



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

节能量测量和验证技术要求 板带加热炉系统

Technical requirements of measurement and verification of energy savings,
strip reheating furnace system

(征求意见稿)

2014. 3. 6

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本标准由全国能源基础与管理标准化技术委员会（SAC/TC20）提出并归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：

节能量测量和验证技术要求 板带加热炉系统

1 范围

本标准规定了钢铁企业板带加热炉系统节能技术改造项目节能量测量和验证的术语和定义、系统边界、节能量计算原则、测量和验证方法和不确定度等。

本标准适用于对钢铁企业板带加热炉系统节能技术改造项目进行节能量测量和验证，新建类和管理类项目也可参考使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 28750-2012 节能量测量和验证技术通则

GB 50026-2007 工程测量规范

3 术语和定义

GB/T 28750 确立以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

板带加热炉系统 strip reheating furnace system

钢铁企业中生产板带材的板坯加热设备及其附属设施。

4 边界的确定

板带加热炉系统边界是实施节能措施所影响的用能单位、设备、系统的范围和地理位置界线。项目边界通常为板带加热炉系统，根据改造项目的不同，也可以是其中的某个子系统。板带加热炉系统边界示意如图 1 所示。

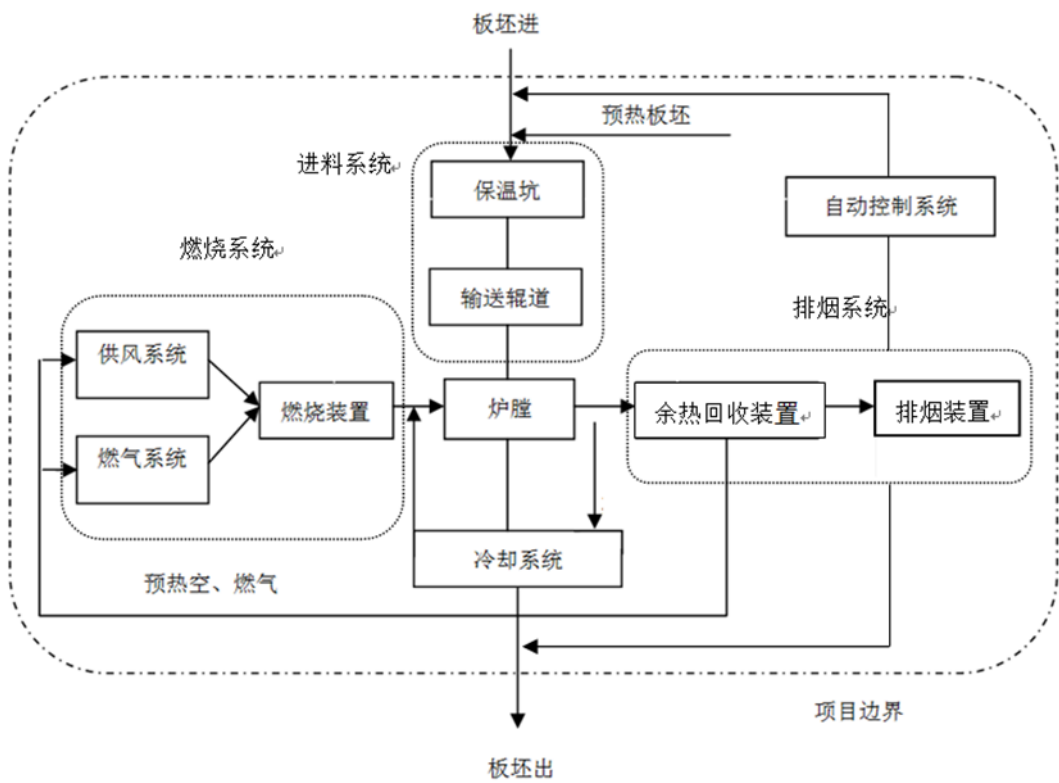


图1 板带加热炉系统边界示意图

5 节能量测量和验证方法

5.1 计算节能量的基本公式

按照 GB/T 28750-2012 的 4.2 给出的式(1) 计算，

$$E_s = E_r - E_a \tag{1}$$

式中：

E_s ——板带加热炉系统节能量，单位为吨标准煤（tce）；

E_r ——板带加热炉系统统计报告期能耗，单位为吨标准煤（tce）；

E_a ——板带加热炉系统校准能耗，单位为吨标准煤（tce）。

5.2 基期和统计报告期

基期和统计报告期的时间一般为一年。

6 测量和验证方法

6.1 “基期能耗-影响因素”模型法

6.1.1 适用条件

- a. 板带加热炉节能措施涉及能源介质可以进行测量确定或约定；
- b. 受板带加热炉节能措施影响的设备能源消耗可以隔离。

6.1.2 “基期能耗-影响因素”模型

6.1.2.1 建立“基期能耗-影响因素”回归模型

板带加热炉系统“基期能耗-影响因素”模型如式（2）：

$$E_b = E_{bm} + P_b \times \sum_{i=1}^n k_i e_{bi} \quad (2)$$

式中：

E_{bm} ——基期的燃料消耗量，单位为吨标准煤（tce）；

P_b ——基期加热板坯的总量，单位为吨(t)；

e_{bi} ——基期第*i*种能源单位板坯量的消耗量；

n ——基期除燃料外其他能源介质（如水、电、压缩空气等）的种类；

k_i ——第*i*种能源介质的折标准煤系数。

E_{bm} 通过式（3）计算：

$$E_{bm} = \frac{\sum Q}{\{(1-K)[Q_{net} + c_r(t_r - t_o) + L_0 c_k(t_k - t_o) - V_\alpha c_y(t_y - t_o)] - V_h^g\}} \quad (3)$$

式中：

K ——燃料机械不完全燃烧热损失率，对于固体燃料 $K=0.03—0.05$ ；对于气体及液体 燃料 $K=0.01—0.02$ ；

Q_{net} ——燃料的低位发热量，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

c_r 、 c_k 、 c_y ——燃料、空气、离炉烟气的平均比热容，单位为千焦每立方米千克度[kJ/ m³ (kg) °C]；

