

煤炭清洁高效利用100问



能源是人类文明进步的基础和动力，攸关国计民生和国家安全。党的二十大报告强调，深入推进能源革命，加强煤炭清洁高效利用，加快规划建设新型能源体系。这些重要论述科学擘画了我国能源高质量发展的新蓝图。当前，面对国际能源安全新挑战，夯实煤炭煤电兜底保障基础的重要性愈加凸显。因此，基于我国“富煤、贫油、少气”的能源禀赋，推进煤炭清洁高效利用则是实现“双碳”目标的重要途径。

煤炭清洁高效利用，是指在煤炭生产、加工、运输、利用和转化过程中，降低能源消耗，控制和减少污染物和温室气体排放，提高煤炭利用效率的活动。基于对煤炭清洁高效利用的理解，山西科城能源环境创新研究院梳理了目前国内外有关煤炭清洁高效利用有关的研究成果以及相关技术规范，针对煤炭清洁高效利用的基本知识、煤炭清洁高效利用的形势、煤炭绿色低碳开采、煤炭洗选、商品煤质量、燃煤发电、煤焦化、煤化工、散煤治理等九个方面的问题，同时梳理了煤炭清洁高效利用的相关案例，形成《煤炭清洁高效利用 100 问》，供相关人员参考。

目 录

第一篇 基础篇	1
01 煤炭的形成机理.....	2
02 世界煤炭资源分布情况.....	2
03 我国煤炭资源分布情况.....	3
04 我国煤炭分类标准.....	3
05 世界煤炭分类.....	4
06 煤炭形成于哪些时代.....	4
07 煤炭组成成分是什么.....	5
08 什么是无烟煤，它有哪些性质用途.....	6
09 什么是烟煤，它有哪些性质用途.....	6
10 什么是褐煤，它有哪些性质用途.....	8
第二篇 形势篇	9
11 能源与人类发展的关系.....	10
12 世界能源发展的趋势.....	10
13 世界煤炭发展历程.....	11
14 煤炭与气候变化的关系.....	12
15 煤炭与环境的关系.....	13
16 全球控煤进程.....	14
17 煤炭资源的供应现状.....	15
18 煤炭资源的消费现状.....	15
19 中国能源对外依存情况.....	17
20 煤炭清洁高效利用相关政策.....	17
第三篇 采矿篇	19
21 煤炭科学产能是什么.....	20
22 什么是煤炭先进产能.....	20
23 煤炭绿色开采技术有哪些.....	21
24 什么是绿色矿山.....	22
25 煤炭开采的低碳技术路径.....	23
26 煤炭与新能源多能互补技术路径.....	23
27 矿区生态碳汇技术路径.....	24

28 煤矿节能减碳技术措施	25
29 矿区瓦斯抽采利用关键技术	26
30 煤炭开采扰动空间 CO ₂ 封存关键技术	27
第四篇 选煤篇	28
31 什么是重介质选煤	29
32 什么是跳汰选煤	29
33 什么是浮游选煤	29
34 什么是高精度煤炭分选技术工艺	30
35 炼焦煤选煤典型重选工艺	32
36 什么是智能选煤	33
37 为什么要井下选煤	33
38 煤炭洗选行业节能减排技术路径	33
39 什么是煤炭洗选标准化管理	34
40 选煤厂原煤运输、产品贮存的清洁生产技术要求	34
第五篇 商品煤	36
41 什么是商品煤	37
42 商品煤质量有哪些要求	37
43 煤炭产品的类别、品种和技术要求	37
44 炼焦用煤质量要求	38
45 发电用煤质量要求	39
46 气化用煤质量要求	40
47 直接液化用煤质量要求	41
48 高炉喷吹用煤质量要求	42
49 什么是特殊和稀缺煤种	42
50 哪些煤炭禁止或限制开采	42
第六篇 火电篇	44
51 全国火电装机现状	45
52 全国电力生产和外送现状	46
53 电力行业煤炭消费与碳排放现状	47
54 什么是三改联动	48

55 先进灵活超超临界发电技术是什么	48
56 碳捕集方式的技术路线有哪些	49
57 二氧化碳封存与利用技术有哪些	51
58 什么是煤电联营	53
59 什么是风光火储一体化发展	54
60 什么是煤电与新能源一体化发展	54
第七篇 焦化篇	56
61 全国焦化行业发展现状	57
62 焦化行业煤炭消费及碳排放现状	57
63 焦化行业节能降碳技术路径有哪些	57
64 什么是焦炉精准自动加热技术	58
65 什么是干熄焦	58
66 什么是煤调湿技术	58
67 焦炉煤气的利用方向有哪些	59
68 粗苯精制的方向有哪些	60
69 煤焦油深加工方向有哪些	62
70 山西省焦化超低排放的技术要求有哪些	63
第八篇 煤化工	65
71 全国煤化工行业发展现状	66
72 煤化工行业煤炭消费及碳排放现状	66
73 现代煤化工的生产过程特点	66
74 现代煤化工行业清洁低碳转型路径	67
75 现代煤化工行业节能减排技术路径	68
76 合成氨行业节能减碳技术路径	69
77 煤化工行业能效标杆水平和基准水平	69
78 什么是绿电绿氢与煤化工耦合	70
79 气化渣的综合利用方式有哪些	71
80 煤化工原料用能的管理要求	72
第九篇 散煤篇	73
81 什么是散煤	74
82 散煤的危害有哪些	74
83 为什么要治理散煤	74

84 高污染燃料禁燃区的划定及其法律依据	74
85 中国散煤使用及治理现状	75
86 中国散煤治理成效	75
87 民用散煤质量要求	75
88 农村清洁取暖的主要技术方式	75
89 散煤治理存在的问题及挑战	76
90 工业散煤治理的主要措施有哪些	76
第十篇 案例篇	78
91 美国佩特拉诺瓦碳捕集封存商业项目	79
92 加拿大边界大坝百万吨级燃烧后二氧化碳捕集封存项目	79
93 阿瑟港 (Port Arthur) 碳捕集项目	80
94 国电泰州电厂百万千瓦超超临界二次再热示范工程项目	80
95 陕煤榆化 1500 万吨/年煤炭分质清洁高效转化示范项目	81
97 黄白茨煤矿连采连充式胶结充填采煤技术案例	82
98 沃能化工焦炉煤气制备乙二醇项目	82
99 水煤浆气化节能技术应用案例	83
100 国内首套二氧化碳加氢制绿色低碳甲醇联产 LNG 项目	83

第一篇 基础篇

01 煤炭的形成机理

煤是地壳运动的产物。大量植物残骸经过复杂的生物化学、地球化学、物理化学作用后转变成煤。从植物死亡、堆积、埋藏到转变成煤经过了一系列的演变过程，这个过程称为成煤作用。成煤作用大致可分为两个阶段：第一个阶段是植物在泥炭沼泽、湖泊或前海中不断繁殖，其遗骸在微生物参加下不断分解、化合和聚积，在这个阶段中起主导作用的是生物地球化学作用。低等植物经过生物地球化学作用形成腐泥，高等植物形成泥炭，因此成煤第一阶段可称为腐泥化阶段或泥炭化阶段。当已形成的泥炭和腐泥由于地壳的下沉等原因而被上覆沉积物所掩埋时，成煤作用转入第二阶段——煤化作用阶段，即泥炭、腐泥在以温度和压力为主的作用下变为煤的过程。这个阶段包括成岩作用和变质作用，在这个阶段中起主导作用的是物理化学作用。在温度和压力的影响下，泥炭进一步变为褐煤（成岩作用），再由褐煤变为烟煤和无烟煤。

02 世界煤炭资源分布情况

根据《BP 世界能源统计年鉴 2021》，截至 2020 年年底，全球已探明的煤炭储量为 1.07 万亿吨。分地区来看，亚太地区储量占比 42.8%，北美地区占比 23.9%，独联体国家占比 17.8%，欧盟地区占比 7.3%，以上 4 个地区储备合计占比超过 90%。从国家来看，美国是全球煤炭储量最丰富的国家，占全球资源的 23.2%，俄罗斯占比 15.1%，澳大利亚占比 14%，中国占比 13.3%，印度占比 10.3%，以上 5 个国家储量之和占全球总储量的 76%。

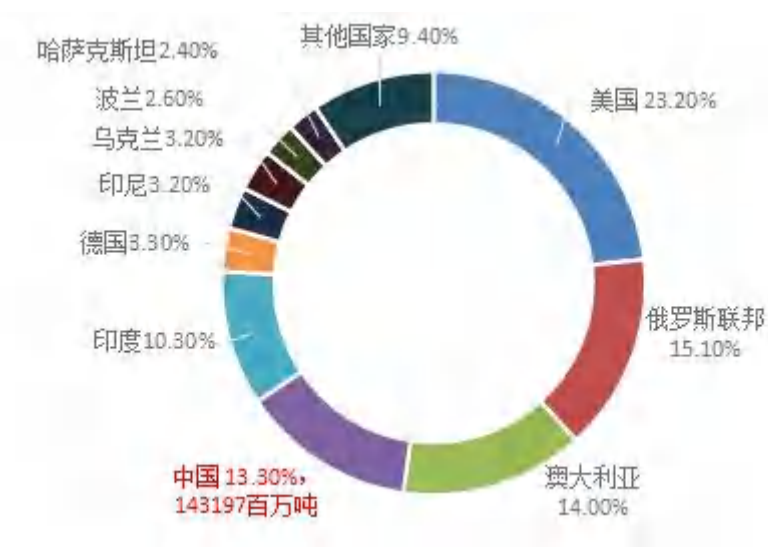


图 1 煤炭探明储量分布（截止 2020 年）

03 我国煤炭资源分布情况

我国煤炭资源储量丰富、分布面积广、煤种齐全，但仍存在资源分布不均匀的情况。在昆仑山—秦岭—大别山—一线以北地区，煤炭资源量占全国的 90.3%，北方煤炭资源主要集中在山西、内蒙古、陕西、河南、甘肃和宁夏等省份，基础储量占全国基础储量的 68%左右。根据山西省自然资源厅数据，山西查明煤炭资源储量 2709.01 亿吨（2015 年），占全国煤炭资源量的 17.3%。正由于煤炭资源和现有生产力呈逆向分布，从而形成了“北煤南运”和“西煤东调”的基本格局。

04 我国煤炭分类标准

《中国煤炭分类国家标准（GB/T 5751-2009）》按煤的煤化程度根据干燥无灰基挥发分等指标将煤分成褐煤、烟煤和无烟煤三大类。再按煤化程度的深浅及工业利用的要求，将褐煤分两个小类，无烟煤分成三个小类，将烟煤分成十二类。用干燥无灰基挥发份 $V_{daf}=10\%$ 作为烟煤与无烟煤的分界值，小于该值的煤为无烟煤，大于该值的煤划分为烟煤；采用恒湿无灰基高位发热量 $Q_{gr, maf}=24\text{MJ/kg}$ 作为褐煤与烟煤的分界值，大于该值的煤为烟煤，小于该值的煤划分为褐煤。

表 1 中国煤炭分类国家标准（GB5751-86）

类别	缩写	分类指标					
		$V_{daf}\%$	GRL	Y_{mm}	b%	PM%	$Q_{gr, maf}$
无烟煤	WY	10					
贫煤	PM	>10.0-20.0	<5				
贫瘦煤	PS	>10.0-20.0	5-20				
瘦煤	SM	>10.0-20.0	>20-65				
焦煤	JM	>20.0-28.0 >10.0-20.0	>50-65 >65①	<25.0	(<150)		
肥煤	FM	>10.0-37.0	(>85) ①	>25	①		
1/3 焦煤	1/3JM	>28.0-37.0	>65①	<25.0	(<220)		
气肥煤	QF	>37.0	(>85) ①	>25.0	> 220		
气煤	QM	>28.0-37.0 >37.0	>50-65 >35-65	<25.0	(<220)		
1/2 中粘煤	1/2ZN	>20.0-37.0	>30-50				
弱粘煤	RN	>20.0-37.0	>5-30				
不粘煤	BN	>20.0-37.0	<5				
长焰煤	CY	>37.0	<5-35			> 50	
褐煤	HM	>37.0 >37.0				<30 >30-50	<24

05 世界煤炭分类

无论是中国还是世界其他国家，通常包括成因分类和工业分类（或称实用分类）两大体系。成因分类是根据成煤原始植物的不同而进行分类，工业分类是根据煤的工业利用的途径不同进行分类，如炼焦用煤、气化用煤、炼油用煤和发电用煤等。在国际上，对烟煤和无烟煤之和统称为硬煤。ISO 11760 以煤的变质程度（以镜质组反射率来表示）、岩相组成（以镜质组含量来表示）以及煤的品级（以干基灰分产率来表示）作为煤炭分类的依据。

表 2 国际 ISO 煤炭分类表

划分	类别	煤种	煤种分类	指标
类别划分	低阶	褐煤	褐煤 C 褐煤 B	煤层水分 $\leq 75\%$
		次烟煤		$\overline{R}_r < 0.5\%$
	中阶	烟煤	烟煤 A 烟煤 B 烟煤 C 烟煤 D	$0.5\% \leq \overline{R}_r < 2\%$
	高阶	无烟煤	无烟煤 A 无烟煤 B 无烟煤 C	$2\% \leq \overline{R}_r < 6\%$ $\overline{R}_{\max} \leq 8\%$
其他分类	岩相组成	低镜质组含量煤 中等镜质组含量煤 中高镜质组含量煤 高镜质组含量煤		
	无机物含量	特低灰煤、低灰煤 中灰煤、中高灰煤 高灰煤		

06 煤炭形成于哪些时代

在整个地质年代中，全球范围内有三个大的成煤期：古生代的石炭纪和二叠纪，成煤植物主要是孢子植物，主要煤种为烟煤和无烟煤。中生代的侏罗纪和白垩纪，成煤植物主要是裸子植物，主要煤种为褐煤和烟煤。新生代的第三纪，成煤植物主要是被子植物，主要煤种为褐煤，其次为泥炭，也有部分年轻烟煤。

表 3 我国各大区不同成煤时代的含煤沉积分布

	占全国煤炭储量%	储量, % 成煤时代	晚古生代							中生代			新生代
			石炭纪			二叠纪				三叠纪	侏罗纪	白垩纪	第三纪
			下石炭纪	中石炭纪	上石炭纪	山西统	石盒子统	黔阳统	乐平统				
全国统计	100	占全国	0.19	0.006	2.28	17.17	3.17	0.07	9.94	0.47	38.84	0.07	2.80
东北区	8.75	占本区 占全国			1.53 0.13	2.10 0.18					87.00 7.61		9.37 0.82
华北区	60.36	占本区 占全国			38.89 24.09	21.46 12.96					38.41 32.19	0.12 0.07	0.12 0.07
华东区	6.61	占本区 占全国	0.02 0.001		18.02 1.19	29.66 1.96	44.97 2.97	0.03 0.002	4.59 0.30	1.24 0.08	0.31 0.02		1.16 0.08
中南区	3.63	占本区 占全国	4.94 0.18	0.04 0.001	26.26 0.95	36.20 1.31	5.19 0.19	1.45 0.05	16.92 0.61	1.79 0.07	4.60 0.17		2.62 0.19
西北区	9.41	占本区 占全国	0.001	0.05 0.005	9.79 0.92	8.06 0.76	0.07 0.01			1.51 1.14	80.53 7.58		
西南区	11.24	占本区 占全国	0.05 0.01	0 0				0.13 0.02	80.31 9.03	1.64 0.18	2.42 0.27	0.003 0.001	15.45 1.74

07 煤炭组成成分是什么

构成煤炭有机质的元素主要有碳、氢、氧、氮和硫等，此外，还有极少量的磷、氟、氯和砷等元素。碳、氢、氧是煤炭有机质的主体，占95%以上；煤化程度越深，碳的含量越高，氢和氧的含量越低。煤中的有机质在一定温度和条件下，受热分解后产生的可燃性气体，被称为“挥发分”，它是由各种碳氢化合物、氢气、一氧化碳等化合物组成的混合气体。挥发分也是主要的煤质指标，在确定煤炭的加工利用途径和工艺条件时，挥发分有重要的参考作用。煤中的无机物质含量很少，主要有水分和矿物质，它们的存在降低了煤的质量和利用价值。矿物质是煤炭的主要杂质，如硫化物、硫酸盐、碳酸盐等，其中大部分属于有害成分。

08 什么是无烟煤，它有哪些性质用途

无烟煤的特点是固定碳高，挥发分小于 10%，纯煤真相对密度高达 1.35-1.90，无黏结性，燃点高，燃烧时不冒烟。

无烟煤主要作民用燃料和合成氨造气原料，低灰、低硫且质软易磨的无烟煤不仅是理想的高炉喷吹和烧结铁矿石用的还原剂与燃料，而且还可作为制造各种碳素材料（如碳电极、炭块、阳极糊和活性炭、滤料等）的原料。

我国无烟煤资源以山西省最多，晋城、阳泉等是中国最大的无烟煤生产矿区。

09 什么是烟煤，它有哪些性质用途

烟煤由褐煤经变质作用转变而成的煤种，煤化程度高于褐煤而低于无烟煤，包括长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤等。烟煤呈灰黑至黑色，具沥青光泽至金刚光泽，通常有条带状结构，不含原生腐殖酸，挥发分为 10%~40%，一般随煤化程度增高而降低。碳含量为 76%~92%，发热量较高，热值为 6500-8900 千卡/公斤。大部分烟煤具有粘结性，燃烧时火焰高而有烟，故名烟煤。烟煤通常可以分为两大部分：一部分是具有强粘结性或结焦性的炼焦用煤；另一部分是没有粘结性或粘结性很弱的，一般只能用作动力用煤炭。烟煤燃烧多烟，容易造成空气污染。

贫煤 (PM)： 贫煤挥发分在 10%~20%之间，呈不黏结或微弱的黏结，在层状炼焦炉中不结焦。贫煤发热量比无烟煤高，燃烧时火焰短，耐烧，但燃点也较高，仅次于无烟煤，一般在 350~360℃左右。贫煤主要作为电厂燃料。

贫瘦煤 (PS)： 贫瘦煤挥发分较低，在 10%~20%之间，黏结性仅次于典型瘦煤，单独炼焦时，生成的粉焦多，在配煤炼焦时配入较少的比例就能起到瘦煤的瘦化作用，可以提高焦炭的块度。这类煤也是发电、民用及其他工业炉窑的燃料。

瘦煤 (SM)： 瘦煤是具有中等黏结性的低挥发分炼焦煤，挥发分在 10%~20%之间，炼焦过程中能产生相当数量的胶质体，Y 值一般在 6~10mm。瘦煤单独炼焦时能得到块度大、裂纹小、落下强度较好的焦炭，但其耐磨强度较差。瘦煤主要用作炼焦配煤。

焦煤 (JM)： 焦煤是一种结焦性较好的炼焦煤，挥发分 V_{daf} 一般在 16%~28%之间，加热时能产生热稳定性很高的胶质体。焦煤单独炼焦时能得到块度大、裂纹少、落下强度和耐磨强度很高的焦炭，但单独炼焦时膨胀压力大，有时易产生推焦困难。焦煤一般作为炼焦配煤使用，对焦炭的冷热强度起重要作用。

肥煤 (FM)： 肥煤是中等挥发分及中高挥发分的强黏结性炼焦煤，其挥发分多在 25%-35%，加热时能产生大量的胶质体。肥煤单独炼焦时能生成熔融性好、强度高的

焦炭，耐磨强度比相同挥发分的焦煤炼出的焦炭还好，但单独炼焦时焦炭有较多的横裂纹，焦根部分常有蜂焦。肥煤是配煤炼焦中的基础煤。

1/3 焦煤 (1/3JM)：1/3 焦煤是中等偏高挥发分的较强黏结性炼焦煤，挥发分在 28%~37%之间，它是一种介于焦煤、肥煤和气煤之间的过渡性煤种。单独炼焦时能生成熔融性良好、强度较高的焦炭，焦炭的落下强度接近肥煤，耐磨强度则又明显地高于气肥煤和气煤。因此它既能当煤炼焦供中型高炉使用，也是良好的配煤炼焦的基础煤，且其配入量可在较宽范围内波动而能获得高强度的焦炭。

气肥煤 (QF)：气肥煤是一种挥发分和胶质层厚度都很高的强黏结性炼焦煤，挥发分大于 37%，其结焦性优于气煤而低于肥煤，胶质体虽多但较稀（即胶质体的黏稠度小），单独炼焦时产生大量的煤气和液体化学产品。气肥煤可用于配煤炼焦。

气煤 (QM)：气煤是一种变质程度较低、挥发分较高的炼焦煤，挥发分多在 37%以上。气煤结焦性较弱，加热时能产生较多的煤气和较多的焦油。气煤胶质体的热稳定性较差，能单独结焦，但焦炭的落下强度和耐磨强度低，焦炭多呈细长条而易碎，并有较多的纵裂纹。配煤炼焦时多配入气煤可增加煤气和化学产品的产率，并可利用气煤低灰、低硫的特点，降低焦炭的灰分和硫含量。

1/2 中黏煤 (1/2ZN)：1/2 中黏煤是挥发分变化范围较宽、中等结焦性的炼焦煤。其中有一部分煤在单独炼焦时能结成一定强度的焦炭，可作为配煤炼焦的原料，单独炼焦时的焦炭强度差，粉焦率高，主要作为气化或动力用煤。

弱黏煤 (RN)：弱黏煤是一种黏结性较弱的从低变质到中等变质程度的非炼焦用烟煤，隔绝空气加热时产生的胶质体少，炼焦时有的能结成强度差的小块焦，有的只有少部分能结成碎屑，粉焦率很高。这种煤的成因也较特殊，有较高的惰质组含量，且多形成于古生代的早、中侏罗世时期。弱黏煤一般适用于现代煤化工及发电。

不黏煤 (BN)：不黏煤是一种在成煤初期就已经受到相当程度氧化作用的低变质到中等变质程度的非炼焦用烟煤，焦化时不产生胶质体。不黏煤的水分大，纯煤发热量仅高于一般褐煤而低所有烟煤，有的还含有一定数量的再生腐殖酸，其含氧量大多在 10%~15%左右。不黏煤主要作为发电和气化用煤，也可作为动力及民用燃料，但由于这类煤的灰熔点较低，最好与其他煤类配合燃烧，可充分利用其低灰、低硫、收到基低位发热量较高的优点。

长焰煤 (CY)：长焰煤是变质程度最低的高挥发分非炼焦烟煤，其煤化程度稍高于褐煤而低于其他类烟煤。长焰煤的着火温度低，纯煤发热量也不高。长焰煤无黏结性或有弱黏结性，有的含有一定数量的腐殖酸，储存时易风化碎裂。有的长焰煤加热

时能产生一定数量的胶质体，也能结成细小的长条形焦炭，但焦炭强度差，粉焦率高。所以长焰煤一般不用于炼焦，多作为电厂、工业炉窑燃料，也可作气化用煤。

10 什么是褐煤，它有哪些性质用途

褐煤是煤化程度最低的煤，其特点是水分大、孔隙度大、挥发分高、不黏结、热值低、含有不同数量的腐殖酸。褐煤的氧含量高达 15%~30%左右，气化反应性强，热稳定性差，块煤加热时破碎严重，存放在空气中很易风化变质，碎裂成小块甚至粉末状。褐煤灰熔点普遍较低，煤灰中常含有较多的钙盐，其中有的来自腐殖酸钙，有的来自碳酸钙和硅酸钙。褐煤主要用作发电燃料，粒度 6~50mm 的混块煤可用于加压气化生产燃料气和合成气。晚第三纪褐煤中有不少可作为提取褐煤蜡的原料，但侏罗纪褐煤中褐煤蜡低而只可作为燃料、气化或加氢液化原料。

第二篇 形势篇

11 能源与人类发展的关系

人类科技文明发展史，某种意义上讲就是能源与动力开发史。约 8 万年前，人类发明了钻木取火的技术，人类文明从原始自然状态中脱颖而出。约 2400 年前，中国人开始烧煤，化石能源时代就此拉开序幕。16 世纪 70 年代，英国国内的用煤量剧增，煤炭取代柴草成为人类社会的主要能源。到了 18 世纪中叶，蒸汽机（1765 年）引发第一次工业革命，带动煤炭大规模开采。煤炭在一次能源消费中占比，由 1860 年 24% 扩大到 1920 年 62%，人类进入“煤炭时代”。煤炭成为人类社会的主要能源。180 年前，人类开启了电气时代。法拉第发明发电机，世界由蒸汽时代进入电气时代。随着第一台实用发电机的成功发明，第二次工业革命拉开序幕。1883 年，德国工程师戴姆勒制成以汽油为燃料的内燃机，1903 年，福特推出普通汽油车，汽车进入寻常百姓家，石油消费时代真正到来。1965 年，石油第一次超过煤炭，成为人类第一大能源。地球至今约有五十亿年的历史，世界能源经历了柴草、煤炭、石油三个时期，如今已进入新能源时代。

