

锅炉污染物减排优化方法及能效评价

2023 - 03 - 21 发布

2023 - 06 - 21 实施

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号和单位 2

5 总则 6

 5.1 评价方式 6

 5.2 NO_x 炉内控制与炉外治理协同评价 6

 5.3 SO₂ 炉内控制和炉外治理协同评价 6

 5.4 颗粒物控制与治理技术 6

 5.5 高温烟气余热与低温烟气余热回收协同 7

 5.6 综合评价 7

 5.7 数据来源 7

6 评价流程 7

 6.1 一般原则 7

 6.2 评价流程图 8

7 耦合脱硫过程的能效评价 11

 7.1 炉内脱硫 11

 7.2 湿法脱硫 13

 7.3 半干法脱硫 16

8 耦合脱硝过程的能效评价 18

 8.1 炉内脱硝（SNCR） 18

 8.2 SCR 脱硝 21

9 耦合除尘过程的能效评价 23

 9.1 布袋除尘器 24

 9.2 电袋除尘器 25

 9.3 湿电除尘器 26

10 余热回收评价 26

 10.1 高温烟气余热回收 27

 10.2 低温烟气余热回收（脱硫余热回收） 27

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省市场监督管理局提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省特种设备安全标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：大同市综合检验检测中心（原大同市特种设备监督检验所、大同市质量技术监督检验测试所）、中特检验集团有限公司、中国特种设备检测研究院、山东大学、哈尔滨工业大学、大同市新信环保热能有限责任公司、哈尔滨电气股份有限公司。

本文件主要起草人：张松松、刘建敏、董勇、高建民、齐国利、朱小文、王守信、董鹤鸣、谢敏、杜谦、崔琳、管立江、杨涛、温廷东、王凡、郝国华、辛耀武、王日有、张昊、杨旭、周必云、李一兵、颜冬。

锅炉污染物减排优化方法及能效评价

1 范围

本文件规定了锅炉污染物减排方法的能效评价流程、钙硫摩尔比计算要求、脱硫成本计算、脱硝成本计算和其他费用等要求。

本文件适用于层燃锅炉、循环流化床锅炉、煤粉锅炉、液体燃料锅炉、气体燃料锅炉污染物减排优化及能效评价，其他类型锅炉可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2589 综合能耗计算通则
- GB 2900.48 电工名词术语 锅炉
- GB/T 10180 工业锅炉热工性能试验规程
- GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程
- GB 13223 火电厂大气污染物排放标准
- GB 13271 锅炉大气污染物排放标准
- NB/T 47034 工业锅炉技术条件
- TSG 11 锅炉安全技术规程
- TSG 91 锅炉节能环保技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

钙硫摩尔比

入炉钙基脱硫剂与燃料中含硫量的摩尔比。按下式计算：

$$S_t = \frac{\text{脱硫剂数量} \times \text{Ca 的含量} / 40.1}{\text{燃料消耗量} \times \text{S 的含量} / 32}$$

3.2

运行小时

锅炉机组处于运行状态的小时数。

3.3

炉内脱硫

燃料和脱硫剂同时送入燃烧室，燃烧室内脱硫剂裂解成氧化物，氧化物和二氧化硫结合成硫酸盐，脱除SO₂的过程。

3.4

湿法脱硫

用含有吸收剂的溶液或浆液，在湿状态下脱硫和处理脱硫产物。

3.5

半干法脱硫

脱硫剂在干燥状态下脱硫、在湿状态下再生，或者在湿状态下脱硫、在干状态下处理脱硫产物的烟气脱硫技术。

3.6

烟气脱硫系统

用吸收剂脱除燃烧所生成的烟气中二氧化硫的设备系统。

3.7

选择性催化还原脱硝系统

在催化剂作用下，氨基还原剂与烟气中的NO_x发生化学反应生成氮气和水的一种脱硝系统。

3.8

选择性非催化还原脱硝系统

在一定温度范围内，氨基还原剂与烟气中的NO_x发生化学反应，生成氮气和水的一种脱硝系统。

4 符号和单位

表1中所列符号及单位适用于本文件。

表1 符号和单位

序号	符号	名称	单位
1	a	石灰石纯度	/
2	a''	生石灰纯度	/
3	b	尿素溶液浓度	%
4	B_A	添加石灰石脱硫后的计算或实测燃料	t/h
5	B_B	未添加石灰石脱硫后的计算或实测燃料量	t/h
6	B_{fl}	湿法脱硫废水处理量	t
7	B_{H_2O}	湿法脱硫系统耗水量	t
8	B'_{H_2O}	半干法脱硫系统耗水量	t/h
9	B_j	锅炉燃料消耗量	t/h
10	B_{NH_3}	液氨消耗量	t/h
11	B_{ns}	尿素消耗量	t/h
12	B_S	炉内石灰石粉耗量	t/h
13	B'_{SO_2}	炉内脱硫后 SO ₂ 剩余量	t
14	C	满足环保要求的 SO ₂ 实际排放浓度	mg/Nm ³
15	C_{NOx}	SNCR 入口 NO _x 含量	mg/Nm ³
16	C_{SO_2}	湿法脱硫入口（或炉内脱硫出口）SO ₂ 浓度	mg/Nm ³
17	c_{gas}	低温余热烟气比热容	kJ/(kg·K)
18	D	锅炉蒸发量	t/h
19	E_{bdc1}	布袋除尘器引风机增加的功率能耗折标	kgce
20	E_{bdc2}	布袋除尘器压缩空气系统能耗折标	kgce
21	E_{bdc3}	布袋除尘器运行能耗折标	kgce
22	EN	高温烟气余热回收产生的经济效益	万元
23	EN_1	高温烟气余热显热回收	kJ/m ³
24	EN'_1	低温余热节水增益	万元
25	EN_2	高温烟气余热潜热回收	kJ/m ³
26	EN'_2	低温余热经济效益（余热）	万元

序号	符号	名称	单位
27	E_1	炉内脱硫石灰石制粉运行能耗折标	kgce
28	E'_1	脱硫热损失的能耗折标	kgce
29	E'_2	湿法脱硫运行电耗折标	kgce
30	E''_2	湿法脱硫耗电折标	kgce
31	E'_3	半干法脱硫系统耗电折标	kgce
32	E''_3	半干法脱硫系统耗水折标	kgce
33	E_4	SNCR 脱硝运行耗水折标	kgce
34	E'_4	SNCR 运行耗电折标	kgce
35	E_5	SCR 运行耗电折标	kgce
36	E'_5	SCR 吹灰及加热还原剂蒸汽耗量折标	kgce
37	E_6	温余热耗电折标	kgce
38	E'_6	低温余热回收水增益折标	kgce
39	F	装置静态总投资费用	万元
40	h	SCR 催化剂使用周期	h
41	Δh_{rb}	热网水循环水泵水阻	mH ₂ O
42	$\Delta h_{shushui}$	疏水水泵压头	mH ₂ O
43	h_{ss}	吸收式热泵驱动蒸汽疏水焓值	kJ/kg
44	Δh_{yiliu}	溢流水泵压头	mH ₂ O
45	Δh_{yure}	余热水循环水泵压头	mH ₂ O
46	h_{zq}	吸收式热泵驱动蒸汽焓值	kJ/kg
47	H	锅炉运行小时	h
48	H_{NO}	SNCR 尿素与 NO 反应的反应热	kJ/mol
49	H_{NO_2}	SNCR 尿素与 NO ₂ 反应的反应热	kJ/mol
50	H_{t1}	SNCR 还原剂喷射温度焓值	kJ/kg
51	H_{t2}	SNCR 还原剂蒸发温度 (100℃) 焓值	kJ/kg
52	H_{t4}	SNCR 还原剂 (气态) 排烟温度下焓值	kJ/kg
53	H_{t3}	SNCR 还原剂 (气态) 蒸发温度下焓值	kJ/kg
54	K	固体燃料中硫燃烧后生成 SO ₂ 的份额	/
55	K_{glb}	钙硫摩尔比	/
56	K'_{glb}	湿法脱硫炉外钙硫摩尔比	/
57	K_{glb}	半干法脱硫炉外钙硫摩尔比	/
58	ΔM	低温余热烟气回收水量	t/h
59	M_a	节能塔入口烟气中含水蒸气的量	t/h
60	M_b	节能塔出口烟气中含水蒸气的量	t/h
61	m_a	脱硫系统出口对应单位体积烟气中的饱和蒸汽量	g/Nm ³
62	m_b	节水塔系统出口对应饱和蒸汽含水	g/Nm ³
63	m_{SO_2}	低温余热烟气中 SO ₂ 总量	kg/h
64	$m_{SO_2,0}$	低温余热氧化 SO ₂ 量	kg/h
65	$m_{H_2SO_4}$	低温余热 H ₂ SO ₄ 总量	kg/h
66	m_{H^+}	低温余热 H ⁺ 物质的量	mol/h
67	$m_{Na_2CO_3}$	Na ₂ CO ₃ 消耗量	kg/h
68	n	设备使用年数	万元
69	Δp	布袋除尘器进出口压差	Pa
70	P_a	脱硫系统出口 (t _a 温度) 水蒸气饱和压力	MPa
71	P_{adc1}	压缩空气马达全载功率	kW
72	P_{adc2}	布袋除尘器配套设备电机运行功率	kW
73	P_b	节水塔系统出口水蒸气饱和压力	MPa
74	P_c	石灰粉空压机额定功率	kW
75	P'_g	SCR 系统固定连续运行设备功率	kW
76	q_{yiliu}	低温余热溢流水流量	m ³ /h
77	P_{rb}	吸收式热泵功率	kW
78	P_{rewang}	热网水循环水泵增加功率	kW
79	$P_{shushui}$	疏水水泵功率	kW

