

ICS 77.180
CCS H 92

YS

中华人民共和国有色金属行业标准

YS/T 119.2-20XX

代替 YS/T 119.2-1992

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)
(送审稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 热平衡测定和计算基准	1
5 设备状况及流程	1
6 热平衡测定条件	3
7 测定项目和方法	3
7.1 测定项目中符号的定义及单位	3
7.2 测定的项目和方法	4
7.2.1 大气环境测定	4
7.2.2 进入体系物料的测定和方法	4
7.2.3 出体系物料的测定和方法	7
7.2.4 其他辅助测定	7
8 物料平衡计算	8
8.1 各物料量的计算方法	8
8.1.1 收入部分	8
8.1.2 支出部分	9
8.2 物料平衡表	9
8.3 物料平衡允许误差	10
9 热平衡计算	10
9.1 各项热量的计算方法	10
9.1.1 收入部分	10
9.1.2 支出部分	11
9.2 热平衡表	12
9.3 热平衡允许误差	13
10 热效率及主要技术指标	13
10.1 热效率计算	13
10.1.1 窑的热效率	13
10.1.2 冷却器的余热利用率	13
10.2 主要技术指标	13
11 热平衡测定分析与改进建议	14
附录 A (规范性附录)	15
附录 B (资料性附录)	22

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。

本文件代替 YS/T 119.2-1992《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 119.2-1992《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，主要技术变化如下：

a) 增加了以天然气和煤气为燃料时焙烧回转窑的热平衡测试与计算方法（见 7.2.2.1.2），对天然气和煤气的取样分析方法（见附录 A.3），燃烧所需空气量（见附录 A.9.2），燃烧热（见 9.1.1.1）以及产生的烟气量（见附录 A11.2）进行了增补；

b) 增加了原料品种，由原来单一的湿氢氧化铝增加为氢氧化铝、氧化铝以及氢氧化铝和氧化铝的混合物料作为焙烧回转窑的原料（见 7.2.2.2.2）；

c) 更改了物料平衡和热平衡的测试体系，在原来的测试体系（见 YS/T 119.2-1992 中 4.2）的基础上增加了窑后预热部分（见 5.2 图 1）；

d) 增加了氧化铝相变反应热的计算方法（见 9.1.2.5）；

e) 更改了部分项目名称及单位，如比重更改为密度，仟卡更改为千焦等；

f) 更改了部分计算方法（算式），例如：附录 A.8 中公式 (A.10)，由于原来公式中空气的密度是重度，单位是 n/m^3 ，修订后空气的密度单位是 Kg/m^3 ，公式 (A.10) 中的系数 $\sqrt{2g}$ 更改为 $\sqrt{2}$ ，即 1.414 等等；

g) 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）提出并归口。

本文件起草单位：中铝山东有限公司、中铝山东新材料有限公司、中铝中州有限公司、中铝郑州有色金属研究院有限公司。

本文件主要起草人：

本文件所代替版本的历次发布情况为：

—1992 年首次发布为 YS/T 119.2-1992。

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

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。

本文件适用于以重油、天然气或煤气为燃料，以氢氧化铝、氧化铝以及氢氧化铝和氧化铝混合物料为原料的焙烧回转窑的热平衡测定与计算。

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 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 476 《煤的元素分析方法》
- GB/T 508 《石油产品灰分测定方法》
- GB/T 2587 《用能设备能量平衡通则》
- GB/T 2588 《设备热效率计算通则》
- 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》
- GB/T 13609 《天然气取样导则》
- GB/T 13610 《天然气的组成分析 气相色谱法》
- GB/T 30490 《天然气自动取样方法》

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 热平衡测定和计算基准

- 4.1 基准温度采用 0℃。
- 4.2 基准压力采用 101325Pa。
- 4.3 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。
- 4.4 物料平衡与热平衡均以一吨成品氧化铝（高温氧化铝）为计算单位。
- 4.5 热平衡测定范围及计算体系

物料平衡测定范围包括窑体、窑头罩、窑尾罩、冷却器及窑后各级收尘器；热平衡计算体系只包括窑体、窑头罩、窑尾罩及窑后各级预热器，不包括电收尘器等设备。

4.6 热设备能量平衡应当符合 GB/T 2587 的规定，设备热效率的计算应当符合 GB/T 2588 的规定。

5 设备状况及流程

5.1 设备状况

写明设备的新旧程度、运行状态（正在运行、停机、正在维修和设备护养）、特点及存在问题、投产和上次大修后投产日期，生产概况填写测定前三个月的月平均。

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 Nm ³ /t	
			原料下料量	kg/h	
			原料附着水含量	%	
			窑实际产能	t/h	
			吨氧化铝热耗	KJ/t	

5.2 设备流程示意图

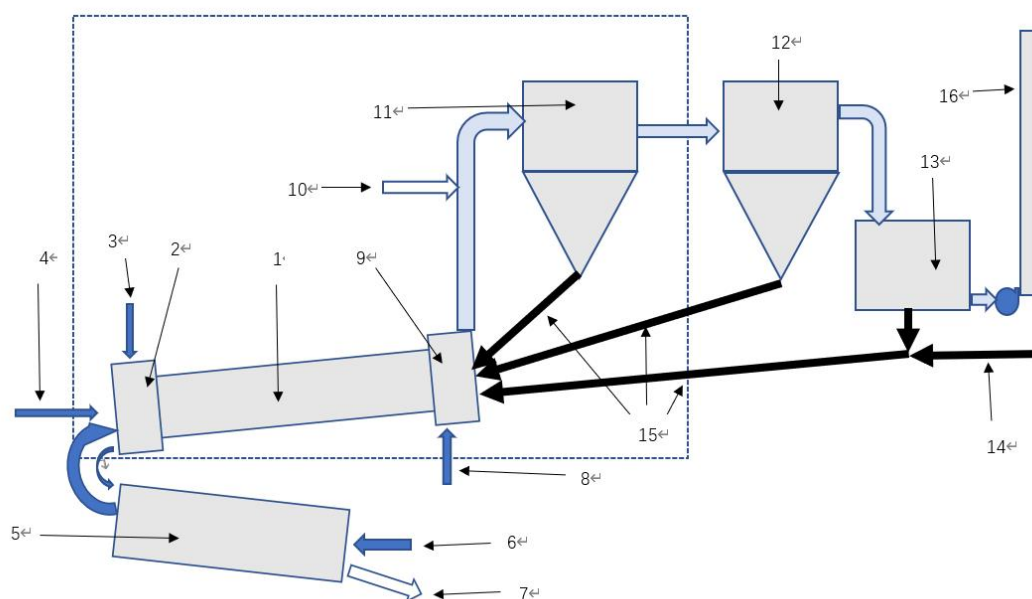


图 1 焙烧回转窑及设备流程图

标引序号说明：1--窑体 2--窑头罩 3--窑头漏风 4--燃料 5--冷却器 6--鼓风机鼓入风
7--成品氧化铝 8--窑尾漏风 9--窑尾罩 10--原料 11--预热系统
12--收尘系统 13--电收尘器 14--电收尘吹灰风排风机 15--返灰 16--烟囱-