t_r 、 t_k ——进入烧嘴时燃料、空气的预热温度，单位为度（°C）；

t_y ——逸出烟气温度，单位为度（°C）；

t_o ——周围大气温度，单位为度（°C）；

L_0 ——单位燃料空气消耗量，单位为立方米每立方米或立方米每千克（m³/ m³或 m³/kg）；

V_α ——单位燃烧生成量，单位为立方米没立方米或立方米每千克（m³/ m³或 m³/kg）；

V_h^g ——实际 CO、H₂、CH₄ 干燃产物量，单位为标准立方米每标准立方米（Nm³/Nm³）。

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 - Q_8 \quad (4)$$

其中:

- Q_1 ——钢坯带走的有效热;
 Q_2 ——装料装置带走的物理热,;
 Q_3 ——冷却水散热;
 Q_4 ——炉门、开孔等辐射热损失;
 Q_5 ——通过炉门及其他不严密处逸出气体热损失。
 Q_6 ——氧化铁皮带走热损失,;
 Q_7 ——炉体表面散热,;
 Q_8 ——金属(或合金成分)氧化放热。

$$V_h^g = V_n^g (126.4CO^g + 108.0H_2^g + 358.7CH_4^g) \quad (5)$$

其中:

- V_n^g ——实际干燃产物量, 单位为标准立方米每标准立方米 (Nm^3/Nm^3);
 CO^g 、 H_2^g 、 CH_4^g ——烟气中 CO 、 H_2 、 CH_4 干成分的体积百分数 (%)。

$$Q_1 = G(J_2 - J_1) \quad (6)$$

其中:

- G ——为炉子的小时产量, 单位为千克每小时 (kg/h);
 J_2 ——加热终了时金属的比能, 即比焓(融化金属时尚包括融化潜热), 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
 J_1 ——加热前金属的比能, 单位为千焦每千克 (kJ/kg)。

$$Q_2 = \sum m_2 (C_2 t_2 - C_{2o} t_{2o}) \quad (7)$$

其中:

- m_2 ——各种装置的质量, 单位为千克每小时 (kg/h);
 C_2 、 C_{2o} ——分别为装置在 $0^\circ C$ 至出炉温度 (t_2) 和环境温度 (t_o) 间的平均比热容, 单位为千焦每千克度 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$];

- t_{2o} ——各装料装置的入炉温度, 单位为度 ($^\circ C$);
 t_2 ——各装料装置的出炉温度, 单位为度 ($^\circ C$);

$$Q_3 = G_3 (c_{3out} t_{3out} - c_{3in} t_{3in}) \quad (8)$$

其中:

- G_3 ——冷却水单位时间 (h) 的流量, 单位为立方米每小时 (m^3/h);
 t_{3out} 、 t_{3in} ——冷却水出口、进口的温度, 单位为度 ($^\circ C$);
 c_{3out} 、 c_{3in} ——冷却水在 t_{3out} 、 t_{3in} 温度下的平均热容量, 单位为千焦每千克度 [$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$].

$$Q_4 = \frac{\sum A_4 \phi \Delta \tau}{60} \times 20.43 \times \left[\left(\frac{273 + t_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_e}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

其中:

- A_4 ——炉门、开孔开启面积, 单位为平方米 (m^2);
 ϕ ——炉门、开孔综合角度系数;
 $\Delta \tau$ ——小时内开启时间, 单位为分钟 (min);
 t_4 ——炉门对应的炉膛温度, 单位为度 ($^\circ C$)。

$$Q_5 = 0.82 \times 3600 A_y \times \sqrt{\frac{2h}{\rho_y}} \times \frac{273}{273+t_y} \times c(t_y - t_e) \quad (10)$$

其中:

