

5.3 热电厂氢气掺烧方案

5.3.1 氢气掺烧改造设计条件

福海创化工园区内有部分氢富裕，尤其是耗氢设备停运或低负荷运行时，存在排空燃烧现象。可考虑将富裕的氢在动力站锅炉中作为燃料掺烧使用。可供发电的重整氢已并入燃料气管网，据已有资料显示，最大可供应重整氢量约 36000

本图样或文件及其附加图样和/或文件的所有权属于中国东方电气集团有限公司（东方电气），未经东方电气事先书面同意，不得以任何方式进行部分或全部复制、分发和使用，且其内容不得向第三方披露或转让，违者应赔偿损失。东方电气保留设计、实用新型或专利注册的所有权利。

Nm³/h，最小可供应的重整氢流量约为 7500 Nm³/h。掺烧氢成分暂按下表考虑。
PSA 装置正常负荷生产运行，解吸气量约 11000 Nm³/h 可供发电。

表 5-4 重整氢分析数据

项目	单位	重整氢	解析氢
氢气	vol%	86~96	45~65
氧气	vol%	0.26	0.15
氮气	vol%	0.5	4.56
甲烷	vol%	1.88	11.72
C2	vol%	1.88	9.55
C3	vol%	0.92	4.80
C4	vol%	0.23	2.88
C5 及 C5+	vol%	0.21	0.86
硫化氢	μl/L	<0.5	<2
CO+CO2	μl/L	<25	<0.2%
平均分子质量	/	3.3~4.8	12~16.5
边界压力	MPa	2.85	0.03MPa
边界温度	℃	<40	<40
平衡后可供燃气发电 流量	Nm ³ /h	36000 ~7500	4000 ~11000

表 5-5 解析气分析数据（PSA 进料大于 40000 Nm³/h）

项目	氢气	氧气	氮气	甲烷	一氧 化碳	二氧 化碳	C2	C3	C4	C5 及 5+
单位	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol %	vol %	vol%
1	52.67	0.64	4.08	15.48	<0.01	<0.01	16.04	6.17	3.74	1.17
2	51.28	0.15	2.31	16.48	<0.01	<0.01	17.16	6.77	4.24	1.61
3	52.66	0.45	3.42	15.45	<0.01	<0.01	16.29	6.40	3.97	1.36
4	50.61	0.14	2.25	17.08	<0.01	<0.01	17.73	6.69	4.14	1.36

项目	氢气	氧气	氮气	甲烷	一氧化碳	二氧化碳	C2	C3	C4	C5 及 5+
单位	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%
5	50.94	0.30	2.84	15.93	<0.01	<0.01	17.82	6.70	4.10	1.38
6	51.15	0.04	1.78	16.76	<0.01	<0.01	17.87	6.79	4.13	1.49
7	49.76	0.28	2.67	16.81	<0.01	<0.01	17.68	7.31	4.18	1.31
8	52.21	0.70	4.26	15.51	<0.01	<0.01	16.41	6.16	3.69	1.06
9	47.87	0.44	3.33	17.63	<0.01	<0.01	18.18	7.39	4.16	1.01
10	54.69	0.23	2.45	15.12	<0.01	0.01	16.01	6.11	3.88	1.49
11	49.25	0.27	2.64	17.08	<0.01	<0.01	17.43	7.46	4.43	1.44
12	46.39	1.41	6.90	16.41	<0.01	<0.01	17.15	6.45	3.88	1.42
13	48.09	0.66	4.07	16.89	<0.01	<0.01	18.06	6.66	4.01	1.54
14	48.82	0.50	3.63	17.10	<0.01	<0.01	17.93	6.68	4.07	1.27
15	52.33	0.45	3.44	15.68	<0.01	<0.01	16.42	6.38	3.87	1.43
16	49.82	1.50	7.19	15.10	<0.01	<0.01	15.62	5.86	3.58	1.34
17	47.14	0.58	3.77	17.62	<0.01	<0.01	18.55	6.85	4.10	1.38
18	52.84	0.12	2.02	16.90	<0.01	<0.01	16.90	6.29	3.69	1.24
19	46.96	0.10	1.87	17.89	<0.01	<0.01	19.30	7.99	4.51	1.39
20	45.86	1.34	6.53	16.89	<0.01	<0.01	17.45	6.64	3.97	1.32
21	45.53	0.21	2.37	18.40	<0.01	<0.01	19.46	8.11	4.51	1.40
22	47.88	0.58	3.90	18.80	<0.01	<0.01	17.78	6.42	3.75	0.90
23	44.53	0.04	1.67	18.93	<0.01	<0.01	20.26	8.29	4.66	1.63
24	50.51	0.37	2.71	16.69	<0.01	<0.01	18.38	6.59	3.63	1.13
25	47.69	0.44	3.28	16.99	<0.01	<0.01	18.75	7.41	3.88	1.57
26	49.36	0.35	2.60	17.28	<0.01	<0.01	19.14	6.57	3.39	1.32
27	53.30	0.24	2.36	17.20	<0.01	<0.01	17.10	5.79	2.99	1.03
28	45.20	0.05	1.52	20.10	<0.01	<0.01	21.53	6.94	3.41	1.25