注：虚线为热平衡体系界线

6 热平衡测定条件

- 6.1 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。
6.2 测定时间每班次不应少于八小时，测定次数不少于两个班次。
6.3 测定用的仪器、仪表应在有效检定周期之内。

7 测定项目和方法

7.1 测定项目中符号的定义及单位

测定项目的名称、符号及单位列于表 2:

表 2 测定项目中符号的定义和单位

符号	定义	单位	符号	定义	单位
t	大气温度	°C	t _F	窑尾罩出口烟气温度	°C
P	大气压力	Pa	V _F	窑尾罩出口烟气体积	Nm ³ /h
φ	相对湿度	%	P _F	窑尾罩出口烟气压力	Pa
M _R	入窑原料量	kg/h	V _j	预热器出口烟气体积	Nm ³ /h
H ₂ O _R	原料附着水量	%	t _j	预热器出口烟气温度	°C
H ₂ O _R ^I	原料结晶水量	%	P _j	预热器出口烟气压力	Pa
t _R	原料入窑温度	°C	C _{nj}	预热器出口干气含尘浓度	g/ Nm ³ _{干气}
α _R	原料中 α-氧化铝含量	%	X _{swj}	预热器出口烟气含湿量	%
γ _R	原料中 γ-氧化铝含量	%	V _d	电收尘出口烟气体积	Nm ³ /h
t _c	成品出窑温度	°C	t _d	电收尘出口烟气温度	°C
t _c ^I	成品出冷却器温度		P _d	电收尘出口烟气压力	Pa
W _c	成品灼减	%	C _{nd}	电收尘出口干气含尘浓度	g/ Nm ³ _{干气}
M _c	成品量	t/h	V _k ⁰	鼓风机进冷却器风量	Nm ³ /h
α _c	成品中 α-氧化铝含量	%	P _k	进冷却器风管压力	Pa
γ _c	成品中 γ-氧化铝含量	%	t _k ¹	空气进冷却器时的温度	°C
M _y 或 V _y	燃料量	kg/h 或 Nm ³ /h	t _k ²	空气进窑时的温度	°C
ρ _y	燃料(天然气或煤气)的密度	kg/ Nm ³	t _k ³	窑头漏入空气温度	°C
t _y	燃料入窑温度	°C	V _k ³	窑头漏入空气量	Nm ³ /h
Q _{DW} ^y	燃料应用基发热量	KJ/kg	t _k ⁴	窑尾漏入空气温度	°C
M _q	蒸汽耗用量	kg/h	V _k ⁴	窑尾漏入空气量	Nm ³ /h
P _q	蒸汽压力	Pa	t _k ⁵	预热系统漏入空气温度	°C
t _q	蒸汽温度	°C	V _k ⁵	预热系统漏入空气量	Nm ³ /h

α	烟气过剩空气系数		t_k°	电收尘吹灰风温度	$^{\circ}\text{C}$
t_n	窑尾烟气温度	$^{\circ}\text{C}$	V_k°	电收尘吹灰风量	Nm^3/h
V_n	窑尾烟气量	Nm^3/h	X_{sw}	烟气的含湿量	%

7.2 测定的项目和方法

7.2.1 大气环境测定

表 3 大气环境

项目	符号	单位	测定仪器
温度	t	$^{\circ}\text{C}$	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

7.2.2 进入体系物料的测定和方法

7.2.2.1 燃料的测定项目和方法

目前正在运行中的焙烧回转窑的燃料分为天然气、煤气和重油，重油一般作为辅助燃料。

7.2.2.1.1 以重油为燃料的测定项目和方法

表 4 以重油为燃料的测定项目和方法

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	
重油	耗重油量	M_y	kg/h	重油泵出口	流量计累积	8 小时累积 1 次	累积数算术平均值
	重油进窑温度	t_y	$^{\circ}\text{C}$	靠近窑头罩重油管	红外测温仪	4 小时 1 次	算术平均值
	重油的取样			重油泵出口管道	见附录 A.2.1	每班 1 次	
	重油应用基成分	C^y	%		符合 GB/T 476 的规定		算术平均值
		H^y					
		O^y					
		N^y					
	S^y	%		符合 GB/T 388 的规定			
	H_2O^y	%		符合 GB/T 260 的规定			
	A^y	%		符合 GB/T 508 的规定			
重油低(位)发热量	Q_{Dw}^y	KJ/kg		根据分析基发热量计算 (见附录 A.2.3)			
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	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	$^{\circ}\text{C}$	蒸汽雾化	水银温度计或红外测温	1 小时 1 次	8 小时算术

	度		管道	仪		平均值
--	---	--	----	---	--	-----

7.2.2.1.2 以天然气或煤气为燃料的测定项目和方法

天然气和煤气都是气体燃料，其组成相差不大，只是组分的比例不同，所以以煤气为燃料的测定项目和方法可参照以天然气为燃料的测定项目和方法进行，见表5。

以天然气为例，测定项目和方法列于表5。

表5 以天然气为燃料的测定项目和方法

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
天然气消耗量	V_y	Nm^3/h	天然气管道	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_y	$^{\circ}\text{C}$	靠近窑头罩管道	红外测温仪	4小时1次	算术平均值
天然气的取样			合同规定的交接点	见附录A.3	每班1次	
天然气组成		%		符合GB/T 13610的规定	不少于2次	算术平均值
天然气低(位)发热量	Q_{Dw}^y	KJ/Nm^3		符合GB/T 11062的规定	不少于2次	算术平均值

注：天然气的组成主要包括甲烷等各烷类气体、氢气、一氧化碳、二氧化碳、氧气、氮气、硫化氢、水分等。

7.2.2.2 入窑原料

入窑原料分为湿氢氧化铝、氧化铝以及氢氧化铝和氧化铝混合加入。

7.2.2.2.1 以湿氢氧化铝为原料时入窑原料的测定和方法

表6 入窑原料为湿氢氧化铝

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
入窑湿氢氧化铝量	M_r	kg/h	下料皮带	皮带称累计	8小时1次	累计数算术平均值
湿氢氧化铝附着水含量	H_2O_r	%		取样实测(见附录A.1)	1小时1次	组成班样送分析
氢氧化铝结晶水含量	H_2O_r^j	%		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_r	$^{\circ}\text{C}$	进喂料机之前	水银温度计或红外测温仪	4小时1次	算术平均值