序号	符号	名称	单位
80	P_t	电机总额定功率	kW
81	P_{yff}	引风机增加功率	kW
82	P_{yiliu}	溢流水泵功率	kW
83	P_{yrz}	余热回收设备总功率	kW
84	P_{yure}	余热水循环水泵功率	kW
85	P_1	湿法脱硫系统总耗电功率	kW
86	P'_1	半干法脱硫系统总耗电功率	kW
87	P_2	SCR 脱硝系统耗电功率	kW
88	Q	布袋除尘器的进口风量	m ³ /s
89	Q_{ar}	燃料收到基发热量	kJ/kg
90	Q_{gas}	低温余热烟气降温的显热	MW
91	Q_{rb}	吸收式热泵总制热量	MW
92	Q_{shiji}	低温余热回收的实际余热量	MW
93	Q_{qr}	冷凝出的蒸汽潜热	MW
94	ΔQ_0	低温余热回收的理论余热量	MW
95	q_a	SNCR 还原剂溶液由喷射温度加热至蒸发温度的吸热量占锅炉入炉燃料的比例	%
96	q_b	SNCR 还原剂蒸发过程吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例	%
97	q_c	SNCR 还原剂蒸发相变后升至排烟温度时吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例	%
98	q_m	SNCR 还原剂溶液质量流量	t/h
99	q_{rewang}	吸收式热泵热网水流量	m ³ /h
100	$q_{shushui}$	吸收式热泵疏水流量	m ³ /h
101	q_{yure}	喷淋水循环水量	m ³ /h
102	q_1	SNCR 还原剂蒸发吸热全过程总吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例	%
103	q_2	SNCR 尿素与 NO _x 反应放热量占锅炉入炉燃料热值的比例；	%
104	R_{adc}	马达全载运转时间比	%
105	R'_{adc}	马达空载运转时间比	%
106	r	SNCR 还原剂气化潜热	kJ/kg
107	s	SCR 蒸汽耗量	t/h
108	S_{ar}	燃料收到基硫分	%
109	Δt	低温余热烟气温降	℃
110	t_a	脱硫塔出口烟温	℃
111	t_b	填料塔出口烟温	℃
112	t_{plsrk}	低温余热喷淋水入口温度	℃
113	$t_{rw\lambda s}$	热网回水温度	℃
114	t_{rwgs}	吸收式热泵热网水出口温度	℃
115	t_{yff}	引风机处烟温	℃
116	u_1	炉内用石灰石单价	元/t
117	u'_1	炉外用石灰石单价	元/t
118	u''_1	干法脱硫生石灰单价	元/t
119	u_2	石灰石粉制备运行电价	元/kW·h
120	u_2	湿法脱硫系统运行电价	元/kW·h
121	u''_2	半干法脱硫运行电价	元/kW·h
122	u_3	湿法脱硫系统用水单价	元/t
123	u''_3	半干法脱硫用水单价	元/t
124	u_4	湿法脱硫石膏售价	元/t
125	u_5	湿法脱硫废水处理价格	元/t
126	u_6	低温余热运行电价	元/kW·h
127	u_6	Na ₂ CO ₃ 价格	元/t
128	u_6	低温余热装置节水单价	元/t
129	V	SCR 催化剂更换体积	m ³
130	V_a	脱硫塔出口烟气流量	Nm ³ /h
131	V_b	节能塔入口的烟气中干烟气总量	Nm ³ /h

序号	符号	名称	单位
132	v_{dy}	低温余热单价（余热）	元/GJ
133	V_g	节能塔出口烟气总量	Nm ³ /h
134	V_{gy}	高温烟气余热回收高温烟气量	m ³ /h
135	V_y	SNCR 入口烟气量	Nm ³ /h
136	V_1	炉内脱硫石灰石费用	万元
137	V'_1	湿法脱硫炉外石灰石费用	万元
138	V''_1	半干法脱硫炉外石灰石费用	万元
139	V_2	炉内脱硫石灰石制粉费用	万元
140	V'_2	湿法脱硫系统炉外运行耗电费用	万元
141	V''_2	半干法脱硫系统耗电费用	万元
142	V'_3	湿法脱硫系统用水费用	万元
143	V''_3	半干法脱硫系统耗水费用	万元
144	V'_4	湿法脱硫石膏收益	万元
145	V'_5	湿法脱硫废水处理费用	万元
146	V_6	低温余热运行耗电费用	万元
147	V''_6	低温余热 Na ₂ CO ₃ 费用	万元
148	$V_{\text{折旧}}$	装置折旧费用	万元
149	$V_{\text{维修}}$	装置维修费用	万元
150	$V_{\text{人工}}$	装置运行人工费用	万元
151	$V_{\text{财务}}$	装置财务费用	万元
152	v_{bdc1}	引风机电价	元/kW·h
153	v_{bdc2}	压缩空气马达电价	元/kW·h
154	v_{bdc3}	布袋除尘器运行电价	元/kW·h
155	v_{gy}	高温余热回收热量价格	元/kJ
156	v_{dy}	低温余热价格	元/Gj
157	v_1	尿素单价	元/t
158	v'_1	SCR 液氨单价	元/t
159	v_2	制备尿素溶液水费	元/t
160	v'_2	SCR 运行电价	元/kW·h
161	v_3	SNCR 运行电价	元/kW·h
162	v'_3	SCR 运行蒸汽价格	元/t
163	v'_4	SCR 催化剂价格	元/m ³
164	W	石灰石耗量	t
165	W_{bdc1}	布袋除尘器阻力增加的引风机功率运行费用	万元
166	W_{bdc2}	布袋除尘器压缩空气运行费用	万元
167	W_{bdc3}	布袋除尘器运行电费	万元
168	w_C	石灰粉压缩空气产量	m ³ /h
169	w_{Ca}	石灰石粉产量	t/h
170	W_1	尿素费用	万元
171	W'_1	SCR 液氨费用	万元
172	W_2	制备尿素溶液用水费用	万元
173	W'_2	SCR 系统耗电费用	万元
174	W_3	SNCR 脱硝耗电费用	万元
175	W'_3	SCR 蒸汽耗量费用	万元
176	W_4	SCR 催化剂运行费用	万元
177	η_{H_2O}	湿法脱硫石膏含水率	%
178	η_{SO_2}	脱硫塔出口 SO ₂ 含量	mg/Nm ³
179	$\eta_{szq,a}$	脱硫系统出口饱和水蒸气体积分数	%
180	$\eta_{szq,b}$	节水塔系统出口饱和水蒸气体积分数	%
181	η_{tl}	理论炉内脱硫效率	%
182	η'_{tl}	湿法脱硫效率	%
183	η_{tuochu}	填料层对 SO ₂ 脱除率	%

序号	符号	名称	单位
184	η_{tx}	炉内脱硝效率	%
185	$\eta_{yanghua}$	SO ₂ 氧化率	%
186	y	装置运行人工年均工资	万元/人
187	β	石灰粉压缩空气系数	m ³ /t
188	φ_1	电力折标系数	kgce/kW·h
189	φ_2	原煤折标系数	kgce/kg
190	φ_3	新水折标系数	kgce/t
191	φ_4	蒸汽折标系数	kgce/kg
192	γ	氨氮摩尔比	/
193	γ'	SCR 氨氮摩尔比	/

5 总则

5.1 评价方式

5.1.1 锅炉经济技术评价包括综合使用炉内大气污染物控制、炉外大气污染物治理、以及炉内和炉外的协同控制、高温烟气和低温烟气余热回收的协同。对锅炉经济技术评价采用两种方式，一种是基于单位直接或间接花费的评价方法，一种是基于单位能耗的评价方法。本文件通过综合考虑炉内和炉外大气污染物治理协同、低温和高温余热回收协同，来评价各种技术组合应用。

5.1.2 炉内大气污染物控制包括 NO_x、SO₂ 控制，NO_x 控制一般采用低氮燃烧技术、SNCR 等，SO₂ 控制一般采用炉内石灰石脱硫等。

5.1.3 炉外大气污染物治理包括 NO_x、SO₂ 和颗粒物治理，NO_x 治理一般采用 SCR 技术、臭氧法等，SO₂ 治理一般采用湿法脱硫、半干法脱硫等，炉外颗粒物治理一般采用布袋除尘、静电除尘以及布袋和静电的组合等高效除尘设备。

5.1.4 高温烟气余热回收一般采用间壁式换热器，脱硫后的低温烟气余热回收一般采用直接接触式换热器，其它型式换热器可参照执行。

5.2 NO_x 炉内控制与炉外治理协同评价

5.2.1 优化炉内、炉外 NO_x 控制与治理协同的技术路线，协调高效燃烧与低污染物排放之间的关系，分炉型科学设置 NO_x 原始排放浓度，通过炉内 NO_x 指标的科学合理设置，计算技术经济性或者能耗。

5.2.2 层燃锅炉炉内控制技术优先采用燃料分布、燃烧气氛组织、烟气再循环、飞灰再循环等，尾部或炉外 NO_x 治理技术优先采用 SCR 技术，也可以采用其他技术。

5.2.3 煤粉锅炉炉内控制优先采用低氮燃烧技术，尾部或炉外 NO_x 治理技术优先采用 SCR 技术，也可采用其他技术。

5.2.4 循环流化床锅炉炉内 NO_x 控制技术优先采用低氮燃烧技术与 SNCR 技术相结合的方法，尾部或炉外 NO_x 治理技术可以采用 SCR 技术或臭氧氧化技术等。

5.3 SO₂ 炉内控制和炉外治理协同评价

5.3.1 按照炉型选择是否需要炉内脱硫技术，炉外脱硫优先选用半干法或湿法脱硫技术，合理布置技术路线。

5.3.2 层燃锅炉可以采用炉内脱硫等新技术，优先使用炉外半干法或湿法脱硫等。

5.3.3 煤粉锅炉优先使用炉外半干法或湿法脱硫等。

5.3.4 循环流化床锅炉优先使用炉内干法脱硫和炉外半干法或湿法脱硫等。

5.4 颗粒物控制与治理技术

- 5.4.1 根据排放要求布置不同的颗粒物脱除技术路线，优化配置脱除设备。
- 5.4.2 层燃锅炉优先使用布袋除尘和静电除尘或湿式除尘器等组合的方式。
- 5.4.3 煤粉锅炉优先使用布袋除尘和静电除尘或湿式除尘器等组合的方式。
- 5.4.4 循环流化床锅炉优先使用布袋除尘器和静电除尘或湿式除尘器等组合的方式。

