

YS

中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T xxx. x-20XX

氧化铝生产专用设备
热平衡测试与计算方法
(焙烧回转窑)

Methods for determination and calculation of heat
Balance of special equipments for alumina production
(Rotary kiln used calcining)
(预审稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

前 言

本文件按照 YS/T 119-2-92《氧化铝专用设备热平衡测试与计算方法（焙烧回转窑）》的有关内容编写。

本文件代替 YS/T 119-2-92《氧化铝专用设备热平衡测试与计算方法（焙烧回转窑）》

本文件与 YS/T 119-2-92《氧化铝专用设备热平衡测试与计算方法（焙烧回转窑）》相比，除结构调整和编辑性改动外，主要变化如下：

—增加以天然气为燃料时焙烧回转窑的热平衡测试与计算方法，对天然气的测试标准，燃烧所需空气量，燃烧热以及产生的废气量进行了增补。

—更改了部分名称及单位。。

—更改了部分计算方法（算式），使测试人员计算更方便。

—增加完善了附录 B 的相关数据表。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发文机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）归口。

本文件起草单位：中铝山东有限公司等

本文件主要起草人：

本文件所代替版本的历次发布情况为：

—YS/T 119-2-92

氧化铝生产专用设备

热平衡测试与计算方法

（焙烧回转窑）

1 范围

1.1 本文件规定了氧化铝厂氢氧化铝焙烧回转窑的热平衡测定与计算基准、测试条件、测试项目及测试方法。

1.2 本文件适用于以油或天然气为燃料的氢氧化铝焙烧回转窑的热平衡测定与计算。不适用于窑外烘干预热的回转窑。

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 476 《煤的元素分析方法》
GB/T 260 《石油产品水分含量的测定 蒸馏法》
GB/T 388 《石油产品硫含量测定法（氧弹法）》
GB/T 508 《石油产品灰分测定方法》
GB/T 13609 《天然气取样导则》
GB/T 30490 《天然气自动取样方法》
GB/T 13610 《天然气的组成分析 气相色谱法》
GB/T 11062 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》

3 术语和定义

3.1 基准温度采用 0℃。

3.2 基准压力采用 101325Pa。

3.3 燃料的发热量及计算单位

燃料的发热量按应用基低（位）发热量计算。

卡与焦耳的换算，采用 1 卡=4.1816 焦耳。

3.4 计算单位

物料平衡与热平衡均以一吨成品氧化铝为计算单位。

3.5 热平衡测定范围及计算体系

热平衡测定范围包括窑体、窑头罩、窑尾罩、冷却机及窑后各级收尘器；热平衡计

算体系只包括窑体 窑头罩及窑尾罩。

4 设备状况及流程

4.1 设备状况

4.1.1 写明设备的新旧程度、特点及存在问题、投产和上次大修后投产日期。

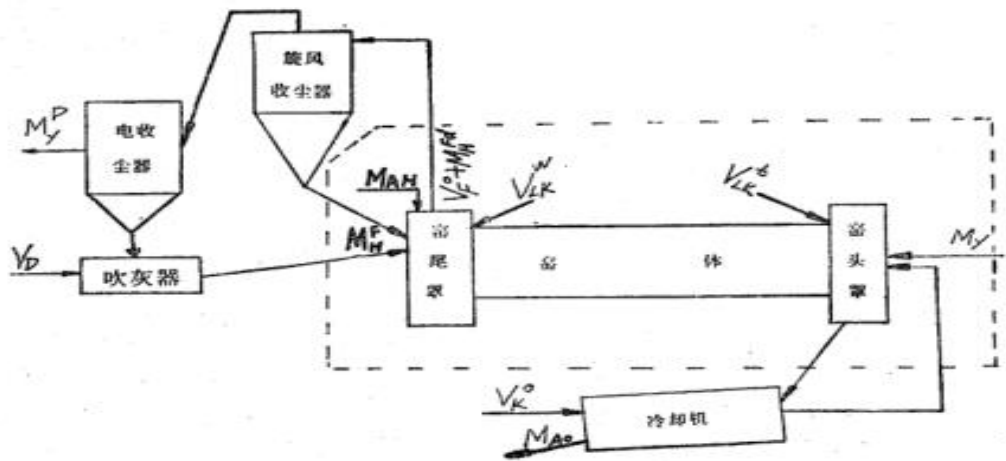
4.1.2 设备及生产概况表

生产概况填写测定前三个月的某月平均。

表 1 设备及生产概况

厂名：	车间：	窑号：	
项目	单位	数值或内容	
窑型			
规格（直径×长度）	mm		
设计产能	t/h		
建成日期			
最后一次大修日期			
有效内表面积	m ²		
有效容积	m ³		
斜度	%		
窑转速	r/min		
窑内热交换器型式与规格			
燃料种类			
燃料压力	P _a		
雾化方式			
燃料单耗	kg/t 或 m ³ /t		
湿氢氧化铝下料量	kg/h		
湿氢氧化铝附着水含量	%		
窑实际产能	t/h		
吨氧化铝热耗	KJ/t		

4.2 设备流程示意图



注：虚线为热平衡体系界线

5 热平衡测定条件

- 5.1 焙烧窑测定宜在上次大修投产后的中期进行，测定时窑的生产工况必须稳定正常。
- 5.2 测定应为一个连续工班，测定次数不少于两个班次。
- 5.3 测定用的仪器、仪表应在检定周期之内。

6 测定项目和方法

表 2 测定的项目和方法

项目		符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据
大气	温度	t	℃		水银温度计			
	压力	P	Pa		大气压力表			
	相对湿度	φ	%		干湿球温度计			
入窑氢氧化铝	入窑湿氢氧化铝量	M _{AH}	kg/h	裙式饲料机	抽称计算	4 小时 1 次	算术平均值	
	湿氢氧化铝附着水含量	W _{AH}	%		取样实测	1 小时 1 次	组成班样送分析	
	氢氧化铝结晶水含量	W ^I _{AH}	%		取样实测	1 小时 1 次	组成班样送分析	
	氢氧化铝入窑温度	t _{AH}	℃	进窑尾罩之前	水银温度计	4 小时 1 次	算术平均值	

续表 2 :

项目	符号	单位	测定仪器与方法	测定频率	测定频率	取值原则	测定数据
成品氧化铝	氧化铝出窑温度	t_{Ao}	℃	窑头	取样用钨铍热电偶实测	2 小时 1 次 每次测 2 个数	算术平均值
	氧化铝出冷却机温度	t_{Ao}^L		冷却机出口	水银温度计	2 小时 1 次	算术平均值
	成品氧化铝灼减	W_{Ao}	%	窑头	取样送分析	4 小时 1 次	组成班样送分析
	成品氧化铝产量	M_{Ao}	t/h		根据氢氧化铝下料量等计算		
燃油	耗油量	M_y	kg/h	油泵出口	流量计累积	8 小时 累积 1 次	累积数 算术平均值
	油进窑温度	t_y	℃	靠近窑头罩油管	水银温度计	4 小时 1 次	算术平均值
	燃油的取样			油泵出口管道	装入磨口瓶内	每班 1 次	
	燃油应用基成分	C^y H^y O^y N^y S^y W^y A^y	%		GB/T 476 GB/T 476 GB/T 476 GB/T 476 GB/T 388 GB/T 260 GB/T 508		算术平均值
	燃油应用基低（位）发热量	Q_{Dw}^y	KJ/kg				
雾化蒸汽	蒸汽耗用量	M_q	kg/h		蒸汽流量计	8 小时 累积 1 次	累积数 算术平均值
	蒸汽压力	P_q	Pa	窑头罩前蒸汽雾化管道	蒸汽压力表	1 小时 1 次	8 小时算术平均值
	蒸汽温度	t_q	℃	窑头罩前蒸汽雾化管道	水银温度计	1 小时 1 次	8 小时算术平均值

续表 2 :