现代社会，能源、粮食和水是人类赖以生存的三大必需品。在过去的 6 万年里，文化的变迁和技术的进步极大地影响了一个国家或一些国家的能源密集度。对经济合作与发展组织国家的详细研究指出：能源密集度的最终下降源于两个不同的因素：一是节能技术在制造业、交通运输业、居民家庭和服务业中的引入，这些行业对能源密集度的减少贡献 80%；另一方面消费模式的结构改变，也就是生活方式的根本改变，贡献剩下的 20%¹。

12 世界能源发展的趋势

从全球一次能源消费结构来看，当前世界能源使用结构仍以石油、天然气和煤炭三大传统能源为主。但在受日趋严格的碳排放政策和快速发展的能源新技术影响下，天然气的供应进入黄金时代。可再生能源的地位持续上升，能源供应持续向更为高效、清洁的多元化方向发展。

1 若泽·戈尔登贝格，《能源》[M].武汉：华中科技大学出版社. 2020.8：251

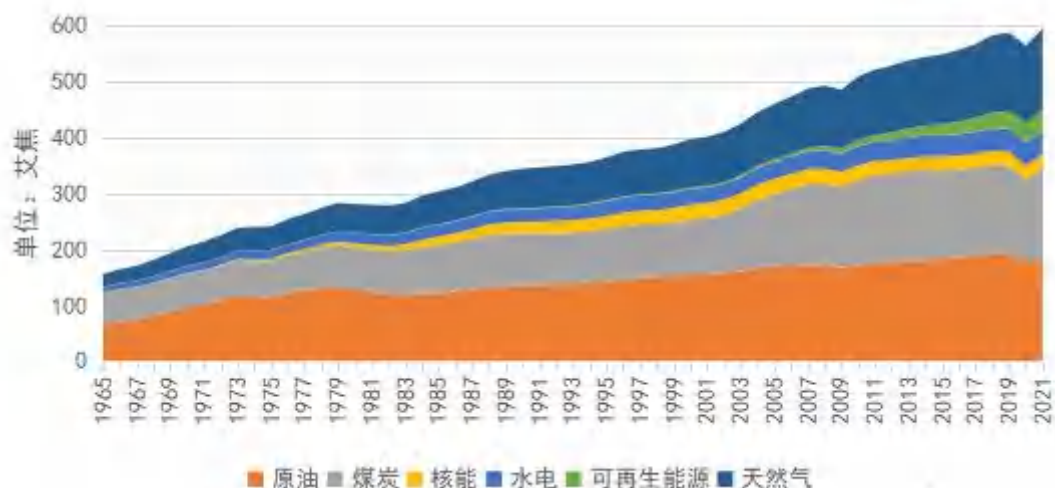


图 2 1965-2021 年全球能源消费结构变化

从 2021 年全球一次能源消费结构来看，原油仍占最大份额（30.95%），煤炭仍是全球第二大燃料，占比为 26.9%；天然气占比稳中有升，上升到 24.4%。可再生能源在全球能源消费中占比为 5.8%。总体来说，化石能源在全球能源消费中一直处于主导地位，总体占比仍高于 80%。²但各国已对积极应对气候变化基本达成共识，截至 2021 年，承诺碳中和的国家已覆盖全球 74% 的温室气体排放，更多国家出台更加清晰的减排路线图，能源清洁低碳转型趋势愈加强烈。据 IEA《2021 年全球能源回顾》报告预测，2021 年可再生能源在全球电力供应增长中的占比势将过半，仅中国一个国家就很可能贡献近一半的全球可再生能源发电增量。未来发展路径中可再生能源趋势不可阻挡，其中风能、太阳能、低碳氢能将持续高速发展。

13 世界煤炭发展历程

中国是世界上最早认识、开采和利用煤炭的国家。早在人类文明之前，距今 7200 年前，中国就将煤炭用于制作配饰和工艺品。宋代出现了煤炭利用的新形式——焦炭。宋元时期，税收减免促使煤炭开采更为普遍，煤作为燃料和还原剂在炼铁行业得到广泛运用。

如果说中国引领了前现代世界的煤炭利用，那么英国就引领了后现代世界的煤炭利用。18 世纪，煤炭在英国得到大范围开采，但却一直未能很好地解决煤矿井下渗水和淹井的问题。直到一个叫纽库曼的人为解决煤矿井下排水问题发明了蒸汽机。随后詹姆斯瓦特又对这种蒸汽机进行了改进，大大提高了蒸汽机的效率，使得越来越多的煤被运送出来。而蒸汽机自身，也为新型的运输工具提供了动力之源。于是，火

2 《BP 世界能源统计年鉴 2022》

车诞生了，煤炭带领人类走进工业化时代。到了 19 世纪，人类发明了发电机，美国的爱迪生发明了白炽灯并发现煤炭是最适合发电的燃料。1882 年，爱迪生设计的世界第一个燃煤电厂在美国纽约投入运行。从那时起，电灯走进了千家万户。至此，煤炭和人类不可或缺的电力密不可分。煤炭又引领人类走进电气化时代。人类依赖煤炭的高峰是 20 世纪初，当时，煤炭在世界能源消费构成中占 90%（2021 年全球占比为 27%）。此后，石油资源的发现在一定程度上缓解了全球对煤炭的依赖。如今到了 21 世纪，煤炭的勘探、开发技术已经非常成熟了，截止到 2020 年底，煤炭供应了全球三分之一以上的电量，在冶金等行业，也仍发挥着至关重要的作用。

14 煤炭与气候变化的关系

能源和气候变化问题是伴随着工业文明的进步而发生和发展的。在工业革命之前，大气二氧化碳浓度长期稳定，维持在 278ppm，在长久的时间中几乎没有变化。然而化石燃料燃烧，彻底打破了大气的平静。工业革命后二氧化碳浓度持续增长，尤其是近 30 年来增长趋势更为明显。根据测算，工业革命后 200 年，浓度水平增加了 25%，而最近的 30 年，浓度水平就增加了 50%。今天的二氧化碳浓度达到 419ppm（2021 年 5 月数据），是近 80 万年来的最高值。

煤炭主要由碳构成，燃烧会释放大量的二氧化碳。与其他化石能源相比，煤炭碳排放系数为 2.66 吨二氧化碳/吨标准煤，在所有化石能源中的碳排放系数最高（石油 1.73 吨二氧化碳/吨标准煤、天然气 1.56 吨二氧化碳/吨标准煤），是典型的高碳能源。在我国，燃煤产生的二氧化碳排放量约占总排放量的 80%，我国的产煤大省山西，燃煤产生的二氧化碳排放量占排放量高达 90%以上。



图 3 全球、全国、山西碳排放结构

数据来源：全球数据来自国际能源署（IEA），全国、山西碳排放数据根据 2020 年全国、山西省能源平衡表核算；

注：核算边界为化石能源消费的直接碳排放。

除了煤炭燃烧释放大量二氧化碳外，近年来，随着科学界对甲烷短期气候影响的认识逐步加深，我们发现煤炭生产过程中和废弃矿井，会释放大量甲烷。甲烷是比二氧化碳更具温室效应的气体，特别是在短期影响力上。在 20 年的时间内，它影响气候变暖的潜力是等量二氧化碳的 80 倍。因此，我们在考虑煤炭对气候变化的影响时，应关注全生命周期的煤炭清洁化利用。随着煤炭在中国能源体系中的比例逐步降低，废弃煤矿的数量却每年增加，这些废弃矿井不仅会排放大量的甲烷，也会引起环境、安全和社会问题。事实上，由于甲烷本身也是一种清洁能源，对废弃井甲烷加以抽采和利用，可以带来区域环境、安全及社会的多重效益。

15 煤炭与环境的关系

人们利用煤炭取得热能和作为炼制焦炭和化工原料主要是用煤的有机物质，而煤中还有一定数量的无机矿物杂质，这些物质在煤炭利用中都以灰渣或粉尘排出，从而对环境造成污染。除在煤炭开采造成的工业废水及选煤厂煤泥水及排出的大量矸石污染环境外，煤炭燃烧后生成的粉尘、SO₂、NO_x、CO、和微量重金属元素等。据估算，每燃烧 100 万吨煤，平均要排放出 2 万吨 SO₂ 气体，20 万吨灰渣和 3 万吨烟尘。在我国，燃煤产生的粉尘和 SO₂ 约总占排放量的 70%和 90%。排出的 SO_x 和 NO_x 又二次生成硫酸盐和硝酸盐，形成酸雨。煤在炼焦过程中排出的 H₂S、焦油蒸汽、苯并芘等都严重污染环境³。因此，为降低煤炭利用过程中对环境的危害，“十三五”期间控煤工作和超低排放改造工作不断推进，主要涉煤行业二氧化硫和氮氧化物排放比重不断降低，其中电力行业下降比例最大。目前，我国已建成全球最大的清洁高效煤电供应体系，燃煤发电机组大气污染物的超低排放标准高于世界主要发达国家和地区，燃煤发电已不再是我国大气污染物的主要来源。

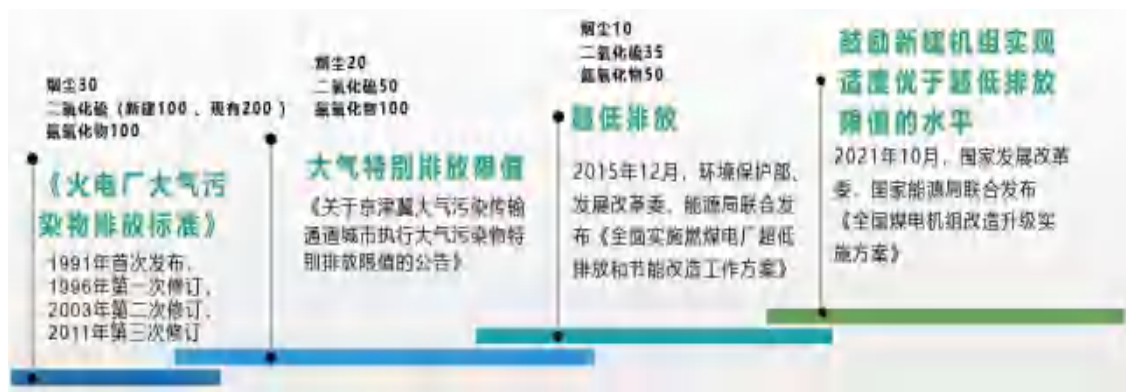


图 4 火电大气污染物排放标准趋严

3 陈文敏 etc., 《煤炭加工利用知识问答》[M], 北京: 化学工业出版社, 2006: 241

16 全球控煤进程

2021年3月，联合国秘书长古特雷斯表示，逐步在电力行业中淘汰煤炭是实现将升温幅度控制在1.5摄氏度之内的最重要一步。这意味着，到2030年，全球发电领域的煤炭用量必须比2010年下降80%。古特雷斯呼吁经合组织国家承诺到2030年逐步淘汰煤炭，并呼吁非经合组织国家2040年淘汰煤炭。另外，停止对煤炭发电厂的国际资助，将投资转向可持续能源项目。

去煤化是利用清洁能源例如天然气、核能和可再生能源逐步替代煤炭，其中天然气贡献最大。近年来，欧盟及其成员国相继公布气候目标，计划在未来数年里将煤炭从能源供给体系中淘汰。2015年英国成为第一个宣布实现无煤目标的国家，目标是到2025年退煤。第二年法国紧随其后，目标是2023年退煤。比利时在2016年成为第一个完全淘汰煤炭的欧盟国家。德国计划在2038年全部退煤。然而，随着俄乌战争的爆发，天然气价格暴涨让欧洲深陷能源危机，煤炭在欧洲的使用量大幅回升。



图5 国家退煤计划时间线⁴

表4 部分发达国家的控煤措施

国家	控煤措施	成效
美国	1963年颁布《清洁空气法》 1986年颁布“洁净煤先导计划” 2014年推出“清洁电力计划”	2021年拜登政府承诺，到2030年将碳排放减半，到2035年实现100%的清洁电力，到2050年实现净零排放。
德国	2020年7月，德国议会通过《减少和终止煤炭发电法》（退煤法案）提出到2038年之前逐渐减少并最终停止煤炭在德国的使用。	德国的退煤时间从2038年“理想地”提早至2030年，并迅速加快可再生能源的推广。
英国	1956年颁布《清洁空气法案》 1974年颁布《环境污染控制法》 1988年颁发《城乡规划环境影响评价条例》 1990年颁布《环境保护法》	2015年，英国成为第一个宣布无煤目标的国家，目标是到2025年退煤。2021年6月英国政府宣布，从2024年10月1日起，英国将不再使用煤炭发电，比原计划提前一年。

4 <https://beyond-coal.eu/europes-coal-exit/>

	2003 年颁布《2003 英国能源白皮书》 2007 年颁布《气候变化法》	
日本	1995 年，成立“洁净煤技术中心” 1999 年，出台《21 世纪煤炭技术战略》 2008 年，启动《清凉地球——能源创新技术计划》 2014 年，日本内阁通过新的《能源基本计划》	2022 年，日本政府重申了其尽可能减少对燃煤发电依赖的政策，并计划在 2030 年之前初步淘汰低效燃煤电厂，日本的政策是允许高效燃煤电厂继续运营。

17 煤炭资源的供应现状

我国是全球最大的煤炭生产国，已探明煤炭储量占我国化石能源的 90%以上，产量占全球的一半。据国家统计局公布数据，2021 年，全国规模以上煤炭企业原煤产量 40.7 亿吨，同比增长 4.7%；比原全国最高原煤产量年份（2013 年）的 39.74 亿吨，增加 9600 万吨，创历史新高。不仅如此，在我国从 2021 年开始的保供稳价政策的重拳出击的影响之下，目前我国煤炭日产量达到 1200 万吨以上的水平。⁵“十三五”时期，我国煤炭生产力加快向资源禀赋和开采条件好的“晋陕蒙地区”集中。2021 年四省（区）原煤产量 33 亿吨，占全国 80%左右。山西省煤炭产量占到全国四分之一以上，2020 年重回产煤第一大省，2021 年山西省的煤炭产量和全国占比均达到统计年份内峰值。

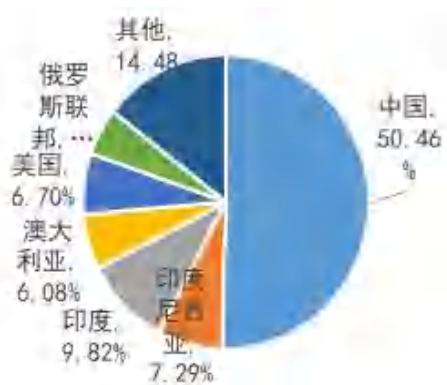


图 6 2020 年全球煤炭产量分布
数据来源：BP 世界能源统计年鉴 2021

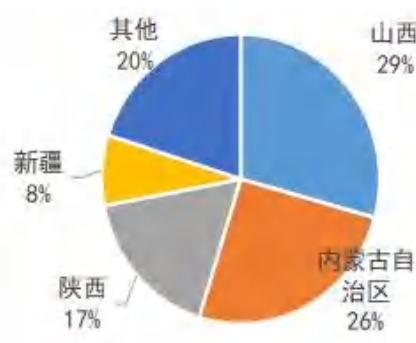


图 7 2021 年全国重点省份产煤比重
数据来源：国家统计局

18 煤炭资源的消费现状

我国是全球最大的煤炭消费国。虽然我国一直在减少煤炭在能源消费结构中的比例，但自 2011 年起，我国煤炭消费量占全球比例就一直维持在一半以上，且一直在

5 煤炭：欧盟禁止进口俄罗斯煤炭事件点评-期货-金融界（[jrj.com.cn](http://www.jrj.com.cn)）

增长，2020 年达到了 56%⁶，第二名到第十名煤炭消费量之和仍不及中国煤炭消费量。与全球能源结构相比，我国一次能源消费量是以煤炭为主，2020 年煤占一次能源消费量的 56.8%，而世界平均是 27%，美国约为 10%，欧洲约为 12%⁷。中国有 14 亿人口，有全世界规模最大的工业体系，耗能巨大的第二产业贡献了中国 4 成左右的 GDP，也解决了大量人口的就业问题。未来短期内，不论从成本角度或是从能源安全的角度看，我国仍将是世界范围内最大的煤炭消费国。

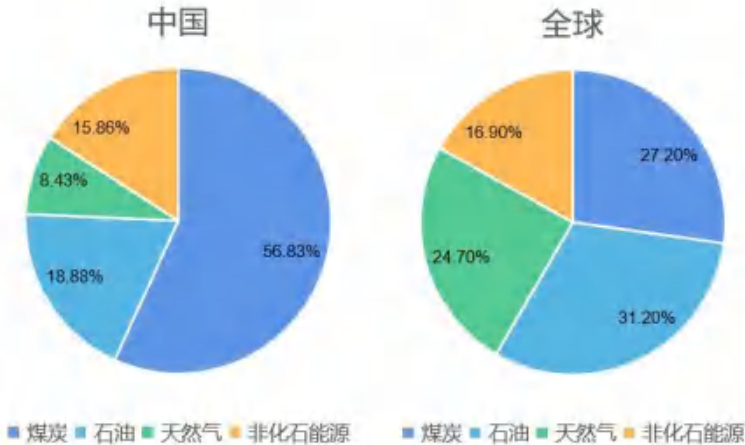


图 2020年中国和全球能源消费结构

数据来源：国家统计局、bp世界能源统计年鉴

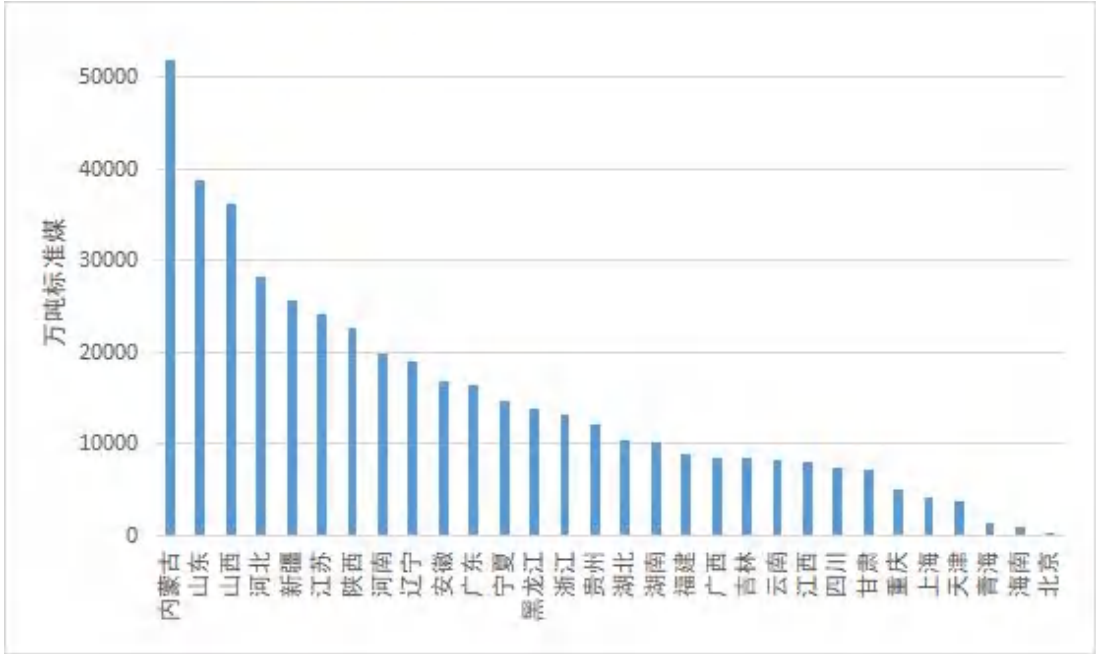


图 8 2020 年各省（市、区）煤炭消费量情况

数据来源：2021 中国能源统计年鉴

注：西藏地区数据暂缺

6 <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview/consumption>

7 《bp 世界能源统计年鉴》

19 中国能源对外依存情况

2010年，我国石油消费进口依存度就已超过50%的国际警戒线，随后呈现不断上升的趋势，2017年中国成为全球原油进口第一大国，其2015-2019年的进口增幅达到全球进口增幅的44%，2018年后原油对外依存度超过70%。随着碳中和目标的不断推进，天然气作为最清洁的化石能源，需求强劲，这也致使我国天然气依存度不断上升。2018年天然气对外依存度超过40%，在庞大天然气进口量背后，液化天然气（LNG）进口成为主力军，占总进口量的60%以上。2021年，我国进口LNG达到8140万吨，超过日本成为全球最大液化天然气进口国。在国际能源博弈和地缘政治冲突不断加剧的背景下，油气进口安全风险增加。目前，在我国没有任何一种能源能够替代煤炭在能源体系中的兜底保障作用，煤炭依然是国家能源安全的“压舱石”⁸。

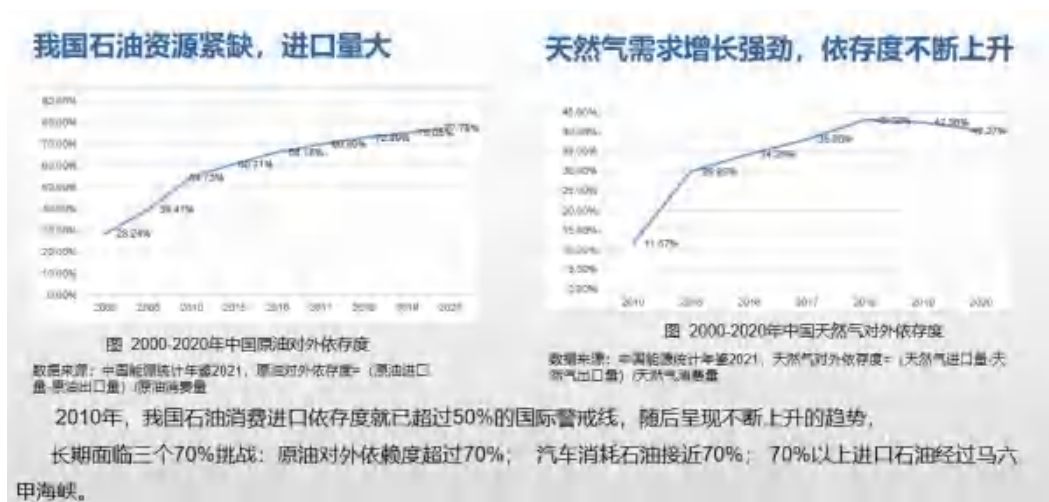


图 9 我国化石能源对外依存度

20 煤炭清洁高效利用相关政策

20世纪90年代起，我国已经认识到煤炭清洁化利用的重要性，对推进煤炭清洁化利用的技术愈发重视，并逐步完善促进煤炭清洁化利用的技术政策。2001年起，中国始终致力于追求煤炭的清洁高效利用，并将其列为科研方面的战略目标。近年来，我国出台煤炭清洁化利用技术政策的频率逐渐提高。2014年国家能源局、环境保护部、工业和信息化部出台了《关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》，是专门针对煤炭清洁高效利用的部门规范性文件，后续出台的《工业领域煤炭清洁高效利

8 彭苏萍，煤炭清洁低碳转型导论[M]，北京：中国科学技术协会，2022：20

用行动计划》《煤炭清洁高效利用行动计划（2015—2020年）》《2020年能源工作指导意见煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）》等重要文件，为煤炭清洁高效利用提供政策支持。

表 5 煤炭清洁高效利用相关政策文件

序号	政策名称	出台时间	序号	政策名称	出台时间
1	煤炭工业节能减排工作意见	2007	15	能源发展“十三五”规划	2017
2	煤炭产业政策	2007	16	现代煤化工产业创新发展布局方案	2017
3	洁净煤技术科技发展“十二五”专项规划	2012	17	煤炭深加工产业示范“十三五”规划	2017
4	煤炭工业“十二五”规划	2012	18	2020年能源工作指导意见	2020
5	能源发展“十二五”规划	2012	19	关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知	2020
6	大气污染防治行动计划	2013	20	“十四五”节能减排综合工作方案	2021
7	煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）	2014	21	高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021年版）	2021
8	国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划（2014—2020年）	2014	22	电机能效提升计划（2021—2023年）	2021
9	关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见	2014	23	关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见	2021
10	商品煤质量管理暂行办法	2014	24	关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见	2021
11	工业领域煤炭清洁高效利用行动计划	2014	25	关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见	2022
12	关于促进煤炭工业科学发展的指导意见	2014	26	高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）	2022
13	煤炭清洁高效利用行动计划（2015—2020年）	2014	27	煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022年版）	2022
14	2015年工业绿色发展专项行动实施方案	2015			

第三篇 采矿篇

21 煤炭科学产能是什么

煤炭科学产能是以中国工程院院士谢和平为代表的专家学者于 2011 年提出并大力倡导的煤炭资源开发利用新理念。科学产能是指在具有保证一定时期内持续开发的储量前提下，用安全、高效、环境友好的科学开采技术方法将煤炭资源最大限度采出的生产能力。科学产能要求“资源、人力、科技与装备”都必须达到相应的要求和标准，科学产能是煤炭企业综合能力的体现。