5.5 高温烟气余热与低温烟气余热回收协同

- 5.5.1 高温烟气主要指锅炉空气预热器出口与第一级除尘器入口之间的烟气；低温烟气主要指脱硫塔后的烟气。
- 5.5.2 优化高温烟气和低温烟气余热回收组合方式。

5.6 综合评价

- 5.6.1 根据排放要求，综合考虑锅炉燃烧效率、余热回收等，重点在于采用不同的大气污染物控制和治理方式、余热回收方式对锅炉能效的影响，重心在于给出优化的大气污染物减排和余热回收设计方案和运行方法。
- 5.6.2 优化技术路线后，计算锅炉及其系统的综合能耗。
- 5.6.3 评价结果可以用标准煤或者经济效益指标进行表征，采用多种组合方式时，需分别计算后相加。

5.7 数据来源

- 5.7.1 设计阶段，可以采用设计数据进行评价，设计数据主要包括锅炉热力计算、大气污染物初始排放、烟风阻力计算（或者风机选型）、水动力计算（或者水泵选型）、SNCR 设计数据、SCR 设计数据、炉内脱硫设计数据、炉外脱硫设计数据、除尘设计数据等。
- 5.7.2 运行阶段，可以采用实际测试数据进行评价，测试数据主要包括锅炉燃烧效率、锅炉热效率、大气污染物初始排放、SNCR 脱硝反应资源和能源消耗、SCR 脱硝反应资源和能源消耗、炉内脱硫反应资源和能源消耗、炉外脱硫反应资源和能源消耗、除尘资源和能源消耗等。

6 评价流程

6.1 一般原则

6.1.1 设计阶段

- 6.1.2 锅炉设计热力计算书、大气污染物初始和最终排放设计值、烟风阻力计算书、水动力计算书、脱硫计算书、脱硝计算书、除尘计算书等。
- 6.1.3 锅炉原系统（不包括脱硫、脱硝增加的风机和水泵等）风机、水泵选型数据等。
- 6.1.4 优化技术路线，包括炉内与炉外大气污染物控制与脱除的组合方式等，高温烟气和低温烟气余热回收的组合方式等。
- 6.1.5 脱硝：炉内低氮燃烧、炉内 SNCR 和尾部 SCR，按炉型分别计算使用低氮燃烧技术、SNCR 技术对锅炉热损失的影响，炉内和炉外优化组合方式。
- 6.1.6 脱硫：炉内脱硫和炉外脱硫，按炉型分别计算使用炉内对锅炉热损失的影响，炉内和炉外优化组合方式。
- 6.1.7 除尘：布袋除尘、静电除尘和湿式除尘以及其组合方式，分别计算能源消耗或经济指标。
- 6.1.8 余热回收：按照预定最终排烟温度目标，分别对高温烟气和脱硫后低温烟气进行优化。
- 6.1.9 运行阶段

- 6.1.10 测试锅炉燃烧效率、锅炉热效率、大气污染物初始排放、最终排放、炉内脱硫资源和能源消耗、炉外脱硫资源和能源消耗、炉内 SNCR 资源和能源消耗、SCR 资源和能源消耗、除尘资源和能源消耗。
- 6.1.11 测试余热回收资源和能源消耗。
- 6.1.12 优化运行方式：炉内脱硫和炉外脱硫脱除比例；炉内 NO_x 控制、炉外脱硝或尾部脱硝比例。
- 6.1.13 分别计算优化前后的经济性指标与单位折标能耗。

6.2 评价流程图

6.2.1 脱硫评价流程图

6.2.1.1 经济性指标评价流程

首先设定钙硫摩尔比，当钙硫摩尔比 ≤ 2.0 时，直接计算炉内脱硫成本；当 $2.0 < \text{钙硫摩尔比} \leq 2.5$ 时，建议进行脱硫热损失计算，也可以选择直接计算炉内脱硫成本，通过计算脱硫热损失，获得燃料消耗成本的增加值，再计算炉内脱硫成本；当钙硫摩尔比 > 2.5 时，需要计算脱硫热损失，获得燃料消耗成本的增加值，并计算炉内脱硫成本。

第二，分别计算不同钙硫摩尔比条件下的脱硫设施入口SO₂浓度，按照进口浓度分别计算半干法脱硫成本、湿法脱硫成本，同时计算其他费用。

第三，分别计算不同钙硫摩尔比条件下，炉内脱硫成本加上半干法脱硫成本（含其他费用）、炉内脱硫成本加上湿法脱硫成本（含其他费用）。

第四，比较不同钙硫摩尔比条件下，总成本差异，形成优化设计或运行技术路线。

脱硫经济性评价方法如图1。

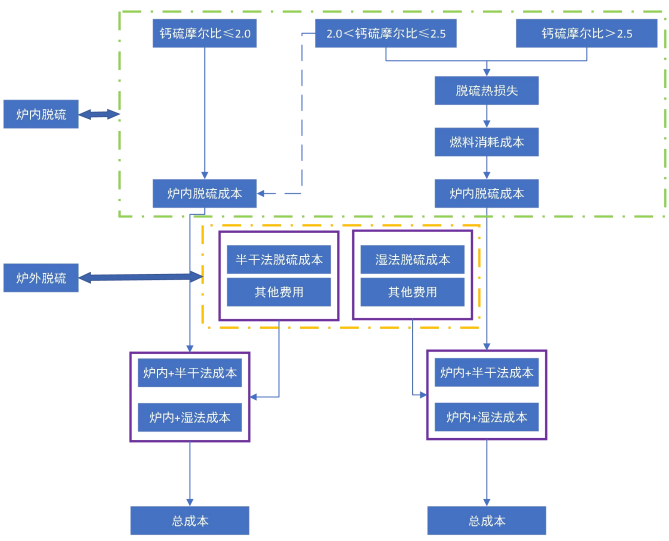


图 1 脱硫经济性评价方法

6.2.1.2 能效指标评价流程

首先设定钙硫摩尔比，当钙硫摩尔比 ≤ 2.0 时，直接计算炉内脱硫单位折标能耗；当 $2.0 < \text{钙硫摩尔比} \leq 2.5$ 时，建议进行脱硫热损失计算，也可以选择直接计算炉内脱硫单位能耗，通过计算脱硫热损失，获得燃料消耗的能耗增加值，再计算炉内脱硫单位能耗；当钙硫摩尔比 > 2.5 时，需要计算脱硫热损失，获得燃料消耗的能耗增加值，并计算炉内脱硫单位折标能耗。

第二，分别计算不同钙硫摩尔比条件下的脱硫设施入口SO₂浓度，按照进口浓度分别计算半干法脱硫单位折标能耗、湿法脱硫单位折标能耗，同时计算其他消耗的单位折标能耗。

第三，分别计算不同钙硫摩尔比条件下，炉内脱硫单位折标能耗加上半干法脱硫单位折标能耗（含其他消耗）、炉内脱硫单位折标能耗加上湿法脱硫单位折标能耗（含其他消耗）。

第四，比较不同钙硫摩尔比条件下的单位折标能耗，形成优化设计或运行技术路线。

脱硫能效评价方法如图2。

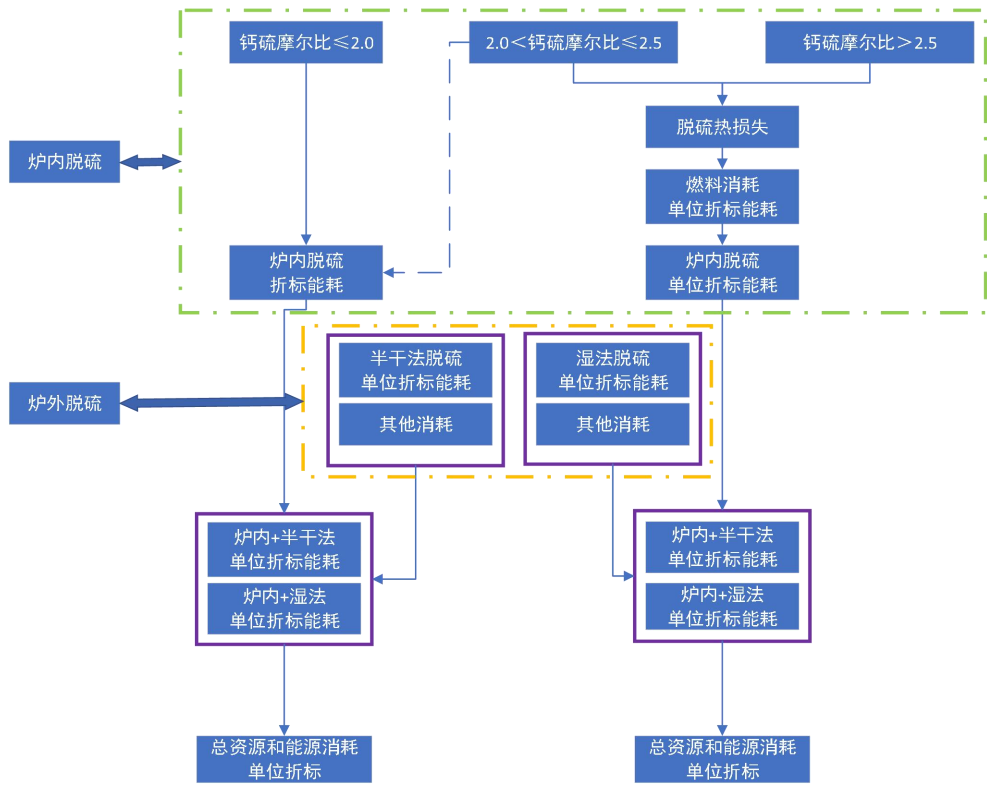


图 2 脱硫能效评价方法

6.2.2 脱硝评价流程图

6.2.2.1 经济性评价流程

首先设定脱硝设施入口 NO_x 浓度指标，当采用低氮燃烧技术后， $\text{NO}_x \leq 100 \text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，直接计算炉内SNCR或尾部SCR脱硝成本；当 $100 < \text{NO}_x < 200 \text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，有SNCR运行的，建议进行脱硝热损失计算，获得燃料消耗的成本增加值，再计算SNCR与SCR脱硝成本；当 $\text{NO}_x \geq 200 \text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，有SNCR运行的，需要计算脱硝热损失，获得燃料消耗的成本增加值，并计算SNCR与SCR脱硝成本。

