
目 录

一、项目背景.....	1
1.1 青岛热电 1#锅炉系统概况.....	1
1.2 测试依据.....	2
二、WT高温节能防腐涂料技术	3
2.1 WT高温节能防腐涂料的防腐原理	3
2.2 WT高温节能防腐涂料的节能原理	4
三、1 号锅炉改造前锅炉热效率测试分析.....	7
3.1 节能改造前的锅炉运行和测试参数.....	7
3.2 节能改造前的 1#锅炉热效率计算.....	9
四、1 号锅炉改造后锅炉热效率测试分析.....	14
4.1 节能改造后的锅炉运行和测试参数.....	14
4.2 节能改造后的 1#锅炉热效率计算.....	16
五、节能经济效益分析.....	21
六、结论和建议.....	21
附录 1 锅炉热效率测试试验仪器设备.....	22
附录 2 锅炉灰渣平衡百分率.....	23
附录 3 烟气、灰和空气的平均定压比热容.....	24

一、项目背景

1.1 青岛热电 1#锅炉系统概况

青岛热电股份有限公司是集供热、发电于一体的技术密集型企业，拥有 4 台 75t/h 蒸汽锅炉，发电能力为 2.4 亿 kWh/年。

青岛热电股份公司 1 号锅炉选用北京巴布布尔克·威尔科克斯有限公司产品，型号为 B&WB-75/5.3-M，1993 年安装，1994 年正式投产运行。该锅炉系统只有过热系统，没有配置再热系统。

锅炉设计参数如下：

项目	单位	设计值
最大连续蒸发量	t/h	75
过热蒸汽压力	MPa	5.3
锅炉工作压力	MPa	5.83
给水压力	MPa	7.845
过热蒸汽温度	°C	450
给水温度	°C	104
排烟温度	°C	163.4
热风温度	°C	353
排烟热损失	%	7.0
气体未完全燃烧热损失	%	0.0
固体未完全燃烧热损失	%	2.0
散热损失	%	0.78
灰渣物理热损失	%	0.0
锅炉效率	%	90.2
计算燃煤量	t/h	11.098

锅炉设计煤质为贫煤，设计煤质特性如下：

项目	符号	单位	设计参数
收到基碳	C_{ar}	%	53.78
收到基氢	H_{ar}	%	2.57
收到基氧	O_{ar}	%	2.24
收到基氮	N_{ar}	%	0.74
收到基硫	S_{ar}	%	3.32
收到基灰份	A_{ar}	%	0.85
收到基水分	M_{ar}	%	6.5
干燥无灰基挥发份	V_{daf}	%	17.8
收到基低位发热量	$Q_{net,ar}$	kJ/kg	21245
燃料温度	T_r	°C	-

1.2 测试依据

本项目依据以下标准进行测试分析和计算：

- (1) 《电站锅炉性能试验规程》 GB 10184-88
- (2) 《火电厂燃料试验方法 飞灰和炉渣可燃物测定方法 》 DL/T 565.6-1995
- (3) 《燃料元素的快速分析方法》 DL/T 568-1995
- (4) 《煤样的制备方法 》 GB 474-1996
- (5) 《煤的工业分析方法 》 GB/T 212-2001
- (6) 《煤的发热量测定方法 》 GB/T 213-2003
- (7) 《煤中全水分的测定方法 》 GB/T 211-2007
- (8) 《高温燃烧红外测硫法 》 ASTM D4239-2008

二、WT 高温节能防腐涂料技术

2.1 WT 高温节能防腐涂料的防腐原理

WT 高温节能防腐涂料覆盖在金属表面，使金属制品与外界介质隔离开来，以阻碍外界高温气氛及腐蚀物质如： O_2 、 S 、 Cl_2 对金属表面的腐蚀。

WT 高温节能防腐涂料涂层具有以下优点：结构紧密，完整无孔，不透过介质；与底层金属有很强的结合力；高硬度，耐磨，耐腐蚀，耐高温；均匀分布在整個保护面上，与基体热容性好。

(1) 该涂料的粘结剂是改性无机粘结剂和改性有机粘结剂在添加剂帮助下复合而成，偏于弱酸性，提供羟基。金属基体可提供正离子，正好与羟基形成化学键结合，在偶联剂的帮助下，甚至实现共价链的结合。在涂料中可提供 Cr^{3+} 、 Si^{4+} 、 CO_3^- 、 Al^{3-} ，其半径分别为 0.064 nm，0.041 nm，0.063 nm，0.051nm，它们在涂层烧结中容易渗进金属基体界面与 Fe 基、AL 基、或者 Cu 基固熔形成界面过渡层，产生“钉扎”效应。涂层的粘结剂浸润金属和填料，在 O-Si-O 键的空间网状结构维系下，形成一个致密和坚硬的整体，其综合热力学性质与基体是相匹配的。因此能够与基体牢固结合。

(2) 涂料的填料是以致网剂 SiO_2 和耐腐蚀绕结剂 Cr_2O_3 ， Al_2O_3 等组成。致网剂在粘结剂的帮助下形成三维网状结构，O-Si-O 键无论低温或是高温都保持宏观无序的结晶状态，结构间隙 0.158 nm 左右，腐蚀性离子 O^{2-} 、 Cl^- 、 S^{4+} 的离子半径依序是 0.14 nm，0.18 nm 和 0.053 nm，并不容易渗过 O-Si-O 网络腐蚀金属基体，何况有机粘结剂补偿无机网络，提高涂层的致密度，在偶联剂帮助下，有机和无机成份不是“油水”分离，而是润湿性、分散性都很好的有机结合，烧结反应之后，形成坚硬致密的薄膜。因此具有耐腐蚀性。