项目		符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据
天燃气	天然气消耗量	V_n	M^3/h	天燃气管道	流量计累积	8 小时累积 1 次	累积数算术平均值	
	天然气进窑温度	t_n	$^{\circ}C$	靠近窑头罩管道	水银温度计	4 小时 1 次	算术平均值	
	天然气的取样			合同规定的交接点	GB/T 13609 GB/T 30490	每班 1 次		
	天然气组成	CH_4^n $C_2H_6^n$ $C_3H_8^n$ $\vdots$ $C_nH_{2(n+1)}^n$ CO_2^n W^n H_2S^n	%		GB/T 13610		算术平均值	
	天然气低(位)发热量	Q_{DW}^y	KJ/m^3n		GB/T 11062	不少于 2 次	算术平均值	
窑尾密封圈前窑体内烟气	干烟气成分	N_2^g CO_2^g CO^g O_2^g H_2^g CH_4^g	%	窑尾窑体内 0.5—1 米处	气体分析仪	4 小时 1 次, 每次 3 个样	算术平均值	
	烟气过剩空气系数	α					根据窑体内干烟气平均成分计算	
	烟气温度	t_n	$^{\circ}C$	窑尾窑体内 0.5—1 米处	抽气热电偶	每班 2 次	算术平均值	
停电收尘吹灰风时窑尾罩出口废气	干气成分	CO_2^g	%	窑尾罩出口	气体分析仪	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值	

续表 2

项目		符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据
有电收尘吹灰风时窑尾罩出口废气	干废气成分	N_2^g CO_2^g CO^g O_2^g H_2^g CH_4^g	%	窑尾罩出口	气体分析仪	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值	
	废气温度	t_F	℃	窑尾罩出口	石英玻璃水银温度计或热电偶	1 小时 1 次	算术平均值	
	废气含湿量	X_{sw}	%	窑尾罩出口	干湿球湿度计法或冷凝法	每班不少于 2 次	算术平均值	
	含尘浓度	干气	C_n	窑尾罩出口	烟尘测试仪等速采样	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值	
		湿气	C_n'		根据 C_n 与 X_{sw} 计算			
	废气量	工况	V_F^t	窑尾罩出口	1. 皮托管、微压计实测; 2. 根据燃料燃烧理论与物料平衡计算	每班实测 2 次	以计算值为准 实测值作参考	
		标况	V_F^0				由 V_F^t 、 T 等进行计算	
电收尘吹灰风	温度	t_D	℃	进窑尾罩前	水银温度计	每班 2 次	算术平均值	
	吹灰风量	V_D	$g/m^3n/h$	进吹灰器前	孔板流量计计量	每班 1 次	8 小时累计平均值	
窑头漏入空气	进窑时的温度	t_{Lk}^t	℃	距窑头罩密封圈 0.5 米	水银温度计多点测量		算术平均值	
	漏入空气量	V_{Lk}^t	m^3n/h		计算			

续表 2

项目			符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据	
窑尾漏入空气	进窑时的温度		t_{Lk}^w	℃	距窑尾罩密封圈 0.5 米	水银温度计多点测量		算术平均值		
	漏入空气量		V_{Lk}^w	m^3n/h		计算				
各级收尘器进口与出口废气	干气成分	进口	CO_2^g	%	收尘器进口管道	气体分析仪	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值		
		出口	CO_2^g	%	收尘器出口管道	气体分析仪	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值		
	窑尾罩出口至 i 级收尘器进口的漏风系数		ϕ_{zi}	%		根据窑尾罩出口及 i 级收尘器进口的 CO_2 体积浓度计算				
	窑尾罩出口至 i 级收尘器进出口的漏风系数		ϕ_{ci}	%		根据窑尾罩出口及 i 级收尘器进口的 CO_2 体积浓度计算				
	含尘浓度	进口	干气	C_{nz}	$g/m^3n_{\text{干气}}$	各级收尘器进口管道	烟尘测试仪等速采样	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值	
			湿气	C'_{nz}	g/m^3n		根据 C_{nz} 等计算			
		出口	干气	C_{nc}	$g/m^3n_{\text{干气}}$	各级收尘器出口管道	烟尘测试仪等速采样	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值	
			湿气	C'_{nc}	g/m^3n		根据 C_{nc} 等计算			
	含湿量	进口	X_{swz}	%	各级收尘器进口	干湿球湿度计	每班 2 次	算术平均值		
		出口	X_{swc}	%	各级收尘器出口	干湿球湿度计	每班 2 次	算术平均值		

续表 2 :

项目		符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据
鼓风机鼓入空气	进冷却机时的温度	t_k^1	℃	进冷却机前风管	水银温度计	每班 1 次		
	进窑时的温度	t_k^2	℃	窑前热风管	石英玻璃水银温度计或热电偶	每班至少 4 次	算术平均值	
	静压	P_k	Pa	进冷却机前风管	压力计	每班 2 次		
	各测点动压值	P_1 P_2 · · · P_n	Pa	进冷却机前风管	皮托管、微压计或风速计	每班 2 次, 2 套数据		
	动压平均方根	$\sqrt{P_{CP}}$	Pa				各测点动压值平方根的平均值	
	平均风速	W_{cp}	m/s			根据 $\sqrt{PCP}$ 等计算	算术平均值	
	风量	工况	V_k^t	m^3/h		根据 W_{cp} 等计算		
		标况	V_k^0	m^3n/h		根据 V_k^t 等计算		
各级收尘器返回窑灰	进窑时的温度	t_{Hi}^F	℃	靠近窑尾罩	水银温度计	每班 2 次	算术平均值	
	返回窑灰量	M_{Hi}^F	kg/h		等于各级收尘器进出窑灰之差			
废气带走窑灰	温度	t_F	℃	靠近窑尾罩	石英玻璃水银温度计或热电偶	1 小时 1 次	算术平均值 (与废气温度等值)	
	带走窑灰量	M_H^{Fd}	kg/h		根据废气量与含尘浓度计算	每班 2 次	算术平均值	

续表 2 ；

项目		符号	单位	测点位置	测定仪器与方法	测定频率	取值原则	测定数据
烟囱排放窑灰	窑灰排放量	M_y^p	kg/h	电收尘出口烟道	由电收尘出口废气量及其含尘浓度计算	每班 2 次	算术平均值	
	窑灰灼减	L_{H}	%	电收尘出口烟道	取样分析	每班 1 次		
表面散热	表面温度	t_{bi}	℃	各区段窑体外壁及窑头（尾）罩表面	远红外测温仪或表面温度计多点测量	每班 2 次	各区段各测点的数算术平均值	
	环境温度	t_{ei}	℃	距窑体外壁 1 米处	水银温度计多点测量	每班 2 次	算术平均值	
	环境风速	W_{Fi}	m/s	距窑体外壁 1 米处	热球式电风速仪测量，与表面温度同时进行	每班 2 次	算术平均值	
	散热面积	F_i	m ²	各对应测温区段	实测或根据图纸计算			
	平均表面热流	q_i	KJ/m ² ·h		根据各区段 t_{bi} 、 t_{ei} 等计算			
	各区段表面散热量	Q_i	KJ/h		$Q_i = q_i \times F_i$			
	总散热损失	Q	KJ/h		$Q = \sum q_i \times F_i$			

7 物料平衡计算

7.1 物料平衡计算表

表 3 一吨氧化铝的物料平衡表

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
一	物料收入				
1	燃油量	M_1	kg/t	$M_1 = \frac{M_y}{M_{Ao}}$ 式中： M_y —每小时耗油量，kg/h； M_{Ao} —每小时成品氧化铝产量，t/h	
1'	天然气量	M_0	kg/t	$M_0 = \frac{V_n \times \rho_o}{M_{Ao}}$ 式中： V_n —每小时天然气量， m^3n/h ； ρ_o —天然气在标准状态下的密度， kg/m^3n ； M_{Ao} —每小时成品氧化铝产量，t/h	
2	干氢氧化铝量	M_2	kg/t	$M_2 = \frac{M_{AH} \times (1 - \frac{W_{AH}}{100})}{M_{Ao}}$ 式中： M_{AH} —每小时入窑湿氢氧化铝量，kg/h； W_{AH} —氢氧化铝附着水含量，%	
3	氢氧化铝附着水量	M_3	kg/t	$M_3 = \frac{M_{AH} \times \frac{W_{AH}}{100}}{M_{Ao}}$	
4	鼓入空气量	M_4	kg/t	$M_4 = \frac{V_k^o \times \rho_k^o}{M_{Ao}}$ 式中： V_k^o —每小时鼓入空气量， m^3n/h ； ρ_k^o —空气在标准状态下的密度， kg/m^3n ， $\rho_k^o = \frac{N_2 \times \rho_n + O_2 \times \rho_{O2} + H_2O \times \rho_{H2O}}{100}$ 式中： N_2 等—空气中氮气等成分的体积含量，%； ρ_n 等—空气中氮气等成分在标准状态下的密度， kg/m^3n 。	
5	窑头漏入空气量	M_5	kg/t	$M_5 = \frac{V_{LK}^t \times \rho_k^o}{M_{Ao}}$ 式中： V_{LK}^t —每小时窑头漏入空气量， m^3n/h 。	
6	窑尾漏入空气量	M_6	kg/t	$M_6 = \frac{V_{LK}^w \times \rho_k^o}{M_{Ao}}$ 式中： V_{LK}^w —每小时窑尾漏入空气量， m^3n/h 。	
7	电收尘炊灰风量	M_7	kg/t	$M_7 = \frac{V_D \times \rho_k^o}{M_{Ao}}$ 式中： V_D —每小时窑尾漏入空气量， m^3n/h 。	
	合计	ΣM	kg/t	$\Sigma M = M_1(M_0) + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7$	