具体表现为：

(1) 矿井的经济可采储量满足矿井服务年限的要求。

(2) 区域地质采矿条件清晰，矿区规划和矿井与回采工作面设计能充分发挥现有开采技术和装备的能力。

(3) 根据煤层赋存条件选择适用的、安全高效开采方法，采用机械化、综合机械化及自动化掘采技术，矿井运输（含辅助运输）实现机械化，通风、排水等系统实现自动化。

(4) 矿井安全生产形势良好，瓦斯及突出矿井实现先抽后采，抽采达标，职工的职业健康有保障。

(5) 尽量不污染环境，污染要得到有效治理；损害的土地通过治理实现再利用；水资源遭到损害时，能得到资源化利用，实现煤炭环境友好开采。

(6) 煤层气、油母页岩、铝土矿等重要伴生资源能得到一体化协调开发。

22 什么是煤炭先进产能

先进产能从机械化程度、资源利用率、安全生产、能耗和环保、产品质量五个方面给出了具体的界定。《煤炭先进产能评价依据（暂行）》具体来看如下。

1、机械化程度

(1) 技术工艺先进，采掘（采剥）方法、工艺和技术装备符合《煤矿安全规程》和《煤炭生产技术与装备政策导向（2014 年版）》鼓励类规定。

(2) 煤矿综合机械化采煤比例达到 100%，机械化掘进比例达到 90%。

(3) 井工煤矿综合单产不低于 20 万 t/（个·月），露天煤矿综合单产不低于 30 万 t/（个·月）。

(4) 井工煤矿原煤生产人员效率不低于 13t/工或全员工效不低于 2000t/年，露天煤矿原煤生产人员效率不低于 45t/工或全员工效不低于 10000t/年。

2、资源利用率

(1) 煤矿采区回采率

井工煤矿。薄煤层 (<1.3 米) 不低于 85%; 中厚煤层 (1.3-3.0 米) 不低于 80%; 厚煤层 (>3.5 米) 不低于 75%。

露天煤矿。薄煤层 (<3.5 米) 不低于 85%; 中厚煤层 (3.5-10.0 米) 不低于 90%; 厚煤层 (>10.0 米) 不低于 95%。

(2) 原煤入选率达到 100%。

(3) 煤矸石综合利用率不低于 80%。

(4) 矿井水 (矿坑水) 利用率不低于 90%。

(5) 瓦斯利用率不低于 85%。

3、安全生产

(1) 近 10 年来未发生较大及以上安全生产事故。

(2) 近 3 年来百万吨死亡率为 0。

(3) 安全质量标准化达到一级标准。

4、能耗和环保

(1) 原煤生产电耗不高于 $15\text{kW}\cdot\text{h}/\text{t}$ ，露天煤矿采煤油耗不高于 $0.5\text{kg}/\text{t}$ 。

(2) 井工煤矿 (不含选煤厂) 原煤生产水耗不高于 0.1m^3 ，露天煤矿 (不含选煤厂) 原煤生产水耗不高于 0.2m^3 。

(3) 实现污染物达标排放。

(4) 塌陷土地治理率不低于 90%。

(5) 排矸场和露天矿排土场复垦率不低于 90%。

(6) 绿化覆盖率不低于可绿化区域面积的 60%。

5、产品质量

(1) 近 3 年国家质量抽检合格率达到 100%。

(2) 商品煤质量:

灰分 (Ad)。褐煤 $\leq 30\%$ ，其他煤种 $\leq 40\%$ 。

硫分 (St, d)。褐煤 $\leq 1.5\%$ ，其他煤种 $\leq 3\%$ 。

其他指标。汞 (Hgd) $\leq 0.6\ \mu\text{g}/\text{g}$ ，砷 (Asd) $\leq 80\ \mu\text{g}/\text{g}$ ，磷 (Pd) $\leq 0.15\%$ ，氯 (Cl d) $\leq 0.3\%$ ，氟 (Fd) $\leq 200\ \mu\text{g}/\text{g}$ 。

23 煤炭绿色开采技术有哪些

煤炭绿色开采技术指利用充填开采、保水开采、煤与瓦斯共采、煤炭地下气化、煤矸石返井和无煤柱开采等减轻对生态环境影响的煤炭开采技术。

1、充填开采。在采空区内充填水、砂、矸石和粉煤灰等充填物，限制顶板变形、减缓地面破坏的一种开采方式。

2、保水开采。通过控制岩层移动，维持具有供水意义和生态价值含水层（岩组）结构稳定或水位变化在合理范围内，寻求煤炭开采量与水资源承载力之间最优解的煤炭开采技术。

3、煤与瓦斯共采。利用采煤形成的卸压场和裂隙场，采用煤层气开采或煤矿瓦斯抽采的形式，促使瓦斯从吸附状态向游离状态的转变和增加煤岩透气性，从而在回采过程中最大限度回收瓦斯的开采技术。

4、煤炭地下气化。是将处于地下的煤炭进行有控制的燃烧，经煤的热解及煤与氧气、水蒸气、二氧化碳发生一系列化学反应，产生一氧化碳、氢气和甲烷等可燃气体，其实质是只提取煤中含能组分，将灰渣等污染物留在井下。

5、煤矸石返井。煤矿在开拓掘进、采煤和煤炭洗选等生产过程中排出的含碳岩石，通过皮带、管路等输送系统返回至井下采空区的技术。

6、无煤柱开采。通过合理的开拓部署、采煤工作面和巷道布置及采掘顺序，不留护巷煤柱而用其他方式维护巷道的开采技术。

7、小煤柱开采。沿已有工作面的顺槽，留设小煤柱护巷，掘进下一个工作面顺槽的开采技术。

24 什么是绿色矿山

绿色矿山是指在矿产资源开发全过程中，实施科学有序开采，对矿区及周边生态环境扰动控制在可控制范围内，实现环境生态化、开采方式科学化、资源利用高效化、管理信息数字化和矿区社区和谐化的矿山。

绿色矿山要求在资源的综合利用方面，按照矿产资源开发规划与设计，较好地完成了资源开发与综合利用指标，技术经济水平居国内同类矿山先进行列；资源利用率达到矿产资源规划要求，矿山开发利用工艺、技术和设备符合矿产资源节约与综合利用鼓励、限制、淘汰技术目录的要求，“三率”指标达到或超过国家规定标准；节约资源，保护资源，大力开展矿产资源综合利用，资源利用达国内同行业先进水平。

在技术创新方面，在积极开展科技创新和技术革新，矿山企业每年用于科技创新的资金投入不低于矿山企业总产值的1%；不断改进和优化工艺流程，淘汰落后工艺与产能，生产技术居国内同类矿山先进水平；重视科技进步，发展循环经济，矿山企业的社会、经济和环境效益显著。

在节能减排方面，积极开展节能降耗、节能减排工作，节能降耗达国家规定指标；

采用无废或少废工艺，成果突出；三废”排放达标；矿山选矿废水重复利用率达到 90% 以上或实现零排放，矿山固体废弃物综合利用率达到国内同类矿山先进水平。

25 煤炭开采的低碳技术路径

煤炭碳中和核心是围绕保供和碳中和双重目标，突破煤炭精准保供以及煤炭开发减碳关键技术，构建煤炭特色碳中和技术体系。具体技术路径包括：

1、资源勘查与地质保障技术，包括煤炭绿色勘查技术、煤炭智能开采地质保障技术、深部矿井精准地质探测技术、煤系伴生资源勘探技术；

2、智能无人开采成套技术装备，包括危险源智能感知与预警技术、智能化综采共工作面成套技术、智能快速掘进关键技术、智能化主/辅运输技术、智能化洗选技术以及智慧煤矿智能综合管理与应用平台；

3、低损绿色开采关键技术，包括生态脆弱矿区煤层开采源头控制失水技术、采煤塌陷地裂缝减缓与顶板水疏放优化技术、采空区精准高效充填治理技术、星-空-地-井一体化的矿区生态环境监测系统；

4、煤炭开发节能提效技术，包括先进适用的开拓布局和开采工艺、在煤矿智能化节能和矿山物联网技术、低品位热能利用关键技术、矿区循环经济体系构建等；

5、煤矿瓦斯抽采利用技术，包括先抽后采模式（巷道抽采、顺层钻孔抽采、巷道穿层钻孔抽采、压裂抽采），随采随抽模式（保护层开采的瓦斯抽采、高抽巷抽采、顶板走向穿层钻孔、巷道穿层钻孔抽采、采空区埋管抽采），先采后抽模式（地面钻井采空区抽采、采空区埋管抽采）等；

6、煤层二氧化碳封存技术，主要需要研究煤层安全储碳机理与主控因素、煤层碳封存风险探测与安全评价方法、煤层碳封存全生命周期安全监测预警技术、煤层碳封存风险应对与应急处置规范等。

26 煤炭与新能源多能互补技术路径

风光储热一体化发展是煤矿区建设成为多元清洁能源基地的重要方面，依托矿区排土场、沉陷区等土地资源以及资金、人员等推动风光、地热等可再生能源大力发展；另一方面利用巨大的矿井建设抽水蓄能电站、压缩空气蓄能电站等储能设施，支撑风光发电、推动矿区低碳转型，将矿区建设成为多元清洁能源基地。主要技术路径包括以下几类：

（1）矿区生态修复+大型地面光伏电站。利用采煤沉陷区、排土场等，开展生态修复再造，通过盘活利用矿区排土场、采煤沉陷区等退出煤矿废弃土地，建设集综合生

态治理、光伏/风能发电等一体的产业基地，实现太阳能/风能资源利用和闲置土地资源利用，实现生态修复和可再生能源发电的有机结合。

(2) 矿区光伏+农林牧渔产业。根据新能源赋存特点和矿区（沉陷区、采空区、排土场）的地理环境特性。开展农光、林光、渔光、牧光等多种模式的应用。对于土地资较好且较为平坦的矿区，可以建设光伏+农业等，全面推进“矿区土光伏+农业种植”“矿区光伏+温室大棚”等开发利用模式。对于沉降重、地势低洼的矿区，由于填充成本过高，则可以考虑储水，采用“矿区光伏+水产养殖”模式。

(3) 井下抽水蓄能电站。煤矿井下抽水蓄能电站主要是通过水体位势能、电能和机械能间的能量转换，在用电低谷时借助电网过剩电力将水从下水库抽至上水库，在用电高峰时放水发电。煤矿抽水蓄能电站分为2种：半地下式，以地表露天矿坑或沉陷区为上水库，地下巷道或预留煤柱采空区作为地下厂房和下水库；全地下式，由地下不同高度差的地下巷道或预留煤柱的采空区作为上下水库和地下厂房。

(4) 井下压缩空气储能电站。关闭退出煤矿可作为压缩空气储能的地下空间主要有两类：一类是矿井的开拓巷道和准备巷道，另一类是采场老空区。目前我国矿井空间空气储能还处于实验阶段，尚未进入产业化应用。2020年8月16日，全球首个基于煤矿巷道压缩空气储能电站在晋能控股煤业集团云冈矿北大巷废弃巷道开工，建设首期60MW、总规模100MW的压缩空气储能电站。

(5) 矿区中低温地热发电。煤矿中低温地热发电技术主要有地热能转化为机械能再转化为电能的技术路径，也可以利用温差热电效应，直接将地热能转化为电能，即热电发电技术。谢和平院士团队提出基于热伏材料的中低温地热发电原理和技术构想，为矿区中低温地热发电未来技术提供了方向。

27 矿区生态碳汇技术路径

构建煤矿区碳汇技术体系，通过土壤重构、植被重构、减损开采、碳汇监测计量、碳汇交易等工具技术手段，有效利用煤矿区植被、土壤和水体等的固碳作用。

(1) 土壤碳库重构与碳汇功能提升技术。土壤碳库重构与碳汇功能提升技术是以总碳含量提升、有机碳汇提升、稳定有机碳汇提升为途径，从土壤处理和植物处理两大方面提升碳汇能力的技术。

(2) 植被碳库重建与碳汇功能提升技术。植被碳库重建与碳汇功能提升技术是采取多种措施重构植被碳库，充分挖掘矿区植被的生物量潜力，显著提高矿区生态植被的地上、地下生物量和地表枯落物量的技术。

(3) 立体空间碳汇技术。立体空间碳汇技术指充分利用不同的立地条件，选择

攀缘植物及其他碳汇植物栽植，并依附或铺贴于各种构筑物及其他空间结构上，通过空间植被量的增加实现矿区碳汇扩容的技术。

(4) 水体碳汇功能提升技术。煤矿地下水库是将煤开发产生的大量矿井水，利用采空区垮落岩体间的空隙进行储存的巨大储水设施。利用煤矿地下水库可理论实现矿区 CO₂ 封存。

(5) 地表塌陷修复治理碳汇恢复技术。采矿活动的剧烈扰动导致矿区大量土地损毁，地表塌陷破坏，造成土壤理化性质改变煤层气逸散等，致使生态系统碳循环过程发生改变煤矿区碳固存能力下降甚至丧失。通过地表塌陷修复治理，提升“土壤-植被”碳库的稳定性，助力矿业生产低碳循环与绿色发展。

28 煤矿节能减碳技术措施

1、高耗能设备的改造及淘汰

- (1) 永磁电机的使用
- (2) 淘汰高耗能设备

2、变频器的推广使用

(1) 对主扇风机实施变频改造（借助变频节能系统，利用一台节能柜来对两台电机进行科学、合理的控制，可依据实际生产情况来对主扇风机的风量进行调节，并引入可调频调速的电机，因电机实际消耗功率与所下降频率为立方关系，这样在电机速度略微降低的情况下，电机所耗电能便会实现大幅降低，同时还可让电机实现了软启动，有效延长了电机及风机的运行寿命，电机长期运行于低于额定转速的状态，其故障率也会明显下降，产生的噪声也会有所降低）；

(2) 对皮带运输机实施变频改造（新的技术变频技术可以实现机器的软启动，还能够很好的避免液力耦合器在使用的时候发生问题，保障企业日常生活的正常的运行。）

(3) 对提升绞车机实施变频改造（使用变频器后，不仅可使提升机更易操作，易维护，而且会显著降低串电阻电能消耗。）

(4) 对采煤机进行变频改造（采煤机经过变频节能技术改进之后，进一部分的供电形式，有三项，公平交流电变为恒定的直流电，利用大功率精轧管，可以进行交流电的输送，可变电压和频率达到无极调速的目的，采煤机中的电牵引需求得到了提升。）

(5) 对主排水系统进行变频改造（在水泵中应用变频技术，大大延长了设备使用期限。在长时间的运行下，提高变频器的灵活性和智能性，能保证安全的生产，同

时灵活地控制水分气体，防止井下液位降低和防止因为频繁启停和空转过程中的造成消耗能量过大，还可以最大限度的降低设备损耗。)

3、余热利用技术

- (1) 矿井水余热利用
- (2) 矿井乏风余热利用
- (3) 瓦斯发电余热回收
- (4) 空压机余热回收利用项目
- (5) 洗浴废水余热回收。

4、维护管理制度

企业应按照 GB/T23331-2020《能源管理体系要求及使用指南》持续改进能源管理体系，强化领导层的作用，完善能源评审控制程序，引入对能源绩效参数和相关能源基准“归一化”的概念，补充能源数据收集策划和相关要求，加强数据分析应用，提高运行管理水平以提高能源利用效率。

- (1) 简化矿井电压等级
- (2) 做好调荷避峰工作
- (3) 合理确定环网的运行方式
- (4) 节能基础管理。企业应定期对煤炭生产的能耗情况进行考核，并把考核指标分解落实到各基层部门，建立用能责任制度。

(5) 企业应按要求建立能耗统计体系，建立能耗计算和考核结果的文件档案，并对文件进行受控管理。

(6) 企业应加强设备的维护、检修工作，提高设备的负荷率；应使生产运行设备合理匹配，经济运行；应使设备处于高效率低能耗运行状态；应加强各种管网的维护管理，防止跑、冒、滴、漏的现象发生。

29 矿区瓦斯抽采利用关键技术

煤矿瓦斯抽采技术先后历经高透气性煤层瓦斯抽采、邻近层卸压瓦斯抽采、地透气性煤层强化抽采以及瓦斯综合抽采阶段，伴随着煤矿瓦斯抽采技术的不断进步，各项技术的针对性与应用性也在不断提升，工程人员可根据煤层深度的不同、结构的不同以及透气性的不同，选择更为科学的抽采技术，确保安全保障体系的健全。当前我国煤矿瓦斯抽采技术主要包括：1、顺层长钻孔瓦斯抽采 2、穿层钻孔瓦斯抽采技术 3、顶板走向钻孔瓦斯抽采技术 4、综合抽采技术。

瓦斯气分为不同品位的瓦斯气，其利用方式也不同。高浓度瓦斯的利用：煤矿抽

采瓦斯中对与甲烷体积分数高于 90% 的部分，相当于常规天然气，可直接作为燃料用于发电、取暖也可用于化工等领域；对于甲烷体积分数在 30%~90% 的瓦斯可用于发电、燃气锅炉、提纯制 LNG 和 CNG 等用途，该浓度范围的瓦斯约占煤矿瓦斯总量的 5% 左右；低浓度瓦斯的利用：对于甲烷浓度在 8%~30% 的瓦斯可通过变压吸附提纯的方法将甲烷浓度提升至 90% 来制取 LNG 和 CNG；甲烷含量大于 10% 的瓦斯用于低浓度瓦斯发电；超低浓度瓦斯利用：对于甲烷含量小于 8% 的瓦斯，以及矿井乏风，可用于低浓度瓦斯发电以及掺混蓄热氧化发电。

30 煤炭开采扰动空间 CO₂ 封存关键技术

目前，CO₂ 地下封存技术的基本思路为：将集中排放源分离得到的 CO₂ 注入到地下具有合适封闭条件的地层中予以隔离封存。现常见的地下封存方式包括：

(1) 利用沉积盆地内深部咸水层封存，如加拿大阿尔伯塔沉积盆地在资源开采日趋枯竭情况下，利用下白垩统 Viking 砂岩咸水层实现 CO₂ 带压封存，因该地层自身结构稳定，且上覆发育有广泛、致密的 Colorado 蒸发岩弱透水层，具有良好地质封闭条件，经评估仅埋深较浅的盆地南部区域可储存的 CO₂ 液体能力达到 201.3x10⁹t；

(2) 利用油气田封存，具体分为枯竭油气田封存、注气驱油 CO₂-EOR (CO₂-Enhanced Oil Recovery) 封存技术 2 种；其中，CO₂-EOR 封存技术已得到一定应用，如美国自 20 世纪 70 年代开始利用该技术进行 CO₂ 强化采油开采，目前，美国拥有 70 余个实施工程，年均充注 CO₂ 可达约 25×10⁶t；

(3) 利用不可开采深部煤层封存，CO₂ 注入到深部煤层后，在煤层孔隙中渗流、扩散，最终被煤体吸附，且因煤体表面吸附 CO₂ 能力大于 CH₄，当 CO₂ 注入后可驱替内部的 CH₄ 形成游离态，有助于提升深部煤层气的采出率，同时实现 CO₂ 地下封存；如相关学者在山西沁水盆地开展了深部煤层 CO₂ 驱煤层气的 CO₂-ECBM 技术探索研究，发现：利用 CO₂ 驱替煤层气可增加采收量 1696×10⁸m³，CO₂ 潜在封存量可达 4.5×10⁸t，CO₂ 封存潜力巨大。

王双明院士在对煤炭开采扰动空间地质特点分析的基础上，探究了煤炭开采扰动空间高效封存 CO₂ 的必备条件，提出了适宜于煤矿开采过程中进行 CO₂ 封存的 3 种潜在技术：煤层采空区碎裂岩体 CO₂ 封存技术、煤地下气化煤灰及碎裂岩体 CO₂ 封存技术、煤原位热解半焦 CO₂ 封存技术。

第四篇 选煤篇

31 什么是重介质选煤

用密度大于水，并介于煤和矸石之间的重液或重悬浮液作介质实现分选的一种重力选煤方法。依所用介质不同，可分为重液选煤和重悬浮液选煤两大类。重液是指某些无机盐类的水溶液和高密度的有机溶液。重悬浮液是由加重质（高密度固体微粒）与水配制成具有一定密度呈悬浮状态的两相流体。当原煤给入充满这种悬浮液的分选机后，小于悬浮液密度的煤上浮，大于悬浮液密度的矸石（或中煤）下沉，实现按密度分选。重液选煤因介质腐蚀性大，回收难，成本高，工业上未能应用。生产中广泛应用的是重悬浮液选煤，通称重介质选煤。

重介质选煤是分选效率最高的选煤方法，其特点是：①分选精确度高；②分选密度调节范围宽；易实现自动调控；③对入选原煤的数量和质量波动适应性强；④分选粒度范围宽，块煤分选机入料粒度一般为 300~13mm，旋流器入料粒度通常为 13~0.15mm；⑤生产中必须添加加重质，工艺流程中要有介质制备和净化回收系统；⑥设备磨损较严重，溜槽、管道要采用耐磨材质，以减少维修量。

32 什么是跳汰选煤

跳汰选煤指物料在垂直脉动为主的介质中，按其物理—力学性质（主要是按密度）实现分层和重力选煤方法，物料在固定运动的筛面上连续进行的跳汰过程，由于冲水、顶水和床层水平流动的综合作用，在垂直和水平流的合力作用下分选。跳时所用的介质可以是水，也可以是空气。以水作为分选介质时，称为水力跳汰；以空气分选介质时，称为风力跳汰。目前，生产中以水力跳汰应用最多。

跳汰分选法的优点在于：工艺流程简单、设备操作维修方便、生产能力大、且有足够的分选精确度。因此，在生产中应用很普遍，是重力选矿中，最重要的一种分选方法。跳汰选煤处理的粒度级别较宽，在 150~0.5mm 范围；既可不分级入选，也可分级入选。常用的跳汰机有活塞跳汰机、空气脉动跳汰机和动筛跳汰机三类。

33 什么是浮游选煤

浮游选煤是根据煤和矸石表面的润湿性差异进行分选的一种选煤方法，简称浮选。主要用于分选小于 0.5mm 细粒级煤炭。浮选是选煤工艺环节的重要组成部分，主要任务是回收大量的细粒煤，充分利用煤炭资源，净化选煤用的循环水，提高其他工艺环节的效果。浮选过程中加入的能帮助浮选过程顺利进行的药剂成为浮选药剂。浮选药剂按照用途分类可分为三大类，捕收剂、起泡剂和调整剂。

捕收剂主要作用在固、液界面上，能选择性地吸附在煤粒表面，提高其表面疏水性和可浮性，并促使煤与气泡附着，增强附着的牢固性。常用的烃类油捕收剂有煤油、柴油、燃料油、页岩轻柴油、天然气冷凝油。

起泡剂主要作用在气、液界面上，使其表面张力降低，促使气泡在矿浆中弥散，形成小气泡，并防止气泡兼并，提高气泡在矿化和上浮过程中的稳定性。起泡剂按其来源可分为天然起泡剂（松油、松醇油、樟脑油、桉叶油）、工业副产品起泡剂（仲辛醇、杂醇、GF 起泡剂、杂醇油、脂油 190）、人工合成起泡剂（醚酸类起泡剂、醚类起泡剂、甲基异丁基甲醇）。

调整剂主要用于调节其他药剂与矿物表面之间的作用，还可以调节矿浆的性质，提高浮选过程的选择性，按其作用可分为：活化剂、抑制剂、pH 调整剂、分散剂及絮凝剂。煤泥浮选中，所涉及的调整剂主要有以下几种：pH 调整剂主要用于调整矿浆的 pH 值和矿物表面的电性，以改善浮选效果；分散与絮凝剂主要用于调节矿浆中细泥的分散与团聚，减少细泥对分选的影响。

34 什么是高精度煤炭分选技术工艺

1、先进的湿法选煤工艺

(1) 不脱泥无压给料三产品重介质旋流器+煤泥重介质旋流器+浮选。

该选煤工艺适应于各种可选性原煤，可用单一低密度介质系统一次分选出精煤、中煤和矸石，与有压给料两产品重介质旋流器主、再选相比，减少了 1 套高密度介质系统，且易于实现煤泥重介质分选，具有工艺系统简单、分选效率高的特点，且精煤回收率高于目前的一般工艺。原煤重介质旋流器的分选下限可达 0.25 mm，煤泥重介质旋流器的分选下限可达 0.10 mm，中煤带精煤量较少，通常可低于 3%，矸石中带煤量小于 1%。该工艺与采用脱泥有压给料重介质旋流器工艺相比，原料煤不经脱泥和泵送，次生煤泥量大幅减少，有利于实现煤泥减量化；厂房布置与脱泥无压给料三产品重介质旋流器相比更简单，土建投资低。不脱泥无压给料三产品重介质旋流器选煤技术优势明显，目前我国 60%以上选煤厂均采用此种选煤工艺。

(2) 脱泥无压给料三产品重介质旋流器+TBS+浮选。

该选煤工艺适应于粗煤泥极易选原料煤，可用单一低密度介质系统一次分选出精煤、中煤和矸石，与有压给料两产品重介质旋流器主、再选相比，减少了 1 套高密度介质系统，工艺系统较为简单。该工艺分选效率较高，精煤回收率高于跳汰选煤，矸石带煤少，无压给料与有压给料相比，次生煤泥量少，对煤泥减量化有利，脱泥入选易于控制介耗。