第二，分别计算脱硝设施入口不同 NO_x 下，低氮燃烧加上SNCR脱硝成本（含其他消耗）、低氮燃烧加上SCR脱硝成本（含其他消耗）。

第三，比较不同入口 NO_x 浓度、相同出口浓度指标条件下的成本，形成优化设计或运行技术路线。

脱硝经济性评价方法如图3。

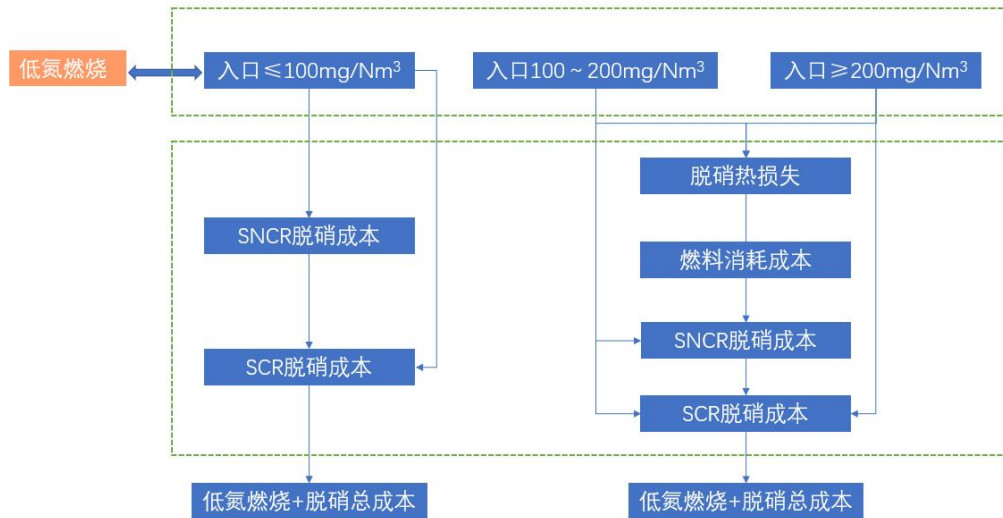


图 3 脱硝经济性评价方法

6.2.2.2 能耗指标评价流程

首先设定脱硝设施入口NO_x浓度指标，当采用低氮燃烧技术后，NO_x≤100mg/Nm³时，直接计算炉内SNCR或尾部SCR脱硝单位折标能耗；当100<NO_x<200mg/Nm³时，有SNCR运行的，建议进行脱硝热损失计算，获得燃料消耗的能耗增加值，再计算SNCR与SCR脱硝单位折标能耗；当NO_x≥200mg/Nm³时，有SNCR运行的，需要计算脱硝热损失，获得燃料消耗的单位折标能耗增加值，并计算SNCR与SCR脱硝单位折标能耗。

第二，分别计算脱硝设施入口不同NO_x下，低氮燃烧加上SNCR脱硝单位折标能耗（含其他消耗）、低氮燃烧加上SCR脱硝单位折标能耗（含其他消耗）。

第三，比较不同入口NO_x浓度指标、相同出口NO_x浓度指标条件下的单位折标能耗，形成优化设计或运行技术路线。

脱硝能效评价方法如图4。

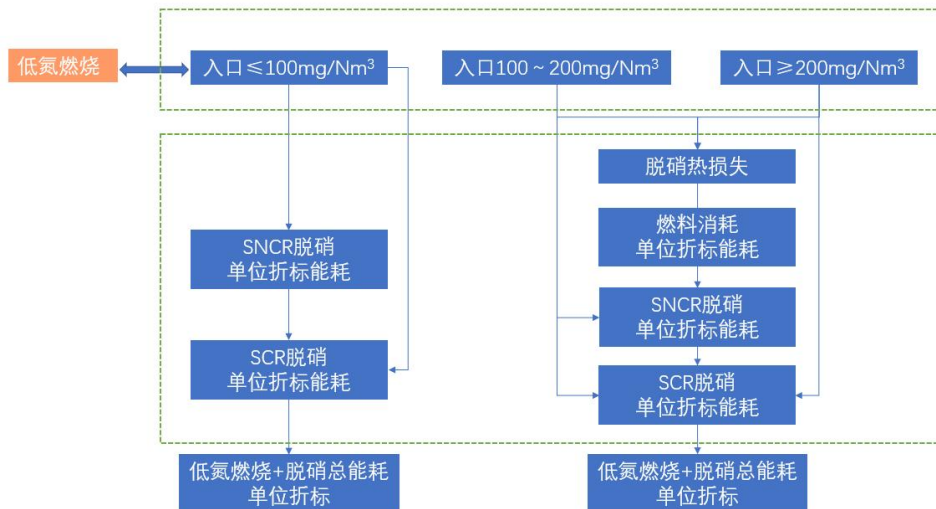


图 4 脱硝能效评价方法

6.2.3 除尘评价流程

6.2.3.1 经济性评价流程

针对不同炉型进行除尘技术路线优化，层燃锅炉、煤粉锅炉、循环流化床锅炉分别选用布袋除尘与静电除尘、湿式除尘等组合，分别计算布袋除尘配湿式除尘、布袋除尘配静电除尘等组合方式，计算不同技术路线的成本，形成优化设计或运行技术路线。

6.2.3.2 能耗指标评价流程

针对不同炉型进行除尘技术路线优化，层燃锅炉、煤粉锅炉、循环流化床锅炉分别选用布袋除尘与静电除尘、湿式除尘等组合，分别计算布袋除尘配湿式除尘、布袋除尘配静电除尘等组合方式，计算不同技术路线的单位折标能耗，形成优化设计或运行技术路线。

6.2.4 余热回收评价流程

6.2.4.1 经济性评价流程

针对排烟烟气温度品质，按照不同炉型，包括层燃锅炉、煤粉锅炉、循环流化床锅炉，即脱硫塔前高温烟气余热回收、脱硫过程中余热回收的比例，分别计算不同回收方式的成本和能源节约利润。

6.2.4.2 能耗指标评价流程

针对排烟烟气温度品质，按照不同炉型，包括层燃锅炉、煤粉锅炉、循环流化床锅炉，即脱硫塔前高温烟气余热回收、脱硫过程中余热回收的比例，分别计算不同回收方式的单位折标能耗。

6.2.5 综合评价

6.2.5.1 经济性评价

将脱硫成本、脱硝成本、除尘成本、余热回收能源节约（增益）相加，形成最终成本或利润。

6.2.5.2 能耗指标评价

将脱硫、脱硝、除尘等的单位折标能耗、余热回收净单位折标节约量相加，形成最终折标能耗或折标节约量。

7 耦合脱硫过程的能效评价

7.1 炉内脱硫

7.1.1 炉内脱硫经济性评价

7.1.1.1 石灰石耗量费用

在设计时可以采用公式（1）计算石灰石耗量，如果是运行阶段也可以使用公式（1），或者直接使用经过计量的石灰石耗量数据。石灰石耗量按照公式（1）计算：

$$W = \frac{100}{32a} KB_f \frac{S_{ar}}{100} K_{glb} H \dots\dots\dots (1)$$

式中：

W —石灰石耗量, t;

a —石灰石纯度, 可以是化验数据或者取0.9;

K —固体燃料中硫燃烧后生成 SO_2 的份额, 可以实测 SO_2 后计算, 也可以取0.9;

B_j —锅炉燃料消耗量, 实测数据或统计数据, t/h;

S_{ar} —燃料收到基硫分, 化验数据, %;

K_{glb} —钙硫摩尔比, 实测或设定数据;

H —锅炉运行小时, 实测或预期数据, h。

石灰石费用按照公式(2)计算:

$$V_1 = 10^{-4} W \cdot u_1 \quad (2)$$

式中:

V_1 —炉内脱硫石灰石费用, 万元;

u_1 —炉内用石灰石单价, 元/t。

7.1.1.2 运行耗电费用

分为两种情况, 一种是直接购买石灰石粉, 另一种是有石灰石制备车间。炉内脱硫石灰石制粉费用按照公示(3)计算:

$$V_2 = 10^{-4} \left(\frac{P_t}{w_{Ca}} + \frac{P_c \beta}{w_c} \right) B_S u_2 H \quad (3)$$

式中:

V_2 —炉内脱硫石灰石制粉费用, 万元;

P_t —电机总额定功率, kW;

w_{Ca} —石灰石粉产量, t/h;

P_c —石灰粉空压机额定功率, kW;

β —石灰粉压缩空气系数, 一般取115.2 m³/t;

w_c —石灰粉压缩空气产量, m³/h;

B_S —炉内石灰石粉耗量, t/h;

u_2 —石灰石粉制备运行电价, 元/kW·h。

若直接购买石灰石粉, 则该部分运行耗电费用为零。

7.1.2 炉内脱硫能耗评价

7.1.2.1 运行耗电

从能耗角度, 进行折标。炉内脱硫石灰石制粉运行能耗折标按照公式(4)计算:

$$E_1 = \left(\frac{P_t}{w_{Ca}} + \frac{P_c \beta}{w_c} \right) B_S \varphi_1 H \quad (4)$$