续表 3：

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
二	物料支出				
1	成品氧化铝量	M'_1	kg/t	$M'_1=1000$	
2	废气量	M'_2	kg/t	$M'_2=\frac{V_F^0 \times \rho_F^0}{M_{Ao}}$ 式中： V_F^0 —每小时窑尾罩出口废气量， m^3n/h ； ρ_F^0 —窑尾罩出口废气在标准状态下的密度， kg/m^3n ， $\rho_F^0=\frac{CO_2 \times \rho_{CO_2}+O_2 \times \rho_{O_2}+...+H_2O \times \rho_{H_2O}}{100}$ 式中： CO_2 等—空气中二氧化碳等成分的体积含量，%； ρ_{CO_2} 等—空气中二氧化碳等成分在标准状态下的密度， kg/m^3n 。	
3	烟囱排放窑灰量	M'_3	kg/t	$M'_3=\frac{M_y^q}{M_{Ao}}$ 式中： M_y^q —每小时烟囱排放窑灰量， kg/h 。	
4	差值	ΔM	kg/t	$\Delta M \Sigma M - (M'_1 + M'_2 + M'_3)$	
	合计	ΣM		$\Sigma M' = M'_1 + M'_2 + M'_3 + \Delta M$	

7.2 物料平衡表

表 4 一吨氧化铝的物料平衡表

收入				支出			
符号	项目	数值		符号	项目	数值	
		kg/t	%			kg/t	%
$M_1(M_0)$	燃油（天然气）量			M'_1	成品氧化铝量		
M_2	干氢氧化铝量			M'_2	废气量		
M_3	氢氧化铝附着水量			M'_3	烟囱排入窑灰量		
M_4	鼓入空气量			ΔM	差值		
M_5	窑头漏入空气量						
M_6	窑尾漏入空气量						
M_7	电收尘吹灰风量						
ΣM	合计		100	ΣM	合计		100

注：如果燃油用蒸汽雾化，需要在物料平衡中进行计算。

7.3 物料平衡允许误差

物料平衡允许相对误差为±5%，即

$$\left| \frac{\Delta M}{\Sigma M} \right| \leq 5$$

8 热平衡计算

8.1 热平衡计算表

表 5 一吨氧化铝的热平衡计算表

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
一	热收入				
1	燃油的燃烧热	Q_1	KJ/t	$Q_1 = Q_{DW}^y \times M_1$ 式中: Q_{DW}^y —燃油的应用基低位发热量, KJ/kg。	
1'	天然气的燃烧热	Q_0	KJ/t	$Q_0 = Q_{DW}^n \times M_0 \div \rho_n$ 式中: Q_{DW}^n —天然气的低位发热量, KJ/m ³ n。	
2	燃油带入的显热	Q_2	KJ/t	$Q_2 = M_1 \times C_y \times t_y$ 式中: C_y —燃油在 0~ t_y °C 间的平均比热, KJ/kg · °C。 t_y —燃油入窑头罩时的温度, °C。	
2'	天然气带入的显热	Q_n	KJ/t	$Q_n = \frac{M_0}{\rho_n} \times C_n \times t_n$ 式中: C_n —天然气在 0~ t_n °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_n —天然气入窑头罩时的温度, °C。	
3	干氢氧化铝带入显热	Q_3	KJ/t	$Q_3 = M_3 \times C_{AH} \times t_{AH}$ 式中: C_{AH} —氢氧化铝在 0~ t_{AH} °C 间的平均比热, KJ/kg · °C。 t_{AH} —氢氧化铝入窑头罩时的温度, °C	
4	氢氧化铝附着水带入显热	Q_4	KJ/t	$Q_4 = M_3 \times C_k \times t_{AH}$ 式中: C_{H2O} —水在 0~ t_{AH} °C 间的平均比热, KJ/kg · °C。	
5	鼓入空气带入显热	Q_5	KJ/t	$Q_5 = \frac{M_4}{\rho_k^0} \times C_k \times t_k^2$ 式中: C_k —空气在 0~ t_k^2 °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_k^2 —鼓入空气进窑头罩时的温度, °C。	
6	窑头漏入空气带入显热	Q_6	KJ/t	$Q_6 = \frac{M_5}{\rho_k^0} \times C_k \times t_{Lk}^t$ 式中: C_k —空气在 0~ t_{Lk}^t °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_{Lk}^t —窑头漏入空气进窑时的温度, °C。	
7	窑尾漏入空气带入显热	Q_7	KJ/t	$Q_7 = \frac{M_6}{\rho_k^0} \times C_k \times t_{Lk}^w$ 式中: C_k —空气在 0~ t_{Lk}^w °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_{Lk}^w —窑尾漏入空气进窑时的温度, °C。	
8	电收尘吹灰风带入显热	Q_8	KJ/t	$Q_8 = \frac{M_7}{\rho_k^0} \times C_k \times t_D$ 式中: C_k —空气在 0~ t_D °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_D —电收尘吹灰风进窑尾罩时的温度, °C。	

续表 5:

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
9	返回窑灰 带入显热	Q_9	KJ/t	$Q_9 = \sum \frac{M_{Hi}^F}{M_{Ao}} \times C_{Hi} \times t_{Hi}$ 式中: M_{Hi}^F —第 i 级收尘器返回的窑灰量, kg/h。 C_{Hi} —第 i 级收尘器返回窑灰在 $0 \sim t_{Hi}$ °C 间的平均比热, KJ/kg °C。 t_{Hi} —第 i 级收尘器返回窑灰进窑尾罩时的温度, °C。	
	合计	ΣQ	KJ/t	$\Sigma Q = Q_{1(0)} + Q_{2(n)} + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9$	
二	热支出				
1	成品氧化铝 带走显热	Q_1'	KJ/t	$Q_1' = M_1' \times C_{Ao} \times t_{Ao}$ 式中: C_{Ao} —成品氧化铝在 $0 \sim t_{Ao}$ °C 间的平均比热, KJ/kg °C。 t_{Ao} —成品氧化铝出窑时的温度, °C。	
2	干废气带 走显热	Q_2'	KJ/t	$Q_2' = \frac{M_2' \times (1 - \frac{X_{sw}}{100})}{\rho_{Fg}^0} \times C_{Fg} \times t_F$ 式中: X_{sw} —窑尾罩出口废气含湿量, %; C_{Fg} —窑尾罩出口干废气在 $0 \sim t_F$ °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。 t_F —窑尾罩出口废气温度, °C。 ρ_{Fg}^0 —窑尾罩出口干废气在标准状态下的密度, kg/m ³ n。	
3	氢氧化铝 附着水及 结晶水蒸 发吸热	Q_3'	KJ/t	$Q_3' = (M_3 + M_2 \times \frac{W_{AH}^J}{100}) \times [(100 - t_{AH}) \times C_{H2O} + 2253.9 + 1.24(t_F - 100) \times C_{H2O}^q]$ 式中: W_{AH}^J —干氢氧化铝结晶水的质量含量, %; t_{AH} —氢氧化铝入窑时的温度, °C。 C_{H2O} —水在 $t_{AH} \sim 100$ °C 的平均比热, KJ/kg · °C。 2253.9—水在 100 °C 下的汽化潜热, KJ/kg。 1.24—标准状态下, 1 公斤水汽所占的体积, m ³ n/kg。 C_{H2O}^q —水蒸汽在 $100 \sim t_F$ °C 间的平均比热, KJ/m ³ n °C。	
4	空气中水 分带走热	Q_4'	KJ/t	$Q_4' = \frac{M_4 + M_5 + M_6 + M_7}{\rho_k^0} \times g_{H2O} \times 0.00124 \times C_{H2O}^q \times t_F$ 式中: g_{H2O} —空气中水汽含量, g/m ³ n; 0.00124—1 克水汽在标准状态下所占的体积, m ³ n/g。	

