

中华人民共和国国家标准

GB/T 26137—2010

高炉煤气能量回收透平膨胀机 热力性能试验

Thermodynamic performance testing for
blast furnace gas energy recovery turbo-expander

2011-01-14 发布

2011-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 符号和说明	1
4 试验装置和仪器	3
4.1 试验装置	3
4.2 试验管路	4
4.3 流量测量	4
4.4 测量仪表	4
4.5 功率测量	5
5 试验规则	5
5.1 测量项目	5
5.2 性能试验条件	5
5.3 试验转速	6
5.4 流量测量	6
5.5 气体密度确定	6
5.6 压力测量	6
5.7 温度测量	6
5.8 功率测量	7
6 试验条件的稳定	7
7 试验结果的计算	7
7.1 性能计算	7
7.2 性能换算	8
8 试验报告	8
附录 A (资料性附录) 热力学计算	10

前 言

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国风机标准化技术委员会(SAC/TC 187)归口。

本标准起草单位:沈阳鼓风机(集团)有限公司、陕西鼓风机(集团)有限公司。

本标准主要起草人:陈凤义、王斗、李杰、郑华、张三元。

高炉煤气能量回收透平膨胀机

热力性能试验

1 范围

本标准规定了高炉煤气能量回收透平膨胀机(以下简称膨胀机)热力性能试验的试验方法。
烟气、硝酸尾气及其他能量回收透平膨胀机的热力性能试验可参照本标准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 1236 工业通风机 用标准化风道进行性能试验(GB/T 1236—2000, idt ISO 5801:1997)

GB/T 2624.1 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第1部分:一般原理和要求(GB/T 2624.1—2006, ISO 5167-1:2003, IDT)

GB/T 2624.2 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第2部分:孔板(GB/T 2624.2—2006, ISO 5167-2:2003, IDT)

GB/T 2624.3 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第3部分:喷嘴和文丘里喷嘴(GB/T 2624.3—2006, ISO 5167-3:2003, IDT)

GB/T 2624.4 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第4部分:文丘里管(GB/T 2624.4—2006, ISO 5167-4:2003, IDT)

JB/T 3165 离心和轴流式鼓风机和压缩机热力性能试验

3 符号和说明

3.1 本标准的符号和说明按表1规定。

表1 符号和说明

符号	名 称	单位	说 明
d	节流孔直径	m	节流孔直径指孔板内径、文丘里管喉径或喷嘴缩口直径
D	管道直径	m	流量计上游管道直径或试验管道直径
A	节流测量元件面积	m ²	
V	体积	m ³	
t	时间	s	
n	转速	r/min	
m	质量	kg	
ρ	密度	kg/m ³	$\rho = \frac{p}{RT}$
ρ_N	标准状态下的密度	kg/m ³	$\rho_N = \frac{101\,325}{273.15R}$
p_N	标准状态下的压力	Pa	101 325

表 1 (续)

符号	名 称	单位	说 明
p	测量压力	Pa	表压
p_a	大气压力	Pa	现场环境压力
p_{up}	上游压力	Pa	节流元件上游取压口测得的绝对静压
Δp	节流压差	Pa	孔板、喷嘴或文丘里管上、下游取压口处的静压之差
N	输出功率	W	$N = G \cdot c_p \cdot \Delta t \cdot f_d$
N_{is}	等熵功率	W	$N_{is} = G \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{2is})$
η	效率		$\eta = \frac{N}{N_{is}}$
η_t	机械效率		一般取 0.98
G	质量流量	kg/s	膨胀机进口的质量流量
Q	容积流量	m ³ /s	
Q_N	标准状态下的流量	Nm ³ /h	将质量流量换算到标准状态下的小时流量
T_N	标准状态下的热力学温度	K	273.15
T	测量热力学温度	K	$T = 273.15 + t$
t	测量温度	°C	$t = T - 273.15$
Δt	测量温差		$\Delta t = t_1 - t_2$
c_p	比定压热容	J/(kg·K)	$c_p = \frac{k}{k-1}R$
κ	等熵指数		$\kappa = -\frac{V}{p} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_s$
M	相对分子量		
R	气体常数	J/(kg·K)	$R = \frac{p \cdot V}{T}$
x	绝对湿度		
φ	相对湿度		
f_d	修正系数		汽化潜热的影响修正
标准状态			压力: $p_N = 101\,325\text{ Pa} = 0.101\,3\text{ MPa}$ 温度: $t = 0\text{ °C}$