式中:

E_1 —炉内脱硫石灰石制粉运行能耗折标, kgce;

φ_1 —电力折标系数, 0.1229kgce/kW·h。

7.1.2.2 炉内脱硫热损失

7.1.2.2.1 工业锅炉

使用GB/T 10180, 分别计算炉内不同钙硫摩尔比条件的脱硫热损失, 进一步计算燃料消耗量的变化。工业锅炉脱硫热损失的能耗折标按照公式(5)计算:

$$E'_1 = 10^3(B_A - B_B) \cdot H \cdot \varphi_2 \quad (5)$$

式中:

E'_1 —脱硫热损失的能耗折标, kgce;

B_A —添加石灰石脱硫后的计算或实测燃料量, t/h;

B_B —未添加石灰石脱硫后的计算或实测燃料量, t/h;

H —锅炉运行小时, h;

φ_2 —原煤折标系数, 0.7143kgce/kg。

7.1.2.2.2 电站锅炉

使用GB/T 10184, 分别计算炉内不同钙硫摩尔比条件的脱硫热损失, 进一步计算燃料消耗量的变化。电站锅炉脱硫热损失的能耗折标按照公式(6)计算:

$$E'_1 = 10^3(B_A - B_B) \cdot H \cdot \varphi_2 \quad (6)$$

7.1.2.3 运输费用

石灰石的运输费用核算到石灰石的单价中, 不再单独计算。

7.2 湿法脱硫

7.2.1 湿法脱硫经济性评价

7.2.1.1 石灰石费用

计算湿法脱硫炉外石灰石耗量, 先由炉内钙硫摩尔比确定炉内脱硫效率。根据SO₂排放限制, 计算炉外应达到的脱硫效率, 如果是运行情况, 可结合电厂试验数据来求得炉外钙硫摩尔比, 即可通过计算湿法脱硫入口处SO₂总量得到石灰石耗量。湿法脱硫炉外脱硫效率按照公式(7)计算:

$$\eta'_{tl} = 1 - \frac{C}{C_{SO_2}(1 - \eta_{tl})} \quad (7)$$

式中:

η'_{tl} —湿法脱硫效率, %;

C_{SO_2} —湿法脱硫入口(或炉内脱硫出口)SO₂浓度, mg/Nm³;

C —满足环保要求的SO₂实际排放浓度, mg/Nm³;

η_{tl} —理论炉内脱硫效率, %。

湿法脱硫炉外石灰石费用按照公式(8)计算:

$$V'_1 = \frac{100}{32a} KB_j \frac{S_{ar}}{100} (1 - \eta_{tl}) \eta'_{tl} K'_{glb} Hu'_1 \times 10^{-4} \quad (8)$$

式中:

V'_1 —湿法脱硫炉外石灰石费用，万元；

K'_{glb} —湿法脱硫炉外钙硫摩尔比；

u'_1 —炉外用石灰石单价，元/t。

若为氧化镁脱硫，则需要在 V'_1 计算结果乘以0.4。

7.2.1.2 运行耗电费用

湿法脱硫工艺中主要耗能设备为浆液循环泵和氧化风机，约占总脱硫系统总能耗的60%—70%。引风机能耗中，脱硫塔阻力的贡献率约为20%。实际运行中，针对不同脱硫系统入口 SO_2 浓度，会采用不同功率循环泵进行组合以达到能耗最低，此处计算忽略这部分影响。此外不设烟气再热器（GGH）。湿法脱硫炉外运行耗电费用按照公式（9）计算：

$$V'_2 = P_1 u'_2 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

V'_2 —湿法脱硫系统炉外运行耗电费用，万元；

P_1 —湿法脱硫系统总耗电功率，kW；

u'_2 —湿法脱硫系统运行电价，元/kW·h。

7.2.1.3 运行耗水费用

脱硫系统耗水点主要包含烟气带走的水蒸气、烟气携带液态水、石膏带走的水量以及排放废水4个部分。用水费用按照公式（10）计算：

$$V'_3 = B_{H_2O} u'_3 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

V'_3 —湿法脱硫系统耗水费用，万元；

B_{H_2O} —湿法脱硫系统耗水量，t；

u'_3 —湿法脱硫系统用水单价，元/t。

7.2.1.4 石膏收益

炉外脱硫的工业副产品是石膏，主要成分是结晶硫酸钙，含水率一般为10%—20%。炉外脱硫石膏收益按照公式（11）计算：

$$V'_4 = \frac{172}{64} B'_{SO_2} \frac{1}{1-\eta_{H_2O}} u'_4 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

V'_4 —湿法脱硫石膏收益，万元；

B'_{SO_2} —炉内脱硫后 SO_2 剩余量，t；

η_{H_2O} —湿法脱硫石膏含水率，%；

u'_4 —湿法脱硫石膏售价，元/t。

7.2.1.5 废水处理费用

废水处理费用按照公式（12）计算：

$$V_5' = B_{fl}u_5'H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (12)$$

式中：
 V_5' —湿法脱硫废水处理费用，万元；
 B_{fl} —湿法脱硫废水处理量，t；
 u_5' —湿法脱硫废水处理价格，元/t。

7.2.2 湿法脱硫能耗评价

7.2.2.1 运行耗电折标

湿法脱硫工艺中主要耗能设备为浆液循环泵和氧化风机，约占总脱硫系统总能耗的60%—70%。引风机能耗中，脱硫塔阻力的贡献率约为20%。实际运行中，针对不同脱硫系统入口SO₂浓度，会采用不同功率循环泵进行组合以达到能耗最低，此处计算忽略这部分影响，此外不设烟气再热器（GGH）。湿法脱硫炉外运行耗电能耗按照公式（13）计算：

$$E_2' = P_1 \cdot H \cdot \varphi_1 \dots\dots\dots (13)$$

式中：
 E_2' —湿法脱硫运行耗电折标，kgce；
 P_1 —湿法脱硫系统总耗电功率，kW。

7.2.2.2 运行耗水折标

脱硫系统耗水点主要包含烟气带走的水蒸气、烟气携带液态水、石膏带走的水量以及排放废水4个部分。用水费用按照公式（14）计算：

$$E_2' = B_{H_2O} \cdot H \cdot \varphi_3 \dots\dots\dots (14)$$

式中：
 E_2'' —湿法脱硫水耗折标，kgce；
 B_{H_2O} —湿法脱硫系统耗水量，t；
 φ_3 —新水折标系数，0.2571kgce/t。

7.2.3 其他费用

7.2.3.1 折旧成本

脱硫装置折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用按照公式（15）计算：

$$V_{\text{折旧}} = \frac{F}{n} \times 95\% \dots\dots\dots (15)$$

式中：
 $V_{\text{折旧}}$ —装置折旧费用，万元；
 F —装置静态总投资费用，万元；

n —设备使用年数，年。

7.2.3.2 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用按照公式（16）计算：

$$V_{\text{维修}} = F \times 3\% \quad (16)$$

式中：

$V_{\text{维修}}$ —装置维修费用，万元。

7.2.3.3 人工成本

假定每台机组增加运行人员 n 人，每人年均工资 y 万元，人工费用按照公式（17）计算：

$$V_{\text{人工}} = n \cdot y \quad (17)$$

式中：

$V_{\text{人工}}$ —装置运行人工费用，万元。

y —装置运行人工年均公司，万元/人

7.2.3.4 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本按照公式（18）计算：

$$V_{\text{财务}} = F \times 5\% \quad (18)$$

式中：

$V_{\text{财务}}$ —装置财务费用，万元。

7.3 半干法脱硫

7.3.1 半干法脱硫经济性评价

7.3.1.1 生石灰费用

炉外石灰石费用按照公式（19）计算：

$$V_1'' = \frac{56}{32a''} KB_J \frac{S_{ar}}{100} (1 - \eta_{tl}) \eta_{tl}' K_{glb}'' u_1' H \times 10^{-4} \quad (19)$$

式中：

V_1'' —半干法脱硫炉外石灰石费用，万元；

a'' —生石灰纯度；

K_{glb}'' —半干法脱硫炉外钙硫摩尔比；

u_1'' —半干法脱硫生石灰单价，元/t。

7.3.1.2 运行耗电费用

相较于湿法脱硫工艺，半干法脱硫工艺需再增设高效布袋除尘器，因此需要考虑半干法脱硫系统阻力与布袋除尘器阻力对引风机电耗的贡献率。已有设计数据表明，半干法脱硫系统与布袋除尘器的阻力之和约为湿法脱硫系统阻力的两倍，所以将这部分电耗近似为湿法脱硫阻力所致引风机电耗的两倍。半干法脱硫炉外运行耗电费用按照公式（20）计算：

$$V_2'' = P_1' u_2'' H \times 10^{-4} \cdots \cdots \cdots (20)$$

式中：

V_2'' —半干法脱硫系统耗电费用，万元；

P_1' —半干法脱硫系统总耗电功率，kW；

u_2'' —半干法脱硫运行电价，元/kW·h。

7.3.1.3 运行耗水费用

半干法脱硫系统耗水费用按照公式（21）计算：

$$V_3' = B_{H_2O}' u_3'' H \times 10^{-4} \cdots \cdots \cdots (21)$$

式中：

V_3' —半干法脱硫系统耗水费用，万元；

B_{H_2O}' —半干法脱硫系统耗水量，t/h；

u_3'' —半干法脱硫用水单价，元/t。

7.3.2 半干法脱硫能耗评价

7.3.2.1 运行耗电折标

半干法脱硫系统运行耗电折标按照公式（22）计算：

$$E_3' = P_1' \cdot H \cdot \varphi_1 \cdots \cdots \cdots (22)$$

式中：

E_3' —半干法脱硫系统耗电折标，kgce；

P_1' —半干法脱硫系统总耗电功率，kW。

7.3.2.2 运行耗水折标

半干法脱硫系统运行耗水折标按照公式（23）计算：

$$E_3'' = B_{H_2O}' \cdot H \cdot \varphi_3 \times 10^3 \cdots \cdots \cdots (23)$$