A_y ——炉门口及缝隙面积, 单位为平方米 (m^2);

h ——炉门口或缝隙中心处炉内正压, $h=(\rho_k - \rho_y)Hg + p_d$ (Pa);

ρ_k 、 ρ_y ——周围空气及逸出烟气在各自温度下的密度, 单位为千克每立方米 (kg/m^3);

p_d ——炉底平面处炉压, 单位为帕 (Pa);

H ——炉门口或缝隙中心离炉底高度, 单位为米 (m)。

$$Q_6 = GaC_6(t_6 - t_e) \quad (11)$$

其中:

a ——氧化烧损率 (%);

t_6 、 t_e ——铁皮出炉温度、空气温度, 单位为度 ($^{\circ}C$)。

$$Q_7 = 3.6 \sum A_y q_7 \quad (12)$$

其中:

A_y ——包括炉墙、炉顶、炉底及炉门在内的计算面积, 对于稳定态传热 $A_y \approx \sqrt{A_n A_w}$, 单位为平方米 (m^2);

对于不稳态传热, 热量的传递主要发生在内表面附近, 可近似取 $A_y = A_n$;

A_n 、 A_w ——炉墙、炉顶、炉底及炉门的内表及外表面积, 单位为平方米 (m^2);

q_7 ——炉墙单位面积热损失, 单位为瓦每平方米 (W/m^2)。

$$Q_8 = q_y G \delta \quad (13)$$

其中:

q_y ——金属(或合金)氧化放热, 单位为千焦每千克 (kJ/kg), 对于铁 $q_y = 5652 kJ/kg$; 对于硅 $q_y = 29370 kJ/kg$; 对于锰 $q_y = 6908 kJ/kg$;

G ——为炉子的小时产量, 单位为千克每小时 (kg/h);

δ ——为氧化烧损率 (%).

$$Q_{ne} = 4.187 (3040 \% 2580 \% 38550 \% 1230 kJ^3) \quad (14)$$

6.1.2.3 校准能耗的计算

应将统计报告期的测量数据带入“基期能耗-影响因素”模型对校准能耗进行计算, 见公式(14)。

$$E_a = E_{am} + P_r \times \sum_{i=1}^m k_i e_{ri} \quad (2)$$

式中:

E_{am} ——校准的燃料消耗量, 单位为吨标准煤 (tce), 通过将统计报告期的影响因素数

值代入公式(3)获得;

P_r ——统计报告期加热板坯的总量, 单位为吨 (t);

e_{ri} ——统计报告期第 i 种能源单位板坯量的消耗量;

m ——统计报告期除燃料外其他能源介质(如水、电、压缩空气等)的种类。

6.1.2.4 校准能耗调整值

校准能耗调整值 A_c 的确定应符合GB/T 28750-2012的要求，并应得到各相关方的确认。

6.1.2.5 节能量的计算

按照公式（1）计算节能量。

6.1.3 数据的获得和验证

6.1.3.1 通过统计、计量资料获得数据：

- a. 基期数据的收集：基期产量、基期热效率、基期燃耗。测定方法可参考附录 A。
- b. 报告期数据的收集：报告期产量、报告期热效率、报告期燃耗。测定方法可参考附录 A。

6.1.3.2 通过部分测量或全部测量获得数据

6.1.3.2.1 基期数据的测量

数据的测量适用于大宗能源消耗缺乏统计数据的情形。测试周期内，加热炉保持连续出钢，出炉板坯满足正常加热及轧线要求。能源消耗以月度为单位计量。测试中板坯品种以加热炉加热最多品种计，采用标准尺寸坯料，坯料质量（计量准确度应达到 1‰）以实测为准。基期测量参数列表见表 1 和表 2，测定方法见附录 A 表 A.1。

表 1 板带加热炉系统主要能耗设备测量参数指标

设备分类	设备明细	参数指标
燃烧设备	燃烧器	烧嘴功率（kw）、燃烧效率（%）、空燃气流量（m³/h）、燃气种类烧嘴数量
用水设备	炉体等冷却水设备	流量（m³/h）、扬程（m）、功率（kw）、每天运行时间、全年运行时间
用电设备	用电机组	功率（kw）、运行电流（A）、每天运行时间、全年运行时间
余热锅炉	锅炉机组	蒸发量（t/h）、蒸汽温度（℃）、蒸汽压力（Mpa）、流量（m³/h）、每天运行时间、全年运行时间
其它设备	风机类设备	风量（m³/h）、风压（kpa）、电机功率（kw）、每天、全年运行时间
	压缩空气设备	流量（m³/h）、节点压力（Mpa）、每天运行时间、全年运行时间

表 2 基期测量参数列表

能源消耗量								产量 （吨）	热效率 （%）
燃耗 （吨）	电量 （千瓦时）	油量 （吨）	气量 （立方）	水量 （立方）	压缩空气量 （立方）	其他能源 介质(吨)	共折合标准 煤(吨)		