由于 WT 高温节能防腐涂料采用涂层烧结形成陶瓷膜的配方，因而涂料涂层在高温烧结时形成的陶瓷膜具有较强的耐磨性，大约是 20# 钢的耐磨性的 5-10 倍。

2.2 WT 高温节能防腐涂料的节能原理

根据普朗克辐射理论，温度为 1273K 的辐射体，其 1-5 μ m 波段的辐射能占全波段辐射总能的 76%；当辐射温度为 1573K，1-5 μ m 波段的辐射能量占全波段辐射能量的 85%，因此提高锅炉内衬（向火面）1-5 μ m 波段的辐射率是提高锅炉热效率的关键。

WT 高温节能防腐涂料在高温中的节能作用，主要有两个方面：

(1) 提高锅炉内衬（向火吸热面）1-5 μ m 波段的辐射率，其潜在吸收热能的能力提高 10% 左右。

首先估算锅炉内衬（向火吸热面）单位面积，单位时间因 1-5 μ m 波段发射率提高而增加的辐射能量为：

$$\Delta W = W' - W$$

式中 W' 是涂层单位面积、单位时间辐射的能量， W 是锅炉内衬（向火吸热面）的单位面积、单位时间辐射的能量。

$$W' = \int_0^{\infty} \varepsilon_{2\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$$

$$W = \int_0^{\infty} \varepsilon_{1\lambda} E_{b\lambda} d\lambda$$

式中 $\varepsilon_{1\lambda}$ 是锅炉内衬（向火吸热面）单色辐射率； $\varepsilon_{2\lambda}$ 是 WT 高温节能防腐涂料涂层单色辐射率， $E_{b\lambda}$ 是绝对黑体单色辐射强度。

$$\Delta W = \int_0^{\infty} (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) E_{b\lambda} d\lambda$$

锅炉内衬（向火吸热面）辐射率与 WT 高温节能防腐涂料涂层辐射率相差主要在 1-5 μ m 波段，其它波段相差很小，可忽略不计。运用中值定理：

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^{\infty} (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) E_{b\lambda} d\lambda \\ &= (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) \int_1^5 E_{b\lambda} d\lambda \end{aligned}$$

根据普朗克辐射理论，在 1000℃ 时绝对黑体全波段的总辐射能量有 76% 分布在 1-5 μ m 波段，所以

$$\begin{aligned} \Delta W &= 0.76 \times (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda \\ &= 0.76 \times (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) \times \delta \times T^4 \end{aligned}$$

锅炉的内衬（向火吸热面）一般采用 20# 碳钢制造，则 $\varepsilon_{1\lambda}=0.60$ ，而 WT 高温节能防腐涂料涂层的 $\varepsilon_{2\lambda}=0.9$

$$\delta \text{ 是斯忒潘-玻尔兹曼常数, } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.6697 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$\begin{aligned} \Delta W &= 0.76 \times (0.9 - 0.6) \times 5.67 \times 10^{-8} \times (1273)^4 \\ &= 3.3 \times 10^4 \text{ (W/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

黑体 $\Delta W/W$ 是单位面积炉衬因辐射率提高 $\Delta \varepsilon$ 而提高的吸热效率，但是燃烧的辐射能量只是部分直接辐射到锅炉内衬(向火吸热面)，所以要乘上一个折算因子 $k_1=0.8$ ；另外，射到涂料涂层上的入射波只是部分吸收亦要乘上一个因子 $k_2=0.9$ 。

因涂层做锅炉内衬(向火吸热面)而增加的加热效率：

$$\begin{aligned} \eta &= k_1 \times k_2 \times \Delta W/W \\ &= 0.8 \times 0.9 \times 0.76 \times (\varepsilon_{2\lambda} - \varepsilon_{1\lambda}) \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda / \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda \\ &= 0.164 \approx 16\% \end{aligned}$$

由此得出理论结论：在高温加热锅炉中，用 WT 高温节能防腐涂料，其潜在的吸热能力可以提高 10% 左右。

(2) 优化强化红外匹配波谱，提高加热效率，缩短升温时间，使辐射场温度均匀，保障燃烧安全。

由于 WT 高温节能防腐涂料具有 0.9 以上的发射率，因而可以提高锅炉内热能 1-5 μm 波的增加。同时，涂层发射率相对于金属表面的发射率的提高，增强了炉膛内吸热面的辐射量，提高了灰分的搅动，确保炉膛内的温度均匀及减少灰分在吸热面上的附着，使燃烧更充分，降低了灰分中的含碳量。另外，锅炉燃烧后排放的气体大多是三原子气体（如 CO_2 ， SO_2 等），他们的黑度较低（图 2-1），相对于 WT 高温节能防腐涂料黑度为 0.9 的涂层吸收辐射能量较差。所以使用 WT 高温节能防腐涂料可以充分吸收燃烧辐射能量，同时进一步充分燃烧，同时降低排烟温度，就可以提高锅炉的热效率。