式中：

E_3'' —半干法脱硫系统耗水折标，kgce；

B_{H_2O}' —半干法脱硫系统耗水量，t/h。

7.3.3 其他费用

7.3.3.1 折旧成本

脱硫装置折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用参照公式（15）计算。

7.3.3.2 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用参照公式（16）计算。

7.3.3.3 人工成本

假定每台机组增加运行人员n人，每人年均工资y万元，人工费用参照公式（17）计算。

7.3.3.4 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本参照公式（18）计算。

8 耦合脱硝过程的能效评价

8.1 炉内脱硝（SNCR）

8.1.1 SNCR 脱硝经济性评价

8.1.1.1 SNCR 还原剂费用

SNCR还原剂一般为尿素，其它还原剂可参照执行。脱硝效率与氨氮摩尔比有直接关系，根据入口烟气的值，可求出使NO_x排放值小于50mg/Nm³的临界脱硝效率，从而反推出所需氨氮摩尔比，若SNCR与SCR联用，可依据实际运行工况输入所需氨氮摩尔比。根据实际调查，SNCR的脱硝效率一般为40%—75%。氨氮摩尔比按照公式（24）计算：

$$\gamma = \begin{cases} 6\eta_{tx} - 1.6 & 83 \leq C_{NOx} \leq 100 \\ 3\eta_{tx} - 0.1 & 100 < C_{NOx} \end{cases} \quad (24)$$

式中：

γ —SNCR氨氮摩尔比；

η_{tx} —炉内脱硝效率，%；

C_{NOx} —SNCR入口NO_x含量，mg/Nm³（按照NO占95%，NO₂占5%计算）。

尿素消耗量按照公式（25）计算：

$$B_{ns} = \frac{60\gamma C_{NOx} V_y}{2 \times 30.8 \times 10^9} \quad (25)$$

式中：

B_{ns} —尿素消耗量，t/h；

V_y —SNCR入口烟气体积，Nm³/h。

尿素费用按照公式（26）计算：

$$W_1 = B_{ns} v_1 H \times 10^{-4} \quad (26)$$

式中：

W_1 —尿素费用，万元；

v_1 —尿素单价，元/t。

8.1.1.2 运行耗水费用

尿素使用前需用水稀释为一定浓度的尿素溶液。用水费用按照公式（27）计算：

$$W_2 = \frac{1-b}{b} B_{ns} v_2 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

W_2 —制备尿素溶液用水费用，万元；

b —尿素溶液浓度，%；

v_2 —制备尿素溶液水费，元/t。

8.1.1.3 运行耗电费用

根据锅炉脱硝实际数据确定脱硝耗电功率 P_2 。可参考由运行数据统计获得耗电与尿素耗量之间的近似关系按照公式（28）计算：

$$P_2 = c B_{ns} \dots\dots\dots (28)$$

式中：

P_2 —SNCR脱硝耗电功率，kW；

c —单位质量尿素耗电量，一般为20 kW·h/t。

运行耗电费用按照公式（29）计算：

$$W_3 = P_2 v_3 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (29)$$

式中：

W_3 —SNCR脱硝耗电费用，万元；

v_3 —SNCR运行电价，元/kW·h。

8.1.2 SNCR 脱硝能耗评价

8.1.2.1 运行耗水折标

SNCR系统运行耗水折标按照公式（30）计算：

$$E_4 = \frac{1-b}{b} B_{ns} H \varphi_3 \dots\dots\dots (30)$$

式中：

E_4 —SNCR运行耗水折标，kgce。

8.1.2.2 运行耗电折标

SNCR系统运行耗电折标按照公式（31）计算：

$$E'_4 = P_2 \cdot H \cdot \varphi_1 \quad (31)$$

式中：

E'_4 —SNCR运行耗电折标，kgce。

8.1.2.3 SNCR 脱硝热损失

SNCR还原剂喷入炉膛后，依次经历还原剂溶液蒸发、发生脱硝反应、随烟气排出等主要过程。SNCR技术对锅炉效率的影响主要在以下三个方面：还原剂溶液蒸发吸热、脱硝反应放热以及增大锅炉排烟焓等。

a) 还原剂溶液蒸发吸热

还原剂溶液喷入炉膛后，会先后经历溶液吸热、液体蒸发、蒸发后的气体升温至烟气温度等三个主要过程。

还原剂溶液质量流量按照公式（32）计算：

$$q_m = \frac{1-b}{b} B_{ns} \quad (32)$$

式中：

q_m —SNCR还原剂溶液质量流量，t/h。

还原剂溶液由喷射温度（20℃）加热至蒸发温度（100℃）的吸热量按照公式（33）计算：

$$q_a = \frac{q_m(H_{t2}-H_{t1})}{B_j Q_{ar}} \times 100 \quad (33)$$

式中：

q_a —SNCR还原剂溶液由喷射温度加热至蒸发温度的吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例，%；

H_{t2} —SNCR还原剂蒸发温度（100℃）焓值，kJ/kg；

H_{t1} —SNCR还原剂喷射温度焓值，kJ/kg；

Q_{ar} —入炉燃料收到基发热量，kJ/kg。

还原剂溶液随即进入蒸发过程，蒸发吸热量按照公式（34）计算：

$$q_b = \frac{q_m r}{B_j Q_{ar}} \times 100 \quad (34)$$

式中：

q_b —SNCR还原剂蒸发过程吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例，%；

r —SNCR还原剂气化潜热，kJ/kg。

还原剂溶液蒸发后，其蒸汽继续吸热，最终达到与排烟温度相同的温度。该过程吸热量按照公式（35）计算：

$$q_c = \frac{q_m(H_{t4}-H_{t3})}{B_j Q_{ar}} \times 100 \quad (35)$$

式中：

q_c —SNCR还原剂蒸发相变后升至排烟温度时吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例，%；

H_{t4} —SNCR还原剂（气态）排烟温度下焓值，kJ/kg；

H_{t3} —SNCR还原剂（气态）蒸发温度下焓值，kJ/kg。

综上，还原剂溶液蒸发吸热全过程的总吸热量按照公式（36）计算：

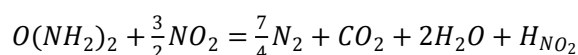
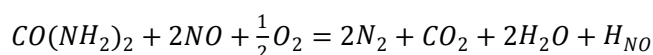
$$q_1 = q_a + q_b + q_c \quad (36)$$

式中：

q_1 —SNCR还原剂蒸发吸热全过程总吸热量占锅炉入炉燃料热值的比例，%。

b) 脱硝反应放热

SNCR系统中尿素与NO_x的反应式如下：



H_{NO} 、 H_{NO_2} 分别为两个反应对应的反应热。这两个反应均为放热反应，脱硝反应放热量按照公式（37）计算：

$$q_2 = \frac{1000B_{ns}}{60\gamma B_j Q_{ar}} (0.956H_{NO} + 0.044H_{NO_2}) \times 100 \quad (37)$$

式中：

q_2 —SNCR尿素与NO_x反应放热量占锅炉入炉燃料热值的比例，%；

H_{NO} —SNCR尿素与NO反应的反应热，kJ/mol；

H_{NO_2} —SNCR尿素与NO₂反应的反应热，kJ/mol。

c) 锅炉排烟焓变化

还原剂溶液喷入炉膛后，由反应生成的水蒸气、CO₂与N₂会增大烟气体积，造成锅炉烟气排烟焓的增大，进而增大排烟损失，导致锅炉整体效率的下降。但已有研究显示，锅炉排烟焓变化对锅炉效率的影响非常小，可忽略。

d) 也可以按照以下规定近似计算脱硝热损失

当入口NO_x浓度≤100mg/m³时，脱硝效率40%以上时，脱硝总热损失按0.1%计算，燃料量增加按0.11%B_j，折标后0.11B_j·0.7413；当入口100<NO_x浓度≤200mg/m³时，脱硝效率40%以上时，脱硝总热损失按0.4%计算，燃料量增加按0.44%B_j，折标后0.44B_j·0.7413；当入口NO_x浓度>200mg/m³时，脱硝效率40%以上时，脱硝总热损失按1%计算，燃料量增加按1.11%B_j，折标后1.11B_j·0.7413。

8.2 SCR 脱硝

8.2.1 SCR 脱硝经济性评价

8.2.1.1 还原剂费用

SCR还原剂一般使用液氨，其它还原剂参照执行。当氨氮摩尔比为0.9时，脱硝效率可达90%。因此氨氮摩尔比取0.9，可以满足排放要求。液氨消耗量按照公式（38）计算：

$$B_{NH_3} = \frac{17\gamma' C_{NOx} V_y}{30.8 \times 10^9} \quad (38)$$

式中：

B_{NH_3} —SCR液氨消耗量，t/h；

γ' —SCR氨氮摩尔比。

液氨费用按照公式（39）计算：

$$W'_1 = B_{NH_3} v'_1 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (39)$$

式中：

W'_1 —SCR液氨费用，万元；

v'_1 —SCR液氨单价，元/t。

8.2.1.2 运行耗电费用

SCR液氨脱硝工艺主要耗电设备有液氨卸料压缩机、液氨泵、稀释风机以及废水泵。本文件将固定连续运行设备功率 P'_g 和其余设备电耗随液氨量变化情况分开处理。根据锅炉运行数据确定脱硝耗电功率 P'_2 ，则该耗电功率按照公式（40）计算：

$$P'_2 = P'_g + 100 B_{NH_3} \dots\dots\dots (40)$$

式中：

P'_2 —SCR脱硝系统耗电功率，kW；

P'_g —SCR系统固定连续运行设备功率，kW。

运行耗电费用按照公式（41）计算：

$$W'_2 = P'_2 v'_2 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (41)$$

式中：

W'_2 —SCR系统耗电费用，万元；

v'_2 —SCR运行电价，元/kW·h。

8.2.1.3 运行蒸汽费用

吹灰以及加热还原剂需消耗蒸汽。蒸汽耗量费用按照公式（42）计算：

$$W'_3 = s v'_3 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (42)$$

式中：

W'_3 —SCR蒸汽耗量费用，万元

s —SCR蒸汽耗量，t/h；

v'_3 —SCR运行蒸汽价格，元/t（此处可以取180元/t）。

8.2.1.4 运行催化剂费用

催化剂的运行费用按照公式（43）计算：

$$W'_4 = \frac{V}{h} v'_4 H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (43)$$