续表 5:

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
5	废气中窑灰带走显热	Q'_5	KJ/t	$Q'_5 = \frac{M_H^{Fd}}{M_{AO}} \times C_H \times t_F$ 式中: M_H^{Fd} —窑尾罩出口废气每小时带走窑灰量, kg/h; C_H —废气带走窑灰在 $0 \sim t_F$ °C 间的平均比热, KJ/kg · °C。 t_F —窑尾罩出口废气温度, °C。	
6	反应热	Q'_6	KJ/t	$2Al(OH)_3 = \gamma - Al_2O_3 + 3H_2O(液)$ $\Delta H = 80.29 \text{ KJ/mol}_{Al_2O_3}$ $2Al(OH)_3 = \alpha - Al_2O_3 + 3H_2O(液)$ $\Delta H = 47.25 \text{ KJ/mol}_{Al_2O_3}$ $Q'_6 = \frac{M_2 \times 1000}{2 \times 78} \times \frac{47.25 \alpha + 80.29 \gamma}{100}$ 式中: α —成品氧化铝中 $\alpha - Al_2O_3$ 的质量含量, %; γ —成品氧化铝中 $\gamma - Al_2O_3$ 的质量含量, %; 78—氢氧化铝的分子量, g/mol。	
7	表面散热损失	Q'_7	KJ/t	$Q'_7 = \frac{\sum q_i \times F_i}{MAO}$ 式中: q_i —第 i 部窑体或窑头(尾)罩的平均表面热流, KJ/m ² h F_i —第 i 部窑体或窑头(尾)罩的散热面积, KJ/m ² 。	
8	化学不完全燃烧损失	Q'_8	KJ/t	$Q'_8 = \frac{M_2}{\rho_F} \times \frac{12630 \times CO^s + 10790 \times H_2^s + 35840 \times CH_4^s}{100}$ 式中: CO^s —窑尾罩出口废气(湿)中一氧化碳等可燃气体的体积含量, %; ρ_F —窑尾罩出口废气(湿)在标准状态下的密度, kg/m ³ 。 12630 等—一氧化碳等可燃气体的燃烧热, KJ/m ³ 。	
9	燃油中水分带走热	Q'_9	KJ/t	$Q'_9 = (H^y + W^y) \times 0.00124 M_1 \times C_{H_2O}^q \times t_F$ 式中: H^y —燃油中氢的应用基质量含量, %; W^y —燃油中水分的应用基质量含量, %。	
10	天然气中水分带走热	Q'_{10}	KJ/t	$Q'_{10} = (2CH_4^n + 3C_2H_6^n + 4C_3H_8^n + W^n + H_2S^n) \times \frac{M_0}{\rho_n} \times C_{H_2O}^q \times t_F$ 式中: CH_4^n —天然气中甲烷的体积含量, %; $C_2H_6^n$ —天然气中乙烷的体积含量, %; $C_3H_8^n$ —天然气中丙烷的体积含量, %; W^n —天然气中水汽的体积含量, %; H_2S^n —天然气中 H_2S 的体积含量, %;	

续表 5:

序号	项目	符号	单位	依据或算式	数值
11	差值	ΔQ	KJ/t	$\Delta Q = \Sigma Q - (Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7 + Q'_8 + Q'_{9(10)})$	
	合计	$\Sigma Q'$	KJ/t	$\Sigma Q' = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7 + Q'_8 + Q'_{9(10)} + \Delta Q$	

8.2 热平衡表

表 6 一吨氧化铝的热平衡表

收入				支出			
符号	项目	数值		符号	项目	数值	
		kg/t	%			kg/t	%
$Q_1(Q_0)$	燃油（天然气）燃烧热			Q'_1	成品氧化铝量带走显热		
$Q_2(Q_n)$	燃油（天然气）带入			Q'_2	干废气带走显热		
Q_3	干氢氧化铝带入显热			Q'_3	氢氧化铝附着水及结晶水蒸发吸热		
Q_4	氢氧化铝附着水带入显热			Q'_4	空气中水分带走显热		
Q_5	鼓入空气带入显热			Q'_5	废气中窑灰带走显热		
Q_6	窑头漏入空气带入显热			Q'_6	反应吸热		
Q_7	窑尾漏入空气带入显热			Q'_7	表面散热损失		
Q_8	电收尘吹灰风带入显热			Q'_8	化学不完全燃烧损失热		
Q_9	返回窑灰带入显热			$Q'_{9(10)}$	燃油（天然气）中水分带走显热		
				ΔQ	差值		
ΣQ	合计		100	ΣQ	合计		100

注：如果燃油用蒸汽雾化，需要在热平衡中进行计算。

8.3 热平衡允许误差

热平衡允许相对误差为±5%，即 $|\frac{\Delta Q}{\Sigma Q}| \leq 5\%$ 。

9 热效率及主要技术指标

9.1 热效率计算

9.1.1 窑的热效率

$$\eta_{\text{窑}}=\frac{Q_3+Q_6'}{Q_1}\times 100\cdots\cdots\cdots$$

式中： $\eta_{\text{窑}}$ —氢氧化铝焙烧窑的热效率，%；
 Q_3 —氢氧化铝附着水及结晶水的蒸发吸热，KJ/t；
 Q_6' —反应吸热，KJ/t；
 Q_1 —燃油的燃烧热，KJ/t。

9.1.2 冷却机的余热利用率

$$\eta_{\text{余}}=\frac{Q_5-\frac{M_4}{\rho_k}\times C_k\times t_k^1}{Q_1}\times 100\cdots\cdots\cdots$$

式中： $\eta_{\text{余}}$ —冷却机的余热利用率，%；
 Q_5 —鼓入空气带入的显热，KJ/t；
 M_4 —鼓入空气量，kg/t；
 C_k —空气在 0— t_k^1 ℃间的平均比，KJ/m³·℃；
 t_k^1 —鼓入空气进入冷却机时的温度，℃；
 Q_1 —成品氧化铝带走的显热，KJ/t。

9.2 主要技术指标

表 7： 主要技术指标

序号	名称	符号或算式	单位	数值
1	窑产能	M_{Ao}	t/h	
2	单位热耗	Q_1	KJ/t	
3	烟气过剩空气系数	α		
4	窑尾烟气含量	CO^g	%	
5	窑尾烟气温度	t_n	℃	

10 热平衡测定分析与改进建议

- 10.1 对设备结构、操作及工艺制度的分析。
- 10.2 对热效率及主要技术指标的评价。
- 10.3 提出节能途径及改进建议。

附录 A

(规范性)

热平衡测定和计算方法补充说明

A.1 入窑湿氢氧化铝量及其附着水含量的测定

A.1.1 入窑湿氢氧化铝量的测定

每隔 4 小时记录一次裙式饲料机每小时走过的盘数,并抽称每盘上的实际重量,得出每盘上料的平均重,按下式计算每小时氢氧化铝的下料量。

$$M_{\text{AH}} = g \times m$$

式中: M_{AH} ——每小时入窑湿氢氧化铝量, kg/h;

g ——裙式饲料机每盘上是湿氢氧化铝的平均质量, kg/盘;

m ——每小时裙式饲料机走过的平均盘数, 盘/h。

A.1.2 湿氢氧化铝附着水含量的测定

每小时取样一次,每次取样,每隔几个盘取等量样品装入磨口瓶,组成班样。样品称重后置于烘箱内,在 105℃ 左右充分烘干,烘干后再称,按下列式计算氢氧化铝附着水的含量

$$W_{\text{AH}} = \frac{M_{\text{AH1}} - M_{\text{AH2}}}{M_{\text{AH1}}} \times 100$$

式中: W_{AH} ——入窑湿氢氧化铝量附着水的质量含量, %;

M_{AH1} ——烘干前湿氢氧化铝样品的质量, kg;