脱泥无压给料三产品重介质旋流器比两产品重介质旋流器更具优势，且比不脱泥工艺技术含量低，这是因为煤泥量对重介质旋流器分选及后续脱介脱水回收等环节的影响都比较大，设备的选型、管路的设计等都需要设计人员进行较为专业的把控，否则会影响生产指标，特别是介耗指标，但是如果提前脱除这部分煤泥，则会简单很多，因此从这个角度考虑脱泥工艺的技术含量要低。该选煤工艺较易被选煤厂设计人员掌握，因而得到较广泛应用。我国煤泥含量大的河南郑州矿区、陕西韩城矿区以及山西部分矿区的选煤厂，大多采用脱泥无压给料三产品重介质旋流器选煤工艺。

(3) “国华科技选煤工艺包”由原料煤不预排矸、不分级、不脱泥无压给料三产品重介质旋流器主选、粗煤泥重介质旋流器分选、细煤泥浮选机粗精选、煤泥水两段浓缩两段回收联合工艺联合构成，具有高效、简化、节能、环保等特点。与其他技术相比，采用该技术建设的炼焦煤选煤厂的投资和加工费降低 20%以上，电耗降低 40%以上，吨煤介耗比相同类型的选煤厂低 50%。全入选动力煤选煤厂矸石带煤率相比其他动力煤选煤厂低 4~20 个百分点，投资和加工费低 10%~30%。

2、干法分选技术

(1) 风力分选技术

风力分选技术可以概括为基于煤炭和矸石在压缩空气中沉降末速的差异，借助周期性脉动气流实现煤炭的有效分选，主要包括风力跳汰与风力摇床分选机。近年来，风力跳汰分选技术受到了中国、德国、土耳其、美国、印度等国关注，在工业放大以及推广上取得了重大突破。德国的 Allminerals 公司在德国亚琛大学搭建了半工业规模的分选样机，处理量为 300 kg/h。WEINSTEIN 和 SNOBY 利用风力跳汰开展了煤炭工业性分选试验研究，由于分选机理简单、投入成本低，在美国建立了风力跳汰分选工业性系统，处理量在 50~120 t/h。目前，风力摇床分选机的研究工作主要集中在 KADEMLI 和 GULSOY 对大于 6 mm 褐煤分选研究，主要分析了床层振动频率、床层倾斜角度、给料速度、栅格的高度对分选效率的影响，结果显示分选效率与风力跳汰接近，风力摇床的可能偏差 E 可以维持在 0.13~0.23 g/cm³，有效分选粒度为 6~38 mm。

(2) 复合式干法分选机

复合式干法分选机通过振动气流复合力场驱使物料在翻转剥离过程中按密度与粒度梯级分布，完成分选。目前，复合式干法分选技术已在美国、俄罗斯、澳大利亚、印度尼西亚、南非、波兰等国家得到推广应用，处理能力可达 480 t/h， E 在 0.20~0.30 g/cm³。

(3) 光电分选技术

随着科技发展，国内外的研究热点主要在智能化干法分选技术。目前，智能干法

分选技术主要分为3类：X射线识别、 γ 射线识别以及基于色差的智能识别。目前，智能干法分选机对块煤的分选精度较高，优势在于简化工艺流程，实现了对人工拣矸的替代，大大压缩了人力成本，已成功实现300~25 mm块煤分选的工业应用，处理能力达380 t/h，有效降低了矸石的带煤率，在国内多个选煤厂进行了工业性分选试验。

(4) 干法重介质流化床分选技术

干法重介质流化床分选技术，又称空气重介流化床分选技术，是干法领域的研究热点之一，是气固鼓泡流态化技术在矿业领域的拓展应用，利用气固流化床似流体的特点，实现精煤和矸石按照密度进行有效分离。目前，气固流态化分选研究得到了澳大利亚、印度、日本、南非、中国等国学者的关注，各国学者围绕流化特性、密度调控、煤炭分离机制等方面开展了细致研究，建立了多套半工业规模的分选样机。在工业推广方面，中国矿业大学率先开发了模块化干法重介质流化床选煤系统，成功进行了工业推广，实现了煤炭的干法精选，主要针对粒度在100~6 mm煤炭的高效干法分选， E 在0.05~0.08 g/cm³。

35 炼焦煤选煤典型重选工艺

(1) 跳汰主、再选工艺

选煤工艺为：50-0mm用跳汰主、再选，<0.5mm煤泥直接浮选，该工艺适用条件：原煤属易选、中等可选或偏难选的炼焦煤，对产品灰分要求不严不要求出低灰精煤时常用此流程。本流程生产操作容易，当原煤属易选时，可获得较高精煤产率。

(2) 块煤重介、末煤跳汰联合工艺

选煤工艺为：100-13mm块煤主、再选用斜轮重介质分选机精选，13-0.5mm末煤跳汰选，<0.5mm煤泥浮选。该工艺适用条件：块煤含量多且难选、末煤较易选的原煤宜采用此流程。采用本流程时，应在重视各粒级可选性差异的前提下，既要考虑适当减少重介入选量，又要考虑提高分级和脱介筛的效率，综合权衡利弊确定分级粒度。

(3) 块、末煤全重介，煤泥浮选工艺

选煤工艺为：30-13mm块煤用斜轮重介质分选机分选，13-0.5mm末煤用重旋流器分选，<0.5mm煤泥浮选。该流程适用条件：原煤可选性属难选和极难选的优质、稀缺煤种，适于采用此流程分级粒度应根据各粒级的分选密度的相近性来划分，尽量取偏小值（13mm或6mm）为宜，以减少重介质旋流器负荷，简化介质回收系统，降低选煤费用。

(4) 跳汰粗选、粗精煤用重介质旋流器精选、煤泥浮选工艺

采用的工艺为：<50mm 原煤用跳汰机粗选、跳汰精煤按 37mm 分级，50-37mm 块精煤破碎到 37-0mm 作为 2 号精煤，37-0.5mm 末精煤用重介质旋流器再选轻产物 1 号精煤，重产物为中煤。该工艺适用条件：用于分选难选和极难选原煤，且对产品有特殊的要求。如：气煤高灰分块精煤和低灰分配焦精煤两种产品；或者对稀缺煤种炼焦煤，将跳汰块粗精煤破碎后与末粗精煤合并作为重介质旋流器原料，出合格精煤。

（5）块煤重介、末煤跳汰、跳汰中煤重介质旋流器再选、煤泥浮选工艺

选煤工艺为：120-13mm 块煤用主、再选立轮重介质分选机选，13-0.5mm 末煤用巴达克跳汰机选，跳汰中煤用重介质旋流器再选，<0.5mm 煤泥浮选。该工艺适用条件：块煤含量多且难选、末煤难选、中煤含量大，为了充分回收资源，提高精煤产率和经济效益，采用此流程。

36 什么是智能选煤

智能选煤指应用现代通信与信息技术、计算机网络技术、人工智能技术、智能控制技术，以提高企业安全水平和效率效益为目标，依托标准化选煤大数据与选煤专家知识库，实现智能管理、智能控制、智能设计、智能服务，逐步到无人或少人干预、智能决策、自动执行。

37 为什么要井下选煤

井下选煤技术目的是实现原煤井下精确分选，精煤或洗混煤提升出井进行井上分选或直接作为产品，矸石就地充填。矿井年产能受到矿井提升能力限制，井下选煤技术实现井下排矸，升井煤炭的灰分大幅降低，减少无效运输带来的能耗和设备劳损之外，还可提高矿井实际产能。井下矸石回填和煤矸置换，可以减少地表沉陷幅度，降低采煤对地表建筑和环境的破坏，“三下压煤”能够实现开采利用，提高煤炭资源的回收率，延长矿井服务年限。大量矸石不用升至地表同样可以节约用地，减少选煤厂造成的环境污染。

38 煤炭洗选行业节能减排技术路径

加大重视程度。相关企业需要提升注重产品质量的意识，在资金与政策方面加大投入，进一步优化煤炭洗选行业的产品结构，及时更新设备。相关领导还要协调组织生产、设计、研究和制造安装等部门，分步骤实施。要进一步提升洗选技术，并将其发展成整个煤炭企业之中的支柱型产业，多给予政策和资金方面的支持，并做长期规划，提升洗选煤的价格，从环保和节能角度入手，对炼焦煤实施灰分计价，对动力煤

实施发热量计价，并给予相应的补贴，从而拉开不同质量和不同品种煤炭的价格。同时还要提升燃煤的排污标准，制定出一些强制性的用煤标准，要求电厂、窑炉等使用洗选之后的动力煤，以此降低环境污染，提升环保效果。

加大技术创新，多手段解决问题。通过技术创新建设新型煤厂、改造老型煤厂，并使用先进的选煤工艺和设备。实现矿井和选煤厂的同步建设，通过新技术和设备提升产品质量。及时转变运营机制，同时发展两种类型的选煤厂，对于那些能够促进煤炭资源合理运用且能够确保经济效益的就要鼓励发展。要进一步提升技术管理，使用先进技术改造煤厂，及时淘汰落后的生产力，使其渐渐向着低耗能、高效率的方向发展，构建起完善的洗选设备制造体系，实现规模发展，建立煤机集团。

提升煤炭洗选技术。将出产的原煤实施分级洗选，具体依照密度和力度的差异、煤炭的类型和质量等实施合理洗选，在这之中需要运用耗水量小、水中停留时间短以及来回转动频率低的工艺，以此提升煤炭生产量。

可以使用湿法加工工艺，将直径大的无压类产品当作选煤工艺的重点，通过低密度的悬浮液把煤炭之中的矸石分离出去，并使用重介质煤泥工艺配合洗选技术，实现全程不脱泥和煤泥的高效回收利用。还可以使用干法加工工艺，这能够最大程度上节约煤炭脱水和干燥技术工艺，有效简化煤炭洗选技术流程。此外它还能够解决煤炭易泥化的问题，排除煤炭之中的灰和硫，降低能源浪费。同时煤泥分选技术工艺还能够回收煤泥之中比较大的颗粒，并排除多余的细灰泥。

39 什么是煤炭洗选标准化管理

《煤炭洗选企业标准化管理规范》规定了煤炭洗选企业人员管理、生产管理与技术经济指标、机电管理、安全管理、环保要求文明生产、实施与监督等方面的标准化管理要求。

目标是立足煤炭清洁利用供给侧结构性改革，落实“减、优、绿”发展原则，通过洗选企业标准化规范管理及分级、考核、评定，强化企业各环节的过程管控及现场管理，规范行为，提高装备和管理水平，促进安全绿色生产，逐步淘汰落后产能，达到行业标准化等级要求，推动洗选企业转型升级、规范发展。

40 选煤厂原煤运输、产品贮存的清洁生产技术要求

矿井型选煤厂原煤运输 I 级（国际领先水平）、II 级（国内先进水平）基准井工开采要求由封闭皮带输送机将原煤直接运进矿井选煤厂全封闭的贮煤设施，露天开采由矿井原煤提升设备、胶带或刮板输送机将原煤直接运进矿井选煤厂的贮煤设施。III

级基准（国内一般水平）井工开采要求由箱车或矿车将原煤运进矿井选煤厂全面防尘的贮煤设施，露天开采由箱车或矿车将原煤运进矿井选煤厂的贮煤设施；群矿（中心）选煤厂原煤运输 I 级基准要求由铁路专用线将原煤运进选煤厂，采用翻车机的贮煤设施，运煤专用道路必须硬化。II 级基准要求由箱式或自卸式货运汽车将原煤运进选煤厂的贮煤设施，运煤专用道路必须硬化。III 级基准要求由汽车加遮盖将原煤运进选煤厂的贮煤设施，运煤专用道路必须硬化。

储存的精煤、中煤 I 级基准要求存于封闭的储存设施。运输有铁路专用线及铁路快速装车系统。II 级、III 级基准要求存于半封闭且配有洒水喷淋装置的储存场，运输有铁路专用线、铁路快速装车系统，汽车公路外运采用全封闭车厢；煤矸石、煤泥首先考虑综合利用，不能利用的暂时存于封闭或半封闭的储存设施，地面不设立永久矸石山，煤矸石、煤泥外运采用全封闭车厢。

第五篇 商品煤篇

41 什么是商品煤

商品煤是指作为商品出售的煤炭产品。不包括坑口自用煤以及煤泥、矸石等副产品。

42 商品煤质量有哪些要求

商品煤应当满足下列基本要求：

- (1) 灰分 (Ad)：褐煤 $\leq 30\%$ ，其它煤种 $\leq 40\%$ 。
- (2) 硫分 (St, d)：褐煤 $\leq 1.5\%$ ，其它煤种 $\leq 3\%$ 。
- (3) 其它指标：汞 (Hgd) $\leq 0.6 \mu\text{g/g}$ ，砷 (Asd) $\leq 80 \mu\text{g/g}$ ，磷 (Pd) $\leq 0.15\%$ ，氯 (Cl d) $\leq 0.3\%$ ，氟 (Fd) $\leq 200 \mu\text{g/g}$ 。

在中国境内远距离运输(运距超过 600 公里)的商品煤除在满足上述要求外，还应当同时满足下列要求：

- (1) 褐煤：发热量 ($Q_{\text{net, ar}}$) $\geq 16.5\text{MJ/kg}$ ，灰分 (Ad) $\leq 20\%$ ，硫分 (St, d) $\leq 1\%$ 。
- (2) 其它煤种：发热量 ($Q_{\text{net, ar}}$) $\geq 18\text{MJ/kg}$ ，灰分 (Ad) $\leq 30\%$ ，硫分 (St, d) $\leq 2\%$ 。

京津冀及周边地区、长三角、珠三角限制销售和使用灰分 $\geq 16\%$ 、硫分 $\geq 1\%$ 的散煤。

43 煤炭产品的类别、品种和技术要求

煤炭产品按其用途、加工方法和技术要求划分为五大类，28 个品种。煤炭产品的类别、品种名称和技术要求应符合表 6 的规定。煤炭的粒度按 GB/T 189 和 GB/T 10612 进行分级。

表 6 煤炭产品的类别、品种和技术要求

产品类别	品种名称	技术要求			
		粒度 mm	发热量 ($Q_{\text{net, ar}}$) MJ/kg	灰分 (Ad) %	最大粒度 ¹⁾ 上限, %
精煤	冶炼用炼焦精煤	<50, <100		≤ 12.50	不大于 5
	其他用炼焦精煤	<50, <100		12.51~16.00	
粒级煤	洗特大块	>100	无烟煤、烟煤： ≥ 14.50		
	特大块	>100	褐煤： ≥ 11.00		

	洗大块	50~100, >50			
	大块	50~100, >50			
	洗中块	25~50, 20~60			
	中块	25~50			
	洗混中块	13~50, 13~80			
	混中块	13~50, 13~80			
	洗混块	>13, >25			
	混块	>13, >25			
	洗小块	13~20, 13~25			
	小块	13~25			
	洗混小块	6~20			
	混小块	6~20			
	洗粒煤	6~13			
	粒煤	6~13			
洗选煤	洗原煤	≤300			
	洗混煤	<50, <80, <100			
	混煤	0~50			
	洗末煤	0~13, 0~20, 0~25			
	末煤	0~13, 0~20, 0~25			
	洗粉煤	0~6			
	粉煤	0~6			
原煤	原煤, 水采原煤				
低质煤 ²⁾	原煤	--	无烟煤、烟煤: <14.50 褐煤: <11.00	>40 ³⁾	--
	煤泥, 水采煤泥	0~1.0, 0~0.5		16.50~49	
1) 取筛上物累计产率最接近、但不大于 5% 的那个筛孔尺寸, 作为最大粒度。 2) 如用户需要, 必须采取有效的环保措施, 不违反环保法规的情况下供需双方协商解决。 3) 当发热量数据和灰分数据不能同时达到规定时, 以灰分为准。					

44 炼焦用煤质量要求

焦炭最重要的质量指标是强度和灰分、硫分等杂质含量。焦炭的强度取决于煤的黏结性, 杂质含量取决于煤中杂质的含量。对炼焦用煤而言, 黏结性和结焦性是最重要的指标。在 GB 5751-2009《中国煤炭分类》方案中, 1/2 中黏煤、气煤、气肥煤、1/3 焦煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫瘦煤均属炼焦煤范畴, 可作为炼焦(配)煤来使用。

我国煤炭资源虽很丰富, 但地区及煤种的分布却很不均衡, 炼焦煤类只占我国煤炭总储量的 30% 左右, 而黏结性和结焦性均好的肥煤和焦煤不仅储量有限, 且有很大一部分属于高灰、高硫、难选煤。因此, 充分合理地利用我国现有的炼

焦煤资源十分必要。

1、灰分的要求

煤炭的灰分在炼焦过程中几乎全部转入焦炭中。煤的灰分越高，焦炭的灰分也越高。焦炭灰分的主要成分 SiO_2 、 Al_2O_3 等酸性氧化物，熔点较高，在炼铁过程中只能靠加入石灰石等熔剂与它们生成低熔点化合物才能以熔渣形式排出。此外，焦炭灰分高，要适当增加高炉炉渣碱度，高炉气中钾、钠蒸气含量也相应增加，会加速焦炭与 CO_2 的反应而显著降低焦炭的热强度，影响高炉正常运行。

通常，焦炭灰分每升高 1%，高炉熔剂消耗量约增加 4%，炉渣量约增加 3%，每吨生铁消耗焦炭量增加 1.7%~2.0%，生铁产量约降低 2.2%-3.0%；因此，炼焦用煤的灰分应尽可能低。冶炼用炼焦精煤的灰分以 10.00% 以下为宜，最高不应超过 11.50%。

2、全硫的要求

焦炭中的硫全部来自于煤，硫在焦炭中的存在形式主要有：煤中含硫矿物转变而来的硫化物，如 FeS 、 CaS 以及 Fe 与 S 固溶生成的 Fe_nS_n ；熄焦过程中的部分硫化物被氧化生成硫酸盐，如 FeSO_4 、 CaSO_4 ；炼焦过程中产生气态含硫化合物在析出过程中与高温焦炭作用而进入焦炭的炭硫复合物。

黄炉内由炉料带入的硫分，仅 5%~20% 随高炉煤气逸出，其余只能靠炉渣排出。焦炭含硫高会使生铁含硫提高而降低其质量，同时增加炉渣碱度，使高炉操作指标下降。一般来说，焦炭硫分每增加 0.1%，焦炭耗量增加 1.2%~2.0%，生铁产量约下降 2%。此外，焦炭中的硫含量高还会使冶炼过程环境污染加剧。从我国煤资源特点及炼铁生产情况等方面综合考虑，炼焦用煤的全硫含量应在 1.50% 以下，个别稀缺煤种（如肥煤）可适当放宽，但最高也不应超过 2.5%。

在实际生产中，大多采取配煤炼焦。在保证焦炭质量的前提下，对黏结性、结焦性强的焦煤和肥煤的要求可适当放宽，以解决炼焦基础煤源不足的问题，而对于储量和产量相对充足的气煤等弱黏结煤种，可严格控制灰分和硫分，这样可通过配煤使焦炭的强度和杂质含量得到平衡，满足冶金的需要。炼焦用煤的技术条件参照 GB/T397-2009。

4.5 发电用煤质量要求

我国的发电用煤以大型火力发电厂为主，用煤量很大，是煤炭的第一大工业用户。一般大型电厂多采用煤粉锅炉，这种炉型对燃煤质量的适应性很强，从褐煤到无烟煤都燃烧。但对于挥发分 V_{daf} 低于 6.5% 的年老无烟煤，由于其不易燃烧，

一般不作电厂燃料，但可以掺入一定量的高挥发分煤制成配煤来使用。每种定型的锅炉对煤的质量都有一定的适应范围，不能波动太大，否则锅炉的热效率和排放指标将显著恶化。例如，锅炉的设计计算（主要参数——蒸发量、压力、温度等）是根据给定的煤种来进行总体结构、受热面布置和燃烧设备的选配。当煤种变化时，不仅会影响锅炉的热效率，而且锅炉的上述主要性能指标亦不能保证。当煤种变化太大且超出设备可调范围时，还会造成燃烧不稳定、间断爆燃，甚至炉膛灭火和爆炸等现象，对锅炉设备的安全运行产生严重的威胁。曾发生过由于炉膛爆炸导致水冷壁管、刚性梁的弯曲、变形或撕裂的事故；因此要求供煤的质量要稳定，最好能做到定点供应。关于发电用煤的质量，国家标准 GB/T 7562-1998《发电煤粉锅炉用煤技术条件》作出了严格的限定。

对发电用煤而言，挥发分和发热量是十分重要的指标。通常，挥发分高的煤，其燃烧性能及在锅炉内的传热效果均较好，所以不同挥发分的煤对发热量有不同的要求。挥发分 $V_{daf}=6.5\% \sim 10.0\%$ 的无烟煤，其发热量 $Q_{net, ar} \geq 21\text{MJ/kg}$ 。而对于挥发分 $V_{daf} > 40.0\%$ 的年轻煤，其发热量只要求在 12MJ/kg 以上即可。

发电用煤的灰分过高除了增加不必要的运输量外，还影响热效率，一般以灰分 $A_d < 24.00\%$ 为宜。为了充分利用劣质煤，灰分可放宽到 40.00% 、燃煤锅炉的类型需要调整，如采用循环流化床锅炉可以燃用高灰分劣质煤。

发电用煤的硫分亦不应太高，一般应在 1.00% 以下，最高不应超过 3.00% 。硫分高既会造成严重的环境污染，又会腐蚀燃煤设备。

我国发电用煤粉锅炉大部分为固态排渣锅炉，为了能顺利出渣，对煤灰熔融性 ST 也有一定的要求，ST 应在 1350°C 以上。

46 气化用煤质量要求

目前气化炉种类虽然很多，但主要是移动床、流化床和气流床 3 种类型。气化炉型不同，对煤质的要求也就不同。

1、常压移动床煤气发生炉对煤质的要求：常压移动床煤气发生炉的应用比较广泛，对煤的适应性也较强，可采用的煤种有长焰煤、不黏煤、弱黏煤、1/2 中黏煤、贫瘦煤、贫煤和无烟煤。为保证移动床煤气发生炉用煤的质量，我国制定出了 CB 9143-2008《常压固定床发生炉用技术条件》。煤的品种以各粒级的块煤为宜；灰熔点 ST 大于 1250°C ；灰分 A_d 不大于 24.00% ，对于灰分 A_d 不大于 18% 的煤，其 ST 只要在 1150°C 以上即可；全硫 $S_{t,d} < 2.00\%$ ；落下强度应大于 60% ；热稳定性 $TS_{c6} > 60.0\%$ 。对于无搅拌装置的发生炉，要求原料煤的胶质层最大厚度

$Y < 12.0\text{mm}$ ；有搅拌装置的发生炉，则要求 $Y < 16.0\text{mm}$ 。

2、间歇式水煤气炉对煤质的要求：目前国内普遍以无烟块煤为原料用间歇式水煤气炉生产合成氨的原料气，要求原料煤有较好的热定性和较高的落下强度。国家标准 GB/T 7561-1998《合成氨用煤技术条件》要求煤的热稳定性 TS_{16} 在 70%以上，落下强度在 65%以上。灰分以小于 16%为佳，最高也不应超过 24%。硫含量应尽可能低些，一般不应超过 2.00%。固定碳尽量高些，通常固定碳含量应在 65%以上。为使气化炉能顺利运行，煤灰熔融性 ST 应大于 1250°C 。

3、流化床气化炉用煤对煤质的要求：我国也用流化床气化炉来生产合成氨原料气。这种气化炉在常压下操作，以空气或氧气作气化剂，要求煤的反应活性越高越好（一般在 950°C 时 CO_2 还原率大于 60%的煤即可。可以用褐煤（一般全水分 M_t 应小于 12.00%， A_d 小于 24.00%），也可用长焰煤或不黏煤，要求粒度小于 8mm，但小于 1mm 的煤粉越少越好；否则飞灰会带出大量碳而降低的气化率，煤的灰熔点 ST 应大于 1200°C ，全硫小于 2.00%。

4、德士古气化炉对煤质的要求：一般认为在选择原料用煤时其重点放在煤的成浆性能上，同时兼顾煤的气化性能，而对于高灰熔点、高灰黏度的煤，简单地考虑煤的成浆性能就确定其能否适用于水煤浆加压气化工工艺，是较为片面的。生产实践证明，水煤浆加压气化工工艺原料煤选择的原则应以煤的“气化性能及稳定运行性能”为主，同时兼顾煤的成浆性能。煤的气化性能包括其反应活性及在一定工艺条件下可以达到的各种技术指标，而稳定运行性能主要表现在其能否实现气化炉的顺利排渣，设备、阀门的故障率及连续运行的时间。在选择煤种时，应考虑下列因素：（1）煤的灰分含量（2）煤的最高内在水分含量（3）煤灰的熔融特性（4）灰的黏温特性及灰成分的影响。