本图样或文件及其附加图样和/或文件的所有权属于中国东方电气集团有限公司（东方电气），未经东方电气事先书面同意，不得以任何方式进行部分或全部复制、分发和使用，且其内容不得向第三方披露或转让，违者应赔偿损失。东方电气保留设计、实用新型或专利注册的所有权利。

项目	氢气	氧气	氮气	甲烷	一氧化碳	二氧化碳	C2	C3	C4	C5 及 5+
单位	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%
29	45.30	0.11	1.64	19.69	<0.01	<0.01	20.94	7.51	3.60	1.22
30	47.44	0.38	2.81	19.06	<0.01	<0.01	19.45	6.42	3.32	1.11

表 5-6 解析气分析数据（PSA 低负荷进料，不控制氢纯度）

项目	氢气	氧气	氮气	甲烷	一氧化碳	二氧化碳	C2	C3	C4	C5 及 C5+
单位	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%
1	81.8	0.04	1.43	7.18	<0.01	<0.01	4.79	2.73	1.39	0.60
2	80.0	0.08	1.53	7.84	<0.01	<0.01	5.45	2.95	1.49	0.64
3	78.6	0.05	1.54	9.06	<0.01	<0.01	5.71	2.92	1.46	0.65
4	82.5	0.04	1.30	6.88	<0.01	<0.01	4.83	2.54	1.30	0.59
5	79.5	0.09	1.61	7.98	<0.01	<0.01	5.75	2.94	1.48	0.69
6	80.1	0.03	1.56	7.96	<0.01	<0.01	5.50	2.79	1.40	0.65
7	78.5	0.06	1.67	8.66	<0.01	<0.01	6.00	3.04	1.51	0.61
8	83.5	0.06	1.80	6.27	<0.01	<0.01	4.22	2.33	1.24	0.55
9	78.9	0.06	1.64	8.35	<0.01	<0.01	5.94	3.04	1.53	0.59
10	75.5	0.04	1.53	9.79	<0.01	<0.01	7.24	3.54	1.70	0.68
11	77.3	0.33	2.46	9.45	<0.01	<0.01	5.74	2.83	1.38	0.54
12	82.2	0.09	1.80	6.92	<0.01	<0.01	4.65	2.55	1.27	0.48
13	76.9	0.07	2.13	9.46	<0.01	<0.01	6.25	3.06	1.51	0.62
14	77.6	0.34	1.45	8.92	<0.01	<0.01	6.22	3.21	1.59	0.67
15	79.6	0.08	1.42	8.34	<0.01	<0.01	5.67	2.88	1.38	0.66
16	79.8	0.04	1.30	8.28	<0.01	<0.01	5.74	2.88	1.36	0.63
17	81.0	0.03	1.27	8.06	<0.01	<0.01	5.13	2.61	1.31	0.59
18	83.2	0.08	1.44	7.08	<0.01	<0.01	4.31	2.27	1.15	0.49