M_{AH2} ——烘干后氢氧化铝样品的质量, kg。

A.2 燃油的取样与分析

A.2.1 燃油的取样

每班从油泵出口后的管道中连续取 2 公升油,混合均匀,迅速倒入一部分至一公升的磨口瓶内、装满密封,以备化验。

A.2.2 燃油的分析

油的分析按下列文件进行:

GB/T 260 《石油产品水分测定方法》

GB/T 388 《石油产品含硫量测定方法》

GB/T 508 《石油产品灰分测定方法》

碳、氢、氧、氮元素分析按 GB/T 476 《煤的元素分析方法》进行。

A.2.3 燃油的应用基低(位)发热量的测定

燃油的发热量,按下式将分析基低(位)发热量换算成应用基低位发热量:

$$Q_{\text{DW}}^y = \left(Q_{\text{DW}}^f + \frac{rW^f}{100} \right) \frac{100 - W^y}{100 - W^f} - \frac{rW^f}{100}$$

式中: Q_{DW}^y ——燃油的应用基低(位)发热量, KJ/kg;

Q_{DW}^f ——燃油的分析基低(位)发热量, KJ/kg;

r ——水的汽化潜热, KJ/kg;

W^f 、 W^y ——分别为燃油的分析基及应用基低水分, %。

A.3 天然气的取样与分析

A.3.1 天然气的取样

由于天然气的特殊性,一般管道上没有取样点,天然气的取样应按 GB/T 13609 或 GB/T 30490 执行,取样点应在合同规定的天然气交接点。

A.3.2 天然气的分析

天然气的组成分析按 GB/T 13610 《天然气的组成分析 气相色谱法》进行。

A.3.3 天然气发热量计算

在工业应用中,天然气的发热量一般按体积发热量的计算。按摩尔数和质量计算发热量参照 GB/T 11062 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》进行。

A.3.3.1 理想气体

已知组成的混合物,在燃烧温度 t_1 计量温度 t_2 和压力 P_2 时的理想气体体积发热量按下式计算:

$$H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ} = H_{(t_1)}^{\circ} \times \frac{p_2}{R \times T_2}$$

式中：\$H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ}\$——混合物的理想气体体积发热量（高位或低位）；

\$R\$——摩尔体积常数（\$R=8.314510\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}\$）；

\$T_2\$——绝对温度（\$T_2=t_1+273.15\$）

上式描述了计算 \$H_o\$ 的基本方法，此外还有一种可供选择的方法，按下式计算：

$$H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ} = \sum_{j=1}^N x_j \times H_{j[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ}$$

式中：\$H_{j[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ}\$——组分 \$j\$ 的理想气体体积发热量（高位或低位）

GB/T 11062 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》中表 5 给出了不同的燃烧和计量参比条件下的 \$H_j^{\circ}\$ 值。

A. 3.3.2 真实气体

气体混合物在燃烧温度 \$t_1\$ 和压力 \$p_1\$， 计量温度 \$t_2\$ 和压力 \$p_2\$ 时真实气体体积发热量按下式计算：

$$H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]} = \frac{H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}^{\circ}}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)}$$

式中：\$H_{[t_1, V_{(t_2, p_2)}]}\$——真实气体体积发热量（高位或低位）；

\$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)\$——在计量参比条件下的压缩因子。

压缩因子用 GB/T 11062 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》中表 2 给出的各组分的求和因子 \$\sqrt{b_j}\$ 按下式计算。

$$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2) = 1 - [\sum_{j=1}^N x_j \times \sqrt{b_j}]^2$$

式中 \$\sqrt{b_j}\$ 为求和因子，GB/T 11062 《天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法》中表 2 给出了本文件考虑的天然气及天然气代用品的所有组分在通常感兴趣的三个计量参比条件下的求和因子的数值 表 2 同时给出了所有各纯组分的压缩因子 \$Z_j\$（假想压缩因子）。\$b_j\$ 是通过使用关系式 \$b_j=1-Z_j\$ 获得。

A. 4 烟气（废气）含湿量的测定与计算

A. 4.1 干湿球湿度计法

此处烟气的含湿量是指烟气中水蒸汽所占的体积百分数，用干湿球湿度计法进行测量时，由下述公式进行计算：

$$P_{\text{sw}} = P_v - C(t_1 - t_2)P_b$$

式中：\$P_{\text{sw}}\$——烟气的水蒸汽压力，Pa；

\$P_v\$——温度为 \$t_2\$ 时的饱和蒸汽压力，Pa；\$P_v\$ 可从附录 B 表 B1 比插曲查取

\$t_1\$ ——干球温度计的温度（精确到 \$1/10^{\circ}\text{C}\$），\$^{\circ}\text{C}\$；

\$t_2\$ ——湿球温度计的温度（精确到 \$1/10^{\circ}\text{C}\$），\$^{\circ}\text{C}\$；

\$P_b\$——通过湿球表面的烟气的绝对压力，Pa；

\$C\$——系数。当通过湿球温度计球部的空气流速达到 2.5 米/秒以上时，\$C\$ 值约等于常数 0.00066，因此测定时要求通过湿球表面的烟气流速大于 2.5 米/秒。

由下式计算出烟气的含湿量：

$$X_{\text{sw}} = \frac{P_{\text{sw}}}{P_s} \times 100$$

式中：\$X_{\text{sw}}\$——烟气的含湿量，%；

\$P_{\text{sw}}\$——烟气的水蒸汽压力，Pa；

\$P_s\$——烟道烟气的绝对压力，Pa。

A. 4.2 冷凝法

用冷凝法测定时，烟道中水蒸汽含量的体积百分数按下式计算：

$$X_{sw} = \frac{1.24M_w + V_s \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_s} \times \frac{P_v}{P+P_r} \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325}}}{1.24M_w + V_s \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_s} \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325}}} \times 100$$

式中：X_{sw}——烟道里的含湿量，%；

M_w——冷凝器中迎凝出来的水量，g；

V_s——抽取的烟气体积（测量状态下流量计的读数），L；

ρ_k——流量计校正状态下的空气密度，kg/m³；

ρ_s——测量状态下烟气的密度，kg/m³；

P_v——通过冷凝器后的饱和水蒸汽压力，Pa。P_v可根据冷凝器后烟气的温度从附录B表B 1查取；

P——大气压力，Pa；

P_r——流量计前的指示压力，Pa；

t_r——流量计前的烟气温度，℃；

1.24——标准状态下，一克水所占体积长数，L/g。

A. 5 干、湿烟气成分的换算

$$CO_2^s = CO_2^g \times \frac{100 - X_{sw}}{100}$$

式中：CO₂^s——湿烟气中二氧化碳的体积量，%；

CO₂^g——干烟气中二氧化碳的体积量，%；

X_{sw}——烟气的含湿量，%。

A. 6 烟气过剩空气系数的测定与计算

烟气的过剩空气系数是指窑尾罩密封圈前窑体内烟气的过剩空气系数，当时用奥氏气体分析仪，由于烟气中的氢气和甲烷均不能测——烟气里的过程空气系数按下式计算：

$$\alpha = \frac{N_2^g}{N_2^g - 3.76(O_2^g - 0.5CO^g)}$$

式中：α——烟气的过剩空气系数；

N₂^g——干烟气中氮气的体积含量，%；

O₂^g——干烟气中氧气的体积含量，%；

CO^g——干烟气中一氧化碳的体积含量，%。

A. 7 烟气含尘浓度的测定与计算

烟气的含尘浓度包括窑尾罩出口及各级收尘器进口与出口烟气的含尘浓度。烟气的含尘浓度（建议采用动压平衡等速烟尘采样器）进行测定。

A. 7.1 采样体积的计算

$$V_{nd} = V_m \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325} = 0.0027V_m \times \frac{P+P_r}{273+t_r}$$

式中：V_{nd}——采样时抽取的干烟气量，L（标升干气）；

V_m——测量时流量计的累计读数，L；

P——大气压力，Pa；

P_r——流量计前压力计读数，Pa；

t_r——流量计前烟气的温度，℃。

A. 7.2 烟气含尘浓度计算

$$C_n = \frac{m}{V_{nd}} \times 1000$$

$$\text{或者 } C'_n = \frac{m}{V_{nd}} \times (1 - \frac{X_{sw}}{100}) \times 1000$$