5、壳牌（Shell）粉煤气化炉对煤质的要求：shell 粉煤气化温度高达 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ ，对煤质的要求不严，几乎可以气化任何煤种。例如高硫、低熔点、易碎、黏结、加热膨胀的各种烟煤、无烟煤和褐煤均可使用。但从运行的可靠性和经济性来说，对煤的组成和性质也有一定的要求：（1）煤的灰分产率（2）灰分的组成（3）煤的灰熔点（4）煤粉粒度、挥发分及反应活性（5）粒度和水分。

47 直接液化用煤质量要求

直接液化尚未大规模推广应用，因此世界各国对液化用煤的要求标准还不一致。如日本和前苏联的一些学者主张采用低灰分煤；欧美有些学者则认为高灰高硫煤的价格低廉，有利于降低液化的成本。但高灰煤在磨碎过程中能耗大，尤其

是含黄铁矿高的煤能耗更大，同时对液化工厂的生广效率和固、液分离都不利，但黄铁矿高的煤有利于液化反应。在多数情况下，原煤的液化效果比精煤好，所以液化以采用原煤为宜。原料煤的灰分要求不超过 25%。

48 高炉喷吹用煤质量要求

高炉喷吹用煤对煤的质量要求较高，煤质的好坏对喷吹的经济效益和高炉的正常操作都有直接影响。一般认为，高炉喷吹用煤的质量应满足下列要求：（1）灰分一般应低于 12%，最高不应高于 14%，硫含量应低于 0.5%，最高不应超过 1.0%（2）全水分应低于 8%，最高不应高于 12%（3）挥发分产率应合适（4）哈氏可磨性指数一般应大于 50%，最低要大于 40%。

一般来说，挥发分的高低对于高炉喷吹的影响不是很大，但当 V_{daf} 较高时，在制粉及喷吹过程中容易引起爆炸。我国目前基本上是以无烟煤作为喷吹的原料煤。挥发分均在 10% 下。烟煤也可以作为喷吹的原料煤，但由于其爆炸的危险性较大，喷吹需在惰性气体（一般为氮气）中进行，设备相对复杂些，成本也略有增高。此外，高炉喷吹用煤的固定碳含量应高些，一般以大于 75% 为宜。哈氏磨性指数 HGI 也应高些，虽然 HGI 的大小对高炉喷吹的效果没有直接影响，但 HGI 过小，会给制粉工艺带来一定的困难，增加动力消耗，同时降低喷吹设备的寿命（特别是喷枪）。煤灰成分对高炉喷吹也有一定的影响，钒和钛的含量越低越好，因为这两种元素会增加炼铁过程中灰渣的黏度，导致铁水和炉渣分离困难。煤灰中二氧化硅与氧化钙之比（ SiO_2/CaO ）越小越好，因为 CaO 含量的增高有助于降低酸性炉渣的黏度。高炉喷吹用煤技术条件参照 GB/T 18512-2008。

49 什么是特殊和稀缺煤种

特殊和稀缺煤类是指具有某种煤质特征、特殊性能和重要经济价值，资源储量相对较少的煤炭种类，包括肥煤、焦煤、瘦煤和无烟煤等。

50 哪些煤炭禁止或限制开采

1、限制高硫份、高灰份煤炭的开采。高硫份、高灰份的煤炭对我国大气环境的危害相当严重。所谓高硫份，根据国家煤炭行业部门的技术准则要求，一般是指含硫量在 3% 以上的煤炭，含硫量在 2%—3% 之间的属于中高硫煤，1% 以下的属于低硫煤。目前我国中高硫煤的产量约为 9600 万吨，为全国煤炭总产量的 7%。对高硫煤的开采进行限制，可以减少二氧化硫排放总量的 20% 左右。因此，对高

硫煤的开采进行限制，既有必要，在经济上也是可以承受的。国家煤炭有关部门已经在这方面采取了一定的措施，取得了较好的效果。

考虑到高硫份、高灰份煤炭对大气环境的严重污染以及煤炭洗选对防治大气污染的重要意义，本条第一款和第二款分两种情况对煤矿的建设提出要求。

(1) 对于新建的所采煤炭属于高硫份、高灰份的煤矿，必须建设配套的煤炭洗选设施，对所开采的煤炭进行洗选，使煤炭中的含硫份、含灰份达到规定的标准。需要注意的是，这一规定虽然着眼点在要求煤矿建设配套的洗选设施，但真正的目的是要求煤炭中的含硫份和含灰份达到规定的标准。违反这一规定的，应当依照本法第六十条第一项的规定追究法律责任。

(2) 对于已经建成的所采煤炭属于高硫份、高灰份的煤矿，应当按照国务院批准的规划，限期建成配套的煤炭洗选设施。这一规定表明，国家对已经建成的煤矿，其要求是不同于新建的煤矿的。对新建煤矿的要求比对已建成煤矿的要求要严格。对于已经建成的煤矿，原则上是要求按照国务院批准的规划，在规定的期限内限期建成配套的煤炭洗选设施，减少所采煤炭的含硫份和含灰份。

2、禁止开采含放射性和砷等有毒有害物质超过规定标准的煤炭。含放射性物质的煤矿，比如含铀矿石，对大气、水体和土壤都可能造成污染，进而危害人体健康。含砷的煤矿同样对大气、水体、土壤均可能产生污染，对人体健康也有严重危害。因此，对含这些有毒有害物质的煤矿，国家严格限制开采。如果煤矿中这些物质的含量超过了规定的标准，国家禁止开采。

第六篇 火电篇

51 全国火电装机现状

我国拥有多种发电形式，主要包括火力发电、水力发电、风力发电、太阳能发电、核能发电等。目前我国火电机组装机容量占比超过五成，火电发电量占比超过七成，火电为我国重要的电力来源。8月，四川、重庆等地经历高温干旱极端天气，对水力发电造成影响。下半年，由于我国风电、太阳能发电等新能源发电装机规模仍较小，暂时无法满足较大的用电需求，因而火电需求或将提升。

根据能源局数据，2021年中国火电装机容量为12.97亿千瓦，同比增长4.7%。2022年1-7月火电装机容量为13.09亿千瓦，同比增长2.8%，已超去年火电装机容量。



图 10 2016-2022 年 7 月中国火电装机容量

通常而言，火电泛指燃煤发电、燃气发电、燃油发电、生物质发电等。截至2021年，我国燃煤机组装机容量为11.09亿千瓦，占火电机组装机容量的比重达到85.52%；燃气机组装机容量为1.09亿千瓦，占比为8.37%；其他机组装机容量为0.79亿千瓦，占比为6.11%。燃煤机组装机容量占比超过八成，火电以燃煤发电为主。

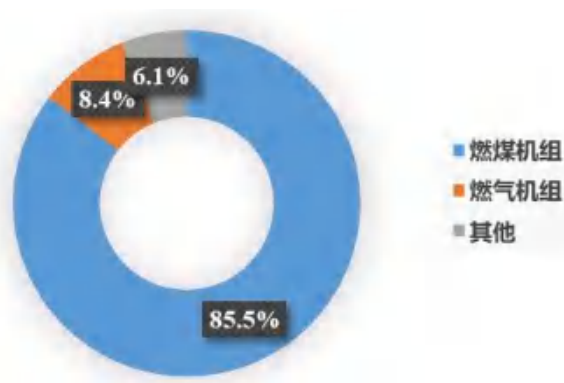


图 11 2021 年中国火电机组装机容量

我国电力行业以火电为主，煤电装机占比近半。长期以来，我国电源结构以火力发电为主，2010年前基本保持在80-90%，2010年起随着新能源装机量不断增长，火电发电量占比逐步下降，占比随月份变化稍有不同，一般来讲冬春季发电量占比高于夏秋季，主要由于水电出力具有季节性，丰水期水电出力会挤占火电出力。2021年火电发电量5.77万亿千瓦时，占全国发电量比例达71.13%。装机情况来看，近年来我国火电及煤电装机占总装机比例不断下降，2019年火电装机占比首次低于60%，2020年煤电装机占比首次低于50%，2021年煤电装机占比首次低于非化石能源装机占比。2022年2月，全国火电装机占总装机比例为54.56%，煤电装机占火电装机比例为85.52%，煤电装机占总装机比例为46.66%。虽然以煤电为代表的火电发电量及装机量占比均不断下降，但仍均远超其他电源，依旧为我国电力生产行业的主体。

52 全国电力生产和外送现状

近年来，中国电力生产和电力消耗量不断增长，火力发电占比达70%以上，同时，由于我国能源分布不均，能源集中分布在西部和北部地区，然而电力消费集中在东部和中部地区，因此我国远距离跨区送电量持续增长，大容量、远距离输电是我国电网发展的必然趋势。

据国家统计局统计数据显示，2014年以来，我国电力生产行业总发电量呈现稳步增长趋势。2019年，我国总发电量为75034.3亿千瓦时，同比增长4.7%。



图 12 2014年-2020年2月全国发电量及增长情况

2020年1-2月，全国发电总量为10982亿千瓦时，同比增长2.9%，增速比2019年同期下滑8.1个百分点。

我国的能源资源与负荷中心呈现十分不均衡的分布特征，能源的总体分布为

西多东少、北多南少，电力需求中心却长期处于东中部地区，我国 80%以上的能源分布在西部和北部，而 75%的电力消费集中在东部和中部。根据中电联的统计数据显示，2020 年 1-2 月全国跨区送电完成 688 亿千瓦时，同比增长 11.8%，全国各省送出电量合计 1917 亿千瓦时，同比增长 9.8%。

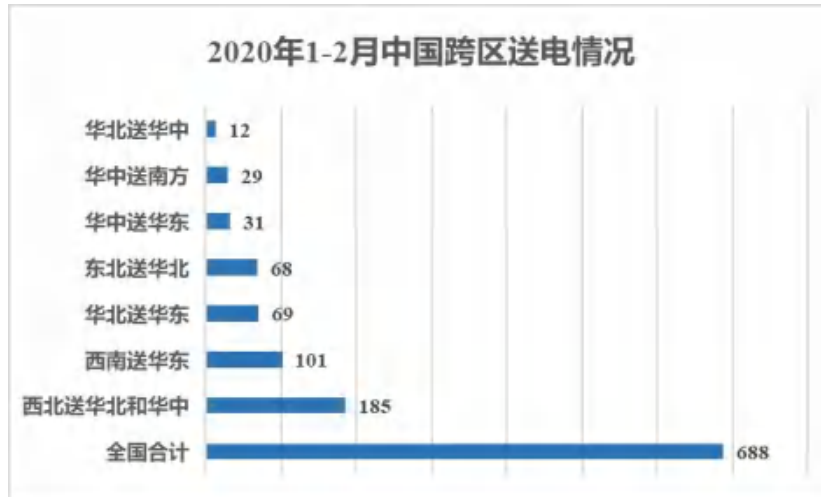


图 13 2020 年 1-2 月中国跨区送电情况

53 电力行业煤炭消费与碳排放现状

煤炭消费仍处达峰过程中，电力行业和东南沿海消费增速显著。全年煤炭消费超预期增长，达到 42.7 亿吨，成为新的峰值，消费增量最大的当属电力行业及煤电布局集中的东南沿海地区。电力行业耗煤同比上升 2 个百分点达到 56.7%，东南沿海的广东增长 23%，浙江增长 20%，上海增长 14%。在全社会用电量增长 10.3%的带动下，占总发电量 60%的煤电发电量同比增长 8.6%。

中国是全球最大煤电装机国，截至 2021 年底，中国煤电总装机达 11.1 亿千瓦，约占电力总装机比重的 46.7%；煤电全年发电量超过 5 万亿千瓦时，约占总发电量的 60.1%。受此影响，电力行业二氧化碳排放量占全国总碳排放量的 40% 以上，电力行业清洁转型进程仍需进一步加速。电力行业动力煤消费量约占我国原煤产量的 54%。

国内碳市场的履约主体方面，首批纳入全国碳市场的重点排放单位共计 2162 家，纳入门槛为 2013-2019 年任一年温室气体排放量达 2.6 万吨二氧化碳当量（综合能源消费量约 1 万吨标准煤）及以上的发电企业（含其他行业自备电厂），合计年覆盖二氧化碳排放量约 45 亿吨二氧化碳。

按照煤炭导致碳排放总量占比 69%、动力煤消费量占比 90%、火电动力煤消费占比 60%计算，煤电碳排放占总碳排放的 37%以上。按照火电发电量占比约 70%、

煤电占火电装机占比 85%计算，通过使用风电、光伏等零碳排放电源替代煤电，在不考虑其他因素的情况下，火电发电量每降低 10%将可降低碳排放 6.3%。因此大力发展新能源，提高新能源装机在我国能源结构中的占比，使新能源占据能源主体地位，是如期实现我国“双碳”目标的必由之路。

54 什么是三改联动

“三改联动”中的“三改”指的是针对煤电机组进行的三种技术改造，分别是节能降耗改造、供热改造和灵活性改造。节能降耗改造是为了让煤电机组少“吃”煤、多发电，每发 1 度电所用的煤不能超过 300 克；供热改造是为了让煤电机组在发电的同时，还能为工业企业和周边居民提供热能；灵活性改造是为了让煤电机组能随时随地控制自己的发电量，需要多发就多发，需要少发就少发。这三项改造如果用得好，就能相互配合，实现煤电机组能效的进一步提升；如果用得不好，就会相互制约，降低煤电机组的能效。

1、节能降耗改造

对供电煤耗在 300 克标准煤/千瓦时以上的煤电机组，应加快创造条件实施节能改造，对无法改造的机组逐步淘汰关停，并视情况将具备条件的转为应急备用电源。“十四五”期间改造规模不低于 3.5 亿千瓦。

2、供热改造

鼓励现有燃煤发电机组实施替代，积极关停采暖和工业供汽小锅炉，对具备供热条件的纯凝机组开展供热改造，在落实热负荷需求的前提下，“十四五”期间改造规模力争达到 5000 万千瓦。

3、灵活性改造制造

存量煤电机组灵活性改造应改尽改，“十四五”期间完成 2 亿千瓦，增加系统调节能力 3000—4000 万千瓦，促进清洁能源消纳。“十四五”期间，实现煤电机组灵活制造规模 1.5 亿千瓦。

55 先进灵活超超临界发电技术是什么

超超临界发电技术指燃煤电厂将水蒸汽压力、温度提高到超临界参数以上，实现大幅提高机组热效率、降低煤耗和污染物排放的技术。

超超临界发电机组是指蒸汽压力 25MPa、温度 580℃ 以上的超高参数燃煤火力发电机组，俗称“超超临界发电机组”，其发电效率在 43.8%~45%之间，远高于亚临界机组的 37.5%。

随着发电技术相关材料的进步，更高参数的 630℃、760℃ 等级超超临界发电技术将成为下一代火力发电主力机组技术，其供电效率预计可达 47%~53%，比目前最先进的 600℃ 等级超超临界机组煤耗约可再降低 40 克标煤/千瓦时。

先进超超临界发电技术是在镍铁基、镍基高温材料研发突破的基础上，进一步将蒸汽参数提高至 630℃、760℃ 以上，供电效率可在 50% 以上，供电煤耗可达 250 克标煤/千瓦时以下，能够大幅度提高机组发电效率，降低煤耗及污染物、CO₂ 等温室气体的排放。一台 600MW 等级的 700℃ 先进超超临界机组，可比同容量 600℃ 超超临界机组节约标准煤约 14.3 万吨/年，大气污染物减少 14% 左右 (NO_x、SO_x)，CO₂ 减排约 30 万吨/年，具有十分显著的经济效益和生态效益。

先进超超临界发电技术核心优势在于低碳、高效、清洁及技术的继承性，研发先进超超临界发电技术对能源结构以煤为主的我国来说，具有十分重要的现实意义和广阔的应用前景。

56 碳捕集方式的技术路线有哪些

目前，CO₂ 的捕集技术主要有燃烧后脱除技术 (post-combustion capture)、燃烧前分离技术 (pre-combustion capture) 和富氧燃烧分离技术 (oxy-fuel combustion) 方式，如下图所示。同时，一些新型的脱除方式，如化学链燃烧分离技术、电化学泵、CO₂ 水合工艺和光催化工艺分离烟气 CO₂ 技术等也逐渐受到研究者的关注和重视。

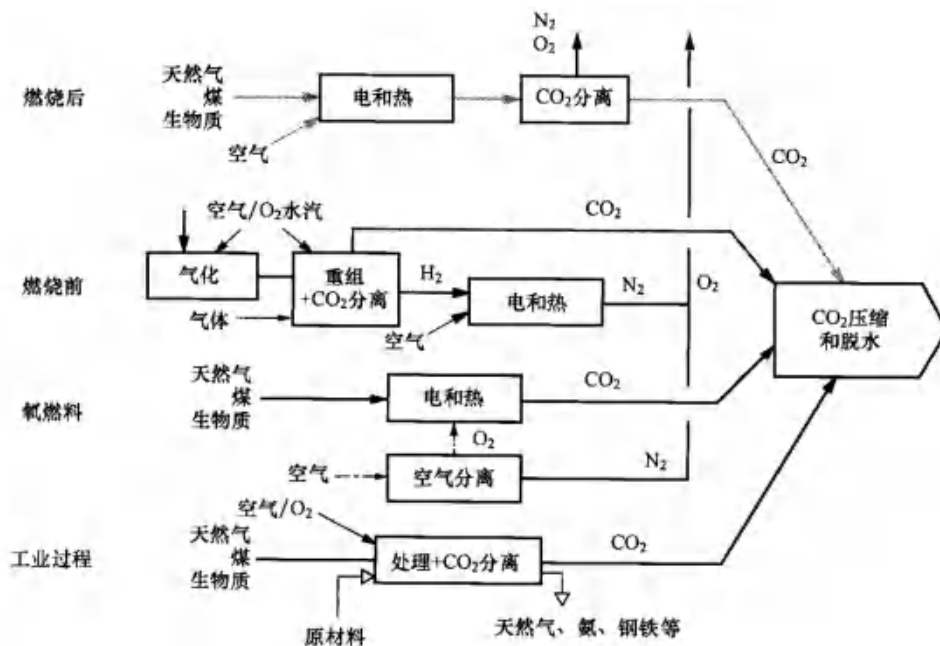


图 14 典型的 CO₂ 捕集技术

目前采用最多的 CO₂ 捕集技术是燃烧后脱除技术，主要包括吸收分离法、膜法、吸附分离法和低温蒸馏法等。

1、吸收分离法

吸收分离法按照吸收分离原理不同，可分为化学吸收法和物理吸收法。

2、膜法

按吸收原理，膜法可以分为膜分离法和膜吸收法。

3、吸附分离法

吸附法按吸附原理可分为变压吸附法（PSA）、变温吸附法（TSA）及变温变吸附法（PTSA）。

4、低温蒸馏法

该法是通过低温冷凝来分离 CO₂ 的物理过程，一般是将烟气进行多次压缩和冷却，从而引起各气体成分的相变来达到分离烟气中 CO₂ 的目的。为了避免烟气中的水蒸气在冷却过程中形成冰块，造成对系统的阻塞，有时还需在分离 CO₂ 之前先将烟气干燥以去除水分。低温分离包括直接蒸馏、双柱蒸馏加添加剂和控制冻结等。

5、富氧燃烧技术（O₂/CO₂）

由于 CO₂ 在燃煤电厂烟气中的含量一般为 14%，采用以上各工艺进行 CO₂ 分离的成本较高，如果可以大幅度提高烟气中 CO₂ 的含量，就可以大大降低 CO₂ 的分离成本，富氧燃烧技术就是在这一背景下提出来的。

富氧燃烧技术也称为 O₂/CO₂ 燃烧技术，或空气分离/烟气再循环技术。该法用空气分离获得的和一部分锅炉烟气循环气构成的混合气体代替空气作为化石燃料燃烧时的氧化剂，以提高燃烧烟气中 CO₂ 浓度。其主要步骤为：空气压缩分离，燃烧和电力生产，烟气冷却、压缩、净化和脱水。按烟气再循环的不同方式可以分为干法循环（脱水后循环）和湿法循环（烟气不脱水）。

6、化学链燃烧技术

CLC 基本原理是将传统的燃料与空气直接接触反应的燃烧借助于载氧剂的作用分解为两个气固反应，燃料与空气无需接触，由载氧剂将空气中的氧传递到燃料中。目前，这项技术还处于研究发展阶段，其有效利用还有待于进一步的开发。

57 二氧化碳封存与利用技术有哪些

CO₂的封存方式主要有物理封存、化学封存和生物封存等。

1、物理封存或利用

CO₂的物理封存不涉及化学变化，主要包括海洋或者深海存储和地质储存。CO₂的物理存储是一种安全、有效的方法。

(1) 海洋储存。海洋是全球最大的 CO₂ 储库，其总储量是大气的 50 多倍，海洋在全球碳循环中扮演了重要角色。

目前，将 CO₂ 进行海洋储存的方式主要是通过管道或船舶将 CO₂ 运送到海洋储存地点，然后将 CO₂ 注入海底，在海底形成固态的 CO₂ 水合物或液态的 CO₂ 湖，并溶解碱性矿物质，如石灰石等，从而中和酸性的 CO₂。溶解的碳酸盐矿物质可以将 CO₂ 的储存时间延长到大约 1 万年，同时将海洋的 pH 值和 CO₂ 分压的变化降至最低。

总体上，对于 CO₂ 的海洋处理，由于涉及对海洋环境的影响和可能引起的生态问题，目前，各国都持谨慎的态度，仍处于研究阶段。

(2) 地质储存。地质储存是永久储存 CO₂ 的有效方法。这种方法通过管道技术，将分离后得到的高纯度 CO₂ 气体注入地下深处具有适当封闭条件的地层中储存起来，利用地质结构的气密性永久封存 CO₂。适合于 CO₂ 储存的地点包括：

(已枯竭油气藏，(深部盐水层，(无商业开采价值的深层煤层。

(3) CO₂ 的物理利用。CO₂ 的物理利用是指在使用过程中，不改变 CO₂ 的化学性质，仅作为一种工作介质。归纳起来，CO₂ 的物理利用主要包括：(作制冷剂。固体 CO₂ 在直接升华过程中吸收周围物质的热量(用于食品保鲜和储存。抑制水果、蔬菜的呼吸，减弱其新陈代谢(作灭火剂。CO₂ 具有低电导率、不助燃的特性(用于气体保护焊。抗腐蚀能力强，适用于多种材料焊接工艺，成本低廉(在低温热源发电站中作为工作介质(液态 CO₂ 用于洗涤新钻成的水井，能改善水质并增加水量(用于提高石油采收率。经济效益和环境效益巨大(用作香料、药物的提取剂和溶剂。CO₂ 在液态或超临界状态下具有良好的溶解能力和选择性。

2、化学固定或利用

CO₂ 化学固定法就是将 CO₂ 作为碳源，转换成有用的化学物质，以达到固定的目的有用化学物质包括有机化合物，也包括无机化合物，CO₂ 合成液体燃料和基础化合物、合成高分子材料特别引人注目，因为既有经济效益又达到了固碳的目的。由 CO₂ 合成化合物达到固定目的可通过两种形式实现：(以 CO₂ 结构；(以

CO₂还原的形式。

最佳 CO₂利用途径是合成的产品具有低耗能、高附加值、大使用量和能永久储存 CO₂等特点。但目前来看，经济性是个比较大的问题，还需要大量研究。由 CO₂合成有用物质，即再资源化可通过下述多种方法来实现：（催化加氢。合成甲醇、甲烷、碳氢化合物、甲酸（高分子合成。合成聚碳酸等（有机合成。合成尿素衍生物等（电化学法。合成甲酸、甲烷、甲醇等（人工光合成法。合成甲烷、甲酸、一氧化碳等（分解法。CO₂直接分解成碳。

化学利用 CO₂的可能途径：

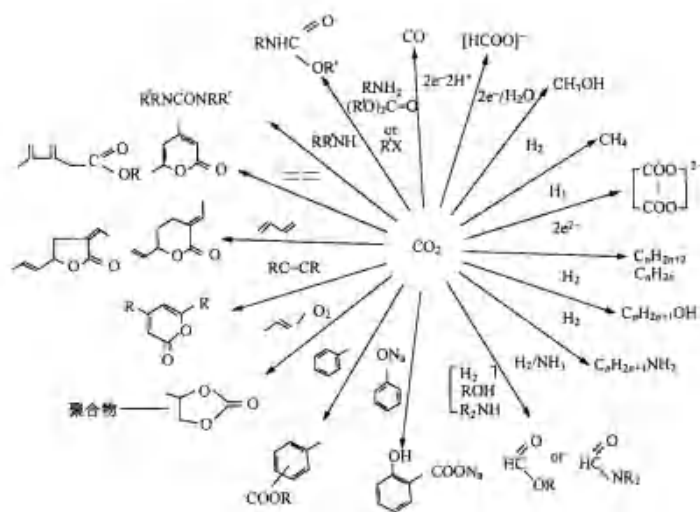


图 15 化学利用 CO₂ 的可能途径

3、生物固定或利用

生物固定 CO₂主要靠植物的光合作用和微生物的自养作用。前者已为众所周知，近年来，主要集中在对微生物固定 CO₂的生化机制与基因工程的研究。

固定 CO₂的微生物一般分为两类，即光能自养型微生物和化能自养型微生物。光能自养型微生物主要包括微藻类和光合细菌，这类微生物在叶绿素的存在下，以光为能源、CO₂为碳源合成菌体物质或代谢产物；化能自养型微生物也以 CO₂为碳源，能源主要有 H₂、H₂S、S₂O₃²⁻、NH₄⁺、NO₂⁻、Fe²⁺等。