7.2.2.2.2 以氧化铝或氧化铝与氢氧化铝的混合物料为原料时入窑原料的测定和方法

表7 入窑原料为氧化铝或氧化铝与氢氧化铝的混合物料

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
入窑原料量	M_r	kg/h	下料皮带	皮带称累计	8小时1次	累计数算术平均值
入窑原料附着水含量	H_2O_r	%		取样实测(没有附着水按0计)	1小时1次	组成班样送分析
入窑原料灼减	H_2O_r^j	%		取样实测	1小时1次	组成班样送分析

入窑原料氧化铝 晶型	α_R	%		取样实测	1 小时 1 次	组成班样送 分析
	γ_R	%				
入窑原料温度	t_R	℃	进喂料机之 前	水银温度计或红外 测温仪	4 小时 1 次	算术平均值

7.2.2.3 漏入空气量的测定和方法

表 8 窑头窑尾的测定项目和方法

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
窑头 漏入 空气	漏入时的 温度	t_k^3	℃	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_k^3	Nm ³ /h		计算（见附录 A.9）		
窑尾 漏入 空气	漏入时的 温度	t_k^4	℃	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_k^4	Nm ³ /h		计算（见附录 A.10）		
预热 系统 漏入 空气	漏入时的 温度	t_k^5	℃	距预热系统 0.5 米	水银温度计多点 测量		算术平均 值
	漏入空气 量	V_k^5	Nm ³ /h		计算（见附录 A.10）		

7.2.2.4 鼓风机鼓入空气量的测定项目和方法

表 9 鼓风机鼓入空气量的测定项目和方法

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
进冷却器时 的温度	t_k^1	℃	进冷却器前 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	远红外高温计或 热电偶	每班 4 次	算术平均值
静压	P_k	Pa	进冷却器前 风管	压力计	每班 2 次	
各测点动压 值	P_i	Pa	进冷却器前 风管	皮托管、微压计 或风速计	每班 2 次	
平均风速	W_{cp}	m/s			按附录 A.8 计算	
工况风量	V_k^t	m ³ /h				
标况风量	V_k^o	Nm ³ /h				

7.2.2.5 电收尘吹灰风量

表 10 电收尘吹灰风量的测定项目和方法

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
温度	t_k^6	℃	进窑尾罩前	水银温度计	每班 2 次	算术平均值	
吹灰风量	V_k^6	Nm ³ /h	进吹灰器前	流量计计量	每班 1 次	8 小时累计平 均值	

7.2.3 出体系物料的测定和方法

7.2.3.1 成品氧化铝

表 11 成品氧化铝的测定项目和方法

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
出窑温度	t_c	℃	窑头	取样用钨铼热电偶 实测	2 小时 1 次, 每次测	算术平均值
出冷却机温度	t_c^l	℃	冷却机出口	水银温度计	2 个数	
成品氧化铝产量	M_c	t/h		根据原料量等计算		
氧化铝灼减	W_c	%	窑头	取样送分析	4 小时 1 次	组成班样送 分析
α—氧化铝	α_c					
γ—氧化铝	γ_c					

7.2.3.2 预热系统出口

表 12 预热器出口的测定项目和方法

项目	符号	单位	测定仪器与方法	测定频率	取值原则
干废气成分	N_2^g 、 CO_2^g 、 O_2^g 、 O_2^g 、 H_2^g 、 CH_4^g	%	气体分析仪	每班 2 次, 每次 3 个样	算术平均值
废气温度	t_j	℃	热电偶	1 小时 1 次	算术平均值
废气压力	P_j	Pa	压力计		
废气含湿量	X_{swj}	%	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	C_{nj}	g/ Nm ³	按附录 A. 7 计算		
风量	V_j	Nm ³ /h	按附录 A. 11 计算		

7.2.3.3 电收尘出口

电收尘出口的测定项目和方法与预热系统出口的测定项目和方法（见 7.2.3.2）类似，可参照预热系统出口的测定项目和方法表 12 进行。

7.2.4 其他辅助测定

7.2.4.1 窑尾密封圈前（窑内）气体

表 13 窑尾密封圈前（窑内）气体的测定项目和方法

项目	符号	单位	测定仪器与方法	测定频率	取值原则
干烟气成分	N_2^g 、 CO_2^g 、 O_2^g 、 O_2^g 、 H_2^g 、 CH_4^g	%	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				附录 A. 6
烟气温度	t_n	℃	抽气热电偶	每班 2 次	算术平均值

7.2.4.2 窑尾罩出口、各级预热器进出口以及各级收尘器进出口

窑尾罩出口、各级预热器进出口以及各级收尘器进出口的测定项目和方法与预热系统出口的测定项目和方法（见 7.2.3.2）类似，可参照预热系统出口的测定项目和方法表 12 进行。

7.2.4.3 表面散热

表面散热的测定位置包括：窑体、窑头罩、窑尾罩和预热系统表面温度，分多区域测量，环境温度指的是距表面 1 米处的空气温度，环境风速指的是距表面 1 米处的风速。

表 14 表面散热的测定项目和方法

项目	符号	单位	测定仪器与方法	测定频率	取值原则
表面温度	t_{bi}	℃	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}	℃	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	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	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	-	见附录 A15
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	$Q = \sum q_i \times F_i$	-	

8 物料平衡计算

物料平衡的计算是以生产一吨成品（高温）氧化铝为基础，进出测试体系时物料的质量（单位：kg/t）平衡的计算。

8.1 各物料量的计算方法

8.1.1 收入部分：

8.1.1.1 燃料量以质量 M_1 记，按公式（1）计算

$$M_1 = \frac{M_y}{M_c} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

M_y ——每小时耗燃料量，kg/h（当燃料为天然气或煤气时，体积流量转化为重量）；

M_c ——每小时成品氧化铝产量，t/h（下同）。

8.1.1.2 干（氢）氧化铝量以质量 M_2 记，按公式（2）计算

$$M_2 = \frac{M_R \times (1 - \frac{H_2O_R}{100})}{M_c} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