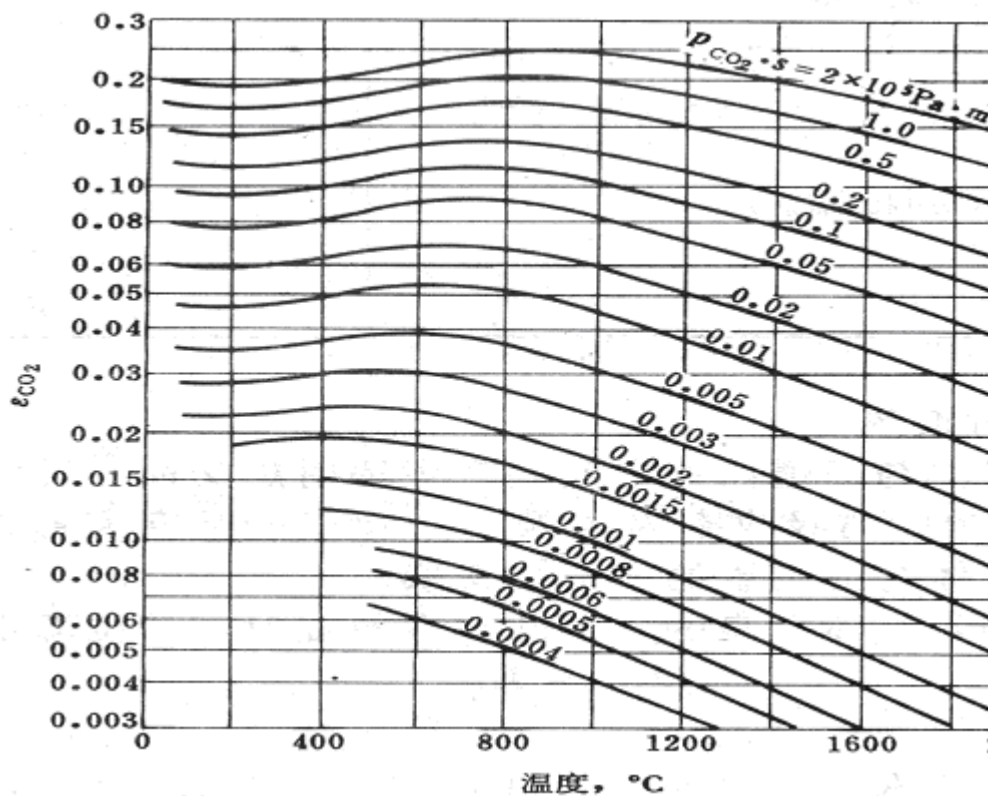


图 2-1 CO_2 的黑度曲线图

三、1 号锅炉改造前锅炉热效率测试分析

3.1 节能改造前的锅炉运行和测试参数

2007 年 7 月 18 日上午，按照与热电公司达成一致的测试方案，中国电力科学研究院能效测试与节能技术研究室工作人员在 1 号炉尾部烟道进行烟气分析采样测试，同时对锅炉飞灰、沉降灰、炉渣进行现场采样。锅炉实际运行参数如下：

表 3-1 锅炉实际运行参数

项目	符号	单位	表盘读取数值
机组功率	P_e	MW	45.5
主蒸汽流量	G_{ms}	t/h	66
主蒸汽压力	p_{ms}	MPa	5.25
主蒸汽温度	T_{ms}	°C	445±5
送风温度（一级预热器入口）	t_0	°C	35.3
排烟温度	t_{py}	°C	178.3
给水压力	p_{fw}	MPa	5.82
给水温度	T_{fw}	°C	104.0
汽包压力	p_{bl}	MPa	5.45
炉膛出口氧量	O_2	%	2.75

现场测试烟气成分参数如下：

表 3-2 现场测试烟气成分参数

测试项目	符号	单位	测量值
送风温度	t_0	°C	35.3
大气压力	p_{am}	kPa	99.6
大气温度（环境温度）	t_{am}	°C	29.5
空气相对湿度	Φ	%	75
排烟温度	t_{py}	°C	176.5
排烟氧量	O_2	%	10.5

排烟三原子气体量	RO ₂	%	9.3
排烟一氧化碳量	CO	ppm	8.2
排烟一氧化氮量	NO	ppm	264.2
排烟氢量	H ₂	ppm	8.0
排烟碳氢化合物量	C _m H _n	ppm	622.5

表 3-3 原煤工业分析和元素分析数据表

项目名称		样品名称	原煤 MJ2007001
全水分	收到基水分 M _{ar} (%)		6.2
工业分析	一般分析煤样水分 M _{ad} (%)		1.07
	收到基灰分 A _{ar} (%)		27.23
	收到基挥发分 V _{ar} (%)		16.45
	收到基固定碳 FC _{ar} (%)		50.12
	焦渣特征 CRC		(3) 弱粘性
元素分析	收到基碳 C _{ar} (%)		56.07
	收到基氢 H _{ar} (%)		3.30
	收到基氮 N _{ar} (%)		0.76
	收到基全硫 S _{t,ar} (%)		2.65
	收到基氧 O _{ar} (%)		3.79
收到基低位发热量 Q _{net,ar} (MJ/kg)			21.22

表 3-4 炉渣、沉降灰、飞灰样的含碳量分析数据表

样品名称	炉渣	沉降灰	飞灰样
项目名称	MJ2007002	MJ2007003	MJ2007004
可燃物 CM _{ad} (%)	5.51	7.43	6.12

3.2 节能改造前的 1#锅炉热效率计算

本项目采用反平衡法进行锅炉热效率计算：

$$\eta_{gl} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \%$$

(1) 输入热量 Q_r

$$Q_r = Q_{DW}^y + Q_{rx} \quad \text{kJ/kg}$$

式中 Q_{DW}^y -燃料收到基低位发热量, kJ/kg

Q_{rx} -燃料物理显热, kJ/kg

由于锅炉排烟的温度一般不低于 110-120℃, 烟气中的水蒸气不可能凝结, 因而锅炉中所能利用的热量只是燃料的低位发热量 Q_{DW}^y 。对于燃煤锅炉, 如果燃料和空气都没有利用外界热量进行预热时, $Q_r = Q_{DW}^y$ 。

本测试中, 现场测试的基准温度取环境温度 29.5℃, 输入热量只计燃料收到基低位发热量 Q_{DW}^y 。则 $Q_r = 21.22 \text{ MJ/kg}$

(2) 机械未完全燃烧热损失 Q_4

链条炉

$$Q_4 = Q_4^{lz} + Q_4^{fh} + Q_4^{lm} \quad \text{kJ/kg}$$

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 \quad \%$$

式中

Q_4^{lz} ——炉渣机械未完全燃烧热损失, kJ/kg ;

Q_4^{fh} ——飞灰机械未完全燃烧热损失, kJ/kg ;

Q_4^{lm} ——炉排漏煤机械未完全燃烧热损失, kJ/kg 。

本测试中, 由于漏煤热损失是指链条炉中未能完全燃烧的煤, 漏入灰斗造成的能量损失, 煤粉炉中没有该项损失。故只计算炉渣机械未完全燃烧热损失 Q_4^{lz} 和飞灰机械未完全燃烧热损失 Q_4^{fh} , 其计算公式为:

$$Q_4^{lz} = 337.27 A^y a_{lz} \frac{C_{lz}^c}{100 - C_{lz}^c} \quad \text{kJ/kg} \quad (6)$$

$$Q_4^{fh} = 337.27 A^y a_{fh} \frac{C_{fh}^c}{100 - C_{fh}^c} \quad \text{kJ/kg} \quad (7)$$