由于微藻（包括蓝细菌）和氢细菌具有生长速度快、适应性强等特点，所以对它们固定 CO₂的各种研究和开发较为广泛深入。日本已筛选出几种能在很高的 CO₂浓度下繁殖的海藻，并计划在太平洋海岸进行人工大面积繁殖试验，以吸收该地区高度工业化后所排放的 CO₂。美国利用盐碱地里的盐生植物吸收 CO₂，并在墨西哥进行试植。利用 CO₂生产单细胞蛋白是其在生物技术方面应用的典型例证。另外，美国在夏威夷的科纳海岸进行了微藻的培育，其种植面积有 90 英亩。

中科院、山东科技大学、浙江大学、新奥集团等单位正在开发微藻生物柴油技术，预计 2015 年前后实现户外中试装置研发，远期将建设万吨级工业示范装置。

4、CO₂采油技术

注 CO₂采油技术主要包括 CO₂驱技术、CO₂/水交驱技术和 CO₂吞吐技术。

(1) CO₂驱技术是在注入井注入 CO₂，CO₂作为驱替剂在油藏中经历较长距离和较长时间的运移。在 CO₂与原油的作用下（混相驱或非混相驱），可大幅度增加原油的产量和采收率。同时，部分 CO₂溶解在油藏的原油、地层水中或与岩石反应形成新的物质沉积在油藏中，实现 CO₂的地质封存。

(2) CO₂/水交替驱技术是在油藏的温度、压力及原油性质达不到混相驱的情况，在注入井交替注入 CO₂和水，水的密度大于原油而 CO₂（气态、液态或超临界状态）的密度小于原油，在重力作用下水倾向于经油层下部流向油井驱油，而 CO₂倾向于经油层上部流向油井驱油，扩大和改善水驱的波及剖面（范围），提高原油的开采效率和采收率。在 CO₂/水交替驱油过程中，部分 CO₂溶解在油藏的原油、地层水或与岩石反应形成新的物质沉积在油藏中，实现 CO₂的地质封存。

(3) CO₂吞吐技术是在油井注入一定量的 CO₂，将油井关闭一段时间后再开启进行原油开采。由于 CO₂对原油的作用（CO₂在原油中溶解，使之体积膨胀、黏度降低、溶解气驱等），可增加原油的产量，但不能实现对 CO₂的地质封存。

5、CO₂置换法开发天然气水合物

作为一种集温室气体储存和天然气水合物开发于一体的方法，CO₂置换法开发天然气水合物在相同的温度下生成水合物的压力比 CH₄低，所以当将 CO₂置换法开发天然气水合物注入水合物储层后，CH₄水合物会转化为更稳定的 CO₂置换法开发天然气水合物水合物。在此过程中 CO₂置换法开发天然气水合物的生成和甲烷水合物的化解同时进行，避免了水合物单纯化解过程所需要的热量；由于 CO₂置换法开发天然气水合物水合物生成时放出的热量大于 CH₄生成水合物时放出的热量，所以还可以避免水合物分解过程中的自保护作用。因此，这种方法不仅可以避免一些常规开采方法的缺点，而且提供了一种长期储存温室气体 CO₂置换法开发天然气水合物及在开发天然气水合物过程中稳定海底地层的方案。

58 什么是煤电联营

国家发展改革委发布《关于发展煤电联营的指导意见》（发改能源[2016]857号），指出煤电联营是指：煤炭和电力生产企业以资本为纽带，通过资本融合、

兼并重组、相互参股、战略合作、长期稳定协议、资产联营和一体化项目等方式，将煤炭、电力上下游产业有机融合的能源企业发展模式，其中煤电一体化是煤矿和电厂共属同一主体的煤电联营形式。

59 什么是风光火储一体化发展

“风光水火储一体化”侧重于电源基地开发，结合当地资源条件和能源特点，因地制宜采取风能、太阳能、水能、煤炭等多能源品种发电互相补充，并适度增加一定比例储能，统筹各类电源的规划、设计、建设、运营，积极探索“风光储一体化”，因地制宜开展“风光水储一体化”，稳妥推进“风光火储一体化”。

强化电源侧灵活调节作用。挖掘一体化配套电源的调峰潜力，完善电力系统调峰、调频等辅助服务市场机制。优化综合能源基地配套储能规模，充分发挥流域梯级水电站、具有较强调节性能水电站、火电机组、储能设施的调峰能力，减轻送受端系统的调峰压力，力争各类可再生能源利用率在 95%以上。

优化各类电源规模配比。优化送端配套电源（含储能）规模，结合送受端负荷特性，合理确定送电曲线，提升通道利用效率。结合关键装备技术创新水平、送端资源特性、受端清洁能源电力消纳能力，最大化利用清洁能源，稳步提升存量通道配套新能源比重，增量基地输电通道配套新能源年输送电量比例不低于 40%，具体比例可在中长期送电协议中加以明确。

确保电源基地送电可持续性。充分考虑送端地区中长期自身用电需求，统筹综合能源基地能源资源禀赋特点和生态环保约束，合理确定中长期可持续外送电力规模。对于煤电开发，必须在确保未来 15 年近区电力自足的前提下，明确近期可持续外送规模；对于可再生能源开发，以充分利用、高效消纳为目标统筹优化近期开发外送规模与远期留存需求，超前谋划好电力接续。

60 什么是煤电与新能源一体化发展

煤电新能源一体化发展是在充分利用火电机组增量调节能力的基础上，建立火风光多能互补综合能源基地。推动煤电与新能源项目作为一个整体，统一送出，统一调度，提高送出通道利用率，提升新能源消纳能力。

1、支持多能互补。对保障电力可靠供应与系统安全稳定运行的托底保供煤电项目，原则上优先通过多能互补模式配置风光资源，在充分利用火电机组增量调节能力的基础上，建立火风光多能互补综合能源基地，实现一体化发展。

2、强化规划引领。有关发电企业应根据自身资源或拟获取资源配置情况编

制多能互补项目实施方案，省能源局会同有关部门委托第三方咨询机构开展评估纳规工作。按年度、经评估具备条件的新增多能互补新能源规模统筹纳入全省电力规划和新能源发展规划，并按制定的年度建设计划实施。

3、鼓励重组推动。煤电企业与新能源企业可通过资产、资源等实施优化重组、资源整合或相互联营，形成多能互补，充分发挥资金、技术、人才等各方优势，共同开发，互利共赢。

第七篇 焦化篇

61 全国焦化行业发展现状

目前，全国焦化生产企业 500 余家，焦炭总产能约 6.3 亿吨，其中常规焦炉产能 5.5 亿吨，半焦（兰炭）产能 7000 万吨（部分电石、铁合金企业自用半焦（兰炭）生产能力未统计在全国焦炭产能中），热回收焦炉产能 1000 万吨。根据国家统计局和中国炼焦行业协会统计数据，山西省产能超过 1 亿吨，河北省、山东省、陕西省、内蒙古自治区产能超过 5000 万吨。半焦（兰炭）生产主要集中在陕西、内蒙、宁夏、及新疆等地区，热回收焦炉主要在山西、河北等地区。

与此同时，焦化行业焦炉煤气制甲醇总能力达到 1400 万吨/年左右，焦炉煤气制天然气能力达 60 多亿立方米/年；煤焦油加工总能力达到 2400 万吨/年左右；苯加氢精制总能力达到 600 万吨/年左右，干熄焦处理能力 4.41 万吨/小时。

62 焦化行业煤炭消费及碳排放现状

据统计，2020 年山西省焦化行业能源消费量 1958.2 万吨标煤，较 2015 年增长 43.3%；占全省能源消费总量的 9.3%，位居第 5，仅次于钢铁、煤炭、化工、人民生活及其他。能源消费品种主要包括煤炭、电力、汽油、柴油和天然气等。其中，焦化行业在 2020 年消费煤炭 1.3 亿吨，占全省煤炭消费的 35.6%，位居全省第二，仅次于电力行业。“十三五”期间，煤炭消费量较 2015 年增长 31.2%，煤炭消费比重较 2015 年增加 2.2 个百分点。

据统计，2020 年山西焦化行业碳排放量约为 4327.7 万吨，较 2015 年增长 41.2%，占全省碳排放总量的 8.2%。其中山西焦化行业化石能源消费产生的直接碳排放占行业碳排放总量的 86.1%，电力消费产生的间接碳排放占行业碳排放总量的 13.9%。

63 焦化行业节能降碳技术路径有哪些

1. 绿色技术工艺。重点推动高效蒸馏、热泵等先进节能工艺技术应用。加快推进焦炉精准加热自动控制技术普及应用，实现焦炉加热燃烧过程温度优化控制，降低加热用煤气消耗。

2. 余热余能回收。加大余热余能的回收利用，推广应用干熄焦、上升管余热回收、烟道气余热回收等先进适用技术，研究焦化系统多余热耦合优化。

3. 循环经济改造。推广焦炉煤气脱硫废液提盐、制酸等高效资源化利用技术，解决废弃物污染问题。利用现有炼焦装备和产能，研究加强焦炉煤气高效综合利

用，延伸焦炉煤气利用产业链条，开拓焦炉煤气应用新领域。

4. 公辅设施改造。提高节能型水泵、永磁电机、永磁调速、开关磁阻电机等节能产品使用比例，合理配置电机功率，系统节约电能。

64 什么是焦炉精准自动加热技术

焦炉加热精准控制技术通过实时测量立火道温度、焦饼温度、荒煤气温度、废气含氧量等数据，由软件控制系统进行数据的采集、分析、调用、控制，提高了焦炉温度控制的自动化程度。实时准确的测量和科学有效的调节，既保证了全炉温度的稳定均匀，也为执行焦炉温度制度、压力制度提供了依据，使煤气燃烧更加合理，降低了工序能耗。同时，焦炉加热精准控制在改善焦炭质量的同时，大幅降低了焦炉烟囱废气污染物的排放。该技术由焦炉直行温度全自动测量系统、单燃烧室控制系统、煤气流量优化控制系统、废气含氧量控制系统、吸力优化控制系统、火落管理系统、焦饼温度测量系统、焦炉加热精准控制系统构成，从而实现了焦炉温度自动化控制。

65 什么是干熄焦

干熄焦即焦炭干法熄焦（Coke Dry Quenching）简称 CDQ，是相对湿熄焦而言的，是指采用惰性气体将红焦降温冷却的一种熄焦方法。其原理为：在干熄焦过程中，1000℃的红焦从干熄炉顶部装入，130℃的低温惰性循环气体由循环风机鼓入干熄炉冷却段红焦层内，吸收红焦显热，冷却后的焦炭（低于200℃）从干熄炉底部排出，从干熄炉环形烟道出来的高温惰性气体流经干熄焦锅炉进行热交换，锅炉产生蒸汽，冷却后的惰性气体由循环风机重新鼓入干熄炉，惰性气体在封闭的系统内循环使用。

66 什么是煤调湿技术

煤调湿是将炼焦煤在装炉前除去一部分水分，保持装炉煤水分稳定在6%左右，然后装炉炼焦。该技术在日本、俄罗斯等国家普遍使用，在我国煤调湿已成为焦化行业重点开发并积极推广的技术。利用焦炉烟道废气煤调湿工艺不但可以节省能源，减少废气、废水、废热的排放，而且可以提高装炉煤堆密度及炼焦初期升温速度、缩短结焦时间，从而实现节能降耗的目的。

目前，煤调湿装置的热源主要有导热油、蒸汽和焦炉烟道废气等。相比较而言，以导热油和蒸汽为热源的煤调湿工艺存在设备繁琐、运行费用高等问题；以

焦炉烟道废气为热源的煤调湿工艺可以利用废气余热干燥入炉煤，热效率高，节能效果好。目前以焦炉烟道废气为热源的煤调湿工艺主要有流化床式、风动选择式和沸腾流化床式等。

67 焦炉煤气的利用方向有哪些

焦炉煤气（简称 COG）是炼焦过程中，在产出焦炭和焦油产品的同时所得到的可燃气体，是炼焦过程中最重要的副产品。COG 主要由氢气和甲烷构成，分别占 56%和 27%，并有少量一氧化碳、二氧化碳、氮气、氧气和其他烃类。焦炉煤气的利用方向有：

1. 加热燃料。焦炉煤气的传统利用方式是作为不同加热设备的气体燃料。与固体燃料相比较，有使用便捷、可以管道输送和传热效率高等优点，受到工业和民用的青睐。工业燃气：焦炉煤气作为气体燃料，可用于焦炉加热、轧钢加热炉、高炉热风炉、烧结点火等。民用燃气：焦化厂生产的焦炉煤气经过净化后，作为燃气可供当地居民使用。

2. 用于发电。将焦炉煤气用于发电，是近几年来焦炉煤气的主要利用途径之一。我国焦炉煤气发电一般有三种方式：蒸气发电、燃气轮机发电和内燃机发电。对于独立焦化厂而言，在利用焦炉煤气发电时，多采用的是燃气内燃机技术，其设备投资较小且焦炉煤气成本低，所以经济效益显著。而对于国内大中型钢铁企业而言，在利用焦炉煤气发电时，多采用的是燃气-蒸气联合循环发电技术，普遍存在设备一次性投资大、维护及备件费用高、电价居高不下等问题。

3. 焦炉煤气生产纯氢。焦炉煤气中氢气资源相当丰富，氢气的体积百分含量超过 50%。目前利用焦炉煤气制氢的方法主要有深冷法和变压吸附法。深冷法是利用焦炉气中各主要成分冷凝温度的不同，以深度冷冻部分冷凝的方法使氢与其它气体组分分离，最后用液氮洗以脱除气体中剩余的 CO 和 CH₄，最终得到的气体中含有 83%~88%的氢，其余为氮。变压吸附法是利用气体组分在固体材料上吸附特性的差异以及吸附量随压力变化而变化的特性，通过周期性的压力变换过程实现气体的分离或提纯。

4. 合成甲醇。焦炉煤气组分中甲烷含量（体积分数）为 24%~28%，只需将甲烷转化成一定比例的 CO 和 H₂，即可大体满足合成甲醇的合成气比例要求。煤气中甲烷及高碳烃转化成合成气后，在 60MPa 压强下即可完成甲醇合成，流程短，反应速度快，焦炉煤气利用率高，一般 2000~2200m³焦炉煤气生产 1t 甲醇。

5. 生产直接还原铁。理论上讲，焦炉煤气不需要经过热裂解，就可直接供给气基竖炉生产海绵铁。其工艺过程为：将焦炉煤气和竖炉顶气混合而成的还原气在加热炉中加热，然后直接通入到直接还原炉中生产直接还原铁（DRI）。在此过程中，焦炉煤气作为还原过程的还原气，而高炉煤气则作为燃料用于加热还原气体。然而，利用焦炉煤气生产直接还原铁，虽然技术上可行，但由于焦炉煤气资源问题、富铁矿资源问题的限制，其距离规模化、产业化应用还有一定的距离。

6. 高炉喷吹焦炉煤气。高炉喷吹焦炉煤气是指将焦炉产生的多余的焦炉煤气经过净化处理，通过设备加压至高于风口压力，然后利用类似喷煤的喷吹设施，通过各个支管喷入高炉风口。目前高炉喷吹焦炉煤气的最大问题是焦炉煤气的来源。作为优质燃料的焦炉煤气在各钢铁厂普遍存在着供应紧缺的现象。然而，从国内总体状况和各企业的实际情况分析，仍然存在许多规模和数量不等的焦炉煤气供应源。对于有焦化厂的钢铁联合企业，自产焦炉煤气基本得到利用，主要用于焦炉加热、轧钢加热炉、高炉热风炉、烧结点火以及燃烧发电等。但是，随着企业内能量利用率的提高和替代燃料的使用，加热所需要的焦炉煤气将不断减少，焦炉煤气会有一定的富裕量供高炉喷吹。

68 粗苯精制的方向有哪些

粗苯精制的主要方法有酸洗法和粗苯加氢，酸洗法在 20 世纪 80 年代曾是我国唯一一种粗苯净化方法，但该法净化效果差，制取的苯产品含硫（噻吩）较高，含有相当多的非芳烃，满足不了基本有机合成的要求，且污染严重，因此改法已经被淘汰。目前粗苯加氢精制是实际普遍采用的精制工艺，粗苯加氢的工艺实质上包括催化加氢净化、精馏得到苯类产品，根据反应温度可以分为高温加氢、中温加氢和低温加氢三种。

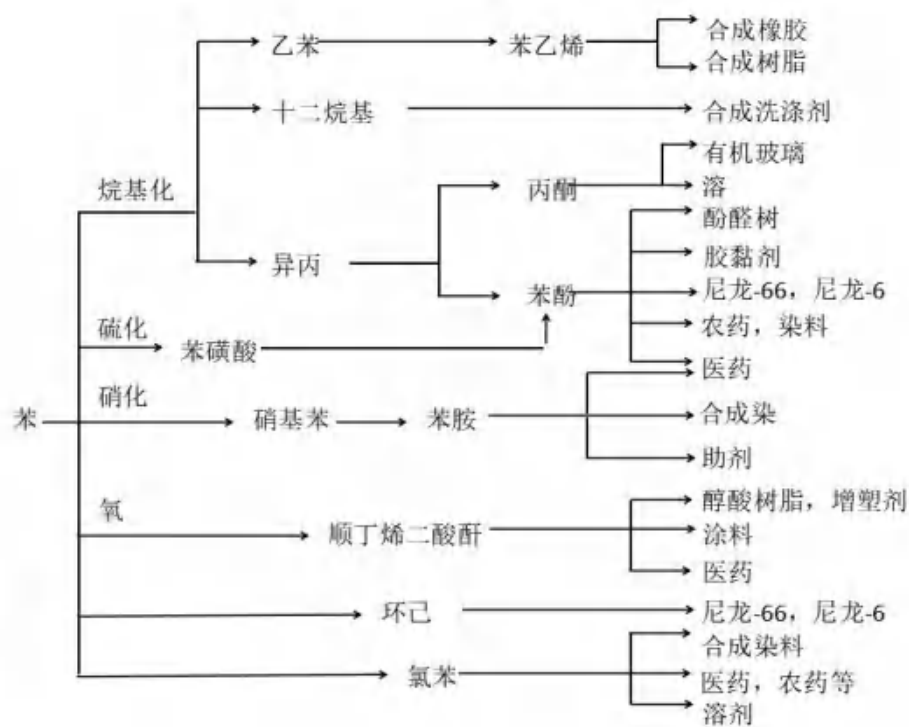


图 16 苯的下游产品路线图

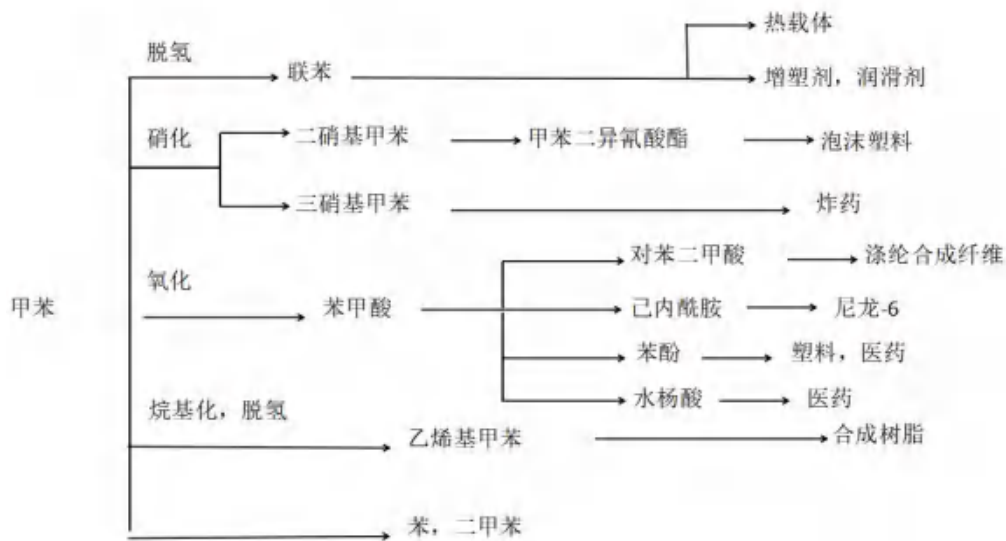


图 17 甲苯下游产品路线图

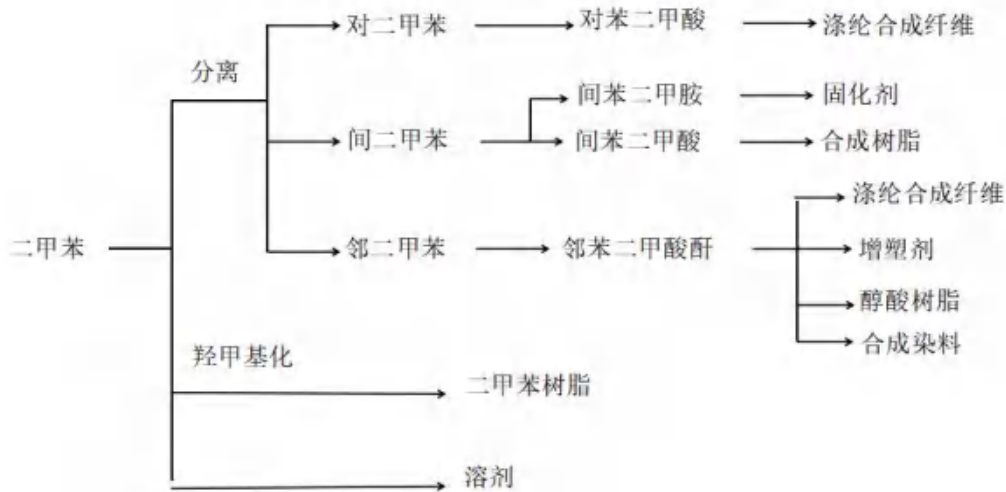


图 18 二甲苯下游产品路线图

69 煤焦油深加工方向有哪些

煤焦油是以芳香烃为主的有机混合物，含有 1 万多种化合物，可提取的约 200 种，目前，有利用价值且提取经济合理的约 50 种，其深加工所获得的轻油、酚、萘、洗油、蒽、喹啉、吲哚、沥青等系列产品是合成塑料、合成纤维、农药、染料、医药、涂料、助剂及精细化工产品的基础原料，也是冶金、合成、建设、纺织、造纸、交通等行业的基本原料。



图 19 煤焦油下游产品路线图

70 山西省焦化超低排放的技术要求有哪些

焦化企业超低排放是指对所有生产环节实施升级改造，包括有组织超低排放、无组织全流程收集治理、物料运输清洁化、监测监控及环境管理规范化。具体技术要求如下。

1. 有组织排放控制指标。在基准氧含量为 8% 的条件下，新建企业焦炉烟囱烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、非甲烷总烃排放浓度分别不高于 10、30、100、60mg/m³，现有企业焦炉烟囱烟气中颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、非甲烷总烃排放浓度分别不高于 10、30、150、80mg/m³。粗苯管式炉等燃用焦炉煤气设施的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10、30、150mg/m³。采用选择性催化还原技术脱硝、氨法脱硫设施的氨逃逸浓度不高于 8mg/m³。装煤、推焦废气中颗粒物排放浓度不高于 10mg/m³。精煤破碎、焦炭破碎、筛分及转运颗粒物排放浓度不高于 10mg/m³。硫铵结晶干燥颗粒物排放浓度不高于 10mg/m³。酚氰废水处理系统的废气治理设施非甲烷总烃排放浓度不高于 50mg/m³。

2. 无组织排放控制措施。全面加强物料储存、输送和生产工艺过程无组织排放控制，以及厂区及周边环境综合整治。在保证安全生产的前提下，采取密闭、封闭等有效措施，有效提高废气收集率，产尘点及生产设施无可见烟粉尘外逸、无异味、无积尘。

3. 清洁运输要求。新建企业原则上同步配套建设铁路专用线，现有企业通过新建、共建、租用等多种形式，加快配套铁路专用线，逐步提高进出厂区大宗物料和产品清洁运输比例，达不到的使用国六排放标准重型载货车辆或新能源车辆。其中，焦化企业出省焦炭铁路运输比例要达到 80% 以上，暂无铁路专用线的，按照就地就近、共用共享原则，通过集装箱运输完成公路短驳，实现公铁联运。位于设区市城市规划区的焦化企业大宗物料和产品清洁运输或新能源车辆运输比例达到 100%。厂内运输车辆全部达到国六排放标准或使用新能源车辆，非道路移动机械全部达到国三及以上排放标准或使用新能源机械。