M_R ——每小时入窑湿氢氧化铝量，kg/h；

H_2O_R ——氢氧化铝附着水含量，%。

当原料没有附着水时，附着水按零计算（下同）。

8.1.1.3（氢）氧化铝附着水量以质量 M_3 记，按公式（3）计算

$$M_3 = \frac{M_R \times \frac{H_2O_R}{100}}{M_c} \dots\dots\dots (3)$$

8.1.1.4 鼓入空气量以质量 M_4 记，按公式（4）计算

$$M_4 = \frac{V_k^0 \times \rho_k^0}{M_c} \quad (4)$$

式中： V_k^0 —每小时鼓入空气量， Nm^3/h ；

ρ_k^0 —空气在标准状态下的密度， kg/Nm^3 ，按公式（5）计算

$$\rho_k^0 = \frac{N_2 \times \rho_n + O_2 \times \rho_{O_2} + H_2O \times \rho_{H_2O}}{100} \quad (5)$$

式中： N_2 、 O_2 、 H_2O —空气中氮气、氧气、水汽的体积含量，%；

ρ_n 、 ρ_{O_2} 、 ρ_{H_2O} —空气中氮气、氧气、水汽在标准状态下的密度， kg/Nm^3 。

8.1.1.5 窑头漏入空气量以质量 M_5 记、窑尾漏入空气量以质量 M_6 记、预热系统漏入空气量以质量 M_7 记和电收尘吹灰风量以质量 M_8 记的计算方法与鼓入空气量以质量 M_4 的计算方法（见 8.1.1.4）相同，可参照 8.1.1.4 的计算方法即公式（4）和（5）计算。

8.1.1.6 收入合计

$$\Sigma M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8$$

8.1.2 支出部分：

8.1.2.1 成品氧化铝量以质量 M'_1 记，按公式（6）计算

$$M'_1 = 1000 \text{ kg} \quad (6)$$

8.1.2.2 预热系统出口烟气体量以质量 M'_2 记，按公式（7）计算

$$M'_2 = \frac{V_j \times \rho_j^0}{M_c} \quad (7)$$

式中： V_j —每小时预热系统出口废气量， Nm^3/h ；

ρ_j^0 —预热系统出口废气在标准状态下的密度， kg/Nm^3 ，

8.1.2.3 烟囱排放窑灰量以质量 M'_3 记，按公式（8）计算

$$M'_3 = \frac{M_y^q}{M_{Ao}} \quad (8)$$

式中： M_y^q —每小时烟囱排放窑灰量， kg/h 。按公式（9）计算

$$M_y^q = \frac{V_D \times C_{nD}}{1000} \quad (9)$$

式中： V_D —电收尘（最后一级收尘器）出口的废气量， Nm^3/h ；

C_{nD} —电收尘（最后一级收尘器）出口的含尘浓度， g/Nm^3 ；

8.1.2.4 差值

$$\Delta M = \Sigma M - (M'_1 + M'_2 + M'_3)$$

8.1.2.5 支出合计

$$\Sigma M' = M'_1 + M'_2 + M'_3 + \Delta M$$

8.2 物料平衡表

表 15 一吨成品氧化铝（高温氧化铝）的物料平衡统计表

收入				支出			
符号	项目	数值		符号	项目	数值	
		kg/t	%			kg/t	%
M_1	燃料量			M'_1	成品氧化铝量		
M_2	干（氢）氧化铝量			M'_2	预热系统出口烟气体量		
M_3	（氢）氧化铝附着水量			M'_3	烟囱排出窑灰量		

M ₄	鼓入空气量			△M	差值		
M ₅	窑头漏入空气量						
M ₆	窑尾漏入空气量						
M ₇	预热系统漏入空气量						
M ₈	电收尘吹灰风量						
ΣM	合计		100	ΣM'	合计		100

注：如果燃料为重油且重油用蒸汽雾化，需要在物料平衡中进行计算。

8.3 物料平衡允许误差

物料平衡允许相对误差为±5%，即

$$\left| \frac{\Delta M}{\Sigma M} \right| \times 100\% \leq 5\%$$

9 热平衡计算

9.1 各项热量的计算方法

9.1.1 收入部分

9.1.1.1 燃料的燃烧热以热量 Q₁ 记

当燃料为重油时，按公式（10）计算

$$Q_1 = Q_{DW}^y \times M_1 \quad (10)$$

式中：Q_{DW}^y—燃料的应用基低位发热量，KJ/kg。

当燃料为天然气或煤气时，按公式（11）计算

$$Q_1 = Q_{DW}^y \times \frac{M_1}{\rho_y} \quad (11)$$

式中：Q_{DW}^y—燃料的应用基低位发热量，KJ/Nm³。

ρ_y—燃料（天然气或煤气）在标准状态下的密度，kg/Nm³。

9.1.1.2 燃料带入的显热以热量 Q₂ 记

当燃料为重油时，按公式（12）计算

$$Q_2 = M_1 \times C_y \times t_y \quad (12)$$

式中：C_y—燃料在 0— t_y℃间的平均比热，KJ/kg·℃。

t_y—燃料入窑头罩时的温度，℃。

当燃料为天然气或煤气时，按公式（13）计算

$$Q_2 = \frac{M_1}{\rho_y} \times C_y \times t_y \quad (13)$$

式中：C_y—燃料在 0— t_y℃间的平均比热，KJ/ Nm³·℃。

9.1.1.3 原料带入显热以热量 Q₃ 记，按公式（14）计算

$$Q_3 = M_2 \times C_R \times t_R \quad (14)$$

式中：C_R—原料在 0— t_y℃间的平均比热，KJ/kg·℃。

t_R—原料进入预热系统时的温度，℃

9.1.1.4（氢）氧化铝附着水带入显热以热量 Q₄ 记，按公式（15）计算

$$Q_4 = M_3 \times C_{H_2O} \times t_R \quad (15)$$

式中：C_{H₂O}—水在 0— t_R℃间的平均比热，KJ/kg·℃。

9.1.1.5 鼓入空气带入显热以热量 Q_5 记, 按公式 (16) 计算

$$Q_5 = \frac{M_4}{\rho_k} \times C_k \times t_k^2 \quad (16)$$

式中: C_k —空气在 $0-t_k^2$ °C 间的平均比热, KJ/Nm³°C。

t_k^2 —鼓入空气进窑头罩时的温度, °C。

9.1.1.6 窑头漏入空气带入显热以热量 Q_6 记、窑尾漏入空气带入显热以热量 Q_7 记、预热系统漏入空气带入显热以热量 Q_8 记和电收尘吹灰风带入显热以热量 Q_9 记的计算方法与鼓入空气带入显热以热量 Q_5 记的计算方法 (见 9.1.1.5) 相同, 可参照公式 (16) 计算。