式中：

W'_4 —SCR催化剂运行费用，万元；
 V —SCR催化剂更换体积， m^3 ；
 h —SCR催化剂使用周期，h；
 v'_4 —SCR催化剂价格，元/ m^3 。

8.2.2 SCR脱硝（使用液氨）能耗评价

8.2.2.1 运行耗电折标

SCR液氨脱硝工艺主要耗电设备有液氨卸料压缩机、液氨泵、稀释风机以及废水泵。本文件将固定连续运行设备轴功率和其余设备电耗随液氨量变化情况分开处理。根据锅炉运行数据确定脱硝耗电功率 P'_2 ，运行耗电折标按照公式（44）计算：

$$E_5 = P'_2 \cdot H \cdot \varphi_1 \dots\dots\dots (44)$$

式中：

E_5 —SCR运行耗电折标，kgce。

8.2.2.2 蒸汽耗量折标

吹灰以及加热还原剂需消耗蒸汽。蒸汽耗量折标按照公式（45）计算：

$$E'_5 = 1000s \cdot H \cdot \varphi_4 \dots\dots\dots (45)$$

式中：

E'_5 —SCR吹灰及加热还原剂蒸汽耗量折标，kgce；
 s —SCR蒸汽耗量，t/h；
 φ_4 —蒸汽折标系数，0.1286kgce/kg。

8.2.3 其它费用

8.2.3.1 折旧成本

脱硝装置折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用参照公式（15）计算。

8.2.3.2 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用参照公式（16）计算。

8.2.3.3 人工成本

假定每台机组增加运行人员 n 人，每人年均工资 y 万元，人工费用参照公式（17）计算。

8.2.3.4 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本参照公式（18）计算。

9 耦合除尘过程的能效评价

9.1 布袋除尘器

9.1.1 布袋除尘器经济性评价

若为设计阶段，依据设计数据，分别计算阻力导致引风机增加的功率、压缩空气系统增加的功率消耗、除尘器运行的功率消耗。若为运行阶段，可以根据运行数据分别计算阻力导致引风机增加的功率、压缩空气系统增加的功率消耗、除尘器运行的功率消耗。

9.1.1.1 阻力导致引风机增加的功率消耗费用

布袋除尘器阻力增加的引风机功率运行费用按照公式（46）计算：

$$W_{bdc1} = \Delta p Q v_{bdc1} H \times \frac{10^{-4}}{0.85} \dots\dots\dots (46)$$

式中：

W_{bdc1} —布袋除尘器阻力增加的引风机功率运行费用，万元；

Δp —布袋除尘器进出口压差，Pa；

Q —布袋除尘器的进口风量， m^3/s ；

v_{bdc1} —引风机电价，元/ $kW \cdot h$ 。

9.1.1.2 压缩空气系统增加的功率消耗费用

布袋除尘器压缩空气增加（运行）费用按照公式（47）计算：

$$W_{bdc2} = 0.746 P_{adc1} H v_{adc2} [R_{adc} + R'_{adc}] \times \frac{10^{-4}}{0.9} \dots\dots\dots (47)$$

式中：

W_{bdc2} —布袋除尘器压缩空气运行费用，万元；

P_{adc1} —压缩空气马达全载功率，kW；

v_{bdc2} —压缩空气马达电价，元/ $kW \cdot h$ ；

R_{adc} —马达全载运转时间比，%；

R'_{adc} —马达空载运转时间比，%。

9.1.1.3 除尘器运行的功率消耗

布袋除尘器运行的电费按照公式（48）计算：

$$W_{bdc3} = P_{adc2} v_{bdc3} H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (48)$$

式中：

W_{bdc3} —布袋除尘器运行电费，万元；

P_{adc2} —布袋除尘器配套设备电机运行功率，kW；

v_{bdc3} —布袋除尘器运行电价，元/ $kW \cdot h$ 。

9.1.2 布袋除尘器能耗评价

9.1.2.1 阻力导致引风机增加的功率消耗折标

布袋除尘器引风机增加的功率能耗折标按照公式（49）计算：

$$E_{bdc1} = \Delta p Q \varphi_1 H \times \frac{10^{-4}}{0.85} \dots\dots\dots (49)$$

式中：
 E_{bdc1} —布袋除尘器引风机增加的功率能耗折标，kgce。

9.1.2.2 压缩空气系统增加的功率消耗折标

布袋除尘器压缩空气系统能耗折标按照公式（50）计算：

$$E_{bdc2} = 0.746 P_{adc2} H \varphi_1 [R_{adc2} + R'_{adc2}] \times \frac{10^{-4}}{0.9} \dots\dots\dots (50)$$

式中：
 E_{bdc2} —布袋除尘器压缩空气系统能耗折标，kgce。

9.1.2.3 除尘器运行的功率消耗折标

布袋除尘器运行能耗折标按照公式（51）计算：

$$E_{bdc3} = P_3 \varphi_1 H \dots\dots\dots (51)$$

式中：
 E_{bdc3} —布袋除尘器运行能耗折标，kgce。

9.2 电袋除尘器

9.2.1 电袋除尘器经济性评价

9.2.1.1 电袋复合除尘的功耗

电袋复合除尘的功耗应为电除尘和布袋除尘的功耗累加。

9.2.1.2 引风机功率增加消耗费用

引风机的功率增加消耗费用参照公式（46）计算。

9.2.1.3 压缩空气系统增加的功率消耗费用

压缩空气系统增加的功率消耗费用参照公式（47）计算。

9.2.1.4 本体设备能耗费用

电袋除尘器本体设备能耗包括除尘设施的全部用电设备，例如一、二次整流变压器，变频设备，加热装置等，消耗费用参照公式（48）计算。

9.2.2 电袋除尘器能耗评价

9.2.2.1 电袋复合除尘的功耗

电袋复合除尘的能耗应为电除尘和布袋除尘的能耗累加。

9.2.2.2 引风机功率消耗能耗折标

引风机的功率消耗能耗折标参照公式（49）进行计算。

9.2.2.3 压缩空气系统增加的功率能耗折标

压缩空气系统增加的功率消耗能耗折标参照公式（50）进行计算。

9.2.2.4 本体设备能耗折标

电袋除尘器本体设备能耗包括除尘设施的全部用电设备，例如一、二次整流变压器，变频设备，加热装置等，能耗折标参照公式（51）计算。

9.3 湿电除尘器

9.3.1 湿电除尘器经济性评价

9.3.1.1 除尘器阻力电耗费用

湿电除尘器阻力电耗费用参照公式（46）进行计算。

9.3.1.2 除尘器其他电耗费用

湿电除尘器高压供电设备和低压用电设备等电耗费用参照公式（48）计算。

9.3.2 湿电除尘器能耗评价

9.3.2.1 除尘器阻力电耗的能耗折标

湿电除尘器阻力电耗能耗折标参照公式（49）进行计算。

9.3.2.2 除尘器其他电耗的能耗折标

湿电除尘器高压供电设备和低压用电设备等等的电耗折标，参照公式（51）计算。

9.3.3 其他费用

9.3.3.1 折旧成本

脱硝装置折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用参照公式（15）计算。

9.3.3.2 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用参照公式（16）计算。

9.3.3.3 人工成本

假定每台机组增加运行人员n人，每人年均工资y万元，人工费用参照公式（17）计算。

9.3.3.4 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本参照公式（18）计算。

10 余热回收评价

10.1 高温烟气余热回收

10.1.1 高温烟气余热回收要求

由于布袋除尘器入口温度要高于露点温度，不建议使用布袋除尘器的燃煤锅炉在布袋除尘器前加装高温烟气余热回收装置，应通过锅炉本体空气预热器使布袋除尘器入口烟温降到170℃以下。

10.1.2 高温烟气余热回收经济性评价

10.1.2.1 回收能量

包括显热计算和潜热按照公式（52）计算：

$$EN = (EN_1 + EN_2)V_{gy}v_{gy}H \times 10^{-4} \dots\dots\dots (52)$$

式中：
EN—高温烟气余热回收产生的经济效益，万元；
EN₁—高温烟气余热显热回收，kJ/m³；
EN₂—高温烟气余热潜热回收，kJ/m³；
V_{gy}—高温烟气余热回收高温烟量，m³/h；
v_{gy}—高温余热回收热量价格，元/kJ。