6.1.3.2.2 统计报告期数据的测量

数据的测量适用于大宗能源消耗缺乏数据的情形。在改造技术不影响工艺要求情况时，以加热炉最低效率为准，板坯温度以出炉平均温度为准。统计报告期能耗设备测量数据与基期一致，见表 3。

表 3 报告期测量参数列表

能源消耗量								产量 （吨）	热效率 （%）
燃耗 （吨）	电量 （千瓦时）	油量 （吨）	气量 （立方）	水量 （立方）	压缩空气量 （立方）	其他能源 介质(吨)	共折合标准 煤(吨)		

6.1.3.3 数据质量要求

在数据的校核时,应按 GB 50026-2007 规定的校核准则和程序对主要用能环节的数据进行校核和单独测量。相关数据记录、汇编、分析和存档,应当符合 ISO 10012 的要求。

在保证测量结果准确的前提下,验证方法应尽量简便、易操作;验证测量仪器一般为便携式仪器,且不会对测量现场内管路和设备造成损坏。数据的验证应符合以下要求:

- a) 应在炉子稳定的工况下连续测定,在 8 小时内完成,且测试次数不少于两次;
- b) 采用红外测温时,由于仪器和被测点的距离影响读数,为保证结果的准确性,应在对同一设备或管路系统测量时尽量保证仪表与测点的距离保持一致;
- c) 采用现场仪表读数时,应对其按相关标准进行校准。

6.2 直接比较法

6.2.1 适用条件

板带加热炉系统中节能措施可关停的节能改造项目。

6.2.2 节能量的计算

采用直接比较法的项目节能量计算按照以下步骤进行:

- a) 在统计报告期内,节能措施开启时,测量典型工况下板带加热炉系统总能耗 ($E_{on,i}$);
- b) 在统计报告期内,节能措施关闭时,测量典型工况下板带加热炉系统总能耗 ($E_{off,i}$);
- c) 典型情况的选取,应覆盖板带加热炉系统运行负荷、炉温等主要影响因素的极大值、极小值与平均值;节能措施开启和关闭时典型工况下对应的能耗影响因素值偏差允许范围应由相关方事先约定。
- d) 将各典型情况下的 $E_{on,i}$ 和 $E_{off,i}$ 作为输入数据,根据测量和验证方案中约定的计算方法分别确定 E_r 和 E_a ;
- e) 由式 (1) 计算 E_s 。

6.2.3 计算中用到的数据的测量和验证

数据的收集、测量和验证可参考 6.1.3 的要求。

6.3 模拟软件法

6.3.1 适用条件

因基期能耗数据缺失等原因无法采用“基期能耗-影响因素”法的板带加热炉节能改造项目。

6.3.2 对模拟软件的要求

选用或开发的模拟软件应满足以下要求:

- a) 能够模拟板带加热炉系统的用能特性;
- b) 能够使用实际运行参数进行校核。

6.3.3 节能量的计算

节能量的计算应按 GB/T 28750 的 5.3 进行。

6.3.4 数据的收集、测量和验证可参考 6.1.3 的要求。

7 不确定度

7.1 概述

节能量是没有发生的量，因此节能量不存在真值和误差。在确定测量和验证方案（包括测量和验证的数据基础、成本、目的等内容）后，可以评价节能量评估结果的不确定度，以说明节能量评估结果的可信赖程度。其表达方式是：一定置信水平下的节能量置信区间。

7.2 不确定度的来源

7.2.1 使用“基期能耗-影响因素”模型法时，节能量的不确定度可能来源于：

- a) 基期和报告期数据的测量、计量或统计；
- b) 模型；
- c) 抽样；
- d) 非常规调整。

7.2.2 使用直接比较法时，节能量的不确定度可能来源于：

- a) 基期和报告期数据的测量、计量或统计；
- b) 抽样。

7.2.3 使用模拟软件法时，节能量的不确定度可能来源于：

- a) 基期和报告期数据的测量、计量或统计；
- b) 模型；
- c) 抽样。

7.3 不确定度的量化分析

7.3.1 对于测量、计量或统计相关的不确定度，可参照参考文献[1]进行量化分析。

7.3.2 对于抽样的不确定度，可参照参考文献[2]的附录 B、参考文献[3]附录 B 进行量化分析。

7.3.3 对于模型的不确定度，可参考附录C和文献[3]的附录B进行量化分析。

7.3.3.1 当采用数学模型进行非常规调整时，可参考模型的不确定度量化分析方法。

7.3.3.2 当采用人为约定进行非常规调整时，所有的调整量均应加入置信区间。

7.3.4 不确定度的量化分析需要较高的成本和人员能力。因此，通常可以忽略那些不重要的不确定度来源，仅对重要的不确定度来源（如模型或抽样等）进行分析。例如：在检定有效期内的计量仪表的数据可认为具有较低的不确定度，在分析时可以忽略。