本图样或文件及其附加图样和/或文件的所有权属于中国东方电气集团有限公司（东方电气），未经东方电气事先书面同意，不得以任何方式进行部分或全部复制、分发和使用，且其内容不得向第三方披露或转让，违者应赔偿损失。东方电气保留设计、实用新型或专利注册的所有权利。

项目	氢气	氧气	氮气	甲烷	一氧化碳	二氧化碳	C2	C3	C4	C5 及 C5+
单位	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%	vol%
19	80.8	0.04	1.25	7.70	<0.01	<0.01	5.51	2.81	1.33	0.56
20	84.8	0.08	1.30	6.10	<0.01	<0.01	4.14	2.22	1.09	0.27
21	83.2	0.10	1.53	6.46	<0.01	<0.01	4.52	2.46	1.24	0.52
22	86.9	0.03	0.93	5.37	<0.01	<0.01	3.31	1.94	1.01	0.48
23	84.5	0.08	1.21	6.82	<0.01	<0.01	4.01	2.06	0.96	0.39
24	85.9	0.05	1.08	5.75	<0.01	<0.01	3.67	2.09	1.04	0.41
25	84.5	0.04	1.09	6.94	<0.01	<0.01	3.87	2.04	1.03	0.44
26	83.9	0.12	1.40	6.48	<0.01	<0.01	4.24	2.25	1.13	0.48
27	83.3	0.09	1.33	7.31	<0.01	<0.01	4.24	2.18	1.06	0.47
28	85.3	0.03	1.19	5.79	<0.01	<0.01	3.79	2.21	1.18	0.51
29	80.5	0.05	1.30	8.39	<0.01	<0.01	5.19	2.69	1.34	0.59
30	79.0	0.07	1.40	9.02	<0.01	<0.01	5.79	2.82	1.39	0.56

根据上述表 5-4 中重整氢分析数据，整理废氢成份作为设计燃料成分如下：

表 5-7 废氢成分及热值

气体组成	单位	设计成份	校核成份
氢气	vol%	81.30	49.27
氧气	vol%	0.08	0.44
氮气	vol%	1.46	3.21
甲烷	vol%	7.62	17.10
一氧化碳	vol%	0.00	0.1
二氧化碳	vol%	0.00	0.1
乙烷	vol%	5.05	17.96
丙烷	vol%	2.63	6.79
正丁烷	vol%	1.31	3.92
CmHn	vol%	0.55	1.11

低位发热量	MJ /m ³		
计算低位发热量	MJ /m ³	19.32	0.35
硫化氢	ppm	<0.5	<2

最大供气量按 40000Nm³/h 考虑，即总掺烧量为~11.11Nm³/s，设计燃气热值按 19.32MJ/ Nm³（该数据需业主进一步核实确认）计，则总的输入热功率为 214.67MW。每台锅炉原在 BMCR 工况下的总燃煤量为 88.6t/h，设计煤种的热值为 20.097MJ/kg，此时锅炉输入热功率为 494.6 MW。若单台炉掺烧，最大燃气量所对应的输入热功率占原锅炉全燃煤时在 BMCR 工况下总的输入热功率的比例为~43.4%，每台锅炉至少布置两层八只燃烧器。为了减小掺烧对原锅炉的影响，提高掺烧时的安全性。考虑分两台炉掺烧，每台炉掺烧负荷占 21.7%，掺烧量为 20000Nm³/h。

5.3.2 掺烧燃烧器布置

改造方案目标是在锅炉正常运行阶段以废氢替代部分煤粉进行掺烧，达到降低燃料消耗成本、提高锅炉运行经济效益的目的。考虑到氢气的爆炸浓度范围很宽，为了保证安全在锅炉点火阶段和低负荷稳燃阶段不以氢气替代点火重油对煤粉进行点火和稳燃。