4. 监测监控设施建设要求。建设全厂污染物排放管、控、治一体化监控平台，全面加强自动监控、过程监控和视频监控设施建设。焦炉烟囱、装煤地面站、推焦地面站、干法熄焦地面站、VOCs 废气治理设施等均安装自动监控设施（CEMS），污染治理设施安装分布式控制系统（DCS），记录企业环保设施运行及相关生产过程主要参数。煤场、焦场出入口、焦炉炉体等易产尘点，安装高清视频监控设施。厂区内主要产尘点周边、运输道路两侧安装空气质量颗粒物监测设施，煤气

净化区内安装环境空气质量非甲烷总烃自动监测设备，厂界安装环境空气质量颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、非甲烷总烃自动监测站。建设门禁系统和视频监控系统，监控运输车辆进出厂区情况。自动监控、DCS 监控等数据至少要保存一年以上，视频监控数据至少要保存半年以上。

5. 环境管理要求。健全企业环保管理机构，成立专门环保机构，各生产工序需配各分管环保的负责人，并设置环保专职人员，经企业自主培训考核后持证上岗。建立企业环保管理制度，包括：环境保护责任制度、环保设施检修与维护制度、环境监测管理制度、环境保护培训教育管理制度、环保监督与考核管理细则、环境保护应急预案等。规范档案台账管理，环保档案保存完整，包括：环评批复文件、排污许可证及季度年度执行报告、竣工验收文件、废气治理设施运行管理规程、一年内第三方废气监测报告；台账记录完整规范，包括：完整生产管理台账（生产设备运行台账，原辅材料、燃料使用量，产品产量，推焦次数记录等）、设备维护记录、废气治理设备清单（主要污染治理设备、设计说明书、运行记录、CEMS 小时数据等）、耗材记录、LDAR 报告，档案台账留存纸质原件，并生成电子档案，可随时调阅。

第八篇 煤化工篇

71 全国煤化工行业发展现状

经过二十多年的发展，我国现代煤化工产业已初步形成体系齐全、集聚发展的整体格局，并正在加快推进内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、宁夏宁东和新疆准东 4 个现代煤化工产业示范区建设。截至 2021 年，煤制油、煤制天然气、煤（甲醇）制烯烃、煤制乙二醇产能规模分别达到 823 万吨/年、61.25 亿立方米/年、1672 万吨/年、803 万吨/年，产能利用率分别为 82.6%、72.7%、94.2%、40.2%，并创新发展了煤制乙醇、煤制生物可降解材料等产业。2021 年，我国煤制油、气、烯烃、乙二醇等四大类主产品总产量约为 2896 万吨，折原油当量达到 3000 万吨级，已成为实现油气资源和石化原料多元化的重要途径之一。与此同时，我国已成功掌握大型煤气化、煤直接液化、费托合成、甲醇制烯烃、煤制乙二醇的核心工艺，并成功开发了大型气化炉、大型空分装置、大型合成反应器等具有自主知识产权的关键设备，整体设备国产化率达到 95% 以上。

72 煤化工行业煤炭消费及碳排放现状

根据生态环境部统一部署，“十四五”期间石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸、航空等行业将逐步纳入全国碳市场。煤化工行业属于资源型和能源型产业，产品生产主要以天然气、煤炭等化石能源为原料，生产过程中二氧化碳等温室气体排放量大，在低碳发展工作中担负着极其重要的任务。

据统计，我国煤化工行业能源消费量达 4.2 亿吨标煤，约占到全国消费总量的 8.4%；煤化工行业每年的二氧化碳排放量达到 11 亿吨左右，约占全国排放总量的 10%。氮肥、甲醇行业又是煤化工行业中的重点排放大户，73.7% 的合成氨、77.3% 的甲醇产能是以煤炭为原料生产的。生产 1 吨合成氨，煤头二氧化碳排放约为 4.2 吨，天然气头约为 2.04 吨；生产 1 吨甲醇，煤头二氧化碳排放约为 3.1 吨，天然气头约为 0.58 吨。2020 年合成氨、甲醇行业二氧化碳总的排放量分别为 2.19 亿吨和 1.96 亿吨，占煤化工行业排放总量的 19.9% 和 17.8%，二者合计二氧化碳排放量占到煤化工行业排放总量的约 38%。

73 现代煤化工的生产过程特点

(1) 物质频繁变化、压力高低变化、温度高低变化。实现对化学反应外部压力、转化率以及吸热反应温度的有效控制是提升化学反应的重要途径。因此，在化学反应前，应对化学反应的外部压力进行科学计算，明确输送物质的数量和

反应物质的耗能，确保化学反应能够正常进行。同时，应着力提升化学反应的转化率，降低化学副反应的发生概率，在化学反应过程中合理使用催化剂，实现对能源消耗的有效控制。

(2) 大量热交换。应严格控制吸热反应的温度，提升设备的热传导性，防止因温度过高导致的能耗增加，为化学反应顺利进行奠定良好的前提条件。

(3) 大量动力驱动（蒸汽驱、电驱）。降低能源消耗是提升化工企业生产效益的最佳途径。因此，化工企业应完善基础设施建设，引进能源消耗量较低的电机系统、加热炉、空冷器和分馏塔，并在此基础上进行优化设计，使用电机拖动系统带动变频节能系统，完善变频方案设计，促使电机能够高效运行。

(4) “三废”产生。煤化工生产的同时伴随产生废水、废气和废渣，直接影响我国的资源水体、生态环境和居民生活。近年来，随着环保理念的深入人心，该产业的可持续发展道路引起了人们的重视。因而，“三废”的有效处理以及回收利用对于产业的发展和生态环境有着重要的意义。废水：追求零排放与废水回用并举、探索高浓盐水提取工业盐。废气：回收硫磺产工业级浓硫酸和大量蒸汽、微藻生物固碳技术、CERI 工艺捕集二氧化碳。废渣：细渣零非放提碳及造绿技术、粉煤灰提取氧化铝、粉煤灰用于水泥生产和建筑材料。

(5) CO₂ 产生。煤化工生产过程以化学反应为基础，存在大量物质变化和能量交换，工艺流程复杂。因此产生了大量的二氧化碳，并且其浓度高达 95% 以上，可大幅降低捕集成本，有利于开展二氧化碳捕集、输送与封存示范。

74 现代煤化工行业清洁低碳转型路径

1. 整合生产路线。科学合理地整合能够有效地提高煤化工产业的发展效能。在实际整合过程中，需要对煤化工产业链进行分析，并与相关产业进行有效整合，实现煤化工产业的多产业共生路线，从而降低煤化工产业经营成本、增加资源利用效率、提高经济效益。一方面，煤炭是煤化工产业的主要原料，包含了碳、氢等多种元素，具有复杂的化学结构，不同的煤炭具有不同的用途和化工产物，如果将其全部作为燃料使用，会导致煤炭资源的浪费，并且还会增加碳排放。因此，需要对煤炭资源进行科学合理的分类划分，实现煤炭资源分级利用。另一方面。通过开展高能效多联产，对各个生产工艺进行有效联合，促进煤炭资源的整体利用效率。

2. 多产业结合发展。联合生产的模式可以促进资源的循环利用，合理解决能源供给问题，目前主要有以下两个发展路线。一是煤化工产业与石化产业联合，

原油的重质化、劣质化是石化工业生产面临的一个主要问题，解决这一问题最有效的方法是通过加氢的方式分离油中的杂质、改进其质量。但我国天然气匮乏，这种方法并不适用；而煤化工产业在生产过程中常常会分解出氢气，这对石化生产意义重大，因此，煤化工产业与石化产业的联合是极具实践意义的生产方式。二是煤化工产业与建材、冶金行业联合。我国缺少能够生产出焦炭的煤炭资源，这对工业生产造成了一定阻碍。研究发现，COREX 技术（奥钢联开发的非焦炼铁技术）可以生产出高质量的富含焦炭的煤种，这种技术在应用过程中需要使用很多的铁，其中产生的残渣可用于冶金与建材生产，生成的一氧化碳可作为煤化工或发电企业的原料进行甲醇、氢气等的生产。

3. 优化生产工艺。优化升级煤化工产业的当务之急是做好现有煤化工装置上的节能增效、系统优化和综合利用的技术措施，以现代煤化工带动传统煤化工升级，淘汰或迭代落后产能；延伸煤化工产品链，增加特种燃料、高附加值产品和新材料生产，逐步由大型化、集约化、产品多元化和高值化方向发展，进一步降低能耗、煤耗和水耗，提高整体能量利用效率和碳的利用率，从而实现二氧化碳相对减排，降低单位 GDP 的二氧化碳排放强度。

4. 贯彻落实低碳理念与循环经济。煤化工产业在生产过程中，首先要加强对低碳理念和循环经济的解读，促使煤化工产业将资金和资源进行高效率的利用，并降低对环境的影响；其次要制定完善的低碳战略，并加大战略的执行力度，最大限度地降低二氧化碳排放量，实现友好型生产；最后要加强煤化工产业相关从业人员对低碳理念的认可，加大技术研究，合理优化生产工艺，提高二氧化碳处理技术，用实际行动践行可持续发展理念。

75 现代煤化工行业节能减排技术路径

(1) 绿色技术工艺。加快大型先进煤气化、半/全废锅流程气化、合成气联产联供、高效合成气净化、高效甲醇合成、节能型甲醇精馏、新一代甲醇制烯烃、高效草酸酯合成及乙二醇加氢等技术开发应用。推动一氧化碳等温变换技术应用。

(2) 重大节能装备。加快高效煤气化炉、合成反应器、高效精馏系统、智能控制系统、高效降膜蒸发技术等装备研发应用。采用高效压缩机、变压器等高效节能设备进行设备更新改造。

(3) 能量系统优化。采用热泵、热夹点、热联合等技术，优化全厂热能供需匹配，实现能量梯级利用。

(4) 余热余压利用。根据工艺余热品位的不同，在满足工艺装置要求的前提下，分别用于副产蒸汽、加热锅炉给水或预热脱盐水和补充水、有机朗肯循环发电，使能量供需和品位相匹配。

(5) 公辅设施改造。根据适用场合选用各种新型、高效、低压降换热器，提高换热效率。选用高效机泵和高效节能电机，提高设备效率

(6) 废物综合利用。依托项目周边二氧化碳利用和封存条件，因地制宜开展变换等重点工艺环节高浓度二氧化碳捕集、利用及封存试点。推动二氧化碳生产甲醇、可降解塑料、碳酸二甲酯等产品。加强灰、渣资源化综合利用。

(7) 全过程精细化管控。强化现有工艺和设备运行维护，加强煤化工企业全过程精细化管控，减少非计划启停车，确保连续稳定高效运行。

76 合成氨行业节能减碳技术路径

(1) 绿色技术工艺。优化合成氨原料结构，增加绿氢原料比例。选择大型化空分技术和先进流程，配套先进控制系统，降低动力能耗。加大可再生能源生产氨技术研究，降低合成氨生产过程碳排放。

(2) 重大节能装备。提高传质传热和能量转换效率，提高一氧化碳变换，用等温变换炉取代绝热变换炉。涂刷反辐射和吸热涂料，提高一段炉的热利用率。采用大型高效压缩机，如空分空压机及增压机、合成气压缩机等，采用蒸汽透平直接驱动，推广采用电驱动，提高压缩效率，避免能量转换损失。

(3) 能量系统优化。优化气化炉设计，增设高温煤气余热废热锅炉副产蒸汽系统。优化二氧化碳气提尿素工艺设计，增设中压系统。

(4) 余热余压利用。在满足工艺装置要求的前提下，根据工艺余热品位不同，分别用于副产蒸汽、加热锅炉给水或预热脱盐水和补充水、有机朗肯循环发电，实现能量供需和品位相匹配。

(5) 公辅设施改造。根据适用场合选用各种新型、高效、低压降换热器，提高换热效率。选用高效机泵和高效节能电机，提高设备效率。采用性能好的隔热、保冷材料加强设备和管道保温。

77 煤化工行业能效标杆水平和基准水平

为指导各地科学有序做好高耗能行业节能降碳技术改造，有效遏制“两高”项目盲目发展，国家发展改革委、工业和信息化部、生态环境部、国家市场监督管理总局和国家能源局联合印发了《关于发布〈高耗能行业重点领域能效标杆水

平和基准水平（2021年版）的通知》，参考国内外生产企业先进能效水平和现行能耗限额标准，根据行业实际、发展预期、生产装置整体能效水平等，明确了炼铁、乙烯等25个重点领域的能效标杆水平和基准水平。其中对煤化工行业的单位产品综合能耗做出了以下要求：

煤制焦炭领域：顶装焦炉能效标杆水平为110千克标准煤/吨，基准水平为135千克标准煤/吨；捣固焦炉能效标杆水平为110千克标准煤/吨，基准水平为140千克标准煤/吨。

煤制甲醇领域：褐煤能效标杆水平为1550千克标准煤/吨，基准水平为2000千克标准煤/吨；烟煤能效标杆水平为1400千克标准煤/吨，基准水平为1800千克标准煤/吨；无烟煤能效标杆水平为1250千克标准煤/吨，基准水平为1600千克标准煤/吨。

煤制烯烃领域：乙烯和丙烯能效标杆水平为2800千克标准煤/吨，基准水平为3300千克标准煤/吨。

煤制乙二醇领域：合成气法能效标杆水平为1000千克标准煤/吨，基准水平为1350千克标准煤/吨。

78 什么是绿电绿氢与煤化工耦合

现代煤化工是指以煤为原料，采用先进技术和加工手段生产替代石化产品和清洁燃料的产业，涉及煤制油、煤制天然气、低阶煤分质利用、煤制化学品以及多种产品联产等领域。相对传统煤化工，现代煤化工具有装置规模大、技术含量高、能耗低、环境友好、产品市场潜力大等特点，且煤炭是中国的主体能源和重要的原料，适度发展现代煤化工是中国推进煤炭清洁高效利用和保障国家能源安全的重要举措。绿电指的是在生产电力的过程中二氧化碳排放量为零或趋近于零，因相较于其他方式（如火力发电）所生产之电力，对于环境冲击影响较低。绿电的主要来源为太阳能、风力、生物质能、地热等，中国主要以太阳能及风力为主。目前国内外关于绿氢尚无统一标准，根据中国氢能联盟提出的《低碳氢、清洁氢与可再生能源氢的标准与评价》，在单位氢气碳排放量方面，低碳氢的阈值为 $14.51\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$ ，清洁氢和可再生氢的阈值为 $4.9\text{kgCO}_2\text{e/kgH}_2$ ，可再生氢同时要求制氢能源为可再生能源。

绿电绿氢和煤化工的耦合，实际上是一种产业模式的创新和再升级，它的要点是用可再生能源产生的绿电来电解水制氢，然后氢气进一步作为化工的生产原料，用于降低一氧化碳、二氧化碳变换的负荷，从而降低二氧化碳的排放。煤化

工和绿电绿氢耦合发展能简化煤化工生产流程,理论上可将原料煤中碳都转化到甲醇等后续产品中,实现煤化工源头大幅减碳,同时又能为绿电绿氢发展提供巨大应用场景,是煤化工企业和氢能生产企业生存和发展的需要,也是保障中国能源安全和双碳目标如期实现的重要探索路径,研究具有重大的战略和现实意义。

79 气化渣的综合利用方式有哪些

(1) 路面材料。路面结构由面层、基层、垫层组成。面层材料类型主要为水泥混凝土、沥青混凝土、路拌沥青碎石等。基层分为无机结合料稳定基层和砾石基层,我国主要采用无机结合料稳定类半刚性基层。目前气化渣在路面材料的应用研究主要是作为混凝土结合料和细集料应用于面层及基层。

(2) 制备免烧制品。免烧制品是以粉煤灰、煤矸石、工业废渣、天然砂等为主要原料,不经高温烧结,由水合反应制作的硅酸盐制品,包括免烧砖、砌块、墙板、骨料等。气化渣免烧制品技术是将气化渣溶于生石灰提供的碱性环境中,激发 SiO_2 、 Al_2O_3 潜在活性。在 OH^- 的作用下,气化渣颗粒表面的玻璃态结构解体,生成水化硅酸钙和水化硅酸铝等胶凝产物。

(3) 制备烧结砖和陶粒。烧结砖和陶粒是利用黏土、页岩、煤矸石、粉煤灰、污泥等无机材料经混料、成型、烧结而成,主要用于建筑物承重部位。制备烧结砖及陶粒是利用气化渣中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等活性成分,在 $1100\sim 1200^\circ\text{C}$ 高温环境下,使其形成钙长石、莫来石、石英、方石英等骨架及液相成分,赋予制品强度。由于气化渣中残碳和 Fe_2O_3 在烧结过程中可释放气体,形成气孔,降低制品的密度,还可以充分利用气化炉渣中残碳热量。与其他原料相比具有一定的膨胀性与降低能耗的作用。

(4) 循环流化床掺烧。残碳含量高且粒径在合适范围内的气化炉渣可以考虑循环流化床锅炉掺烧。目前,部分企业利用该技术进行气化炉渣处置,气化细渣含碳量高于粗渣,更适合作为掺烧原料。湿法排放粗渣、细渣含水率普遍达到 $40\%\sim 60\%$,即使是含碳较高的细渣,残碳质量分数通常在 $10\%\sim 30\%$,收到基发热量低于锅炉入料最低热值 14.64MJ/kg ,作为燃料掺烧,其环境效益大于经济效益。

(5) 在废水处理中的应用。气化炉渣在废水处理中的应用可以分为 2 类:①是以气化炉渣为原料,经过烧结、化学法制成硅基多孔材料进行吸附;②是直接利用气化炉渣中多孔残碳颗粒进行吸附。

80 煤化工原料用能的管理要求

(1) 原料用能基本定义。原料用能指用作原材料的能源消费，即能源产品不作为燃料、动力使用，而作为生产非能源产品的原料、材料使用。

(2) 原料用能具体范畴。用于生产非能源用途的烯烃、芳烃、炔烃、醇类、合成氨等产品的煤炭、石油、天然气及其制品等，属于原料用能范畴；若用作燃料、动力使用，不属于原料用能范畴。

第九篇 散煤篇

81 什么是散煤

散煤是相对于工业（发电、冶金、化工、医药、建材、供热等）用途燃煤而言的，主要是指小锅炉、家庭取暖、餐饮用煤等民用煤。从使用对象分类，散煤主要包括民用散煤、小型锅炉用散煤以及小型窑炉用散煤三类。

82 散煤的危害有哪些

散煤在燃烧过程中要释放出二氧化硫、一氧化碳、烟尘、放射性飘尘、氮氧化物、二氧化碳等。大气污染物的危害是多方面的，对人体而言，主要表现是呼吸道疾病与生理机能障碍，以及眼鼻等粘膜组织受到刺激而患病。对农作物而言，当污染物浓度很高时，会对农作物产生急性危害，使农作物叶表面产生伤斑，或者直接使叶枯萎脱落；当污染物浓度不高时，会对农作物产生慢性危害，使农作物叶片褪绿。

83 为什么要治理散煤

散煤的使用造成了很多问题，根据北京大学有关研究，民用散煤消耗量仅占中国能源消耗总量的 2.9%，但细颗粒物、二氧化硫和氮氧化物的排放量分别占 29%、11%和 2.2%。

治理散煤有三方面好处：

一是有利于促进我国乡村振兴战略的实现。我国政府高度重视农业、农村、农民问题以及生态文明建设，加大散煤治理可以加速“三农”相关政策落地，有助于提高居民生活水平，缩小城乡差距。

二是有利于改善空气质量和健康状况。由于缺乏污染治理设施，散煤的二氧化硫、氮氧化物和细颗粒物排放为同量电厂的 7 倍、2 倍和 6.6 倍。中国农村地区 34% 的人体健康损害与散煤使用直接相关。

三是有利于协同控制二氧化碳排放。散煤作为化石能源，燃烧产生大量的二氧化碳。散煤的淘汰与碳达峰、碳中和发展目标一致。

84 高污染燃料禁燃区的划定及其法律依据

高污染燃料禁燃区是政府划定的禁止销售和使用高污染燃料的区域，该区域内的单位和个人应在政府规定的期限内停止燃用高污染燃料，改用电、天然气、液化石油气或者其他清洁能源。

85 中国散煤使用及治理现状

根据《中国散煤综合治理报告 2022》显示，2021 年，我国散煤消费约 3.1 亿吨，相比 2015 年减少了 4.4 亿吨，散煤消费量累积下降了 58.7%；其中工业散煤治理贡献巨大，目前重点区域已经基本完成工业小锅炉的散煤治理，工业小窑炉的落后产能淘汰、清洁能源替代和改造升级等工作取得了积极成效。

86 中国散煤治理成效

第一，工业小锅炉结构优化明显。基于全国排污许可证管理信息平台获取的燃煤工业锅炉数据显示，2021 年全国燃煤工业锅炉总容量约 56 万蒸吨，煤耗量约 2.5 亿吨，其中 35t/h 以下燃煤小锅炉总容量占比从 2015 年的 48% 下降至 19%。2021 年，全国 35t/h 以下燃煤小锅炉的总容量和煤耗量分别较 2017 年下降 39.2% 和 42.8%。

第二，工业小窑炉散煤大幅削减。以建材行业的小窑炉治理来看，2021 年，建材工业小窑炉散烧煤下降超过 70%，主要来自砖瓦行业，其中淘汰落后产能和提升改造是重要举措。根据中国建筑材料联合会发布的《中国建筑材料工业碳排放报告》，2020 年，砖瓦企业已锐减到 2.1 万家，砖产量只有高峰时期的 60%。

第三，北方清洁取暖超额完成目标。截至 2021 年底，试点城市累计完成清洁取暖改造超过 3500 万户，其中，清洁取暖改造以县城及农村为主，改造规模占比 76%，城区改造规模占比 24%。截至 2021 年底，我国北方地区清洁取暖面积约 156 亿平方米，清洁取暖率达到 73.6%。相比 2016 年，2021 年北方地区清洁取暖率提高了 35.4 个百分点，超预期完成了《规划》中“2021 年北方地区清洁取暖率达到 70%”的目标任务。

87 民用散煤质量要求

民用散煤要用优质煤源，应优先选用低挥发分、低灰、低硫的优质煤炭和洁净型煤，控制其指标，对其质量进行规范。在《商品煤 民用散煤 GB34169-2017》中明确指出[6]，民用散煤技术要求：挥发分 $\leq 37\%$ 、全硫 $\leq 1\%$ 、灰分 $\leq 25\%$ 、磷含量 $\leq 0.1\%$ 、氯含量 $\leq 0.15\%$ 、砷含量 $\leq 20 \mu\text{g/g}$ 、汞含量 $\leq 0.25 \mu\text{g/g}$ 、氟含量 $\leq 200 \mu\text{g/g}$ 。

88 农村清洁取暖的主要技术方式

清洁取暖是指利用天然气、电、地热、生物质、太阳能、工业余热、清洁化

燃煤（超低排放）、核能等清洁化能源，通过高效用能系统实现低排放、低能耗的取暖方式。

北方地区的清洁取暖改造仍然以“煤改电”和“煤改气”为主，但技术应用多元化的格局已经初步形成。目前的清洁取暖技术包括燃气壁挂炉、空气源热泵热水机、空气源热泵热风机、蓄热式电暖器、直热式电暖器、太阳能+电辅热、生物质颗粒+专用炉具等分户取暖的主要方式，也有生物质集中供暖、集中式电锅炉、燃气集中供热、热电联产、工业余热供暖、燃煤锅炉集中供热等集中取暖方式。

89 散煤治理存在的问题及挑战

1. 部门、地区横纵行动与整体联动配合的矛盾。目前，参与散煤治理的部门为财政部、生态环境部、住房城乡建设部等多个部门，任务涉及散煤应用领域摸底调查、能源结构优化、补贴政策支持以及执行效果监管等。不同部门的政策出发点和着眼点不同，往往只关注本部门任务，存在职能分散、部门之间缺乏协作、工作推进难度大等问题。

2. 技术标准体系与更新实施需求的矛盾。国内尚缺乏有关农村清洁能源取暖所涉及的各方面的系统标准规范。虽然民用煤质和煤质适用标识、民用炉具产品以及民用煤燃烧排放测试和监测方法等已有相关标准出台，或者在国家 and 地方有关政策文件中已经提及，但是尚缺乏系统设计与更新，缺乏相应的监管与验收机制。

3. 散煤监管难度大与散煤复烧风险的矛盾。农村散煤治理涉及千家万户，而较低的煤炭价格是影响群众选择的重要因素。受散煤入境渠道多、销售网点多、交易跨区域流动性高、清洁能源价格高和采暖季供给不足、农民对散煤治理认识不足、监管人员力量不足等方面因素的制约，目前在一些农村地区劣质煤供应交易依然活跃，监管难度较大。

90 工业散煤治理的主要措施有哪些

1. 继续深入开展锅炉综合治理。依法依规加大燃煤小锅炉的淘汰力度，利用以大代小、清洁能源替代等方式优化工业锅炉保有量结构。结合全国污染源普查工作，系统建立工业锅炉管理台账，加强工业锅炉的系统化监管，强化对污染治理设施的运行监督，持续推进燃煤锅炉超低排放改造。