附录 A
(资料性附录)
燃烧模型影响因素测定项目及测定方法

表 A.1 基期和报告期测定项目及测定方法

序号	项目	测定参数	测量时间及测点选择	测定方法
1	产量	炉子产量 kg/h	全周期测定每小时产量	统计计算
2	热效率	炉子热效率 %	运行期间测定及计算	统计计算
3	能耗	燃料消耗量 m ³ /h 或 kg/h	液、气燃料在入炉前管路上测定， 固体燃料在炉前堆中测定	流量计、磅秤，由 全周期换算得到

表 A.2 燃烧模型参数测定方法

序号	项目	测定参数	测定时间	测点选择	测试仪器
1	种类	加热钢种	全周期测量	当日生产计划表	统计计算
2	尺寸	板坯尺寸	料场实测	在料场上料前抽样测量 测量 1--2 块板坯或按定尺	卷尺或直尺
		氧化铁皮厚度	每 60 分钟取样一次	在入钢口、出钢口附近取样 每次取样 10 块以上	千分尺 分厘卡
		装料门尺寸	炉前实测	根据图纸计算实测	图纸、卷尺
		换热器尺寸		根据图纸计算或测量	
3	面积	板坯表面积	跟随管坯测	实测钢坯尺寸，计算板坯表面积	卷尺或直尺
		炉体表面积	周期内测量一次	根据图纸计算	图纸
4	质量	板坯单重	全周期测量	由板坯尺寸计算，抽样称重 每次 1--2 块板坯	磅秤、理论计重
		氧化铁皮重量	每 60 分钟取样一次	根据表面积大小计算 (或者钢坯称重法测量)	理论计重
5	个数	出炉板坯数	全周期测定	炉前统计	二级记录
6	湿度	大气湿度	每 30 分钟测量记录一次	炉子周围测量	干湿球温度计
7	产量	炉子产量	全周期测定	统计计算	人工计算
8	流量	热风流量	每 60 分钟测量一次	在热风管道上，测量风压、温度及动压头，动压头最少测量 5 个点或者现场仪表记录	皮托管、微压计、数字温度计
		煤气流量		炉前煤气管道上测量或者在煤气总管上测量或现场仪表记录	超声流量计 现场仪表
		冷却水流量		炉前排水管道上测量或现场仪表记录	

序号	项 目	测定参数	测定时间	测点选择	测 试 仪 器
9	温度	热风温度	每 30 分钟测量一次	在入炉前热风管道上测量或现场仪表记录	水银温度计、热电偶配显示仪表、热电偶配集中监控装置
		煤气温度		在烧嘴前燃气管道上测量，每次测量 6 个区或现场仪表记录	抽气热电偶、数字温度计
		大气温度		炉子周围测量	水银、酒精温度计
		出炉膛烟气温度		在烟道入口测量	抽气热电偶 数字温度计 水银温度计
		换热器前烟气温度		在换热器入口测量	
		换热器后烟气温度		在换热器出口测量	
		空气进换热器温度		在换热器入口测量	
		空气出换热器温度		在换热器出口测量	
		冷却水进口温度	每 60 分钟测量一次	炉前进水管道上测量或现场仪表记录	水银温度计 酒精温度计
		冷却水出口温度		炉前排水管道出口测量或现场仪表记录	
		炉体表面温度	每 30 分钟测量一次	将炉体各段各个表面分成若干区域，每个区域测量九个点	表面热电偶 红外测温仪 热像仪
		出料门温度		在出料口实测	
		装料门温度	每 30 分钟测量一次	在装料口实测	铂铑热电偶 现场仪表
		各段炉温	每 20 分钟测量一次	测各段炉温或者现场仪表记录	
		板坯上表面温度	跟随板坯连续测量	板坯上表面	高温数据记录仪 埋偶试验
		板坯下表面温度		板坯下表面	
		板坯中心温度		板坯中心	
		炉气温度		跟随板坯	
10	压力	入炉钢温	每 30 分钟测量一次	在装料口实测，每次测量 1--2 块板坯	红外测温仪
		出炉钢温		在出料端实测，每次测量 1--2 块板坯	
		热风压力	每 30 分钟测量一次	在入炉前热风管道上测量或现场仪表记录	按冷风压力核算
		煤气压力		在烧咀前管道上测量或现场仪表记录	总管压力
		大气压力		炉子周围测量	大气压表
		出料门压力		在出料口实测	斜管压力计、微压计
		装料门压力		在装料口实测	斜管压力计、微压计
		各段炉压	每 20 分钟测量一次	测各段炉压或者现场仪表记录	微压计、取样管、现场仪表
		出料门开启时间	炉前实测	炉前实测时间，统计开启次数	秒表
		装料门开启时间			
12	比重	煤气比重		按照成分计算	计算
13	速度	环境风速	每 30 分钟测量一次	炉子周围测量	风速计、热球风速仪
14	热值	煤气发热量	周期内测量一次	根据成份计算或将上述煤气样进行测量	计算值

