

工业锅炉焓效率测试技术

Test technology of exergy efficiency for industrial boilers

2025 - 07 - 30 发布

2025 - 08 - 30 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 锅炉运行工况焓效率测试项目与计算方法	3
附录 A（资料性）锅炉运行工况焓效率测试计算实例	7

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件代替DB21/T 2567—2016《工业锅炉热效率测试技术规程》，与DB21/T 2567—2016相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

——修改了范围；

——引用文件中删除了TSG G0002—2010《锅炉节能技术监督管理规程》和TSG G0003—2010《工业锅炉能效测试与评价规则》，增加了GB/T 2900.48《电工名词术语 锅炉》、TSG 91《锅炉节能环保技术规程》；

——增加和修改了术语和定义；

——修改了排烟损失公式，相应的计算示例也进行了更正。

本文件由辽宁省市场监督管理局提出并归口。

本文件起草单位：营口市锅炉压力容器检验研究院有限公司、东北大学、新疆重能电力开发有限公司、朝阳市特种设备监督检验所。

本文件主要起草人：林贺勇、韩鹏、林峰、刘佳、娄锦东、郎冬余、郭佳琦、刘铭玮、谢华清、刘晨、林佳黛、赵国全、孙大超、杨嘉洺。

本文件所替代文件的历次版本发布情况为：

——DB21/T 2567—2016。

本文件发布实施后，任何单位和个人如有问题和意见建议，均可通过来电、来函等方式进行反馈，有关单位将及时答复并认真处理，根据实际情况依法进行评估及复审。

归口管理部门和联系电话：辽宁省市场监督管理局（沈阳市皇姑区崇山中路55号），024-96315-1-3202。

文件起草单位和联系电话：营口市锅炉压力容器检验研究院有限公司（营口市西市区渤海大街西69号），0417-2830471。

工业锅炉焓效率测试技术

1 范围

本文件规定了工业锅炉运行工况焓效率测试中的术语和定义、符号和单位、测试项目与计算方法等。

本文件适用于额定压力小于3.8MPa, 介质为水或液相有机热载体的固体燃料锅炉、液体燃料锅炉、气体燃料锅炉, 且能够按照GB/T 10180进行锅炉运行工况热效率简单测试的锅炉。

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 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 14909 能量系统焓分析技术导则
GB/T 17954 工业锅炉经济运行
TSG 91 锅炉节能环保技术规程

3 术语和定义

GB/T 10180界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

焓 exergy

体系从所处的任意状态(具有一定的温度、压力与化学组成)达到与环境参考态相平衡状态的可逆过程中对外界做出的功。

[来源: GB/T 14909, 3.3]

3.2

焓损失 exergy loss

由于过程不可逆性所造成的体系作功能力的减少, 包括内部焓损失和外部焓损失。

3.3

内部焓损失 internal exergy loss

由于体系内部过程不可逆性所造成的体系做功能力的减少, 包括燃烧焓损失和传热焓损失。

3.4

外部焓损失 external exergy loss

由于体系发生的摩擦生热、绝热不良、废气排热等导致的做功能力减少, 以及环境污染物和废弃物等外部废弃造成的做功能力减少, 包括排烟焓损失、气体未完全燃烧焓损失、固体未完全燃烧焓损失、散热焓损失、灰渣物理焓损失。

3.5

锅炉焓效率 boiler exergy efficiency

同一时间内锅炉有效利用的焓与输入焓的百分比。

3.6

锅炉运行工况热效率简单测试 simple test for thermal efficiency under boiler operating conditions

是对在用燃煤、燃油和燃气等工业锅炉进行日常运行状态下主要参数的简便快速试验,用于快速判定锅炉实际运行热效率。

3.7

锅炉运行工况焓效率测试 simple test for exergetic efficiency under boiler operating conditions