3.2 下标及定义按表 2 规定。

表 2 下标及定义

下标	定 义
g	干煤气
i	煤气成分中的第 i 种气体,包括 CO、CO ₂ 、CH ₄ 、H ₂ 、N ₂ 、O ₂ 等
p	等压
s	湿煤气

表 2 (续)

下标	定 义
is	等熵
up	上游
N	标准状态
0	设计条件下参数值,无下标的参数值为取自试验测试值
1	进口法兰处截面
2	出口法兰处截面

4 试验装置和仪器

4.1 试验装置

试验装置一般采用膨胀机现场的机组及进出口连接管道。试验装置见图 1~图 3。

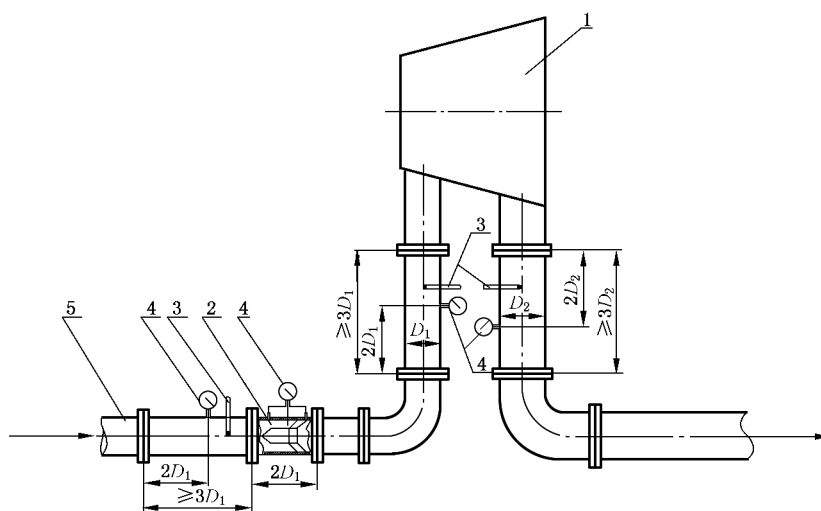


图 1 进出口管道为下进下出布置

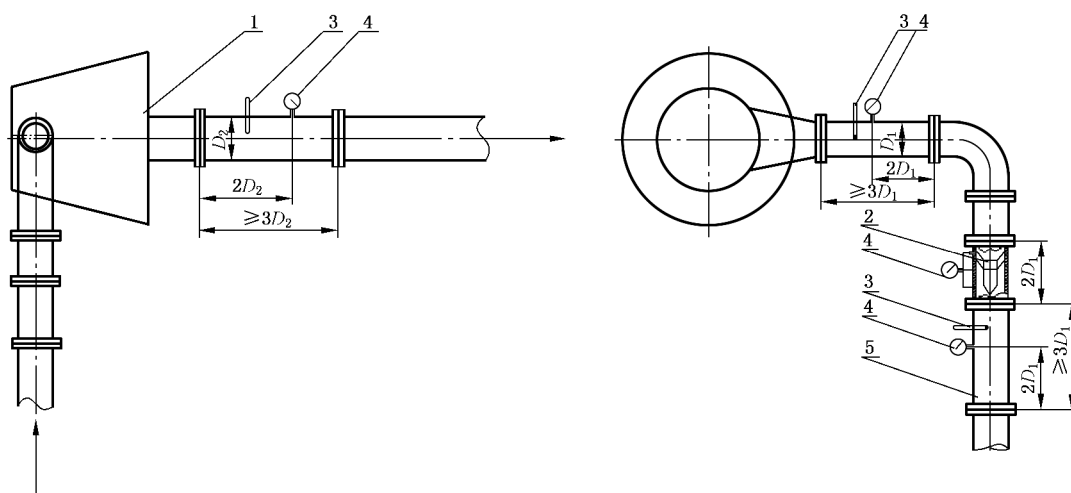
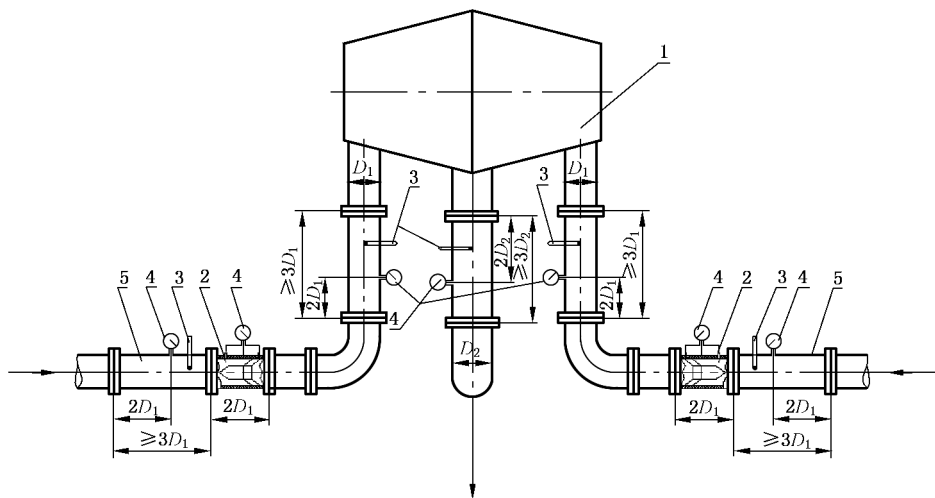


图 2 进出口管道为水平侧向进轴向出布置



注：图 1～图 3 中序号名称：
1——膨胀机；
2——节流元件；
3——温度计表；
4——压力计；
5——管道。

图 3 双进气单出口管道下进下出布置

4.2 试验管路

- 4.2.1 进气和出气试验管路的截面面积,应尽可能与膨胀机进、出口法兰面积相同。若不同时,应另用锥形接头连接。锥形接头的截面积比和外形尺寸应按 GB/T 1236 规定。
- 4.2.2 进、出气试验管道的内壁面应是平整、无尘垢和无起皮的光洁管壁,管道长度应分别符合图 1～图 3 的规定。
- 4.2.3 进、出气试验管道应分别设有测量静压和温度的测量孔。对于静压和温度测量孔的要求按 JB/T 3165 规定。

4.3 流量测量