9.1.1.7 返回窑灰带入显热以热量 Q_{10} 记, 按公式 (17) 计算

$$Q_{10} = \frac{M_D^F}{M_{Ao}} \times C_{Hi} \times t_{Hi} \quad (17)$$

式中: M_D^F —收尘器返回的窑灰量, kg/h。

C_{Hi} —收尘器返回窑灰在 $0-t_{Hi}$ °C 间的平均比热, KJ/kg°C。

t_{Hi} —收尘器返回窑灰进窑尾罩时的温度, °C。

收入合计: $\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}$

9.1.2 支出部分

9.1.2.1 成品氧化铝量带走显热以热量 Q_1' 记, 按公式 (18) 计算

$$Q_1' = M_1' \times C_{Ao} \times t_c \quad (18)$$

式中: C_{Ao} —成品氧化铝在 $0-t_{Ao}$ °C 间的平均比热, KJ/kg°C。

t_c —成品氧化铝出窑时的温度, °C。

9.1.2.2 干烟气带走显热以热量 Q_2' 记, 按公式 (19) 计算

$$Q_2' = \frac{M_2' \times (1 - \frac{X_{swj}}{100})}{\rho_{jg}} \times C_{jg} \times t_j \quad (19)$$

式中: X_{swj} —预热器出口烟气含湿量, %;

C_{jg} —预热器出口干烟气在 $0-t_j$ °C 间的平均比热, KJ/Nm³°C。

t_j —预热器出口烟气温度, °C。

ρ_{jg} —预热器出口干烟气在标准状态下的密度, kg/Nm³。

9.1.2.3 烟气中水分带出的显热以热量 Q_3' 记, 按公式 (20) 计算

$$Q_3' = \frac{M_2' \times \frac{X_{swj}}{100}}{0.804} \times C_{H_2O}^q \times t_j \quad (20)$$

式中: $C_{H_2O}^q$ —水蒸汽在 $100-t_j$ °C 间的平均比热, KJ/Nm³°C。

9.1.2.4 烟气中窑灰带走显热以热量 Q_4' 记, 按公式 (21) 计算

$$Q_4' = \frac{M_H^{Fd}}{M_c} \times C_H \times t_j \quad (21)$$

式中: M_H^{Fd} —预热器出口烟气每小时带走窑灰量, kg/h;

C_H —烟气带走窑灰在 $0-t_j$ °C 间的平均比热, KJ/kg·°C。

t_j —预热器出口烟气温度, °C。

9.1.2.5 反应吸热以热量 Q_5' 记

1. 以氢氧化铝为原料时, 按公式 (22) 计算



$$Q'_5 = \frac{M_{AH} \times 1000}{2 \times 78} \times \frac{47.25 \alpha_c + 80.29 \gamma_c}{100} \quad (22)$$

式中： M_{AH} —生产一吨成品氧化铝消耗的干氢氧化铝的量，kg/t；

α_c —成品氧化铝中 α - Al_2O_3 的质量含量，%；

γ_c —成品氧化铝中 γ - Al_2O_3 的质量含量，%；

78—氢氧化铝的分子量，g/mol。

2. 以氧化铝为原料时，按公式（23）计算

$$Q'_5 = \frac{M_{A_0} \times 1000}{102} \times \frac{(47.25 - 80.29) \times (\alpha_c - \alpha_r)}{100} \quad (23)$$

式中： M_{A_0} —生产一吨成品氧化铝消耗的干氧化铝的量，kg/t；

α_c —成品氧化铝中 α - Al_2O_3 的质量含量，%；

α_r —原料氧化铝中 α - Al_2O_3 的质量含量，%；

3. 如果原料为氢氧化铝和氧化铝的混合物为原料，其反应热 Q'_5 为原料中氢氧化铝和氧化铝比例的加权平均值（以氧化铝为原料时，氧化铝在窑内只发生的相变，且 γ - Al_2O_3 转化为 α - Al_2O_3 是放热过程， Q'_5 的计算结果应为负数）。

9.1.2.7 表面散热损失以热量 Q'_6 记，按公式计算

$$Q'_6 = \frac{\sum q_i \times F_i}{Mc} \quad (24)$$

式中： q_i —第*i*部窑体、窑头（尾）罩或预热系统的平均表面热流，KJ/m²h

F_i —第*i*部窑体、窑头（尾）罩或预热系统的散热面积，KJ/m²。

9.1.2.7 化学不完全燃烧损失热以热量 Q'_7 记，按公式（25）计算

$$Q'_7 = \frac{M_2}{\rho_j} \times \frac{12630 \times CO^s + 10790 \times H_2^s + 35840 \times CH_4^s}{100} \quad (25)$$

式中： CO^s 、 H_2^s 、 CH_4^s —预热器出口烟气（湿）中CO、H₂、CH₄的体积含量，%；

ρ_j —预热器出口烟气（湿）在标准状态下的密度，kg/Nm³。

12630、10790、35840—CO、H₂、CH₄的燃烧热，KJ/Nm³。

9.1.2.10 差值 ΔQ 的计算方法

$$\Delta Q = \sum Q - (Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7)$$

支出合计 $\sum Q' = Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7 + \Delta Q$

9.2 热平衡表

表 16 一吨成品氧化铝（高温氧化铝）的热平衡统计表

收入				支出			
符号	项目	数值		符号	项目	数值	
		kg/t	%			kg/t	%
Q_1	燃料的燃烧热			Q'_1	成品氧化铝量带走显热		
Q_2	燃料带入的显热			Q'_2	干烟气带走显热		
Q_3	干原料带入显热			Q'_3	烟气中水分带走显热		
Q_4	原料附着水带入显热			Q'_4	烟气中窑灰带走显热		
Q_5	鼓入空气带入显热			Q'_5	反应吸热		
Q_6	窑头漏入空气带入显热			Q'_6	表面散热损失		
Q_7	窑尾漏入空气带入显热			Q'_7	化学不完全燃烧损失热		
Q_8	预热系统漏入空气带入显热			ΔQ	差值		

Q ₉	电收尘吹灰风带入显热						
Q ₁₀	返回窑灰带入显热						
ΣQ	合计		100	ΣQ'	合计		100

注：如果重油用蒸汽雾化，需要在热平衡中进行计算。

9.3 热平衡允许误差

热平衡允许相对误差为±5%，即： $|\frac{\Delta Q}{\Sigma Q}| \times 100\% \leq 5\%$

10 热效率及主要技术指标

10.1 热效率计算

10.1.1 窑的热效率

窑的热效率以 $\eta_{\text{窑}}$ 记，按公式 (26) 计算

$$\eta_{\text{窑}} = \frac{Q_5 + Q_6'}{Q_1} \times 100\% \quad (26)$$

式中： $\eta_{\text{窑}}$ —氢氧化铝焙烧窑的热效率，%；

Q_5' —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 —燃料的燃烧热，KJ/t。

其中： $Q_5' = (M_3 + M_2 \times \frac{H_2O_R^l}{100}) \times [(100 - t_R) \times C_{H_2O}^s + 2253.9 + 1.24(t_j - 100) \times C_{H_2O}^q]$