式中 C_{lz}^c 、 C_{fh}^c ——分别为炉渣和飞灰中可燃物含量百分数，%；

a_{lz} 、 a_{fh} ——分别为炉渣、飞灰量占入炉煤总灰量的质量份额。

经过原煤工业分析和可燃物含炭量化学分析试验，可得原煤收到基灰分 $A^y=27.23$ ，

$C_{lz}^c=5.51$ ， $C_{fh}^c=6.12$ 。

由于青岛热电采用的固态排渣系统以及钢球磨煤机或者中速磨煤机，根据 GB10148-1988 电站锅炉性能试验规程附录 E，选取 $a_{lz}=0.1$ ， $a_{fh}=0.9$

经过计算可得，锅炉机械不完全燃烧热损失 $Q_4=592.36\text{kJ/kg}$ ， $q_4=2.79\%$

影响机械不完全燃烧热损失的主要因素是燃料性质和运行人员的操作水平。煤中含灰分、水分越少， Q_4 越小；挥发分越多，煤粉越细，则机械不完全燃烧热损失越小；适当增大过量空气系数，可减少 Q_4 ；一、二次风适时混合，保持火焰不偏斜，维持适当炉温，可减少 Q_4 。机械不完全燃烧热损失是仅次于排烟热损失的锅炉热损失，固态排渣煤粉炉大约为 0.5%-5%。

(3) 排烟热损失 Q_2

排烟热损失按下式计算：

$$Q_2 = Q_{H_2O} + Q_{gy} = (V_{gy} c_{py} + V_{H_2O} c_{H_2O})(t_{py} - t_0) \quad \text{kJ/kg} \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% \quad (9)$$

式中

t_{py} 值在热平衡实验中测定，排烟温度 $t_{py}=176.5$ ；

根据 GB10184-88 电站锅炉性能试验规程第 4.1.3 条，规定锅炉送风机入口处空气温度为各项输入与输出能量的起算点，即基准温度，故取送风温度 $t_0=35.3$ 。

灰渣中平均含炭量与燃煤灰量的比率：

$$\beta_c = \frac{\alpha_{lz} C_{lz}^c}{100 - C_{lz}^c} + \frac{\alpha_{fh} C_{fh}^c}{100 - C_{fh}^c} = \frac{0.1 * 5.51}{100 - 5.51} + \frac{0.9 * 6.12}{100 - 6.12} = 0.0058 + 0.0587 = 6.45\%$$

燃料收到基实际烧掉的碳质量含量百分率：

$$C_{r,ar} = C_{ar} - A_{ar}\beta_c = 56.07 - 27.23 * 6.45\% = 54.3\%$$

$$\text{排烟处干烟气体积 } V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha_{py} - 1)V^0$$

$$\text{其中，理论干空气量 } V^0 = 0.089(C_{r,ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}$$

$$= 0.089(54.3 + 0.375 * 2.65) + 0.265 * 3.30 - 0.0333 * 3.79 = 5.669 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{理论干烟气量 } V_{gy}^0 = 1.866 \frac{C_{r,ar} + 0.375S_{ar}}{100} + 0.79V^0 + 0.8 \frac{N_{ar}}{100}$$

$$= 1.866 \frac{54.3 + 0.375 * 2.65}{100} + 0.79 * 5.669 + 0.8 * 0.0076 = 1.032 + 4.479 + 0.006 = 5.52 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{故得： } V_{gy} = 5.52 + (2.0 - 1) * 5.669 = 11.186 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{排烟处干烟气平均定压比热容 } c_{gy} = c_{co_2} \frac{RO_2}{100} + c_{N_2} \frac{100 - RO_2}{100}$$

$$= 1.7669 * 0.093 + 1.2990 * 0.907 = 1.1782 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

在附录 E 查询可知： $c_{co_2} = 1.7669$ ， $c_{N_2} = 1.2990$ ，（排烟温度为 176.5°C ）

同时查得： $c_{H_2O} = 1.5182 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$

$$\text{排烟处水蒸汽体积 } V_{H_2O} = 1.24 \left(\frac{9H_{ar} + M_{ar}}{100} + 1.293\alpha_{py}V^0d_k \right) = 0.99 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{式中， } d_k = 0.622 * \frac{\frac{\phi}{100} * p_{t_0}}{p_{am} - \frac{\phi}{100} * p_{t_0}} = 0.622 * \frac{\frac{74}{100} * 5714.15}{99600 - \frac{74}{100} * 5714.15} = 0.0275 \approx 0.03$$

在 $0-50^\circ\text{C}$ 内，温度 t_0 的水蒸气的饱和压力 p_{t_0} 按照下式计算：

$$p_{t_0} = 611.7927 + 42.7809t_0 + 1.6883t_0^2 + 0.01208t_0^3 + 6.1637 * 10^{-4}t_0^4$$

$$= 611.7927 + 1510.17 + 2103.77 + 531.36 + 957.06 = 5714.15 \text{ Pa}$$

（此处 t_0 取送风温度值 35.3°C ），空气湿度 $\Phi = 74\%$ ，大气压力 $p_{am} = 99600 \text{ Pa}$

综上所述，烟气中含水蒸气的显热 $Q_{H_2O} = V_{H_2O}c_{H_2O}(t_{py} - t_0) = 212.22 \text{ kJ}/\text{kg}$

干烟气带走的热量 $Q_{gy} = V_{gy}c_{py}(t_{py} - t_0) = 1860.92 \text{ kJ}/\text{kg}$

结合式（8），可得排烟热损失 $Q_2 = 2073.15 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，