序号	项 目	测定参数	测定时间	测点选择	测 试 仪 器
15	成分	煤气成份	每 120 分钟取样一次	烧咀前取样，送分析中心化验	奥氏气体分析仪
		出炉膛烟气成份	每 30 分钟取一次，每次取两个样	在烟道入口取气样	取气泵、抽气热电偶、球单、奥氏仪或燃烧效率仪
		换热器前烟气成份		在换热器入口取气样	
		换热器后烟气成份		在换热器出口取气样	

附录 B
(资料性附录)
典型板带加热炉节能改造项目节能量测量及验证方法

B.1 热装热送节能项目

B.1.1 节能量计算

节约燃料量按式 (B.1) 计算:

$$\Delta B = 0.03412 \Delta Q / 10^6 = \Delta B = 0.03412 [G(t_b^{\text{出}} C_b^{\text{出}} - t_b^{\text{入}} C_b^{\text{入}}) - G'(t_b^{\text{出}'} C_b^{\text{出}'} - t_b^{\text{入}'} C_b^{\text{入}'})] \times 10^{-6}$$
 (B.1)

节能量按式 (B.2) 计算:

$$\Delta E = \Delta B + \Delta \sum Di$$
 (B.2)

式中:

G ——板坯的产量, kg/h;

$t_b^{\text{入}}$ 和 $t_b^{\text{出}}$ ——板坯的入炉和出炉温度, °C;

$C_b^{\text{入}}$ 和 $C_b^{\text{出}}$ ——板坯在相应温度下的平均热容量, kJ/kg·°C。

$\Delta \sum Di$ ——热装热送节约的电力等能源介质。

B.1.2 节能量测量

对于热装热送节能改造项目, 节能量测量参数如表 B.1:

表 B.1 热装热送项目节能量测量参数

序号	参数	采集及使用方法
1	燃料消耗量	基期和报告期分别采集, 现场采集或计算机采集
2	用电量	电气柜上电表测量或计算机采集
3	产量	现场仪表记录或统计计算
4	板坯入炉温度	装料口实测或现场仪表记录, 取平均值
5	板坯出炉温度	出料口实测或现场仪表记录, 取平均值

B. 2 蓄热燃烧节能项目

B.2.1 节能量按式 (B.3) ~ (B.5) 计算

$$B = B_0 \frac{t_{\text{空预}} C_{\text{空预}} L_n + t_{\text{煤预}} C_{\text{煤预}}}{Q_{\text{低}} + t_{\text{空预}} C_{\text{空预}} L_n + t_{\text{煤预}} C_{\text{煤预}} - t_{\text{烟}} C_{\text{烟}} V_n}$$
 (B.3)

式中:

$\Delta \eta$ ——燃料节约率, %;

$t_{\text{空预}}$ 、 $t_{\text{煤预}}$ 、 $t_{\text{烟}}$ ——空气、煤气预热温度及排烟温度, °C;

$C_{\text{空预}}$ 、 $C_{\text{煤预}}$ 、 $C_{\text{烟}}$ ——空气、煤气烟气比热容, kJ/kg·°C;

$Q_{\text{低}}$ ——燃料的低发热值, kJ/kg (m³);

$Q_{\text{空预}}$ 、 $Q_{\text{煤预}}$ ——空气、煤气预热带入的热量, kJ/kg (m³);

$Q_{\text{烟}}$ ——烟气带出的热量, kJ/kg (m³)。

$$\Delta B = B \Delta \eta$$
 (B.4)

式中:

ΔB ——节约燃料量;

B——节能措施前的燃料消耗量。

节能量按式：

$$\Delta E = \Delta B + \Delta \sum Di$$

(B. 5)

B. 2. 2 节能量测量

对于蓄热燃烧节能改造项目，节能量测量参数如表 B. 2：

表 B. 2 蓄热燃烧项目节能量测量参数

序号	参数	采集及使用方法
1	燃料消耗量	基期和报告期分别采集，现场采集或计算机采集
2	用电量	电气柜上电表测量或计算机采集
3	炉膛温度	现场仪表记录或铂铑热电偶，连续测量采集，求平均值
4	预热空气温度	在入炉前热风管道上测量或现场仪表记录，求平均值
5	燃气温度	在烧嘴前燃气管道上测量或现场仪表记录，求平均值
6	烟气温度	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
7	空气流量	在热风管道上，测量风压、温度及动压头，动压头最少测量 5 个点或者现场仪表记录，求平均值
8	燃气流量	炉前煤气管道上测量或现场仪表记录，求平均值
9	烟气流量	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
10	燃料热值	根据成份计算或将燃气取样进行测量

B. 3 余热回收节能项目

B. 3. 1 节能量计算

$$\Delta \eta = \frac{(t_{\text{烟}}^{\text{原}} C_{\text{烟}}^{\text{原}} - t_{\text{烟}}^{\text{后}} C_{\text{烟}}^{\text{后}}) V_{\text{n}}}{Q_{\text{低}} - t_{\text{烟}}^{\text{后}} C_{\text{烟}}^{\text{后}} V_{\text{n}}}$$