在锅炉运行工况热效率简单测试的基础上,通过测定和计算各项内部焓损失和外部焓损失来确定锅炉焓效率的方法。

4 符号和单位

表1中所列的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	E_r	燃料的化学焓	kJ/kg
2	E_{rs}	燃烧产物所具有的焓	kJ/kg
3	e_2	排烟焓损失	%
4	e_3	气体未完全燃烧焓损失	%
5	e_4	固体未完全燃烧焓损失	%
6	e_5	散热焓损失	%
7	e_6	灰渣物理焓损失	%
8	e_7	燃烧焓损失	%
9	e_8	传热焓损失	%
10	η	按照锅炉运行工况焓效率测试方法计算的锅炉焓效率	%
11	$Q_{net,v,ar}$	燃料收到基低位发热量	kJ/kg
12	$Q_{gr,v,ad}$	燃料高位发热量	kJ/kg
13	q_2	排烟热损失	%
14	q_3	气体未完全燃烧热损失	%
15	q_4	固体未完全燃烧热损失	%
16	q_5	散热损失率	%
17	q_6	灰渣物理热损失	%
18	η_j	按照锅炉运行工况热效率简单测试方法计算的锅炉热效率	%
19	ω	收到基水分	%
20	T_0	环境温度	K
21	T_{py}	排烟温度	K
22	T_{1t}	炉体外表面平均温度	K
23	T_{hz}	灰渣温度	K
24	T_h	炉膛内的最高温度	K

序号	符号	名称	单位
25	T_{ck}	工质出口温度	K
26	T_{rk}	工质入口温度	K
注：当计算焓效率及各项焓损失时用热力学温度开尔文（K），当计算热效率及各项热损失时用摄氏度（℃）。			

5 锅炉运行工况焓效率测试项目与计算方法

5.1 测试条件和测试要求

与锅炉运行工况热效率简单测试相同。

5.2 测试项目

在锅炉运行工况热效率简单测试项目基础上增加以下项目：

- 固体燃料中水的质量份数 ω ， %；
- 环境温度 T_0 ， K；
- 炉体外表面平均温度 T_{1t} ， K；
- 炉膛内的最高温度 T_h ， K；
- 工质出口温度 T_{ck} ， K；
- 工质入口温度 T_{rk} ， K；

5.3 各项焓损失的计算

5.3.1 排烟焓损失 (e_2)

排烟焓损失是指排入大气的烟气物理焓，按照公式（1）进行计算：

$$e_2 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}}q_2[1-(T_0/(T_{py}-T_0))\ln(T_{py}/T_0)]}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

对于气体、液体和固体燃料可分别按照公式（2）、（3）和（4）计算燃料的化学焓（ E_r ）。

$$E_r = 0.950Q_{\text{gr,v,ad}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$E_r = 0.975Q_{\text{gr,v,ad}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$E_r = Q_{\text{gr,v,ad}} + 2438\omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

5.3.2 气体未完全燃烧焓损失 (e_3)

气体未完全燃烧焓损失是由于燃料在燃烧过程中所生成的一部分残留在烟气中的可燃体未完全燃烧所造成的，即损失了这部分可燃气体的化学焓，按照公式（5）进行计算：

$$e_3 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}}q_3}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

5.3.3 固体未完全燃烧焓损失 (e_4)

固体未完全燃烧焓损失是由未燃尽的可燃固体造成的，即损失了这部分可燃固体的化学焓，按照公式（6）进行计算：

$$e_4 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}}q_4}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

5.3.4 散热焓损失 (e_5)

散热烟损失是由于锅炉运行中锅炉表面炉墙温度高于周围环境温度，以辐射、对流的传热方式传给周围环境热量而损失的热量烟，按照公式（7）进行计算：

$$e_5 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_5 (1 - T_0/T_{\text{lt}})}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

炉体外表面平均温度（ T_{lt} ）一般按照 320K 选取。

5.3.5 灰渣物理烟损失（ e_6 ）

灰渣的烟损失主要是指排出炉膛的炉渣所具有物理烟，按照公式（8）进行计算：

$$e_6 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_6 (1 - (T_0/T_{\text{hz}}))}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