则排烟热损失百分比 $q_2 = 9.77\%$

通常排烟热损失是锅炉热损失中较大的一项，一般装有省煤器的水管锅炉， q_2 约为

6% ~ 12%；不装省煤器时，往往高达 20% 以上。

(4) 化学未完全燃烧热损失 Q_3

$$Q_3 = V_{gy} (126.36CO + 358.18CH_4 + 107.98H_2 + 590.79C_mH_n) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \text{ kJ/kg} \quad (10)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100\%$$

式中：

V_{gy} —— 取样点处干烟气容积，如下式：

$$V_{gy} = \frac{1.866C_{ar} + 0.7S_{ar}}{RO_2 + CO} \quad \text{Nm}^3 / \text{kg} \quad (11)$$

CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_mH_n —— 取样点处干烟气中可燃气体 CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_mH_n 的容积百分比，%。

燃煤锅炉可认为 $CH_4 = 0, H_2 = 0, C_mH_n = 0$ 。

由于德图烟气分析仪 testo 350XL 只测量碳氢化合物百分含量，不能区别其中的 CH_4 ，故采用下列公式进行计算：

$$Q_3 = 126.36CO \frac{1.866C_{ar} + 0.7S_{ar}}{RO_2 + CO} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \quad (10)'$$

$$= 126.36 * 8.2 * 10^{-4} \frac{1.866 * 56.07 + 0.7 * 2.65}{9.3 + 8.2 * 10^{-4}} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)$$

$$= 1.186 \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) = 1.15 \text{ kJ/kg}$$

则 $q_3 = 0.01\%$

(5) 散热损失

按照附录 D 计算。

或者按照下列公式进行计算：

$$q_5 = q_5^e \frac{D_e}{D} = 1.30\%$$

式中，锅炉的额定蒸发量 $D_e = 75\text{t/h}$ ，锅炉效率试验时的蒸发量 $D = 65\text{t/h}$ ，

$$\text{额定蒸发量下的散热损失 } q_5^e = 5.82(D_e)^{-0.38} = 1.1282\%$$

(6) 灰渣物理热损失 Q_6

$$Q_6 = A_{ar} \frac{a_{lz}(ct)_{lz}}{100 - C_{lz}} \quad \text{kJ/kg} \quad (12)$$

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r} \times 100\% \quad (13)$$

式中：

C_{lz} ——炉渣可燃物含量， $C_{lz}=5.51\%$

a_{lz} ——炉渣含灰量占入炉煤总灰量的重量百分比，取经验值 0.1

t_{lz} ——灰渣离开炉膛时的温度，(当不能直接测量时，固态排渣煤粉炉 800°C ；
火床炉取 600°C ；链条炉 $t_{lz}=600^\circ\text{C}$ ；液态排渣火室炉取煤灰的熔化温 600°C)， $^\circ\text{C}$ ；

c_{lz} ——为炉渣， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ， c_{lz} 按下式计算：

$$c_{lz} = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t_{lz} \quad \text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}) \quad (14)$$

故得：灰渣物理热损失 $Q_6=0.032 \text{ kJ/kg}$ ， $q_6=0.0002\%$

(7) 排烟过量空气系数

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - (O_2 - 2CH_4 - 0.5CO - 0.5H_2)}$$

在简化计算中，过量空气系数可以按 $\alpha_{py} = \frac{21}{21 - O_2}$ 进行计算

$$\alpha_{py1} = \frac{21}{21 - 10.5} = 2.0$$

(8) 反平衡法求解锅炉热效率

$$\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \%$$

$$= 1 - (9.77\% + 0.01\% + 2.79\% + 1.3\% + 0.0002\%) = 1 - 13.9\% = 86.1\%$$

四、1号锅炉改造后锅炉热效率测试分析

4.1 节能改造后的锅炉运行和测试参数

2008年8月6日上午，按照与热电公司达成一致的测试方案，中国电力科学研究院能效测试与节能技术研究室工作人员在1号炉尾部烟道进行烟气分析采样测试，同时对锅炉飞灰、沉降灰、炉渣进行现场采样。锅炉实际运行参数如下：

表 4-1 锅炉实际运行参数表

项目	符号	单位	表盘读取数值
机组功率	P_e	MW	45.8
主蒸汽流量	G_{ms}	t/h	65
主蒸汽压力	p_{ms}	MPa	5.10
主蒸汽温度	T_{ms}	°C	445±5
送风温度（一级预热器入口）	t_0	°C	39.5
排烟温度	t_{py}	°C	162.5
给水压力	p_{fw}	MPa	5.58
给水温度	T_{fw}	°C	103.5
汽包压力	p_{bl}	MPa	5.33
炉膛出口氧量	O_2	%	3.87

现场测试烟气成份参数如下：

表 4-2 现场测试烟气成份参数表

测试项目	符号	单位	测量值
送风温度	t_0	°C	39.5
大气压力	p_{am}	kPa	99.1
大气温度（环境温度）	t_{am}	°C	30.2
空气相对湿度	Φ	%	65.8

排烟温度	t_{py}	°C	160
排烟氧量	O_2	%	11
排烟三原子气体量	RO_2	%	10.2
排烟一氧化碳量	CO	ppm	22.4
排烟一氧化氮量	NO	ppm	212.4
排烟氢量	H_2	ppm	-
排烟碳氢化合物量	C_mH_n	ppm	-

原煤工业分析和元素分析数据如下：

表 4-3 原煤工业分析和元素分析数据表

项目名称		样品名称	原煤 MJ20071372
全水分	收到基水分 $M_{ar}(\%)$		6.8
工业分析	一般分析煤样水分 $M_{ad}(\%)$		0.96
	收到基灰分 $A_{ar}(\%)$		20.93
	收到基挥发分 $V_{ar}(\%)$		12.73
	收到基固定碳 $FC_{ar}(\%)$		59.54
	焦渣特征 CRC		(2) 粘着
元素分析	收到基碳 $C_{ar}(\%)$		62.82
	收到基氢 $H_{ar}(\%)$		3.02
	收到基氮 $N_{ar}(\%)$		0.96
	收到基全硫 $S_{t,ar}(\%)$		1.57
	收到基氧 $O_{ar}(\%)$		3.90
收到基低位发热量 $Q_{net,ar}(\text{MJ/kg})$			24.06