式中：C_n——干烟气含尘浓度，g/m³干气；

m——抽取的烟尘质量，g；

C'_n——湿烟气含尘浓度，g/m³湿烟；

X_{sw}——烟气的含湿量，%。

A. 8 鼓风机鼓入空气的测定与计算

A. 8.1 测定管道截面的平均风速

$$W_{cp} = \frac{1}{N} \times 1.414 \times K_d \times \sqrt{\frac{1}{\rho_t}} \times (\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2} + \dots + \sqrt{P_n})$$

$$\rho_t = \rho_0 \times \frac{P+P_k}{101325} \times \frac{273}{273+t_k} = 12.68 \times \frac{P+P_k}{101325} \times \frac{273}{273+t_k} = 0.0342 \times \frac{P+P_k}{273+t_k}$$

式中: W_{cp} ——被测管道截面积的平均风速, m/s;

N ——动压测点数;

K_d ——皮托管的速度校正系数;

$P_1 \dots$ ——各测点动压值, Pa;

ρ_t ——测定条件下空气的密度, kg/m³;

ρ_0 ——标准状态下空气的密度, kg/m³;

P ——大气压力, Pa;

P_k ——管道内气体的静压, Pa;

t_k ——管道内空气的温度, °C。

A. 8. 2 工作状态下的空气量

$$V_k^t = \frac{\pi D^2}{4} \times W_{cp} \times 3600$$

式中: V_k^t ——工作状态下的空气量, m³/h;

D ——被测管道直径, m。

A. 8. 3 标准状态下的空气量

$$V_k^o = V_k^t \times \frac{T_o \times P_t}{T_t \times P_o}$$

式中: V_k^o ——标准状态下的空气量, m³/h;

T_o 、 T_t ——分别为标准状态及工作状态下的绝对温度, K;

P_o 、 P_t ——分别为标准状态及工作状态下的绝对压力, Pa。

A. 9 窑头漏入空气量的计算

窑头漏入空气量等于燃料燃烧实际所需要的总的空气量减去鼓风机鼓入的空气量。

$$V_{Lk}^t = V_{rk}^t - V_k^o$$

式中: V_{Lk}^t ——窑头漏入空气量, m³/h;

V_k^o ——鼓风机鼓入空气量, m³/h;

V_{rk}^t ——燃料燃烧实际所需要的总的空气量, m³/h。

A. 9. 1 燃油时燃烧实际所需要的总的空气量

$$V_{rk} = \alpha [0.0089C^y + 0.267H^y + 0.033(S^y - O^y)] \times M_y \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g)$$

式中: α ——烟气的过剩空气系数;

$C^y \dots$ ——燃油中碳等元素的应用基质量含量, %;

M_y ——每小时燃油耗用量, kg/h;

ϕ ——大气的相对湿度;

$g_{H_2O}^g$ ——饱和水汽含量, g/m³ 干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

A. 9. 2 以天然气为燃料时实际所需要的总的空气量

$$V_{rk} = \alpha \frac{2CH_4^n + \frac{7}{2}C_2H_6^n + \dots + \frac{3n+1}{2}C_nH_{2(n+1)}^n + \frac{3}{2}H_2S^n}{0.21} \times V_n \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g)$$

式中: α ——烟气的过剩空气系数;

$CH_4^n \dots$ ——天然气中甲烷等组分的体积含量, %;

V_n ——每小时天然气用量, m³/h;

ϕ ——大气的相对湿度;

$g_{H_2O}^g$ ——饱和水汽含量, g/m³ 干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

A. 10 窑尾漏入空气量的测定与计算

漏入空气量目前尚只能靠测定漏风前后干烟气中之二氧化碳的体积含量进行推算。

$$V_{Lk}^w = V_w^g \times \phi_w \%$$

$$V_w^g = [0.01865C^y + 0.0068S^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.008N^y + 0.79\alpha L_o] \times M_y$$

$$\phi_w = \frac{CO_2' - CO_2''}{CO_2''} \times 100$$

式中：\$V_{Lk}^w\$——每小时窑尾漏入干空气量，m³n/h；

\$V_w^g\$——窑尾密封圈前的干烟气流，m³n/h；

\$\phi_w\$——窑尾漏入空气的体积百分数（%），以漏风前干气体体积为基础计；

\$C^y\$……—燃油中碳等元素的应用及质量含量，%；

\$\alpha\$——烟气的过剩空气系数；

\$L_o\$——燃油完全燃烧的理论空气需要量 m³n/kg；

\$M_y\$——每小时油耗用量，kg/h；

\$CO_2'\$——漏风前干烟气中二氧化碳的体积含量，%。

烟气取样点应在窑尾胴体内 0.5—1 米；

\$CO_2''\$——漏风后干烟气中二氧化碳的体积含量，%。烟气取样点应在窑尾罩内或窑尾罩出口，有电收尘吹灰风时，应停止吹灰风取烟气样。

考虑到空气中的水汽，按下式计算漏入湿空气量。

$$V_{Lks}^w = V_{Lk}^w \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g)$$

A. 11 窑尾罩出口废气量的测定与计算

氢氧化铝焙烧窑窑尾罩出口的废气量包括燃料燃烧产生的烟气流、氢氧化铝附着水与结晶水产生的水蒸气气流、窑尾密封圈处漏入的空气量及电收尘窑灰的吹灰风量。窑尾罩出口废气量可用皮托管进行实测，也可根据燃料燃烧产生的烟气流及物料平衡进行计，两者可相互对照。由于现场条件的限制，实测结果往往不够准，建议以计算值为准，实测值作为参考数。

A11. 1. 1 用皮托管测定

$$W_{cp} = 1.414K_d \times \sqrt{\frac{1}{\rho_t + \rho_{\text{尘}}}} \times \frac{\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2} + \dots + \sqrt{P_n}}{n}$$

$$\rho_t = \rho_o \times \frac{P + P_s}{101325} \times \frac{273}{273 + t_s} = 0.0027 \times \rho_o \times \frac{P + P_s}{273 + t_s}$$

$$\rho_o = \frac{CO_2 \times \rho_{CO_2} + O_2 \times \rho_{O_2} + \dots + H_2O \times \rho_{H_2O}}{100}$$

式中：\$W_{cp}\$——被测管道截面的平均风速，m/s；

\$K_d\$——皮托管的速度校正系数；

\$g\$——重力加速度，取 9.81m/s²；

\$n\$——动压测点数；

\$P_1\$……—各测点动压值，Pa；

\$\rho_t\$——测定条件下烟气的密度，kg/m³n

\$\rho_o\$——标准状态下烟气的密度，N/m³；

\$\rho_{\text{尘}}\$——测试条件下烟气中粉尘的密度，N/m³；

\$P\$——大气压力，Pa；

\$P_s\$——管道内烟气静压，Pa；

\$t_s\$——管道内烟气温度，℃；

\$CO_2\$……—烟气中二氧化碳等成分的体积含量，%；

\$\rho_{CO_2}\$……—烟气中二氧化碳等成分在标准状态下的密度，kg/m³n。见附录 B。

A. 11. 1. 2 工作状态下废气量的计算

$$V_F^t = \frac{\pi D^2}{4} \times W_{cp} \times 3600$$

式中：\$V_F^t\$——工作状态下的窑尾罩出口的废气量，m³/h；

\$D\$——被测管道直径，m。

A. 11. 1. 3 标准状态下的废气量的计算

$$V_F^o = V_F^t \times \frac{T_o \times P_t}{T_t \times P_o}$$

式中：\$V_F^o\$——标准状态下窑尾罩出口的废气量，m³n/h；

\$T_o\$、\$T_t\$——分别为标准状态及工作状态下的绝对温度，K；

\$P_o\$、\$P_t\$——分别为标准状态及工作状态下的绝对压力，Pa。

A. 11. 2 根据燃烧产物量及物料平衡计算废气量

$$V_F^\circ = V_r + V_{AH} + V_{Lks}^w + V_D$$

式中：\$V_F^\circ\$——标准状态下窑尾罩出口的废气量

\$V_r\$——燃料燃烧产生的烟气量，m³n/h；

\$V_{AH}\$——氢氧化铝附着水及结晶水产生的水蒸汽量，m³n/h；

\$V_{Lks}^w\$——窑尾漏入的湿空气量，m³n/h；

\$V_D\$——电收尘吹灰风量，m³n/h。

燃料为油时\$V_r\$由下式计算：

$$V_r = [0.01865C^y + 0.112H^y + 0.10243W^y + 0.0068S^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.008N^y + 0.79\alpha L_o + 0.00124\alpha L_o \times \phi \times g_{H_2O}^g] \times M_v$$