- 4.3.1 试验管道应符合 JB/T 3165 的规定。
- 4.3.2 孔板结构尺寸应符合 GB/T 2624.1 和 GB/T 2624.2 的规定。
- 4.3.3 喷嘴结构尺寸应符合 GB/T 2624.1 和 GB/T 2624.3 的规定。
- 4.3.4 文丘里管结构尺寸应符合 GB/T 2624.1 和 GB/T 2624.4 的规定。

4.4 测量仪表

- 4.4.1 膨胀机的热力性能试验用仪表按表 3 规定。

表 3 试验用仪表

测量值名称	测量仪表	最小刻度	精度 %
压力	精密气压计 压力变送器	最大量程的 0.5%	±0.5
大气压力	精密气压计 绝对压力变送器	最大量程的 0.5%	±0.5
差压	精密气压计 压力变送器	最大量程的 0.5%	±0.5

表 3 (续)

测量值名称	测量仪表	最小刻度	精度 %
温度	铂热电阻温度计	0.1℃	±0.5
转速	转速表	最大量程的0.5%	±0.5
流量	流量计	最大量程的0.5%	±0.5
电测法测功率	电流表	最大量程的0.5%	±0.5
	电压表		
	功率因数表		±0.1
	功率表		±1.0
注：本标准推荐的测量仪表是最低限度要求,并不限制使用其他同等或更高精度的仪表。			

4.4.2 仪表校验

差压、压力、温度、转速和功率表等应定期进行计量检定。

4.5 功率测量

功率测量采用热平衡法或电测法。

5 试验规则

5.1 测量项目

- a) 流量；
- b) 进口压力；
- c) 进口温度；
- d) 出口压力；
- e) 出口温度；
- f) 主轴转速；
- g) 大气压力；
- h) 气体组分；
- i) 输出功率。