燃烧器采用部分预混燃烧方式，即将废氢燃烧装置布置在原燃烧器二次风喷口中。锅炉正常运行阶段废气通过两层二次风喷口送入炉内，一层位于燃烧器区域（初步考虑 AB 层，原重油枪取消或移至 AA 层），另一层布置在 OFA 层。分两层布置主要是为了降低单只燃烧器热负荷防止局部高温区增加 NO_x 排放，一层布置于燃烧器区域主要是针对原锅炉燃烧器区域热负荷较低，燃烧温度低的情况，适当提高燃烧器区域火焰温度提高燃尽率；另一次布置在 EE 或 OFA 层主要目的是利用废氢的还原特性还原已生成的 NO_x 降低 NO_x 的排放。

原燃烧器设计二次风风率为~70%（含 SOFA 风），对应的二次风风量为~115.51 Nm³/s。原燃烧器共有 6 层二次风喷口和 3 层燃尽风喷口，每层喷口的供风量为~16.51kg/s，按设计废氢成分燃烧 10000nm³/h 所需理论空气量为 61410kg/h，即 17.06 kg/s，气枪布置在一层二次风喷口中基本可满足瓦斯气的完全燃烧要求。

本图样或文件及其附加图样和/或文件的所有权属于中国东方电气集团有限公司（东方电气），未经东方电气事先书面同意，不得以任何方式进行部分或全部复制、分发和使用，且其内容不得向第三方披露或转让，违者应赔偿损失。东方电气保留设计、实用新型或专利注册的所有权利。

将废氢气枪布置在燃烧器二次风喷口中，则原燃烧器整体结构及配风方式不变。布置气枪的二次风喷口需根据增加的气枪、高能点火装置及火焰检测器所占通风面积及瓦斯气的体积流量重新核算风速，若风速变化过大、超过合理范围，则需重新设计制造二次风喷口以替换原二次风喷口（或采用新设计的燃气燃烧器替代原有的二次风口）。仅在锅炉超过一定负荷（炉膛烟温超过废氢着火温度约 600℃ 以上较多）时，才做掺烧使用，为节约投资气枪也可不配高能点火器及火焰检测器（利用锅炉负荷做投停保护等条件）。

5.3.3 炉前燃气系统

炉前燃气系统将废气分配到各个废气燃烧器。它具有废气输送、流量计量、流量调节、压力测量、压力低（高）保护、快速切断、对空排放、系统吹扫、疏水及取样等功能。本次炉前燃气系统的设备主要包括：管道、快关阀（排放阀）、调节阀、各手动截止阀、疏水水箱、流量计、就地压力指示装置、温度计、压力变送器及压力低（高）开关等。

炉前瓦斯气系统的最大废氢供给流量为 20000Nm³/h，系统进口处瓦斯气压力暂定为 200kPag。全厂管道系统统一规划布置。

燃气管道规格、材质等在后续具体设计阶段按相关规范设计确定。

图5-7 废氢掺烧系统图

每个废氢气燃烧器前的煤气管道上均设置一组（共计 3 个）快速启闭阀，燃

烧器正常运行时，供气管道上的两个阀门开启、排放管上的一个阀门关闭；当对应的废氢气燃烧器停运或锅炉 MFT 时，供气管道上的两个阀门快速关闭、排放管上的一个阀门开启，以彻底切断废氢气管与废氢气燃烧器之间的连接，防止废氢气漏入炉膛内。炉前燃气总管上设置一组（共计 2 个）快速启闭阀，只要有任一废氢气燃烧器在运行中，供气管上的阀门开启，排放阀关闭；当全部废氢气燃烧器停运或锅炉 MFT 时，供气管上的阀门快速关闭，排放阀开启，以将炉前煤气管道内的煤气全部对空排散，避免其进入各煤气燃烧器前的管道内。控制系统应保证每一组内的所有阀门同时动作，且各自处于正确的开关状态。