式中：\$C^y\$……—燃油中碳等元素的应用基质量含量，%；

\$\alpha\$——烟气的过剩空气系数；

\$\phi\$——大气的相对湿度；

\$g_{H_2O}^g\$——饱和水汽含量，g/m³n 干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

\$L_o\$——燃油完全燃烧的理论空气量，m³n/kg；

$$L_o = 0.089C_y + 0.267H_y + 0.033(S_y - O_y)$$

燃料为天然气时\$V_r\$由下式计算：

$$V_r = [3CH_4^n + 5C_2H_6^n + \dots + (2n+1)C_nH_{2(n+1)}^n + 1.5H_2S^n + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.79\alpha L_o + 0.00124\alpha L_o \times \phi \times g_{H_2O}^g] \times V_n$$

式中：\$CH_4^n\$……—天然气中甲烷等组分的体积含量，%；

\$\alpha\$——烟气的过剩空气系数；

\$\phi\$——大气的相对湿度；

\$g_{H_2O}^g\$——饱和水汽含量，g/m³n 干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

\$L_o\$——天然气完全燃烧的理论空气量，m³n/kg；

$$L_o = \frac{2CH_4^n + \frac{7}{2}C_2H_6^n + \dots + \frac{3n+1}{2}C_nH_{2(n+1)}^n + \frac{3}{2}H_2S^n}{0.21}$$

\$V_{AH}\$由下式计算：

$$V_{AH} = [M_{AH} \times \frac{W_{AH}}{100} + M_{AH} \times (1 - \frac{W_{AH}}{100}) \times \frac{W_{AH}^j}{100}] \times \frac{22.4}{18}$$

式中：\$V_{AH}\$——每小时入窑湿氢氧化铝量，kg/h；

\$W_{AH}\$——入窑湿氢氧化铝附着水的质量含量，%；

\$W_{AH}^j\$——干氢氧化铝中结晶水的质量含量，%。

A. 12 各级收尘器进、出口废气量的计算

窑尾各级收尘器进口或出口废气量，窑尾罩出口废气量及窑尾罩出口至各级收尘器进口或出口之漏风系数进行推算。

A. 12. 1 收尘器进口废气量的计算

$$V_{zi} = V_F^\circ + V_F^\circ \times \left(1 - \frac{X_{sw}}{100}\right) \times \phi_{zi} \% \times (1 + 0.00124 \phi \times g_{H_2O}^g)$$

式中：\$V_{zi}\$——第 \$i\$ 级收尘器进口废气量，m³n/h；

\$V_F^\circ\$——窑尾罩出口废气量，m³n/h；

\$X_{sw}\$——窑尾罩出口废气含湿量，%；

\$\phi\$——大气相对湿度；

\$g_{H_2O}^g\$——饱和水汽含量，g/m³n 干气；

\$\phi_{zi}\$——窑尾罩出口至第 \$i\$ 级收尘器进口的漏风系数，%；

$$\phi_{zi} = \frac{CO_2 - CO_2'}{CO_2} \times 100$$

式中：\$CO_2'\$——窑尾罩出口干气体中二氧化碳的体积含量，%；

\$CO_2\$——第 \$i\$ 级收尘器进口干气体中二氧化碳的体积含量，%。

A. 12. 2 收尘器出口废气量的计算

$$V_{ci} = V_F^\circ + V_F^\circ \times \left(1 - \frac{X_{sw}}{100}\right) \times \phi_{ci} \% \times (1 + 0.00124 \phi \times g_{H_2O}^g)$$

式中： V_{ci} ——第 i 级收尘器出口废气量， m^3n/h ；

V_F° ——窑尾罩出口废气量， m^3n/h ；

X_{sw} ——窑尾罩出口废气含湿量， %；

ϕ ——大气相对湿度；

$g_{H_2O}^g$ ——饱和水汽含量， g/m^3n 干气；

ϕ_{ci} ——窑尾罩出口至第 i 级收尘器出口的漏风系数， %；

$$\phi_{ci} = \frac{CO_2' - CO_2''}{CO_2''} \times 100$$

式中： CO_2' ——窑尾罩出口干气体中二氧化碳的体积含量， %；

CO_2'' ——第 i 级收尘器出口干气体中二氧化碳的体积含量， %。

A. 13 窑灰量的计算

A. 13.1 返回窑灰量计算

返回窑灰量包括窑后各级收尘器收下的窑灰，各级收尘器收下的窑灰等于进口与出口窑灰量之差：

$$M_{Hi}^F = \frac{V_{zi} \times C_{nzi} - V_{ci} \times C_{nci}}{1000}$$

式中： M_{Hi}^F ——第 i 级收尘器收下的窑灰量， kg/h ；

V_{zi} 、 V_{ci} ——分别为第 i 级收尘器进口与出口废气量， m^3n/h ；

C_{nzi} 、 C_{nci} ——分别为第 i 级收尘器进口与出口湿烟气含尘浓度， g/m^3n 。

各级收尘器总的返回窑灰量：

$$M_H^F = \sum M_{Hi}^F \quad (kg/h)$$

A. 13.2 窑尾罩出口废气带走窑灰量计算

$$M_{Hi}^{Fd} = \frac{V_F^\circ \times C_n}{1000}$$

式中： M_{Hi}^{Fd} ——窑尾罩出口废气带走窑灰量， kg/h ；

V_F° ——窑尾罩出口废气量， m^3n/h ；

C_n ——窑尾罩出口湿烟气含尘浓度， g/m^3n 。

A. 13.3 烟囱排放窑灰量计算

$$M_y^q = \frac{V_D \times C_{nD}}{1000}$$

式中： M_y^q ——烟囱排放窑灰量， kg/h ；

V_D ——电收尘出口废气量， m^3n/h ；

C_{nD} ——电收尘出口湿烟气含尘浓度， g/m^3n 。

A. 14 成品氧化铝产出量的计算

$$M_{Ao} = \left[\frac{M_{AH} \times \left(1 - \frac{W_{AH}}{100}\right) \times \left(1 - \frac{W_{Ao}^j}{100}\right)}{1 - \frac{W_{Ao}}{100}} + M_y \times \frac{A^y}{100} - M_y^q \times \frac{100 - L_H}{100} \right] \div 1000$$

式中： M_{Ao} ——成品氧化铝产出量， t/h ；

M_{AH} ——入窑湿氢氧化铝量， kg/h ；

W_{AH} ——入窑湿氢氧化铝附着水的质量含量， %；

W_{Ao}^j ——干氢氧化铝结晶水的质量含量， %；

W_{Ao} ——成品氧化铝的灼减， %；

M_y ——燃油消耗量， kg/h ；（天然气作燃料时可以忽略）

A^y ——燃油应用基灰分的质量含量， %；（天然气作燃料时可以忽略）

M_y^q ——烟囱排放窑灰量 kg/h ；

L_H ——烟囱排放窑灰的灼减， %。

A. 15 表面散热损失的计算

$$Q_7' = \frac{\sum q_i \times F_i}{M_{Ao}}$$

式中：\$Q_7'\$——窑体及窑头罩、窑尾罩的的表面散热损失，KJ/t；

\$M_{Ao}\$——成品氧化铝产出量，t/h；

\$F_i\$——第 \$i\$ 部窑体或窑头（尾）罩的表面散热面积，m²；

\$q_i\$——第 \$i\$ 部窑体或窑头（尾）罩的平均表面热流，KJ/m²·h。

\$q_i\$可直接测定，也可按下式计算：

$$q_i = 20.41 \varepsilon \left[\left(\frac{273 + t_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_\varepsilon}{100} \right)^4 \right] + \alpha_d (t_b - t_\varepsilon)$$

式中：\$\varepsilon\$——第 \$i\$ 部窑体或窑头（尾）罩的表面黑度；

\$t_b\$——第 \$i\$ 部窑体或窑头（尾）罩的平均表面温度，℃；

\$t_\varepsilon\$——环境温度，℃；

\$\alpha_d\$——对流给热系数，KJ/m²·h·℃。

环境无风时，

$$\alpha_d = A \times (t_b - t_\varepsilon)^{\frac{1}{4}}$$

式中：\$A\$——系数，散热面向上时，\$A=11.71\$，向下时，\$A=6.27\$，垂直时，\$A=9.20\$。

环境风速 \$WF < 5\text{m/s}\$ 时，

$$\alpha_d = 22.16 + 15.05WF$$

环境风速 \$WF < 5\text{m/s}\$ 时，

$$\alpha_d = 27.06 \times W_F^{0.73}$$

附 录 B
(资料性)