炉渣、沉降灰、飞灰样的含碳量分析数据如下：

表 4-4 炉渣、沉降灰、飞灰样的含碳量数据表

样品名称	炉渣	沉降灰	飞灰样
项目名称	MJ20071373	MJ20071374	MJ20071375
可燃物 $CM_{ad}(\%)$	2.17	7.54	7.72

从改造前后的测试数据来看，烟气成分中，排烟CO和O₂含量增加，排烟SO₂、NO、

CO₂等气体含量降低, 排烟中氢气含量和碳氢化合物含量降低, 排烟温度降低 16℃左右。

4.2 节能改造后的 1#锅炉热效率计算

本项目采用反平衡法进行锅炉热效率测试计算公式:

$$\eta_{gl} = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (\%)$$

(1) 输入热量 Q_r

$$Q_r = Q_{DW}^y + Q_{rx} \quad \text{kJ/kg}$$

式中 Q_{DW}^y -燃料收到基低位发热量, kJ/kg

Q_{rx} -燃料物理显热, kJ/kg

由于锅炉排烟的温度一般不低于 110-120℃, 烟气中的水蒸气不可能凝结, 因而锅炉中所能利用的热量只是燃料的低位发热量 Q_{DW}^y 。对于燃煤锅炉, 如果燃料和空气都没有利用外界热量进行预热时, $Q_r = Q_{DW}^y$ 。

本测试中, 现场测试的基准温度取环境温度 29.5℃, 输入热量只计燃料收到基低位发热量 Q_{DW}^y 。则 $Q_r = 24.06 \text{ MJ/kg}$

(2) 机械未完全燃烧热损失 Q_4

链条炉

$$Q_4 = Q_4^{lz} + Q_4^{fh} + Q_4^{lm} \quad \text{kJ/kg}$$

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 \quad \%$$

式中

Q_4^{lz} ——炉渣机械未完全燃烧热损失, kJ/kg;

Q_4^{fh} ——飞灰机械未完全燃烧热损失, kJ/kg;

Q_4^{lm} ——炉排漏煤机械未完全燃烧热损失, kJ/kg。

本测试中, 由于漏煤热损失是指链条炉中未能完全燃烧的煤, 漏入灰斗造成的能量

损失，煤粉炉中没有该项损失。故只计算炉渣机械未完全燃烧热损失 Q_4^k 和飞灰机械未完全燃烧热损失 Q_4^{fh} ，其计算公式为：

$$Q_4^k = 337.27 A^y a_{lz} \frac{C_{lz}^c}{100 - C_{lz}^c} \quad \text{kJ/kg} \quad (6)$$

$$Q_4^{fh} = 337.27 A^y a_{fh} \frac{C_{fh}^c}{100 - C_{fh}^c} \quad \text{kJ/kg} \quad (7)$$

式中 C_{lz}^c 、 C_{fh}^c ——分别为炉渣和飞灰中可燃物含量百分数，%；

a_{lz} 、 a_{fh} ——分别为炉渣、飞灰量占入炉煤总灰量的质量份额。

经过原煤工业分析和可燃物含炭量化学分析试验，可得原煤收到基灰分 $A^y=20.23$ ， $C_{lz}^c=2.17$ ， $C_{fh}^c=7.72$ ，

由于青岛热电采用固态排渣系统以及钢球磨煤机或者中速磨煤机，根据 GB10184-88 电站锅炉性能试验规程附录 E，选取 $a_{lz}=0.1$ ， $a_{fh}=0.9$

经过计算可得，锅炉机械不完全燃烧热损失 $Q_4=547.08 \text{ kJ/kg}$ ， $q_4=2.27\%$

影响机械不完全燃烧热损失的主要因素是燃料性质和运行人员的操作水平。煤中含灰分、水分越少， Q_4 越小；挥发分越多，煤粉越细，则机械不完全燃烧热损失越小；适当增大过量空气系数，可减少 Q_4 ；一、二次风适时混合，保持火焰不偏斜，维持适当炉温，可减少 Q_4 。机械不完全燃烧热损失是仅次于排烟热损失的锅炉热损失，固态排渣煤粉炉大约为 0.5%-5%。

(3) 排烟热损失 Q_2

排烟热损失按下式计算：

$$Q_2 = Q_{H_2O} + Q_{gy} = (V_{gy} c_{py} + V_{H_2O} c_{H_2O})(t_{py} - t_0) \quad \text{kJ/kg} \quad (8)$$

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\% \quad (9)$$

式中

t_{py} 值在热平衡实验中测定，排烟温度 $t_{py}=160$ ；

根据GB10184-88 电站锅炉性能试验规程第 4.1.3 条，规定锅炉送风机入口处空气温度为各项输入与输出能量的起算点，即基准温度，故取送风温度 $t_0=39.5$ 。

灰渣中平均含炭量与燃煤灰量的比率：

$$\beta_c = \frac{\alpha_{lz} C_{lz}^c}{100 - C_{lz}^c} + \frac{\alpha_{fh} C_{fh}^c}{100 - C_{fh}^c} = \frac{0.1 * 2.17}{100 - 2.17} + \frac{0.9 * 7.72}{100 - 7.72} = 0.0022 + 0.0753 = 7.75\%$$