10.1.2.2 成本计算

包括换热器及其附件成本。

10.1.2.3 折旧成本

换热器折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用参照公式（15）计算。

10.1.2.4 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用参照公式（16）计算。

10.1.2.5 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本参照公式（18）计算。

10.1.3 高温烟气余热回收能耗评价

10.1.3.1 阻力导致引风机增加的功率消耗折标

引风机的功率消耗能耗折标按式（49）进行计算。

10.1.3.2 余热回收装置电耗的能耗折标

余热回收装置水泵等设备电耗能耗折标，参照式（51）计算。

10.2 低温烟气余热回收（脱硫余热回收）

10.2.1 低温烟气余热回收经济性

低温烟气余热回收（脱硫余热回收）经济性评价需输入量见如表2，能耗计算如表3。

表 2 低温烟气余热回收经济型评价输入量

序号	符号	名称	单位	取值或来源
1	D	锅炉蒸发量	t/h	按设计值或实际运行负荷
2	V_0	每蒸吨锅炉烟气量	Nm ³ /h	按设计值或实际值
3	t_a	脱硫塔出口烟温	℃	按照脱硫系统设计书或测量值
4	t_b	填料塔出口烟温	℃	取值范围 25~30
5	η_{SO_2}	脱硫塔出口 SO ₂ 含量	mg/Nm ³	按不同排放标准取值
6	t_{rwhs}	热网回水温度	℃	按热网设计值或运行值
7	t_{rwgs}	吸收式热泵热网水出口温度	℃	基于吸收式热泵选型
8	h_{zq}	吸收式热泵驱动蒸汽焓值	kJ/kg	基于吸收式热泵选型
9	h_{ss}	吸收式热泵驱动蒸汽疏水焓值	kJ/kg	基于吸收式热泵选型
10	Δh_{yure}	余热水循环水泵压头	mH ₂ O	基于填料塔设计
11	Δh_{rb}	热网水循环水泵水阻	mH ₂ O	基于吸收式热泵选型
12	$\Delta h_{shushui}$	疏水泵压头	mH ₂ O	基于系统设计
13	Δh_{yiliu}	溢流水泵压头	mH ₂ O	满足脱硫塔除雾要求
14	η_{xhs}	额定循环水量占总循环水量的比例（溢 出流水引起余热量损失）	%	设计值
15	t_{yfi}	引风机处烟温	℃	设计值
16	V_{gas}	引风机前实际烟气流量	m ³ /h	设计值
17	Δp	增设填料塔引起的烟气阻力增加	Pa	设计值
18	q_{yiliu}	低温余热溢流水流量	m ³ /h	设计值
19	u_6	低温余热运行电价	元/kW·h	/
20	u'_6	低温余热装置回收水单价	元/t	/
21	u''_6	Na ₂ CO ₃ 价格	元/kg	/
22	v_{dy}	低温余热价格	元/GJ	/

表 3 低温烟气余热回收能耗计算

序号	符号	名称	单位	计算公式或取值
1	V_a	脱硫塔出口烟气流量	Nm ³ /h	$V_a = DV_0$
2	P_a	脱硫系统出口（ t_a 温度）水蒸气饱和压 力	MPa	$P_a = (611.7927 + 42.7809t_a + 1.6883t_a^2 + 1.2079 \times 10^{-2}t_a^3 + 6.1637 \times 10^{-4}t_a^4) \times 10^{-6}$
3	$\eta_{szq,a}$	脱硫系统出口饱和水蒸气体积分数	%	$\eta_{szq,a} = P_a / 0.101 \times 100$

序号	符号	名称	单位	计算公式或取值
4	m_a	脱硫系统出口对应单位体积烟气中的饱和蒸汽量	g/Nm ³	$m_a = 1.293 \times 180\eta_{szq,a}/29$
5	P_b	节水塔系统出口水蒸气饱和压力	MPa	参考脱硫系统出口水蒸气饱和压力
6	$\eta_{szq,b}$	节水塔系统出口饱和水蒸气体积分数	%	$\eta_{szq,b} = P_b/0.101 \times 100$
7	m_b	节水塔系统出口对应饱和蒸汽含水	g/Nm ³	$m_b = 1.293 \times 180\eta_{szq,b}/29$
8	M_a	节能塔入口烟气中含水蒸气的量	t/h	$M_a = V_a m_a \times 10^{-6}$
9	V_g	节能塔入口的烟气中干烟气总量	Nm ³ /h	$V_g = V_a \times (1 - \eta_{szq,a})$
10	V_b	节能塔出口烟气总量	Nm ³ /h	$V_b = 1/(1 - \eta_{szq,b}/100)V_g$
11	M_b	节能塔出口烟气中含水蒸气的量	t/h	$M_b = V_b m_b \times 10^{-6}$
12	ΔM	低温余热烟气回收水量	t/h	$\Delta M = M_a - M_b$
13	Q_{qr}	冷凝出的蒸汽潜热	MW	$P_{qr} = 0.7 \Delta M$
14	Δt	低温余热烟气降温	℃	$\Delta t = t_a - t_b$
15	c_{gas}	低温余热烟气比热容	kJ/(kg·K)	由烟气温度及成分查表
16	Q_{gas}	低温余热烟气降温的显热	MW	$Q_{gas} = c_{gas} V_g \Delta t / (2500 \times 1000)$
17	ΔQ_0	低温余热回收的理论余热量	MW	$\Delta Q_0 = Q_{gas} + Q_{qr}$
18	t_{plsrk}	低温余热喷淋水入口温度	℃	$t_{plsrk} = t_b - 5$
19	q_{yure}	喷淋水循环水量	m ³ /h	设计值
20	Q_{shiji}	低温余热回收的实际余热量	MW	$Q_{shiji} = \Delta Q_0 \eta_{xhs}$
21	η_{tuochu}	填料层对 SO ₂ 脱除率	%	设计值（可取 55%）
22	$\eta_{yanghua}$	SO ₂ 氧化率	%	强制氧化，可取 100%
23	m_{SO_2}	低温余热烟气中 SO ₂ 总量	kg/h	$m_{SO_2} = \eta_{SO_2} V_a \times 10^{-6}$
24	$m_{SO_2,O}$	低温余热氧化 SO ₂ 量	kg/h	$m_{SO_2,O} = m_{SO_2} \eta_{tuochu} \eta_{yanghua}$
25	$m_{H_2SO_4}$	低温余热 H ₂ SO ₄ 总量	kg/h	$m_{H_2SO_4} = V_a \eta_{SO_2} \eta_{tuochu} \eta_{yanghua} \times 10^{-6} \times 98/64$
26	m_{H^+}	低温余热 H ⁺ 物质的量	mol/h	$m_{H^+} = m_{H_2SO_4} \times 1000/98 \times 2$
27	$m_{Na_2CO_3}$	Na ₂ CO ₃ 消耗量	kg/h	$m_{Na_2CO_3} = m_{H^+} \times 106/(2 \times 1000)$
28	Q_{rb}	吸收式热泵总制热量	MW	$Q_{rb} = 1.7 P_{shiji}/0.7$
29	q_{rewang}	吸收式热泵热网水流量	m ³ /h	$q_{rewang} = 3.6 \times 10^3 Q_{rb} / (4.18 t_{rwgs} - 4.18 t_{rwhs})$
30	$q_{shushui}$	吸收式热泵疏水流量	m ³ /h	$q_{shushui} = 3.6 \times 10^3 Q_{rb} / (1.7 h_{zq} - 1.7 h_{ss})$
31	P_{yure}	余热水循环水泵功率	kW	$P_{yure} = 9.81 Q_{yure} \Delta h_{yure} / 2880$
32	P_{rewang}	热网水循环水泵增加功率	kW	$P_{rewang} = 9.81 q_{rewang} \Delta h_{rb} / 2880$

序号	符号	名称	单位	计算公式或取值
33	$P_{shushui}$	疏水水泵功率	kW	$P_{shushui} = 9.81q_{shushui}\Delta h_{shushui}/2880$
34	P_{yiliu}	溢流水泵功率	kW	$P_{yiliu} = 9.81q_{yiliu}\Delta h_{yiliu}/2880$
35	P_{rb}	吸收式热泵功率	kW	$P_{rb} = 1.5P_{shuchu}$
36	P_{yffj}	引风机增加功率	kW	$P_{yffj} = 1.4V_{gas}\Delta p \times 10^{-3}$
37	P_{yrz}	余热回收设备总功率	kW	$P_{yrz} = P_{yure} + P_{rewang} + P_{shushui} + P_{shushui} + P_{yiliu} + P_{rb}$

10.2.1.1 运行耗电费用

低温烟气余热回收装置运行耗电费用按照公式（53）计算：

$$V_6 = 10^{-4}P_{yrz}u_6H \quad (53)$$

式中：

V_6 —低温余热运行耗电费用，万元；

u_6 —低温余热运行电价，元/kW·h。

10.2.1.2 Na_2CO_3 消耗费用

低温烟气余热回收装置 Na_2CO_3 消耗费用按照公式（54）计算：

$$V_6'' = 10^{-4}m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}u_6'H \quad (54)$$

式中：

V_6'' —低温余热 Na_2CO_3 费用，万元；

u_6' — Na_2CO_3 单价，元/t。

10.2.1.3 回收的水（节水）效益

低温烟气余热回收的水（节水）效益按照公式（55）计算：

$$EN_1' = 10^{-4}\Delta Mu_6''H \quad (55)$$

式中：

EN_1' —低温余热节水增益，万元；

u_6'' —低温余热节水单价，元/t。

10.2.1.4 低温余热回收（余热）经济效益

低温烟气余热回收（余热）经济效益按照公式（56）计算为：

$$EN_2' = 10^{-4}P_{shiji}v_{dy} \quad (56)$$

式中：

EN'_2 —低温余热经济效益（余热），万元；
 v_{dy} —低温余热单价（余热），元/GJ。

10.2.2 其他费用

10.2.2.1 折旧成本

脱硝装置折旧年限为15年，固定资产形成率为95%，则折旧费用参照公式（15）计算。

10.2.2.2 维修成本

维修费用按静态投资的3%计算，则维修费用参照公式（16）计算。

10.2.2.3 人工成本

假定每台机组增加运行人员n人，每人年均工资y万元，人工费用参照公式（17）计算。

10.2.2.4 财务成本

财务费用按静态投资的5%计算，则财务成本参照公式（18）计算。

10.2.3 低温烟气余热回收能耗评价

10.2.3.1 运行耗电折标

低温余热耗电折标按照公式（57）计算：

$$E_6 = P_{yrz} H \varphi_1 \dots\dots\dots (57)$$

式中：
 E_6 —低温余热耗电折标，kgce。

10.2.3.2 回收水增益折标

低温余热回收水增益折标按照公式（58）计算：

$$E'_6 = \Delta M H \varphi_3 \dots\dots\dots (58)$$

式中：
 E'_6 —低温余热回收水增益折标，kgce。