5.2 性能试验条件

性能试验条件不应超过表 4 和表 5 的范围。

表 4 测量项目偏差量

测量项目	符号	单位	偏差量 %
进口压力	p_1	kPa	±5
进口温度	T_1	K	±8
介质密度	ρ_1	kg/m ³	±2
主轴转速	n	r/min	±2
流量	Q	m ³ /h	±4
注：偏差量是指试验条件量与设计条件量的偏差的百分比。压力为绝对压力,温度为绝对温度。			

表 5 测量项目波动量

测量项目	符号	单位	波动量 %
进口压力	p_1	kPa	± 2
进口温度	T_1	K	± 0.5
出口压力	p_2	kPa	± 2
节流装置压差	Δp	kPa	± 2
节流装置上游压力	p_{up}	kPa	± 2
节流装置上游温度	T_{up}	K	± 0.5
介质密度	ρ	kg/m ³	± 0.25
主轴转速	n	r/min	± 0.5
输出功率	N	kW	± 1
注：温度、压力波动量是分别指平均绝对温度、平均绝对压力的百分比。			

5.3 试验转速

性能试验的转速偏差与波动量应满足表 4 和表 5 的规定。

5.4 流量测量

5.4.1 流量测量装置

试验时应采用 GB/T 2624 节流孔板或喷嘴作为流量测量节流装置测定流量。

节流装置上、下游所需直管段的最小长度应符合 GB/T 2624 的规定。

5.4.2 节流装置的安装

节流装置应放在系统温度低于 150℃ 的地方,以减小节流装置的热膨胀和热变形。节流装置的法兰和管道,应采用与节流件有相同热膨胀系数的耐腐蚀材料。

5.4.3 膨胀机的流量调节通过高炉顶压或减压阀组调节。

5.5 气体密度确定

气体的密度是根据测量出的压力、温度和煤气组分确定的。压力和温度的测量按照本标准的规定进行,煤气组分由符合精度要求的气体分析仪进行测量。

5.6 压力测量

5.6.1 测量压力

压力测量包括出口压力、进口压力,流量计上游压力、流量计节流压差、大气压力。

5.6.2 测压孔

测量的压力的取压口的位置应在能够避开局部阻力(如阀门、三通、弯头等)影响的直管段上。一般可在测量截面的四周壁面均匀布置 4 个测压孔,测压孔应垂直于介质流动的方向,孔口的边缘应是尖锐直角、无毛刺,孔壁应平直。孔的内径应取 3 mm~5 mm。

5.6.3 仪表

采用精度等级符合表 3 的压力(差压)变送器或绝对压力变送器作为测量压力的一次测量元件,或用巡回检测装置作为二次测量仪表。

5.7 温度测量

5.7.1 测量温度

测量温度包括进口、出口温度,流量计上游温度。

5.7.2 温度测点

节流装置上游温度测量应在差压装置的上游,且在上游压力测点下游 0.5D。进出截面温度测量在

相应压力截面下游 $0.5D$ 。

测温应在一个截面上选 2 个互成 90° 的测点。

温度计可置于距管壁 100 mm 或管道直径的 $1/3$ 处以较小者为宜,测量后取两个测量读数的平均值作为该截面介质的温度。

5.7.3 仪表

温度测量仪表应采用经过校验并符合表 3 规定的铂电阻。

5.8 功率测量

5.8.1 功率可采用热平衡法测量,也可采用电测法测量。

5.8.2 通过测量轴承进、出口油温和油量确定机械损失功率。

6 试验条件的稳定

6.1 试验过程中每一试验工况的稳定时间至少为 30 min。

6.2 试验的各项测量值可以取同一时间内的平均值作为测量记录。

7 试验结果的计算

7.1 性能计算

7.1.1 质量流量 $G(\text{kg/s})$ 的计算

$$G = Q_N \cdot \rho_N / 3\,600 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

Q_N ——标准容积流量,单位为标准立方米每小时(Nm^3/h);