燃料收到基实际烧掉的碳质量百分率：

$$C_{r,ar} = C_{ar} - A_{ar} \beta_c = 62.82 - 20.93 * 7.75\% = 61.20\%$$

$$\text{排烟处干烟气体积 } V_{gy} = V_{gy}^0 + (\alpha_{py} - 1) V^0$$

$$\text{其中，理论干空气量 } V^0 = 0.089(C_{r,ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}$$

$$= 0.089(61.2 + 0.375 * 1.57) + 0.265 * 3.02 - 0.0333 * 3.9 = 6.170 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{理论干烟气量 } V_{gy}^0 = 1.866 \frac{C_{r,ar} + 0.375S_{ar}}{100} + 0.79V^0 + 0.8 \frac{N_{ar}}{100}$$

$$= 1.866 \frac{61.2 + 0.375 * 1.57}{100} + 0.79 * 6.17 + 0.8 * 0.0096 = 1.153 + 4.874 + 0.008 = 6.03 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{故得： } V_{gy} = 6.03 + (2.1 - 1) * 6.17 = 12.82 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{排烟处干烟气平均定压比热容 } c_{gy} = c_{CO_2} \frac{RO_2}{100} + c_{N_2} \frac{100 - RO_2}{100}$$

$$= 1.7525 * 0.0815 + 1.2982 * 0.9185 = 1.335 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

在附录 E 查询可知： $c_{CO_2} = 1.7525$ ， $c_{N_2} = 1.2982$ ，（排烟温度为 160°C ）

$$\text{同时查得： } c_{H_2O} = 1.515 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{排烟处水蒸汽体积 } V_{H_2O} = 1.24 \left(\frac{9H_{ar} + M_{ar}}{100} + 1.293 \alpha_{py} V^0 d_k \right) = 1.07 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{式中， } d_k = 0.622 * \frac{\frac{\phi}{100} * P_{t_0}}{P_{am} - \frac{\phi}{100} * P_{t_0}} = 0.622 * 0.05 = 0.0311$$

其中，在送风温度 t_0 的水蒸气的饱和压力 p_{t_0} 可查水蒸气性质表或者在 $0-50^\circ\text{C}$ 内，按照

$$\text{下式进行计算： } p_{t_0} = 611.7927 + 42.7809 t_0 + 1.6883 t_0^2 + 0.01208 t_0^3 + 6.1637 * 10^{-4} t_0^4$$

$$= 611.7927 + 1689.85 + 2634.17 + 744.49 + 1500.48 = 7180.78 \text{ Pa}$$

（此处 t_0 取送风温度值 39.5°C ），空气湿度 $\Phi = 65.8\%$ ，大气压力 $p_{am} = 0.991 * 10^5 \text{ Pa}$

$$\text{综上所述，烟气中含水蒸气的显热 } Q_{H_2O} = V_{H_2O} c_{H_2O} (t_{py} - t_0) = 195.34 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$\text{干烟气带走的热量 } Q_{gy} = V_{gy} c_{py} (t_{py} - t_0) = 2062.32 \text{ kJ}/\text{kg}$$

结合式 (8)，可得排烟热损失 $Q_2 = 2257.66 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，

则排烟热损失百分比 $q_2 = 9.38\%$

通常排烟热损失是锅炉热损失中较大的一项，一般装有省煤器的水管锅炉， q_2 约为 6% ~ 12%；不装省煤器时，往往高达 20% 以上。

(4) 化学未完全燃烧热损失 Q_3

$$Q_3 = V_{gy} (126.36CO + 358.18CH_4 + 107.98H_2 + 590.79C_mH_n) (1 - \frac{q_4}{100}) \text{ kJ/kg} \quad (10)$$

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100\%$$

式中：

V_{gy} —— 取样点处干烟气容积，如下式：

$$V_{gy} = \frac{1.866C_{ar} + 0.7S_{ar}}{RO_2 + CO} \quad Nm^3 / kg \quad (11)$$

CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_mH_n —— 取样点处干烟气中可燃气体 CO 、 CH_4 、 H_2 、 C_mH_n 的容积百分比，%。

燃煤锅炉可认为 $CH_4 = 0, H_2 = 0, C_mH_n = 0$ 。

由于德图烟气分析仪 testo 350XL 只测量碳氢化合物百分含量，不能区别其中的 CH_4 ，故采用下列公式进行计算：

$$Q_3 = 126.36CO \frac{1.866C_{ar} + 0.7S_{ar}}{RO_2 + CO} (1 - \frac{q_4}{100}) \quad (10)'$$

$$= 126.36 * 22.4 * 10^{-4} \frac{1.866 * 62.82 + 0.7 * 1.57}{10.2 + 22.4 * 10^{-4}} (1 - \frac{q_4}{100})$$

$$= 3.28 (1 - \frac{q_4}{100}) = 3.2 \text{ kJ/kg}$$

则 $q_3 = 0.01\%$

(5) 散热损失

按照附录 D 计算。

或者按照下列公式进行计算：

$$q_5 = q_5^e \frac{D_e}{D} = 1.30\%$$

式中，锅炉的额定蒸发量 $D_e = 75\text{t/h}$ ，锅炉效率试验时的蒸发量 $D = 65\text{t/h}$ ，

$$\text{额定蒸发量下的散热损失 } q_5^e = 5.82(D_e)^{-0.38} = 1.1282\%$$

(6) 灰渣物理热损失 Q_6

$$Q_6 = A_{ar} \frac{a_{lz}(ct)_{lz}}{100 - C_{lz}} \quad \text{kJ/kg} \quad (12)$$

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r} \times 100\% \quad (13)$$

式中：

C_{lz} ——炉渣可燃物含量， $C_{lz}=2.17\%$

a_{lz} ——炉渣含灰量占入炉煤总灰量的重量百分比，取经验值 0.1

t_{lz} ——灰渣离开炉膛时的温度，(当不能直接测量时，固态排渣煤粉炉 800℃)，
℃；

c_{lz} ——为炉渣， $\text{kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ， c_{lz} 按下式计算：

$$c_{lz} = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t_{lz} \quad \text{kJ} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (14)$$

故得：灰渣物理热损失 $Q_6=19.02 \text{ kJ/kg}$ ， $q_6=0.08\%$

(7) 排烟过量空气系数

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - (O_2 - 2CH_4 - 0.5CO - 0.5H_2)}$$