灰渣温度（ T_{hz} ）一般按照 873K 选取。

5.3.6 燃烧烟损失（ e_7 ）

锅炉内燃料烟与燃烧产物所具有的烟的差值，即为燃烧烟损失，按照公式（9）进行计算：

$$e_7 = \frac{E_r - E_{rs}}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

锅炉内燃烧产物所具有的烟（ E_{rs} ），按照公式（10）进行计算：

$$E_{rs} = (Q_{\text{net,v,ar}} - Q_{\text{net,v,ar}} q_3 - Q_{\text{net,v,ar}} q_4) \left(1 - \frac{T_0}{T_h - T_0} \ln \frac{T_h}{T_0} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

5.3.7 传热烟损失（ e_8 ）

锅炉中燃烧产物所具有的能量经壁面和换热设备传给工质，由于壁面两侧存在温差，而产生的烟损失，按照公式（11）进行计算：

$$e_8 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} \eta_j T_0 [(\ln T_{ck} - \ln T_{rk}) / (T_{ck} - T_{rk}) - (\ln T_h - \ln T_{py}) / (T_h - T_{py})]}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (11)$$

5.4 锅炉烟效率（ η ）

锅炉烟效率按照公式（12）进行计算：

$$\eta = 100 - \sum_{i=2}^8 e_i \quad \dots\dots\dots (12)$$

5.5 锅炉运行工况烟效率测试分析与计算实例

5.5.1 主要烟损失及烟效率的分析

5.5.1.1 烟烟损失分析

排烟烟损失远小于排烟热损失，原因是烟气的能源品质低可用能少，因此从烟的角度分析排烟烟损失不是节能潜力所在。

5.5.1.2 燃烧烟损失分析

燃料在锅炉炉膛中燃烧时所放出的热量主要是燃料的化学能。燃料化学能与燃烧产物之间能级相差很大，在转换的过程中一部分烟损失掉。燃烧产物所具有的烟与燃料烟的差值，构成燃烧烟损失。这项烟损失是客观存在的，不可逆的，但可以控制在一定的数值之下。燃烧烟损失与燃料的燃烧温度有关，

提高燃烧温度会相应提高燃烧产物的焓值，燃烧焓损失就会减少。工业锅炉常见问题之一就是炉膛温度偏低，其原因主要是：

- a) 所用燃料与设计燃料不符，各项指标数据不能很好的满足锅炉燃烧所需；
- b) 控制不当或风机型号与锅炉不匹配，导致进风量偏多，炉膛平均温度低；
- c) 炉膛漏风，外部冷空气进入锅炉，与内部高温烟气混合，导致炉膛平均温度下降；
- d) 无空气预热器，供给燃烧的空气初始温度低，理论燃烧温度本身就不高；
- e) 炉膛内布置了过多辐射受热面，不能达到良好的保温、稳燃效果。

为了减少燃烧焓损失，应保证燃烧的高温环境，提高炉膛温度，可以从以下几方面入手：

- a) 燃用符合设计的燃料；
- b) 保证燃烧的条件下适当减少空气供给量；
- c) 减少炉膛漏风量；
- d) 从燃烧的角度考虑，加设空气预热设备，用尾部低能级的烟气，加热供给燃烧的空气，不仅可以有效的降低排烟焓损失，还能够很好的提高炉膛燃烧温度。

5.5.1.3 传热焓损失分析

传热焓损失的大小与传热温差有着密切关系，传热温差越大，传热焓损失就越大。炉膛中高温烟气和工质之间存在很大的传热温差，因此炉膛传热焓损失大。要降低传热温差就要通过降低炉内烟气的温度、增加工质的平均温度来实现。降低炉内烟气的温度，虽然减少了传热过程的焓损失，但同时增加燃烧过程的焓损失。因此，要减小传热温差，降低传热过程的焓损失，必须提高工质参数。