所有对空排气支管应汇集成一根母管后引出炉顶外。

在锅炉处于低负荷阶段时，由于炉内温度水平较低，为保证安全，燃气装置必须通过自身的点火装置点燃，因此只要有燃气装置要投入运行，就需要适当降低燃气压力（通过试验确定）以保证需投运的燃气装置能通过自身的点火装置点燃并稳定着火，此时所有燃气装置的出力都会降低到同样水平，待需点火的燃气装置稳定着火后才能将燃气压力逐渐升高。点火阶段对应的上二次风风量也需做同样的调整。此项目为了安全初步考虑不采用废氢进行点火和低负荷投运，则可不设单独的点火装置及火检。**不允许低负荷投运废氢燃烧器。**

当锅炉处于高负荷阶段（通过试验确定）时，喷入炉内的瓦斯气依靠炉内高温炉烟点燃（即所谓掺烧），可不通过自身所属的点火装置进行点火，燃气装置允许在较高的燃气压力下投运。

燃气总管上可设燃气流量计，每个废氢气燃烧器前和炉前废氢气总管上均配有压力低开关（PSL）。当某个煤气燃烧器前煤气压力低于设定值时，相应的压力低开关将输出开关量信号，引发该煤气燃烧器前供气管上的快速启闭阀快速关闭、排放阀开启；当煤气总管中煤气压力低于设定值时，相应的压力低开关将输出开关量信号，引发煤气供气管道上全部快关阀关闭、排放阀开启，从而切断全部煤气供给；当锅炉处于最低不投油稳燃负荷之下、并且没有投油稳燃时，还应引发锅炉 MFT。这样能防止因煤气压力低造成煤气燃烧器熄火，未燃废氢气进入炉膛积聚并因其他因素引发爆炸的可能。

氢气火焰传播速度快、着火爆炸浓度范围宽，需保证废氢气中不含氧气，否则还需在系统管道上设置阻火器。阻火器用于防止燃气装置回火时引起火焰在燃

气管道间蔓延，因此尽可能布置在靠近燃气装置的位置。由于阻火器极易堵塞，因此如果布置，应在每个管路上设置两个并联的阻火器互为备用。设置阻火器需对燃气进行及其严格的过滤清洁，否则则阻火器极易堵塞而严重影响燃气装置的正常运行。燃气的燃烧是需要有氧气，而在密闭的燃气管道内由于缺乏氧气燃气不可能持续燃烧，即使燃烧会很快因燃烧后产生的烟气隔断氧气的供给使管内火焰熄灭，一旦燃气装置所属的火焰检测器检测不到火焰，燃气装置前的快关阀组会迅速切断燃气的供给和空气的进入，火焰一般不能持续燃烧；我公司以往设计的燃气系统中也均未设置阻火器，实际运行中从未发生过相关事故。而且有关防爆规程上也没有相关的强制规定。但氢气的燃烧和爆炸特性与常规燃气有较大不同，是否设置阻火器需进一步论证确定。

管道系统还需设计疏水、充氮、取样等辅助管道。

5.3.4 燃烧废氢后对锅炉整体性能的影响

按照设计燃气成份和设计掺烧量对锅炉进行热力计算分析，锅炉相关参数变化较小，几乎没有影响，锅炉效率略有提高。

5.3.5 废氢掺烧经济性说明

废氢按最大供气量 $40000\text{Nm}^3/\text{h}$ 考虑，分两台炉进行掺烧，每台炉掺烧量为 $20000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，负荷占比为 21.7%。原额定工况下每台炉实际煤耗 81.3t/h （折算标煤为 55.8t/h ），即每台炉节省标煤煤耗： $55.8\text{t/h} \times 21.7\% = 12.1\text{t/h}$ ，两台炉掺烧则共节省标煤煤耗： 24.2t/h 。按废氢年产生小时数 2000 小时计算，年节约标煤耗量为 $2000 \times 24.2 = 48400$ 吨/年，按每吨标煤单价 1120 元，则每年可节约燃煤费用： $48400\text{吨/年} \times 1120\text{元/吨} = 5420.8$ 万元。

两台炉废氢掺烧改造总投资初估约需 3500 万，改造投资回收期： $3500/5420.8 = 0.65$ 年。