ρ_N ——标准状态下的煤气密度。

7.1.2 进出口温差 $\Delta t(^{\circ}\text{C})$ 的计算

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

t_1 ——进口温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

t_2 ——出口温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。

7.1.3 输出功率 $N(\text{kW})$ 的计算

$$N = G \cdot c_p \cdot \Delta t \cdot f_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

G ——质量流量;

c_p ——煤气的比定压热容,可按照附录 A 计算确定;

Δt ——进出口温差;

f_d ——湿煤气水汽冷凝过程中所释放汽化潜热热量修正系数。对于干式膨胀机 $f_d = 1.0$ 。对于湿式膨胀机 f_d 见图 4。

7.1.4 等熵功率 $N_{is}(\text{kW})$ 的计算

$$N_{is} = G \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{2is}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

T_{2is} ——按照等熵过程计算的膨胀机出口温度。

7.1.5 效率的计算

效率为输出功率与等熵功率之比:

$$\eta = \frac{N}{N_{is}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

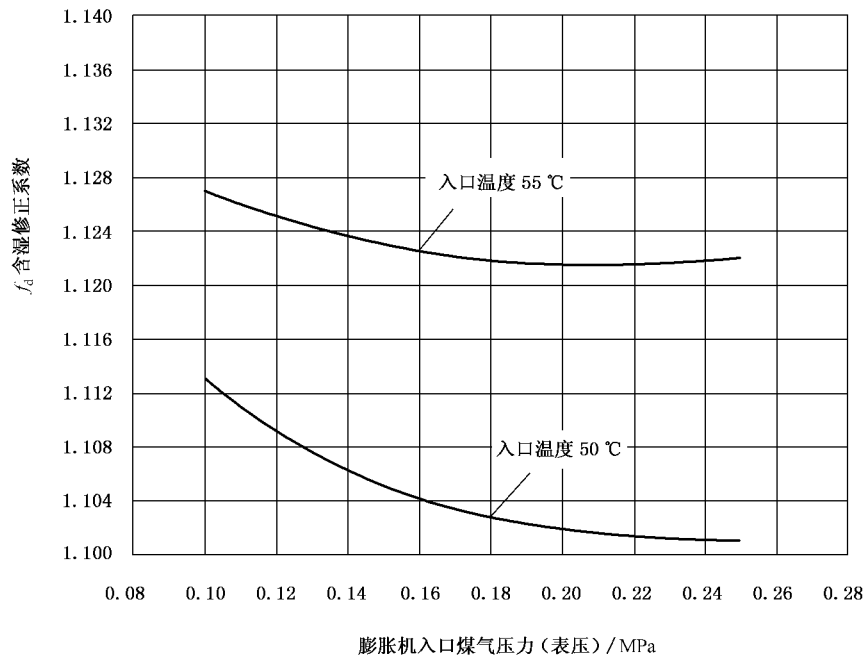


图 4 汽化潜热热量修正系数

7.2 性能换算

设计工况点回收功率按式(6)换算求得：

$$N_0 = \frac{Q_0}{Q} \cdot \frac{\rho_0}{\rho} \cdot \frac{T_{10}}{T_1} \cdot \frac{1 - (p_{20}/p_{10})^{\frac{k-1}{k}}}{1 - (p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot N \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- N_0 ——设计条件下输出功率,单位为瓦(W)；
- N ——试验条件下输出功率,单位为瓦(W)；
- Q_0 ——设计条件下的容积流量,单位为立方米每小时(m^3/h)；
- Q ——试验条件下的容积流量,单位为立方米每小时(m^3/h)；
- ρ_0 ——设计条件下的密度；
- ρ ——试验条件下的密度,可由公式 $\rho = p/(RT)$ 计算得到；
- T_{10} ——设计条件下进口温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)；
- T_1 ——试验条件下进口温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$)；
- p_{20} ——设计条件下出口压力,单位为千帕(kPa)；
- p_{10} ——设计条件下进口压力,单位为千帕(kPa)；
- p_2 ——试验条件下出口压力,单位为千帕(kPa)；
- p_1 ——试验条件下进口压力,单位为千帕(kPa)。