对于在用工业锅炉，影响传热焓损失过大的原因有以下几点：

- a) 工质参数过低，很多工业锅炉在低于额定压力很多的条件下运行，导致水管中工质的温度较低，而炉膛的温度较高，两者间的温差大，传热引起的焓损多；
- b) 锅炉未安装省煤器，供给锅炉内循环的工质初始温度低，导致传热温差大，传热焓损失增加；
- c) 工业锅炉结水垢是个普遍存在的问题。水垢的导热系数比钢铁的导热系数小数十倍。有水垢存在会使受热面传热状况恶化，供给锅炉的水升温速度慢，与炉膛中高温烟气始终保持较大的传热温差，传热焓损失增加；
- d) 工业锅炉采用的燃料品质参差不齐，灰分过多会导致受热面积灰严重，烟气流道截面变窄，局部流速变化，使受热面的传热性能变差，供给锅炉的水升温速度慢，与炉膛中高温烟气始终保持较大的传热温差，传热焓损失增加。

为了减少传热焓损失，须提高工质参数，并考虑较小的传热温差，可以从以下几方面入手：

- a) 避免锅炉降压运行，实际运行负荷不应低于额定负荷过多，使用单位在锅炉选型时，要充分考虑实际使用所需压力的大小，避免“大马拉小车”；
- b) 加省煤器，从焓的角度考虑，用尾部低能级的烟气，加热供给锅炉的工质，两者传热温差相对较小，传热焓损失低。加设省煤器后，供给锅炉的工质初始温度增高，不仅可以降低传热温差，减少传热焓损失，还能够有效的降低排烟焓损失；
- c) 通过采取有效的水处理技术和除垢技术，加强对锅炉的原水、给水、锅水、回水的水质及蒸汽品质检验分析，按时排污减少炉水中盐的含量，减少生成水垢的几率；
- d) 定期的清除锅炉内的积灰和结焦，对于改善传热、减小传热温差有明显的效果。

5.5.1.4 焓效率分析

锅炉的焓效率远低于热效率。影响锅炉焓效率的主要因素是：燃烧不可逆焓损失和传热不可逆焓损失。其原因是内部焓损失的存在，它是由系统内部过程的不可逆性引起的，是能量质量的降低，是不可避免的，但可以把它控制在某个最佳值。

热效率与焓效率之间存在正比的关系，对于热效率不高的锅炉，应主要从热效率角度降低锅炉各项热损失，进而使热效率和焓效率共同提高；对于热效率高的锅炉，应主要从焓效率角度降低其内部焓损失。为了节约能源和合理用能，应从热平衡法和焓平衡法共同科学、客观评价锅炉能效状况，确定影响锅炉能效的主要因素，从而提高锅炉的经济运行水平。

5.5.2 锅炉运行工况焓效率测试计算实例

锅炉运行工况焓效率测试计算实例见附录A。

附录 A

(资料性)

锅炉运行工况焓效率测试计算实例

A.1 锅炉概况和测试数据

某厂燃煤蒸汽锅炉型号为DZL10-1.25-A II，按照锅炉运行工况焓效率测试方法进行测试，已知相关测试、化验和计算数据如下：

表 A.1 测试、化验和计算数据

序号	项目	单位	数据
1	蒸汽压力 p	MPa	1.10
2	环境温度 T_0	K	284.13
3	工质出口温度 T_{ek}	K	460.85
4	工质入口温度 T_{rk}	K	289.45
5	炉膛内的最高温度 T_h	K	1100.77
6	炉体外表面平均温度 T_{1t}	K	320
7	排烟温度 t_{py}	K	457.73
8	排烟处 O_2 含量	%	12.44
9	排烟处CO含量	%	0.01378
10	排烟处过量空气系数 α_{py}	/	2.15
11	飞灰可燃物含量 C_{fh}	%	17.93
12	漏煤可燃物含量 C_{lm}	%	37.08
13	炉渣可燃物含量 C_{lz}	%	10.09
14	收到基灰分 A_{ar}	%	20.04
15	燃料收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}$	kJ/kg	18441.00
16	固体燃料中水的质量份数 ω	%	13.66
17	排烟热损失率 q_2	%	13.35
18	气体未完全燃烧热损失率 q_3	%	0.20
19	固体未完全燃烧热损失率 q_4	%	5.43
20	散热损失率 q_5	%	2.62
21	灰渣物理热损失率 q_6	%	0.54
22	热效率 η_j	%	77.86