2. 开展区域管理。对于城市及近郊区，燃煤小锅炉的治理应以关停和清洁燃

料替代为主要手段；对于非城远郊区，可进行燃煤锅炉大型化或适当发展一些其他燃料锅炉。此外，根据实际情况建立健全锅炉淘汰及拆改台账，明确逐台锅炉的淘汰去向，做到可核查、可追溯。

3. 应进一步加大排查力度。一方面，严格源头控制，选用符合国家、行业、地方相关政策、标准要求的低硫分、低灰分的煤，采用低氮燃烧器等污染预防技术，降低因煤炭燃烧过程产生的二氧化硫、颗粒物、氮氧化物等污染物的浓度；另一方面，通过“清洁能源替代”和“污控措施升级改造”等方式削减燃煤小锅炉散煤用量、提升污染控制措施安装比例及治理效果，深度挖掘燃煤小锅炉减排潜力，并根据各地实际情况因地制宜地制定燃煤工业锅炉大气污染防治相关政策，推进燃煤工业小锅炉的减排。

第十篇 案例篇

91 美国佩特拉诺瓦碳捕集封存商业项目

美国佩特拉诺瓦 (Petra Nova) 项目是全球最大的燃煤电厂烟气二氧化碳捕集与封存商业项目，其建设包括四个内容：一是建设 CCS 装置；二是新建 7.8 万 kW 的天然气机组，作为 CCS 装置的电力与蒸汽来源；三是建设一条长 130 公里、直径 12 英寸的二氧化碳输送管道；四是建设油田相关的基础设施。佩特拉诺瓦项目的二氧化碳捕集装置采用 KM-CDR (Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Removal) 工艺和相应的“KS-1”溶剂。跟其它溶剂吸收法一样，烟气进入主吸收塔之前需要通过预处理降温并进一步脱除二氧化硫。KS-1 溶剂可以脱除进入吸收塔的烟气中 90% 以上的二氧化碳，从解析塔释放出来的二氧化碳纯度高达 99.9%。捕集所得的二氧化碳产品气被压缩至 13MPa 后，通过管道运输至西部牧场油田，注入地下用于强化采油，返回地面的二氧化碳分离后被再次注入地下。

项目新建的 7.8 万 kW 天然气机组，优先为 CSS 设施提供 4.5 万 kW 的电力，剩余电量则一并上网销售。按设计二氧化碳捕集量 199 吨/小时计算，单位捕集量的预留供电负荷为 226kWh/t CO₂。2017 年 10 月，佩特拉诺瓦 CCS 项目在启动运行 10 个月后，实现了累计捕集二氧化碳 100 万吨。

92 加拿大边界大坝百万吨级燃烧后二氧化碳捕集封存项目

边界大坝是全球首个燃煤电厂百万吨级燃烧后二氧化碳捕集与封存项目。边界大坝 CCS 项目仍然采用主流的溶剂吸收法。其特别之处在于前端 SO₂ 也采用相同的吸收工艺，因此被称为 SO₂-CO₂ 联合捕集工艺。SO₂ 吸收段之前设置有烟气间接换热和直接接触降温环节。SO₂ 吸收塔采用陶瓷鳞片和碳砖防腐的水泥填料塔，长 11 米，宽 5.5 米，高 31 米。捕集所得的 SO₂ 被送至化学车间制备硫酸。CO₂ 吸收塔也采用陶瓷鳞片防腐的水泥填料塔，长 11 米，宽 11 米，高 54 米。CO₂ 解析塔则采用 304 不锈钢填料塔，直径 8 米，高 43 米。捕集所得的 CO₂ 经脱水后纯度达到 99%，被一个功率为 1.45 万 kW 的压缩机压缩至 17MPa 的超临界状态。这些超临界二氧化碳再通过管道被送往两个地方：一是约 70 公里外的 Weyburn 油田，注入 1700 米深的油井用于强化采油 (EOR)；二是附近 2 公里远的 Aquistore 碳封存研究基地，注入 3400 米深的咸水层进行永久地质封存。

边界大坝 CCS 项目自 2014 年底运行以来，已累计捕集二氧化碳 415 万吨。其中，2021 年上半年捕集 34 万吨，2020 年捕集 73 万吨，2019 年捕集 62 万吨，2018 年捕集 63 万吨。该项目于 2015、2017 和 2019 年分别开展了三次计划性系

统维护。这些维护升级使得 CCS 装置的可用率得以较大改善，目前保持在 90%左右。

93 阿瑟港 (Port Arthur) 碳捕集项目

2009 年空气产品公司决定采用真空变压吸附 (VSA) 工艺取代溶剂吸收工艺，对制氢装置合成气中的二氧化碳进行捕集。该项目中，两套制氢装置各建设一套 VSA 系统。每套 VSA 系统包括八个装填有高比表面积吸附剂的固定床吸附塔。系统进料合成气压力为 2.76MPa，二氧化碳摩尔含量为 15.0%-16.4%。吸附脱碳后的氢气进入原有的变压吸附 (PSA) 装置进一步纯化。整个 VSA 捕集过程采用高压吸附、真空脱附工艺，包括吸附、减压、吹扫、弛放、真空、升压等多个步骤。中间步骤产生的吹扫气加压后进行二次吸附，以提高系统的二氧化碳回收率。脱附后的二氧化碳浓度高达 98%以上，经由一个耦合了三甘醇干燥系统、功率为 12000kW 的八级离心二氧化碳压缩机，压缩至 15.17MPa 后，再通过一条长度为 21 公里、直径为 8 英寸的新建管线，连接至丹博里公司直径 24 英寸的二氧化碳管道，送至西黑斯廷斯油田用于三次强化采油。

该项目运行稳定。在 2013 年 5 月进行的性能测试中，二氧化碳捕集能力达到了设计容量的 104%-105%，二氧化碳回收率超过 90%。2014 年 4 月，阿瑟港 CCS 项目实现二氧化碳捕集 92.5 万吨。2017 年 8 月，捕集量超过 370 万吨。

94 国电泰州电厂百万千瓦超超临界二次再热示范工程项目

我国自主设计、制造的百万千瓦超超临界二次再热燃煤发电机组 2015 年 9 月 25 日在江苏泰州建成，这是世界上首次将二次再热技术应用到百万千瓦超临界燃煤发电机组，也是我国火电技术在高参数大容量机组方面彻底摆脱国外知识产权束缚的一次重大突破。

该工程由中国国电集团公司、中国电力工程顾问集团、上海电气电站集团三方联合攻关，机组脱硫、脱硝装置同步投运，具有机组参数先进稳妥、机组效率世界领先、环保排放指标最优等特点。该工程集中展现了我国多年来燃煤技术发展水平，成功打造了更高效的清洁燃烧火电机组。设计发电效率 47.92%，高于当今国内外最高水平；发电煤耗 256.2 克/千瓦时，比当今世界最高水平低 6 克/千瓦时；烟尘、二氧化碳和氮氧化物排放浓度分别为 4.58mg/Nm₃、20mg/Nm₃、36mg/Nm₃，实现超低排放，代表了世界领先发电技术。

95 陕煤集团榆林化学有限责任公司 1500 万吨/年煤炭分质清洁高效转化示范项目

榆林化学“煤炭分质利用制化工新材料示范项目”是目前在建的全球最大煤化工项目，是目前煤炭加工能力最大、产业融合度最高、技术集成度最复杂、产业链最贴近终端市场的煤炭转化示范项目。项目分为两期四个阶段建设，共包括 27 个工艺装置及配套的公用工程，主要包括 1500 万吨煤炭中低温热解、560 万吨甲醇、180 万吨乙二醇、200 万吨 MT0 以及以此为中间原料的下游产品。一期一阶段工程计划于 2021 年 6 月投运，全部工程将于 2025 年底前建成投运。项目一期工程投资约 700 亿元，建设 180 万吨/年乙二醇和 200 万吨/年烯烃，同时生产大量烯烃下游精细化工产品；二期工程以煤热解为主，主要包含 120 万吨/年（以处理原煤量干基计）粉煤热解装置、3.5 万吨/年催化剂制备装置、50 万吨/年悬浮床加氢装置、供氢溶剂及轻油联合加氢装置（包括 27 万吨/年供氢溶剂，40 万吨/年加氢提质装置）、气体脱硫装置，42 万吨/年工艺污水处理装置、煤热解罐区及配套设施。

96 庞庞塔煤矿井下 5G 专网建设项目

山西省吕梁市庞庞塔煤矿进行的智能矿山建设项目于 2020 年 7 月启动，10 月中旬一期验收。在组网方面，该项目构建了井下 5G+万兆工业环网于一体的高质量工业互联网，在井下南北区建设 10 个井下环网节点，部署 144 个基站，覆盖超 100km 巷道、48 个场景，完成煤矿南区和北区井下单节点 5 万兆、环网总带宽 40 万兆级别、采用 5G 切片技术的具备物理通道隔离的矿用 IP-RAN 工业环网以及 5G 基站的覆盖工作，并以柔性抗灾光缆完成总体环网铺设，实现了一张网管理。同时，利用 5G 切片技术实现不同系统数据在一张网中的稳定专网传输。井下主干网既可满足井下移动通信的需要，同时也可提供井下工业环网所需的通信协议接口。基于已通过防爆认证的多模基站设备实现煤矿 4G、5G、NB-IoT 三种网络的有效覆盖，常规通信服务区域以 4G 覆盖为主，需要大带宽、低时延应用的工作面、掘进面等场所则以 5G 信号覆盖，为推进智能矿山建设奠定了重要的网络基础。

在应用方面，基于 5G+高质量网络，叠加边缘计算平台，对煤矿各系统进行智能化建设，包括 AI 智能皮带感知、NB+全面感知、多媒体通信调度、高清视频采集、智能视频分析、远程控制等多项智能化应用，实现煤矿人、机、物、环等

全生产要素的智能互联管理，形成井下通信、物资管理、安全监测、集中控制、智能生产工具等 N 种场景的应用解决方案。

97 黄白茨煤矿连采连充式胶结充填采煤技术案例

黄白茨煤矿隶属于国能乌海能源有限责任公司，为了回收 12 号煤南盘区主要大巷之间的保护煤柱，采用连采连充采煤技术进行遗留煤柱置换。充填开采区域煤层平均厚度为 4.58 m，含多层夹矸，结构复杂；倾角为 $5^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 的近水平煤层，埋深约为 176 m，直接顶为泥岩，基本顶为粉砂岩，顶板较稳定。连采连充工作面采用“隔一采一、两步式回采”的充填开采模式。充填材料为矸石、粉煤灰、水泥和矿井水。为了解决近水平煤层密实充填问题，提高充填效率，同时建有充填料浆井下混合和地面混合两套输送系统，在支巷开始充填阶段采用井下混合输送系统；在收尾阶段采用地面混合输送系统，为了增加料浆的流动性，保证接顶密实，收尾阶段的充填材料以水泥和粉煤灰为主。一步回采时，支巷顶板开口段采用锚杆、锚索和金属网联合支护，开口段后主要采用锚杆和金属网支护；煤帮采用玻璃钢锚杆支护。充填体养护龄期不小于 14 d，方可进行二步回采；二步回采时，只对顶板支护，两帮充填体不支护。从井下充填开采过程来看，充填体能够接实顶板，支巷围岩和充填体未发生失稳破坏，实现了对煤柱的高效置换，煤柱的回收率达 95% 以上。

98 沃能化工焦炉煤气制备乙二醇项目

沃能化工是晋南钢铁研发的全球钢铁行业首套利用焦炉煤气和转炉煤气生产聚酯级乙二醇产品的高效、高价值、绿色减碳项目。该项目充分利用转炉煤气碳多氢少、焦炉煤气碳少氢多的互补优势，采用先进的化工分离、合成、精馏等技术生产而成的高端化工产品乙二醇和清洁能源 LNG（液化天然气）。

按该项目年产 30 万吨乙二醇、15 万吨 LNG（液化天然气）计算，晋南钢铁每年可减少钢铁、焦化上游产业二氧化碳排放量 60 万吨，减少氮氧化物排放量 660 吨。沃能化工每生产 1 吨乙二醇，同时副产 0.55 吨 LNG，约消耗 3200 标准立方米/小时焦炉气和 1500 标准立方米/小时转炉煤气。若是用于发电，则这部分气体可实现销售收入 2847.4 元，创效 683.4 元，每立方米气体产生的经济效益折合为 0.15 元。若是用于生产乙二醇，按照乙二醇市场平均价格 4500 元/吨，LNG 市场平均价格 2800 元/吨计算这部分气体可以实现销售收入 6040 元，效益 1500 元。每立方米气体产生的经济效益折合为 0.32 元，经济效益及市场优势明

显。在节能方面，沃能化工采用焦炉煤气和转炉煤气进行分质清洁利用生产乙二醇和 LNG（液化天然气），能量利用效率高出生产甲醇和合成氨 20%~25%，较发电效率高 2 倍及以上。本装置乙二醇的单位能耗折算标煤为 1040.73 公斤，优于现阶段其他工艺的行业先进值 1045 公斤标煤。

99 水煤浆气化节能技术应用案例

水煤浆雾化后与氧气在高温高压环境下发生复杂的物理和化学反应，生成以一氧化碳和氢气为主要成分的粗合成气。燃烧室衬里采用垂直悬挂自然循环膜式水冷壁，利用凝渣保护原理，气化温度可以提高至 1700℃。在燃烧室下部设置辐射废锅，通过独特的高效传热辐射式受热面结构回收粗合成气显热，有效避免结渣积灰问题，使气化炉在生产合成气的同时联产高品质蒸气，提高了能量利用效率。该技术适用于电力行业煤气化领域，已进行产业化应用，在山西阳煤丰喜肥业（集团）临猗分公司气化升级改造案例中，将一台原水煤浆耐火砖激冷流程气化炉改造为一台水煤浆水冷壁废锅流程气化炉，改造后，气化炉连续运行周期加长、产能提高，且无需配备备用炉，开车燃料气消耗降低，开车阶段抽引蒸汽消耗为 0，年节省标准煤约 2 万吨标准煤。预计未来 5 年，该技术推广应用比例可达到 45%，可形成年节能 23 万吨标准煤，年减排二氧化碳 62.1 万吨。

100 国内首套二氧化碳加氢制绿色低碳甲醇联产 LNG 项目

2022 年 9 月 6 日，安阳顺利环保科技有限公司 CO₂加氢制绿色低碳甲醇联产 LNG 项目一次开车成功，产出高品质的 LNG 产品。LNG 产品的顺利产出，标志着焦炉煤气制 LNG 整体正式投运，该项目是中国第一套 CO₂加氢制甲醇工业化生产装置，并且是目前世界上规模最大的 CO₂加氢制甲醇生产装置，对促进该工艺技术装置在我国的推广应用具有重大示范效应，对推动我国探索发展新的碳减排技术及大力发展“甲醇经济”具有重要借鉴意义。项目采用冰岛碳循环利用公司（CRI）专有的 CO₂加氢制甲醇技术（ETL Process CRI-MFE），以河南顺成集团有限公司产生的焦炉煤气及捕集的 CO₂作为原料，可综合利用焦炉煤气 3.6 亿 Nm³/年，生产甲醇 11 万吨/年和 LNG7 万吨/年，实现销售收入 5.6 亿元/年；通过合成甲醇，并减少 CO₂ 排放 0.44 亿 Nm³/年，直接减排 CO₂ 约 16 万吨/年，相当于增加森林种植面积 16 万亩，折合 106 平方公里（间接减排 60 万吨 CO₂，相当于增加森林面积 60 万亩，折合 400 平方公里），具有良好的经济效益和社会效益，同时对我国减少碳排放、实现碳中和意义重大。

参考文献

- [1] 若泽·戈尔登贝格,《能源》[M]. 武汉: 华中科技大学出版社. 2020. 8: 251.
- [2] 《BP 世界能源统计年鉴 2022》.
- [3] 陈文敏 etc. 《煤炭加工利用知识问答》[M], 北京: 化学工业出版社, 2006: 241.
- [4] <https://beyond-coal.eu/europes-coal-exit/>
- [5] 煤炭: 欧盟禁止进口俄罗斯煤炭事件点评-期货-金融界 (jrj.com.cn).
- [6] <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview/consumption>
- [7] 《BP 世界能源统计年鉴》.
- [8] 彭苏萍, 煤炭清洁低碳转型导论[M], 北京: 中国科学技术协会, 2022: 20
- [9] 谢和平 王金华 申宝宏 刘见中 姜鹏飞 周宏伟 刘虹 吴刚. 煤炭开采新理念-科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报, 2012 年 7 月.
- [10] 煤炭先进产能评价依据(暂行), 国家发改委, 2019 年 4 月.
- [11] DB14/T 2535—2022, 煤炭绿色开采技术指南[S], 山西省市场监督管理局, 2022 年 12 月.
- [12] DB61/T 1568-2022 煤矿绿色矿山建设规范[S], 陕西省市场监督管理局, 2022 年 6 月.
- [13] 绿色矿山内容及标准, https://wenku.baidu.com/view/e3428a727cd5360cba1aa8114431b90d6c8589b6.html?_wkts_=1673248693284, 2021 年 10 月.
- [14] 谢和平 任世华 吴立新. 煤炭碳中和战略与技术路径[M]. 科学出版社, 2022 年 6 月.
- [15] 王晓琳. 盘江集团煤炭矿区低碳经济模式研究[D]. 中国矿业大学, 2012 年 4 月.
- [16] GB/T23331-2020, 能源管理体系要求及使用指南[S], 国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会, 2020 年 11 月.
- [17] 齐红军 关景顺 刘成波. 煤矿瓦斯抽采技术的应用[J]. 煤炭经济, 2017 年 5 月.

- [18]瓦斯利用方式简介, https://wenku.baidu.com/view/0e855802de36a32d7375a417866fb84ae45cc30f.html?_wkt_s_=1673252247100&bdQuery=%E7%93%A6%E6%96%AF%E5%88%A9%E7%94%A8%E6%8A%80%E6%9C%AF, 2022年3月.
- [19]刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望[J]. 环境科学, 2022(004): 043.
- [20]王双明 申艳军 孙强 刘浪 师庆明 朱梦博 张波 崔世东. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间 CO₂ 地下封存途径与技术难题探索[J]. 煤炭学报, 2022年1月.
- [21]吴彩峰. 发展煤炭洗选 促进节能减排[J], 化学工程与装备, 2020年9月.
- [22]杨俊利. 发展煤矿井下选煤技术与装备的思考[J], 选煤技术, 2010年2月.
- [23]赵树彦 任利勤 张玉磊. 先进选煤技术促进煤炭清洁高效利用研究与探讨[J]. 中国煤炭, 2022年7月.
- [24]李思维 常博 刘昆轮 周晨阳 董良 段晨龙 赵跃民. 煤炭干法分选的发展与挑战[J]. 洁净煤技术, 2021年5月.
- [25]T/CCT 5-2019, 智能化选煤厂建设通用技术规范[S], 中国煤炭加工利用协会
- [26]曹亦俊 刘敏 邢耀文 李国胜 罗佳倩 桂夏辉, 煤矿井下选煤技术现状和展望[J], 采矿与安全工程学报, 2020年1月.
- [27]DB14/T 2245-2022, 煤炭洗选企业标准化管理规范[S], 山西省市场监督管理局, 2020年12月.
- [28]煤炭采选业清洁生产评价指标体系, 国家发改委, 2019年8月.
- [29]商品煤质量管理暂行办法, 国家发展和改革委员会, 2014年9月3日.
- [30]GB/T 17608-1998, 煤炭产品品种和等级划分[S], 国家质量技术监督局, 1998年12月.
- [31]赵铁锤 袁亮 葛世荣 黄盛初 翟德元. 煤矿总工程师技术手册[M], 煤炭工业出版社, 2010年8月.
- [32]特殊和稀缺煤类开发利用管理暂行规定, 国家发展和改革委员会, 2012年12月.
- [33]中华人民共和国大气污染防治法, 全国人民代表大会常务委员会, 2018

年 10 月.

[34]2022 年中国火电装机现状及容量结构分析, <https://www.askci.com/news/chanye/20220902/1339521975856.shtml>, 2022 年 9 月.

[35]2020 年中国电力行业发展现状分析 跨区送电量持续增长「组图」, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1664636103934086430&wfr=spider&for=pc>, 2020 年 4 月.

[36]中国煤炭、电力及碳市场年度报告(2021 年总结及 2022 年展望), 国家能源集团 <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309634777915425620056>, 2022 年 4 月.

[37]我国碳排放近七成源于煤炭 而电力行业煤炭消费占比过半 能源结构转型势在必行, 立鼎产业研究网 <http://www.leadingir.com/hotspot/view/3546.html>, 2022 年 8 月.

[38]关于开展全国煤电机组改造升级的通知, 国家发展改革委、国家能源局, 2021 年 10 月.

[39]陈硕翼 朱卫东 张丽 唐明生 李建福. 先进超超临界发电技术发展现状与趋势[J], 科技中国, 2018 年 9 月.

[40]骆仲泐 方梦祥 李明远 高林 胡基材 阎维平 郭绪强 施耀 曾荣树. 二氧化碳捕集 封存和利用技术[M], 北京: 中国电力出版社, 2012 年 1 月.

[41]关于发展煤电联营的指导意见, 国家发展改革委, 2016 年 4 月.

[42]关于开展“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”的指导意见(征求意见稿), 国家发展改革委 国家能源局, 2020 年 8 月.

[43]关于推动煤电新能源一体化发展的工作措施(公开征求意见稿), 贵州省能源局, 2022 年 11 月.

[44]中国炼焦行业协会. 焦化行业“十四五”发展规划纲要[R]. 2021.

[45]《碳达峰碳中和背景下山西焦化行业转型发展研究报告》, 山西科城能源环境创新研究院, 2022 年 4 月.

[46]《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022 年版)》, 国家发展改革委, (2022) 200 号.

[47]巩伦昊, 陈刚, 石姜国. 焦炉加热精准控制在焦炉生产中的应用研究[J]. 燃料与化工.

[48]申孝国. 焦炉烟道气余热回收利用[J]. 山东冶金, 2017, 39(1): 2.

- [49]中冶焦耐工程技术有限公司, 于振东, 郑文华. 现代焦化生产技术手册[M]. 冶金工业出版社, 2010.
- [50]李长喜. 焦化粗苯深加工及发展趋势[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018 (5) : 2.
- [51]《煤焦油深加工现状、新技术和发展方向》, <https://www.renrendoc.com/paper/199369491.html>, 2022年3月.
- [52]《山西省焦化行业超低排放改造实施方案》, 山西省生态环境厅, 晋环发〔2021〕17号.
- [53]闫国春, 温亮, 张华. 现代煤化工产业发展路径分析[J]. 化工进展, 2022, 41 (12) : 6201-6212.
- [54]叶茂, 朱文良, 徐庶亮等. 关于煤化工与石油化工的协调发展[J]. 中国科学院院刊, 2019 (4) : 9.
- [55]《现代煤化工行业节能降碳改造升级实施指南》的重点技术与实施要点, 石油和化学工业规划院, 2022年.
- [56]《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》, 国家发展改革委, 发改产业〔2022〕200号.
- [57]《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平(2021年版)》, 国家发展改革委, 发改产业〔2021〕1609号.
- [58]阳国军, 刘会友. 现代煤化工与绿电和绿氢耦合发展现状及展望[J]. 石油学报, 2022, 38 (4) : 6.
- [59]宋瑞领, 蓝天. 气流床煤气化炉渣特性及综合利用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021.
- [60]朱华杰. 新疆现代煤化工企业煤炭管理的问题分析及对策[J]. 化工管理, 2020 (8) : 3.
- [61]刘义. 新型煤化工企业能耗现状与节能潜力分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42 (19) : 3.
- [62]彭苏萍. 煤炭清洁低碳转型导论[M]. 中国科学技术出版社, 2022.
- [63]国家发展改革委 国家统计局关于进一步做好原料用能不纳入能源消费总量控制有关工作的通知, 发改环资〔2022〕803号.
- [64]柴发合, 薛志钢, 支国瑞等. 农村居民散煤燃烧污染综合治理对策[J]. 环境保护, 2016.

- [65] 东莞市生态环境局. 关于加强高污染燃料禁燃区环境管理的政策解读。
- [66] 刘君侠. 我国民用散煤使用现状及治理措施综述[J]. 山东化工, 2019, 48 (19) : 3.
- [67] 《中国散煤综合治理研究报告 2020》.
- [68] 《中国散煤综合治理研究报告 2022》.
- [69] 卢亚灵, 周思, 王建童等. 北方试点地区农村散煤治理的政策回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2020, 45 (3) : 6.
- [70] 《商品煤 民用散煤 GB34169-2017》.
- [71] 李茂林. 我国农村地区清洁取暖方式.
- [72] 杨富强等. “十三五”以来, 我国散煤治理成效及未来七大战略探究[J]. 中国能源, 2022.
- [73] 刘云苹, 孙宇飞. 利用生物质资源解决农村取暖问题[C]. 2017 中国燃气运营与安全研讨会论文集. 2017.