在简化计算中，过量空气系数可以按 $\alpha_{py} = \frac{21}{21 - O_2}$ 进行计算

$$\alpha_{py1} = \frac{21}{21 - 11} = 2.1$$

(8) 反平衡法求解锅炉热效率

$$\eta_{gl} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \%$$

$$= 1 - (9.38\% + 0.01\% + 2.27\% + 1.30\% + 0.08\%) = 1 - 13.04\% = 86.96\%$$

五、节能经济效益分析

根据经验证明，锅炉效率每提高 1%，将使整个机组效率提高约 0.3%--0.4%，标准煤耗下降 3-4g/kwh。

本项目在青岛热电集团的电厂全面实施取得的经济效益十分可观,可使发电厂每发一度电节省 2-3 分钱的燃煤钱.:

1,该电厂有四台 75T 煤粉锅炉,担负着青岛市的部分冬季供热,夏季制冷的热能供应和发点任务.近几年来,每年大约消耗 50 万吨的电煤,改造后每年节省 1%,则可节省燃煤 5000T.现在燃煤按 800 元/T 以上,就是 400 万元.实施本项目的改造的成本是节省燃煤款的三分之一,收入远远大于支出.这还仅仅是对水冷壁改造获得的经济效益,如再对省煤器和过热器同时进行改造,可获得更大的经济效益.

2,由于本项目对锅炉的热腐蚀可以起到延缓作用,减少维修和延长设备使用寿命也可获得一定的经济效益.

3,由于每年可节省 5000T 的燃煤,也就可以减少排放二氧化碳一万吨以上,二氧化硫一百五十吨以上.除节能降耗外,减排的社会效益也十分可观。

六、结论和建议

根据对青岛热电股份公司 1 号锅炉节能改造前后的热效率测试计算分析,可以得出以下结论:

- (1) 锅炉热效率提高将近 1%，降低锅炉煤耗；
- (2) 锅炉排烟温度由 176.5℃降低至 160℃，降低了锅炉排烟热损失；
- (3) 经过一年的跟踪测试分析，节能改造达到预期效果。

同时建议：

青岛热电厂运行人员进一步观察 WT 高温节能防腐涂料的应用效果,充分应用运行数据分析 WT 高温节能防腐涂料的节能效果。

附录 1 锅炉热效率测试试验仪器设备

测试仪器名称	型号	序列号	生产厂家	说明
空盒气压表	DYM3	0604002	上海风云气象仪器经营公司	大气压测试
空气湿度计		009994	武强县标准计量仪器厂	空气相对湿度测试
烟气分析仪	Testo35		德图仪器有限公司	烟气分析测试

附录 2 锅炉灰渣平衡百分率

GB10148-88 电站锅炉性能试验规程

附录 E

附录 E
锅炉灰渣平衡百分率
(补充件)

燃烧方式与炉膛型式		捕渣率 %	飞灰平衡百分率 %
链条炉		—	15~30
抛煤炉			25~40
沸腾炉		—	40~60
固态排渣火室炉	钢球或中速磨煤机 竖井磨煤机	—	~90 ¹⁾ ~85
液态排渣炉	开式炉膛	20~35	—
	半开式炉膛	30~45	
卧式旋风炉	煤粉:烟煤、褐煤	80	—
	煤屑:烟煤	80~85	
立式前置旋风炉(WTN型)	无烟煤	50~60	—
	其他煤种	60~80	
立式下置旋风炉(KSG型)	褐煤	80~85	—

注:1) 其中省煤器下部沉降灰 3%;空气预热器下部沉降灰 5%。

附录 3 烟气、灰和空气的平均定压比热容

GB10148-88 电站锅炉性能试验规程

附录 C

附录 C (资料性附录)

烟气、灰和空气的平均定压比热容

表 C.1 给出了烟气、灰和空气的平均定压比热容。

表 C.1 烟气、灰和空气的平均定压比热容

温度 t ℃	平均定压比热容 c kJ/(m ³ · °C)								
	RO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	CO	H ₂	CH ₄	灰	空气
0	1.599 8	1.294 6	1.505 9	1.474 3	1.299 8	1.278 5	1.550 0	0.795 6	1.315 3
10	1.609 9	1.294 7	1.507 1	1.485 4	1.299 5	1.278 0	1.559 1	0.799 7	1.319 4
20	1.619 9	1.294 8	1.508 3	1.496 5	1.299 7	1.278 4	1.568 2	0.803 9	1.323 0
30	1.629 9	1.294 9	1.509 5	1.497 6	1.300 0	1.280 8	1.577 3	0.808 1	1.326 6
40	1.639 9	1.295 0	1.510 7	1.498 7	1.300 2	1.282 2	1.586 4	0.812 3	1.331 2
50	1.649 9	1.295 1	1.511 9	1.499 8	1.300 6	1.283 6	1.595 6	0.816 5	1.335 9
100	1.700 3	1.295 8	1.517 6	1.505 2	1.301 7	1.290 8	1.641 1	0.837 4	1.324 3
150	1.743 8	1.297 5	1.528 6	1.518 7	1.304 0	1.294 0	1.700 0	0.852 1	1.328 1
160	1.752 5	1.298 2	1.528 4	1.516 4	1.304 8	1.294 6	1.711 8	0.855 0	1.329 9
170	1.761 2	1.298 6	1.530 2	1.517 1	1.305 2	1.295 2	1.723 6	0.857 9	1.329 7
180	1.769 9	1.299 0	1.532 0	1.518 8	1.305 8	1.295 8	1.735 4	0.860 8	1.330 5
190	1.778 6	1.299 4	1.533 8	1.520 5	1.306 6	1.296 4	1.747 2	0.863 7	1.331 3
200	1.787 3	1.299 6	1.535 2	1.522 3	1.307 1	1.297 1	1.758 0	0.865 7	1.331 5
300	1.862 7	1.306 7	1.856 1	1.542 4	1.316 7	1.299 2	1.866 1	0.891 8	1.342 3
600	—	—	—	—	—	—	—	0.950 4	—
800	—	—	—	—	—	—	—	0.979 7	—
900	—	—	—	—	—	—	—	1.004 8	—

注：低于 0℃ 时可按外插法延伸。