A.2 各项焓损失及焓效率的计算

A.2.1 燃料的化学焓 (E_r)

$$E_r = Q_{gr,v,ad} + 2438\omega = 18441.00 + 2438 \times 0.1366 = 18774.03(kJ/kg)$$

A.2.2 排烟焓损失 (e_2)

$$e_2 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_2 [1 - (T_0 / (T_{py} - T_0)) \ln (T_{py} / T_0)] [100 / (100 - q_4)]}{E_r} \times 100\%$$

$$= \frac{18441.00 \times 0.1335 \left(1 - \frac{284.13}{457.73 - 284.13} \ln \frac{457.73}{284.13}\right) \left(\frac{100}{100 - 5.43}\right)}{18774.03} \times 100\%$$

$$= 2.87\%$$

A. 2.3 气体未完全燃烧损失 (e_3)

$$e_3 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_3}{E_r} \times 100\% = \frac{18441.00 \times 0.002}{18774.03} \times 100\% = 0.20\%$$

A. 2.4 固体未完全燃烧损失 (e_4)

$$e_4 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_4}{E_r} \times 100\% = \frac{18441.00 \times 0.0543}{18774.03} \times 100\% = 5.33\%$$

A. 2.5 散热损失 (e_5)

$$e_5 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_5 (1 - T_0 / T_{lt})}{E_r} \times 100\% = \frac{18441.00 \times 0.0262 (1 - 284.13 / 320)}{18774.03} \times 100\%$$

$$= 0.29\%$$

A. 2.6 灰渣物理损失 e_6

$$e_6 = \frac{Q_{\text{net,v,ar}} q_6 (1 - (T_0 / T_{hz}))}{E_r} \times 100\% = \frac{18441.00 \times 0.0054 (1 - 284.13 / 873)}{18774.03} \times 100\%$$

$$= 0.36\%$$

A. 2.7 燃烧损失 (e_7)

$$E_{rs} = (Q_{\text{net,v,ar}} - Q_{\text{net,v,ar}} q_3 - Q_{\text{net,v,ar}} q_4) \left(1 - \frac{T_0}{T_h - T_0} \ln \frac{T_h}{T_0}\right)$$

$$= (18441.00 - 18441.00 \times 0.02 - 18441.00 \times 0.0543)$$

$$\times \left(1 - \frac{284.13}{1100.77 - 284.13} \ln \frac{1100.77}{284.13}\right)$$

$$= 9202.50 (\text{kJ/kg})$$

$$e_7 = \frac{18774.03 - 9202.50}{18774.03} \times 100\% = 50.98\%$$

A. 2.8 传热损失 (e_8)

$$\begin{aligned}
 e_8 &= \frac{Q_{\text{net,v,ar}} \eta_j T_0 [(\ln T_{ck} - \ln T_{rk}) / (T_{ck} - T_{rk}) - (\ln T_h - \ln T_{py}) / (T_h - T_{py})]}{E_r} \\
 &\quad \times 100\% \\
 &= \frac{18441.00 \times 0.7786 \times 284.13 \left(\frac{\ln 460.85 - \ln 289.45}{460.85 - 289.45} - \frac{\ln 1100.77 - \ln 457.73}{1100.77 - 457.73} \right)}{18774.03} \\
 &\quad \times 100\% \\
 &= 29.31
 \end{aligned}$$

A.2.9 锅炉焓效率 (η)

$$\begin{aligned}
 \eta &= 100 - \sum_{i=2}^8 e_i = 100 - (2.87 + 0.20 + 5.33 + 0.29 + 0.36 + 50.98 + 29.31) \\
 &= 10.66\%
 \end{aligned}$$