式中： $H_2O_R^l$ —干原料结晶水的质量含量，%；

t_R —原料进入预热系统或窑时的温度，℃。

$C_{H_2O}^s$ —水在 $t_R - 100$ ℃ 的平均比热，KJ/kg·℃。

2253.9—水在 100℃ 下的汽化潜热，KJ/kg。

1.24—标准状态下，一公斤水汽所占的体积，Nm³/kg

$C_{H_2O}^q$ —水蒸汽在 100— t_j ℃ 间的平均比热，KJ/Nm³·℃。

10.1.2 冷却器的余热利用率

$$\eta_{\text{余}} = \frac{Q_5 - Q_k}{Q_1} \times 100\% \quad (27)$$

$$Q_k = \frac{M_4}{\rho_k} \times C_k \times t_k^1 \quad (28)$$

式中： $\eta_{\text{余}}$ —冷却器的余热利用率，%；

Q_5 —鼓入空气入窑时带入的显热，KJ/t；

Q_k —鼓入空气进入冷却器时带入的显热，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/Nm³·℃；

t_k^1 —鼓入空气进入冷却器时的温度，℃；

Q_1' —成品氧化铝出窑时带走的显热，KJ/t。

10.2 主要技术指标

焙烧回转窑测试后，根据测试数据，通过物料平衡和热平衡计算，应对焙烧回转窑的主

要技术指标进行汇总，示例如表 17。

表 17 主要技术指标

序号	名称	符号或算式	单位	数值
1	窑产能	M_c	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 CO 含量	$CO^{\#}$	%	
5	窑尾烟气温度	t_n	$^{\circ}C$	

11 热平衡测定分析与改进建议

11.1 对设备结构、操作及工艺制度的分析。

11.2 对热效率及主要技术指标的评价。

11.3 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 原料附着水含量的测定

每小时取原料样一次，每次取等量样品封口袋，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，按公式 (A.1) 计算原料附着水的含量

$$H_2O_r = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \% \quad (\text{A.1})$$

式中： H_2O_r —— 原料附着水的质量含量，%；

M_1 —— 烘干前原料样品的质量，g；

M_2 —— 烘干后原料样品的质量，g。

注：原料为氧化铝时，入窑氧化铝送样分析氧化铝中 α -氧化铝和 γ -氧化铝的百分含量。产品氧化铝（高温氧化铝）同样需要分析 α -氧化铝和 γ -氧化铝的百分含量。

A.2 重油的取样与分析

A.2.1 重油的取样

每班从重油泵出口后的管道中连续取 2 公升重油，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 重油的分析

重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 重油的应用基低（位）发热量的测定

重油的发热量，按公式 (A.2) 将分析基低（位）发热量换算成应用基低位发热量：

$$Q_{DW}^y = \left(Q_{DW}^f + \frac{rH_2O^f}{100} \right) \frac{100 - H_2O^y}{100 - H_2O^f} - \frac{rH_2O^f}{100} \quad (\text{A.2})$$

式中： Q_{DW}^y —— 重油的应用基低（位）发热量，KJ/kg；

Q_{DW}^f —— 重油的分析基低（位）发热量，KJ/kg；

r —— 水的汽化潜热，KJ/kg；

H_2O^f 、 H_2O^y —— 分别为重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，天然气的取样应符合 GB/T 13609 的规定或符合 GB/T 30490 的规定执行，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.3.4 煤气的取样与分析可依据天然气的取样与分析方法，也可以依据供应商（生产厂家）的取样与分析方法。

A.4 烟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，按公式 (A.3) 进行计算：

$$P_{sw} = P_v - C(t_1 - t_2)P_b \quad (\text{A. 3})$$

式中： P_{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。

由按公式 (A. 4) 计算出烟气的含湿量：

$$X_{sw} = \frac{P_{sw}}{P_s} \times 100\% \quad (\text{A. 4})$$

式中： X_{sw} —— 烟气的含湿量， %；

P_{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公式 (A. 5) 计算：

$$X_{sw} = \frac{1.24M_w + V_s \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_s} \times \frac{P_v}{P+P_r} \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325}}}{1.24M_w + V_s \sqrt{\frac{\rho_k}{\rho_s} \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325}}} \times 100\% \quad (\text{A. 5})$$

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/m^3 ；

ρ_s —— 测量状态下烟气的密度， kg/m^3 ；

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， $^\circ\text{C}$ ；

1.24 —— 标准状态下， 一克水所占体积长数， L/g。

A. 5 干、湿烟气成分按公式 (A. 6) 换算

$$\text{CO}_2^s = \text{CO}_2^g \times \frac{100 - X_{sw}}{100} \quad (\text{A. 6})$$

式中： CO_2^s —— 湿烟气中二氧化碳的体积量， %；

CO_2^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。按公式 (A. 7) 计算

$$\alpha = \frac{N_2^g}{N_2^g - 3.76(O_2^g - 0.5\text{CO}^g - 0.5\text{H}_2^g - 2\text{CH}_4^g)} \quad (\text{A. 7})$$

式中： α —— 烟气的过剩空气系数；

N_2^g —— 干烟气中氮气的体积含量， %；

O_2^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， %。

0.5H_2^g —— 干烟气中氧气的体积含量， %；

CH_4^g —— 干烟气中甲烷的体积含量， %。

A.7 烟气含尘浓度的测定与计算

烟气的含尘浓度包括各级预热器（或窑尾罩）出口以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 采样体积按公式（A.8）计算

$$V_{nd} = V_m \times \frac{273}{273+t_r} \times \frac{P+P_r}{101325} = 0.0027V_m \times \frac{P+P_r}{273+t_r} \quad (\text{A.8})$$

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 烟气含尘浓度按公式（A.9）计算

$$C_n = \frac{m}{V_{nd}} \times 1000 \quad (\text{A.9})$$

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

式中： C_n ——干烟气含尘浓度，g/Nm³干气；

m ——抽取的烟尘质量，g；

C'_n ——湿烟气含尘浓度，g/Nm³；

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按公式（A.10）计算

$$W_{cp} = \frac{1}{N} \times 1.414 \times K_d \times \sqrt{\frac{1}{\rho_t}} \times (\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2} + \dots + \sqrt{P_N}) \quad (\text{A.10})$$

$$\rho_t = \rho_0 \times \frac{P+P_k}{101325} \times \frac{273}{273+t_k} = 1.293 \times \frac{P+P_k}{101325} \times \frac{273}{273+t_k} = 0.00348 \times \frac{P+P_k}{273+t_k}$$