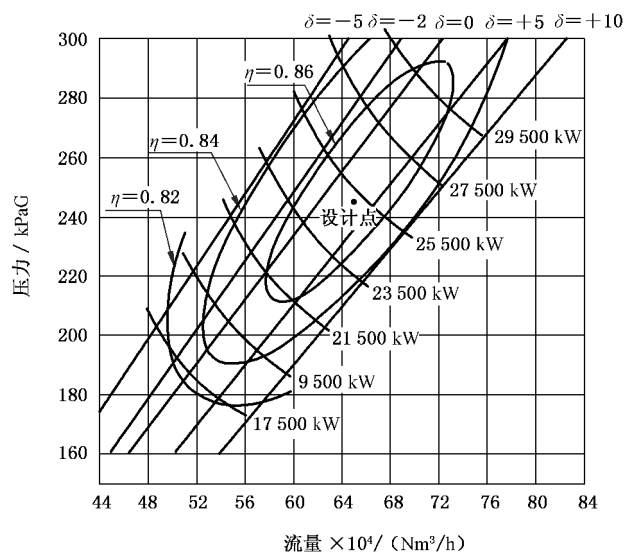
8 试验报告

8.1 试验报告内容包括：

- a) 设计性能参数表；
- b) 试验实测数据汇总表；
- c) 试验结果计算与换算；
- d) 试验性能曲线图；

- e) 试验布置简图；
- f) 试验结果分析；
- g) 其他说明。

8.2 试验性能曲线可参照图 5 绘制。



设计点：

δ ——第一级静叶开度。

进口流量： $65 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ；

进口压力：245 kPa；

进口温度：190 °C；

出口压力：12 kPa；

输出功率：25 300 kW。

图 5 试验性能曲线

附 录 A

(资料性附录)

热力学计算

A.1 热力学计算说明

高炉炼铁过程中产生的煤气称为高炉煤气,它由一氧化碳、二氧化碳、氢气、氮气等组成,并含有大量的灰尘,高炉煤气用集尘器及湿式或干式除尘设备除尘之后,再送入高炉煤气能量回收透平膨胀机。由于从湿式除尘设备中送出的高炉煤气是用除尘设备中的水清洗的,因此,煤气中含有水分,呈饱和状态。但是从干式除尘设备中送出的高炉煤气却不处于含有水分的饱和状态,没有湿气。

通常饱和状态的煤气在膨胀的时候要有冷凝水的产生,因此,计算过程要充分考虑冷凝水对膨胀机的影响。而在干式膨胀机中无冷凝水的产生。

对膨胀机进行热力学性能试验计算时,无论是从湿式还是干式除尘设备中送出的高炉煤气,为简化热力学计算,都作以下假设:

- a) 将介质看作理想气体;
- b) 热力学系统为绝热、稳定、开式系统(包含损失)。

A.2 高炉煤气物理参数的计算

高炉煤气物理参数的计算分两个阶段进行。首先计算除去高炉煤气中水分的干煤气物理参数,然后再考虑水分的影响。

干高炉煤气物理参数按公式(A.1)、(A.2)、(A.3)、(A.4)计算:

$$M_g = \sum M_i V_i \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

$$G_i = V_i M_i / M_g \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$R_g = \frac{8\,314.3}{M_g} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

$$c_{pg} = \sum G_i c_{pi} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

对于高炉煤气中的水分量可以用绝对湿度来表示,其中湿式除尘设备送出的高炉煤气可用公式(A.5)、(A.6)、(A.7)计算,而干式除尘设备送出的高炉煤气则使用用户提出的值。

$$x = \frac{\varphi p_s R_g}{R_s (p - \varphi p_s)} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

$$R = \frac{R_g + x R_s}{1 + x} \quad \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} = \frac{c_{pg} + x c_{ps}}{R_g + x R_s} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

式中:

p_s ——饱和蒸汽分压力,单位为帕(Pa);

R_s ——水蒸气气体常数:462 J/(kg·K);

c_{ps} ——水蒸气的比定压热容:1 884 J/(kg·K)。

$$\rho_N = \frac{101\,325}{273.15 \times R_g} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$