(B. 6)

式中：

$\Delta \eta$ ——燃料节约率，%；

$Q_{\text{低}}$ ——燃料的低发热值，kJ/kg（m3）；

$t_{\text{烟}}^{\text{原}}$ 、 $t_{\text{烟}}^{\text{后}}$ ——原来较高的烟气温度和后来降低的烟气温度，℃；

$C_{\text{烟}}^{\text{原}}$ 、 $C_{\text{烟}}^{\text{后}}$ ——原来较高的烟气温度和后来降低的烟气温度下的平均热容量，kJ/ m³℃；

V_{n} ——单位燃料的烟气量，m3/ m3（kg）；

$$\Delta B = B \Delta \eta$$

(B. 7)

式中：

ΔB ——节约燃料量；

B——节能措施前的燃料消耗量。

或采用整体节能量计算节能量方法：

$$\Delta E = E_{\text{q}} + E_{\text{d}} + E_{\text{s}}$$

(B. 8)

式中：

ΔE ——节能量；

E_{q} 、 E_{d} 、 E_{s} ——节约气、电、水量。

B. 3. 2 节能量测量

对于余热回收项目，节能量测量参数如表 B. 3：

表 B. 3 余热回收项目节能量测量参数

序号	参数	采集及使用方法
1	燃料消耗量	基期和报告期分别采集，现场采集或计算机采集
2	用电量	电气柜上电表测量或计算机采集
3	用水量	纯水总管上测量或计算机采集
4	烟气温度	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
5	烟气流量	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
6	蒸汽温度	蒸汽回收支管及总管上测量或现场仪表记录，求平均值
7	蒸汽压力	蒸汽回收支管及总管上测量或现场仪表记录，求平均值
8	蒸汽流量	蒸汽回收支管及总管上测量或现场仪表记录，求平均值
9	补给水温度	补给管路测量或现场仪表记录，求平均值

B. 4 增加炉衬内表面黑度节能项目

B. 4. 1 节能量计算

增加炉衬内表面黑度，即增加炉衬内表面的辐射能力，提高炉子的生产率，起到节能作用。

$$B = \frac{[\varepsilon_m A_m \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - T_m^4) + \varepsilon_m (1 - \varepsilon_g) \phi \frac{A}{1 - a} - Q_m][\frac{1}{\varepsilon_w} (1 - a) + a]}{A - (1 - a) a T_w^4 A_w} =$$

$$B = \frac{[\varepsilon_m A_m \sigma (\varepsilon_g T_g^4 - T_m^4) + \varepsilon_m (1 - \varepsilon_g) \phi \frac{A}{1 - a} - E_g A_m - [(1 - \varepsilon_g) \phi - 1] \{E_m A_m + \phi (1 - \varepsilon_g) [\frac{E_w}{\varepsilon_w} A_w + \frac{A - (1 - a) a \sigma T_w^4 A_w}{1} (\frac{1}{\varepsilon_w} - 1)] (1 - \varepsilon_m) + E_g A_m (1 - \varepsilon_m)\}][\frac{1}{\varepsilon_w} (1 - a) + a]}{A - (1 - a) a T_w^4 A_w}$$

(B. 9)

B. 4. 2 节能量测量

对于增加炉衬内表面黑度的节能项目，节能量测量参数如表 B. 4：

表 B. 4 增加炉衬内表面黑度节能量测量参数

序号	类别	参数	采集及使用方法
1	统计参数	燃料消耗量	基期和报告期分别采集，现场采集或计算机采集
2		用电量	电气柜上电表测量或计算机采集
3		炉膛温度	现场仪表记录或铂铑热电偶，连续测量采集，求平均值
4		板坯表面温度	高温数据记录仪埋偶试验连续测量，求平均值
5		物料、炉壁表面积	计算机系统采集计算
6		物料、炉壁、炉器黑度	查阅已有资料获得
7	实测参数	炉体外表面温度	基期和报告期分别采集，表面热电偶或红外测温仪，每组至少采集 9 个点，60 分钟采集一次

B. 5 富氧燃烧节能项目

B. 5. 1 节能量计算

增加助燃空气氧气的含量，减少了热量损失，炉子热效率提高，燃料消耗得到降低。同时还可提供燃烧温度和因炉气中 CO₂、H₂O 增加而提高了炉气的辐射能力，从而增加了炉子的产量，减少了烟气量和烟气中 CO₂ 和 NO_x 的含量，有助于保护环境。

但是，在助燃空气中增加氧气含量的措施是有一定限度的。在氧气含量增加的初期，节能效果非常明显，但增加到 30%~40% 以上，其效果的增加就不明显，因考虑到氧气成本较高，不能大量的应用。 燃