式中： W_{cp} ——被测管道截面的平均风速，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/Nm³；

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，℃。

A.8.2 工作状态下的空气量按公式（A.11）计算

$$V_k^t = \frac{\pi D^2}{4} \times W_{cp} \times 3600 \quad (\text{A.11})$$

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按公式（A.12）计算

$$V_k^o = V_k^t \times \frac{T_o \times P_t}{T_t \times P_o} \quad (\text{A.12})$$

式中： V_k^o ——标准状态下的空气量，Nm³/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 窑头漏入空气量按公式（A.13）计算

$$V_k^3 = V_{rk} - V_k^o \quad (\text{A.13})$$

式中： V_k^3 ——窑头漏入空气量，Nm³/h；

V_k^o ——鼓风机鼓入空气量，Nm³/h；

V_{rk} ——燃料燃烧实际所需要的空气量，Nm³/h。

A. 9. 1 燃料为重油时, 燃烧实际所需要的空气量按公式 (A. 14) 计算

$$V_{rk} = \alpha [0.0089C^y + 0.267H^y + 0.033(S^y - O^y)] \times M_y \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g) \quad (A. 14)$$

式中: α —— 烟气的过剩空气系数;

C^y ... —— 重油中碳等元素的应用基质量含量, %;

M_y —— 每小时重油耗用量, kg/h;

ϕ —— 大气的相对湿度;

$g_{H_2O}^g$ —— 饱和水汽含量, g/ Nm³干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

A. 9. 2 以天然气或煤气为燃料时实际所需要的空气量按公式 (A. 15) 计算

$$V_{rk} = \alpha \times \frac{\frac{1}{2}(CO^y + H_2^y) + 2CH_4^y + \frac{7}{2}C_2H_6^y + \dots + \frac{3n+1}{2}C_nH_{2(n+1)}^y + \frac{3}{2}H_2S^y - O_2^y}{21} \times V_y \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g) \quad (A. 15)$$

式中: α —— 燃料燃烧时的过剩空气系数;

CH_4^y ... —— 天然气或煤气中甲烷、乙烷等组分的体积含量, %;

V_y —— 每小时天然气或煤气用量, Nm³/h;

A. 10 窑尾及预热系统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。

A10. 1 窑尾漏入空气量按公式 (A. 16 和 A. 17) 计算

$$V_k^{4g} = V_w^g \times \phi_w \% \quad (A. 16)$$

$$\phi_w = \frac{CO_2' - CO_2''}{CO_2''} \times 100\% \quad (A. 17)$$

式中: V_k^{4g} —— 每小时窑尾漏入干空气量, Nm³/h;

V_w^g —— 窑尾密封圈前的干烟气量, Nm³/h; (计算方法见 A. 10. 1. 1~10. 1. 2)

ϕ_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;

CO_2' —— 漏风前干烟气中二氧化碳的体积含量, %。

CO_2'' —— 漏风后干烟气中二氧化碳的体积含量, %。

考虑到空气中的水汽, 按公式 (A. 18) 计算漏入的湿空气量。

$$V_k^4 = V_k^{4g} \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g) \quad (A. 18)$$

A. 10. 1. 1 当燃料为重油时, 窑尾密封圈前的干烟气量按公式 (A. 19) 计算

$$V_w^g = [0.01865C^y + 0.0068S^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.008N^y + 0.79 \alpha L_o] \times M_y \quad (A. 19)$$

式中: C^y ... —— 重油中碳等元素的应用级质量含量, %;

α —— 烟气的过剩空气系数;

L_o —— 重油完全燃烧的理论空气需要量 Nm³/kg;

M_y —— 每小时重油耗用量, kg/h;

A. 10. 1. 2 当燃料为天然气或煤气时, 窑尾密封圈前的干烟气量按公式 (A. 20) 计算

$$V_w^g = [0.01(CH_4^y + CO_2^y + CO^y + H_2S^y + N_2^y) + 0.02C_2H_6^y + \dots + \frac{n}{100}C_nH_{2(n+1)}^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.79 \alpha L_o] \times V_y \quad (A. 20)$$

式中: CH_4^y ... —— 天然气或煤气中 CH_4 等组分的应用级体积含量, %;

α —— 烟气的过剩空气系数;

L_o —— 天然气或煤气完全燃烧的理论空气需要量 Nm³/ Nm³燃气

V_y —— 每小时天然气或煤气耗用量, Nm³/h;

A. 10. 2 预热系统漏入空气量按公式 (A. 21) 计算

$$V_k^{5g} = (V_w^g + V_k^{4g}) \times \phi_w \% \quad (A. 21)$$

式中: V_k^{5g} —— 每小时预热系统漏入干空气量, Nm³/h;

ϕ_w 按公式 (A. 17) 计算

考虑到空气中的水汽, 公式 (A. 22) 计算漏入湿空气量。

$$V_k^5 = V_k^{5g} \times (1 + 0.00124 \times \phi \times g_{H_2O}^g) \quad (A. 22)$$

A. 11 预热器出口烟气量的测定与计算

预热器出口烟气量包括燃料燃烧产生的烟气量、原料的附着水与结晶水产生的水蒸气量、窑尾密封圈处漏入的空气量、预热器漏入的空气量及电收尘窑灰的吹灰风量。烟气量可用皮托管进行实测，也可根据燃料燃烧产生的烟气量及物料平衡进行计算，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 现场实测

A11.1.1 用皮托管测定管道平均风速按公式 (A.23) 计算

$$W_{cp} = 1.414K_d \times \sqrt{\frac{1}{\rho_t + \rho_{\text{尘}}}} \times \frac{\sqrt{P_1 + \sqrt{P_2 + \dots + P_n}}}{n} \quad (A. 23)$$