表 B1 在 101325Pa 压力下空气饱和水蒸汽压力和含湿量

温度 ℃	干空气密度 (公斤/米 ³)	饱和水蒸汽 分压力 (Pa)	饱和时含湿量			
			克/米 ³ 湿气	克/标米 ³ 干 气	克/标米 ³ 湿 气	克/公斤干 气
0	1.293	611	4.8	4.8	4.8	3.8
5	1.270	867	6.8	7.0	6.9	5.4
6	1.265	933	7.3	7.5	7.4	5.8
7	1.261	1000	7.8	8.1	8.0	6.2
8	1.256	1067	8.3	8.6	8.5	6.7
9	1.252	1147	8.8	9.2	9.1	7.1
10	1.248	1227	9.4	9.8	9.7	7.6
11	1.243	1307	10.0	10.5	10.4	8.1
12	1.239	1400	10.7	11.3	11.2	8.7
13	1.235	1493	11.4	12.1	11.9	9.3
14	1.230	1600	12.1	12.9	12.7	9.9
15	1.226	1707	12.8	13.7	12.5	10.6
16	1.222	1813	13.6	14.7	14.4	11.3
17	1.217	1933	14.5	15.7	15.4	12.1
18	1.213	2066	15.4	16.7	16.4	12.9
19	1.209	2200	16.3	17.9	17.5	13.8
20	1.205	2333	17.3	18.9	18.5	14.6
21	1.201	2493	18.3	20.3	19.8	15.6
22	1.197	2640	19.4	21.5	20.9	16.6
23	1.193	2813	20.6	22.9	22.3	17.7
24	1.189	1493	21.8	24.4	23.1	18.8
25	1.185	3173	23.0	26.0	25.2	20.0
26	1.181	3360	24.4	27.5	26.6	21.2
27	1.177	3560	25.8	29.3	28.2	22.6
28	1.173	3773	27.2	31.1	29.9	24.0
29	1.169	4000	28.7	33.0	31.7	25.5
30	1.165	4240	30.4	35.1	33.6	27.0
31	1.161	4493	32.0	37.3	36.6	28.7
32	1.157	4760	33.9	39.6	37.7	30.4
33	1.154	5000	35.6	41.9	39.9	32.3
34	1.150	5320	37.5	44.5	42.2	34.2
35	1.146	5626	39.6	47.3	44.6	36.4
36	1.142	5946	40.5	50.1	47.1	38.6
37	1.139	6279	43.9	53.1	49.8	40.9
38	1.135	6546	46.2	56.3	52.6	43.4

续表 B1

温度 ℃	干空气密度 (公斤/米 ³)	饱和水蒸汽 分压力(Pa)	饱和时含湿量			
			f 克/米 ³ 湿 气	F' 克/标米 ³ 干气	F' ' 克/标 米 ³ 湿气	克/公斤干 气
39	1.132	6986	48.5	59.5	55.4	45.9
40	1.128	7373	51.1	63.1	58.5	48.6
41	1.124	7773	53.6	66.8	61.6	51.2
42	1.121	8199	56.5	70.8	65.0	54.3
43	1.117	8639	59.2	74.9	68.6	57.6
44	1.114	9106	62.3	79.3	72.2	61
45	1.110	9586	65.4	84	76	64.8
46	1.107	10093	68.6	89	80.2	68.6
47	1.103	10612	71.3	94.1	84.3	72.7
48	1.100	11159	75.3	99.5	88.6	76.9
49	1.096	11732	79	105.3	93.1	81.5
50	1.093	12346	83	111.4	97.9	86.1
51	1.090	12959	86.7	118.0	103.0	91.3
52	1.086	13612	90.9	125.0	108.0	96.6
53	1.083	14292	95.0	132.0	113.0	102.0
54	1.080	14999	99.5	139.0	119.0	108.0
55	1.076	15732	104.3	148.0	125.0	114.0
56	1.073	16505	108.0	156.0	131.0	121.0
57	1.070	17305	113.0	165.0	137.0	128.0
58	1.067	18145	119.0	175.0	144.0	135.0
59	1.063	19012	124.0	185.0	151.0	143.0
60	1.060	19918	130.0	196.0	158.0	152.0
61	1.057	20852	136.0	209.0	166.0	161.0
62	1.054	21772	142.0	222.0	174.0	170.0
63	1.051	22851	148.0	235.0	182.0	181.0
64	1.048	23905	154.0	249.0	190.0	192.0
65	1.044	24998	161.1	265.0	199.0	204.0
66	1.041	26145	168.0	281.0	208.0	215.0
67	1.038	27331	175.0	299.0	218.0	229.0
68	1.035	28558	182.0	318.0	228.0	244.0
69	1.032	29824	190.0	338.0	238.0	259.0
70	1.029	31157	197.9	361.0	249.0	275.0
75	1.014	38543	241.6	499.0	308.0	381.0
80	1.000	47343	293.0	716.0	379.0	544.0
85	0.986	57809	353.0	1092.0	463.0	824.0
90	0.973	70101	423.0	1877.0	563.0	1395.0
95	0.959	84513	504.0	4381.0	679.0	3110.0
100	0.947	101325	597.0	∞	876.0	8000.0

表 B2 常用气体在标准状态下的密度 (ρ)

气体名称	化学式	密度 ρ (千克/标米)
空气		1.293
氧气	O ₂	1.429
氮气	N ₂	1.251
氢气	H ₂	0.090
甲烷	CH ₄	0.716
乙烷	C ₂ H ₆	1.342
二氧化碳	CO ₂	1.965
一氧化碳	CO	1.250
二氧化硫	SO ₂	2.860
水蒸汽	H ₂ O	0.804

表 B3 气体的平均比热: C_p , 千焦/标米³·°C (KJ/m³·°C)

温度/°C	CO ₂	H ₂ O	空气	N ₂	O ₂	H ₂	CO	SO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆
0	1.606	1.489	1.300	1.300	1.304	1.275	1.300	1.731	1.547	
100	1.710	1.497	1.304	1.300	1.317	1.292	1.300	1.810	1.639	2.061
200	1.802	1.514	1.308	1.304	1.333	1.296	1.304	1.885	1.756	2.278
300	1.878	1.535	1.321	1.313	1.354	1.300	1.317	1.952	1.885	2.491
400	1.940	1.556	1.333	1.321	1.379	1.300	1.329	2.015	2.011	2.684
500	2.007	1.581	1.346	1.333	1.396	1.304	1.342	2.065	2.140	2.859
600	2.057	1.605	1.363	1.346	1.417	1.308	1.359	2.111	2.257	3.022
700	2.103	1.631	1.375	1.359	1.434	1.313	1.371	2.149	2.374	3.164
800	2.145	1.660	0.139	1.371	1.450	1.317	1.388	2.178	2.491	3.302
900	2.183	1.685	1.400	1.384	1.463	1.321	1.400	2.211	2.596	3.428
1000	2.216	1.714	1.413	1.396	1.476	1.329	1.413	2.232	2.696	3.540

表 B4 各种材料的黑度

材料名称	黑度, ε	材料名称	黑度, ε
红砖	0.93	铁板 (已生锈)	0.67
耐火粘土砖	0.85	铸铁 (已氧化)	0.89
钢板	0.79	抹灰砖砌物	0.94

表 B5 物质的热容

物质名称	热容 (J/mol·°C)	适应温度范围, K
Al(OH) ₃ (固) 三水铝石	$29.15 + 214.93 \times 10^{-3}T$	293—373
AlOOH (固) 一水软铝石	$54.32 + 24.67 \times 10^{-3}T + 1.67 \times 10^{-6}T^2$	373—673
AlOOH (固) 一水硬铝石	$43.53 + 31.78 \times 10^{-3}T$	373—673
γ -Al ₂ O ₃ (固)	$68.45 + 46.42 \times 10^{-3}T$	
α -Al ₂ O ₃ (固) 刚玉	$114.70 + 12.80 \times 10^{-3}T - 35.42 \times 10^{-5}T^{-2}$	298—1800