料节约率计算方法如下：

$$\xi = \frac{K_1}{K_2/a + K_3}$$
(B. 10)

$$B = B_0 \frac{0.79nL_0(Q_c + c_y t_y) - nL_0 c_k t_k}{[0.21 (+c_m t_m - V_n(Q_c + c_y t_y) + nL_0 c_k t_k)]/a + 0.79 (+c_m t_m) - 0.79 (V_n - nL_0) (Q_c + c_y t_y) - 0.21 nL_0 c_k t_k}$$
(B. 11)

式中：

$K_1=0.79nL_0(Q_c+c_y t_y)-nL_0 c_k t_k$ ；

$K_2=0.21(Q_{低}+c_m t_m-V_n(Q_c+c_y t_y)+nL_0 c_k t_k)$ ；

$K_3=0.79(Q_{低}+c_m t_m)-0.79(V_n-nL_0)(Q_c+c_y t_y)-0.21nL_0 c_k t_k$ ；

ξ ——燃料节约率，%；

$Q_{低}$ ——燃料的低发热值，kJ/kg（m³）；

a ——富氧率， $a=V_{纯氧}/(V_{纯氧}+V_{空气})$ ，%；

L_0 ——理论空气需要量，m³/m³（kg）；

n ——空气系数；

V_n ——实际烟气量，m³/m³（kg）；

$t_k、t_m、t_y$ ——空气、煤气、烟气的温度，℃；

$C_k、C_m、C_y$ ——空气、煤气、烟气在该温度下的比热容，kJ/m³℃；

Q_c ——烟气中C₀、H₂、CH₄等含量计算的热量，kJ/m³。

$$\Delta B = B\xi$$
(B. 12)

式中：

ΔB ——节能量；

B ——节能措施前的燃料消耗量。

B. 5. 2 节能量测量

对于富氧燃烧项目，节能量测量参数如表 B. 5：

表 B. 5 富氧燃烧项目节能量测量参数

序号	参数	采集及使用方法
1	燃料消耗量	基期和报告期分别采集，现场采集或计算机采集
2	用电量	电气柜上电表测量或计算机采集
3	燃气富氧率	燃气成分计算或参考已有资料
4	空气温度	在入炉前空气管道上测量或现场仪表记录，求平均值
5	燃气温度	在烧嘴前燃气管道上测量或现场仪表记录，求平均值
6	烟气温度	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
7	空气流量	在热风管道上，测量风压、温度及动压头，动压头最少测量 5 个点或者现场仪表记录，求平均值
8	燃气流量	炉前煤气管道上测量或现场仪表记录，求平均值
9	烟气流量	烟道测量或现场仪表记录，求平均值
10	燃料热值	根据成份计算或将燃气取样进行测量
11	烟气成分	烟道口取样分析或现场仪表记录

附录 C

(资料性附录)

“燃料消耗-影响因素”模型不确定度分析示例

被测量燃料耗 Y 与设备 X_1 ，燃烧器 X_2 ，水冷系统 X_3 ，排烟系统 X_4 ，空气消耗系数 X_5 、生产率 X_6 、炉子供热负荷 X_7 、排烟温度 X_8 、板带入炉温度 X_9 、出炉温度 X_{10} 、板带厚度 X_{11} 、预热空气温度 X_{12} 、炉体表面温度 X_{13} 、烟气成分 X_{14} 、空燃比 X_{15} 、空气流量 X_{16} 、空气流速 X_{17} 、燃料流量 X_{18} 、燃料流速 X_{19} 、炉膛压力 X_{20} 、风压 X_{21} 等的函数关系如下：

$$Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{21}) \quad (C.1)$$

A 类不确定度分量 $X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{21}$ ；

B 类不确定度分量 X_1, X_2, X_3, X_4 。

A 类不确定度分量 17 个，每个分量测量 n 次，即每个分量有 n 个数据。对每组进行 A 类评定。每个分量的平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_k \quad (C.2)$$

每个分量的标准差

$$s(X_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (C.3)$$

每个分量测量结果不确定度

$$s(\bar{x}) = \frac{s(X_k)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} = u(\bar{x}) \quad (C.4)$$

一共 17 个分量，17 个分量的不确定度 S_p

$$s_p(x_i) = \sqrt{\frac{1}{17} \sum_{i=1}^{17} s_i^2} \quad (C.5)$$

合成不确定度 $U_c(y)$

$$u_c^2(y) = \left[\frac{\partial E_s}{\partial X_1} u_{X_1} \right]^2 + \left[\frac{\partial E_s}{\partial X_2} u_{X_2} \right]^2 + \dots + \left[\frac{\partial E_s}{\partial X_{21}} u_{X_{21}} \right]^2 \quad (C.6)$$

式中 $u_{X_1}, u_{X_2}, \dots, u_{X_{21}}$ 是单组分量的标准不确定度。

参考文献

- [1] JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示
 - [2] ASHRAE guideline 14-2002 Measurement of energy and demand savings
 - [3] EVO 10000-1:2010 International Performance Measurement and Verification Protocol-Concept and Options for Determining Energy and Water Savings.
-