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

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

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/s^2 ；

n ——动压测点数；

$P_1 \dots$ ——各测点动压值，Pa；

ρ_t ——测定条件下烟气的密度， kg/m^3 ；

ρ_o ——标准状态下烟气的密度， kg/Nm^3 ；

$\rho_{\text{尘}}$ ——测试条件下烟气中粉尘的密度， kg/m^3 ；

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， $^{\circ}\text{C}$ ；

$CO_2 \dots$ ——烟气中二氧化碳等成分的体积含量，%；

$\rho_{CO_2} \dots$ ——烟气中二氧化碳等成分在标况下的密度， kg/Nm^3 。见附录 B。

A. 11.1.2 工作状态下烟气量按公式 (A.24) 计算

$$V_F^t = \frac{\pi D^2}{4} \times W_{cp} \times 3600 \quad (A. 24)$$

式中： V_F^t ——工作状态下的窑尾罩出口的烟气量， m^3/h ；

D ——被测管道直径，m。

A. 11.1.3 标准状态下的烟气量按公式 (A.25) 计算

$$V_F^o = V_F^t \times \frac{T_o \times P_t}{T_t \times P_o} \quad (A. 25)$$

式中： V_F^o ——标准状态下窑尾罩出口的烟气量， Nm^3/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 根据燃烧产物及物料平衡计算烟气量按公式 (A.26) 计算

$$V_F^o = V_y^F + V_R + V_k^4 + V_k^5 + V_k^6 \quad (A. 26)$$

式中： V_F^o ——标准状态下预热系统出口的烟气量

V_y^F ——燃料燃烧产生的烟气量， Nm^3/h ；

V_R ——原料附着水及结晶水产生的水蒸气量， Nm^3/h ；

V_k^4 ——窑尾漏入的湿空气量， Nm^3/h ；

V_k^5 ——预热器漏入的湿空气量， Nm^3/h ；

V_k^6 ——电收尘吹灰风量， Nm^3/h 。

燃料为重油时 V_y^F 按公式 (A.27) 计算

$$V_y^F = [0.01865C^y + 0.112H^y + 0.10243W^y + 0.0068S^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.008N^y + 0.79\alpha L_o + 0.00124\alpha L_o \times \phi \times g_{H_2O}^g] \times M_y \quad (A. 27)$$

式中： C^y ...—重油中碳等元素的应用基质量含量，%；

α —烟气的过剩空气系数；

ϕ —大气的相对湿度；

$g_{H_2O}^g$ —饱和水汽含量，g/Nm³干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

L_o —重油完全燃烧的理论空气量，Nm³/kg；按公式 (A. 28) 计算

$$L_o = 0.089C^y + 0.267H^y + 0.033(S^y - O^y) \quad (A. 28)$$

燃料为天然气或煤气时 V_y^F 按公式 (A. 29) 计算

$$V_y^F = \left[\frac{3}{100}CH_4^y + \frac{5}{100}C_2H_6^y + \dots + \frac{(2n+1)}{100}C_nH_{2(n+1)}^y + \frac{1}{100}(CO^y + CO_2^y + N_2^y + O_2^y) + \frac{2}{100}H_2S^y + 0.21(\alpha - 1)L_o + 0.79\alpha L_o + 0.00124\alpha L_o \times \phi \times g_{H_2O}^g \right] \times V_y \quad (A. 29)$$

式中： CH_4^y ...—天然气中甲烷等组分的体积含量，%；

α —烟气的过剩空气系数；

ϕ —大气的相对湿度；

$g_{H_2O}^g$ —饱和水汽含量，g/Nm³干气。根据空气温度查附录 B 表 B1。

L_o —天然气或煤气完全燃烧的理论空气量，Nm³/Nm³燃气；按公式 (A. 30) 计算

计算

$$L_o = \frac{2CH_4^y + \frac{7}{2}C_2H_6^y + \dots + \frac{3n+1}{2}C_nH_{2(n+1)}^y + \frac{1}{2}CO^y + \frac{3}{2}H_2S^y - O_2^y}{21} \quad (A. 30)$$

V_R 按公式 (A. 31) 计算

$$V_R = \left[M_R \times \frac{H_2O_R}{100} + M_{AH} \times \left(1 - \frac{H_2O_R}{100} \right) \times \frac{H_2O_R^l}{100} \right] \times \frac{22.4}{18} \quad (A. 31)$$

式中： M_R —每小时入窑原料量，kg/h；

H_2O_R —入窑原料附着水的质量含量，%；

$H_2O_R^l$ —干原料中结晶水的质量含量，%。

A. 12 窑尾各测试点烟气量的计算

窑尾各测试点包括各级预热器进出口、各级收尘器进出口烟气量，烟气量的计算可按照窑尾罩出口烟气量及窑尾罩出口至各测试点的漏风系数。公式 (A. 32) 计算

$$V_{zi} = V_F^o + V_F^o \times \left(1 - \frac{X_{sw}}{100} \right) \times \phi_{zi} \% \times (1 + 0.00124\phi \times g_{H_2O}^g) \quad (A. 32)$$

式中： V_{zi} —测试点烟气量，Nm³/h；

V_F^o —窑尾罩出口烟气量，Nm³/h；

X_{sw} —窑尾罩出口烟气含湿量，%；

ϕ —大气相对湿度；

$g_{H_2O}^g$ —饱和水汽含量，g/Nm³干气；

ϕ_{zi} —窑尾罩出口至测试点的漏风系数，%；按公式 (A. 17) 计算

A. 13 窑灰量的计算

A. 13.1 返回窑灰量按公式 (A. 33) 计算

$$M_{Hi}^F = \frac{V_{zi} \times C_{nzi} - V_{ci} \times C_{nci}}{1000} \quad (A. 33)$$

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烟气量，Nm³/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/Nm³。

各级收尘器总的返回窑灰量：

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

A. 13.2 烟囱排放窑灰量按公式 (A. 34) 计算

$$M_y^q = \frac{V_D \times C_{nD}}{1000} \quad (A. 34)$$

式中： M_y^q —烟囱排放窑灰量，kg/h；

V_D —电收尘出口烟气量，Nm³/h；

C_{nD} —电收尘出口湿烟气含尘浓度，g/Nm³。

A. 14 成品氧化铝产出量按公式 (A. 35) 计算

$$M_c = \left[\frac{M_R \times \left(1 - \frac{H_2O_R}{100}\right) \times \left(1 - \frac{H_2O_R^j}{100}\right)}{1 - \frac{W_c}{100}} + M_y \times \frac{A^y}{100} - M_H \times \frac{100 - W_H}{100} \right] \div 1000 \quad (\text{A. 35})$$

式中： M_c ——成品氧化铝产出量，t/h；
 M_R ——入窑原料量，kg/h；
 H_2O_R ——入窑原料附着水的质量含量，%；
 $H_2O_R^j$ ——干原料结晶水的质量含量，%；
 W_c ——成品氧化铝的灼减，%；
 M_y ——燃料消耗量，kg/h；（天然气或煤气作燃料时可以忽略）
 A^y ——重油应用基灰分的质量含量，%；（天然气作燃料时可以忽略）
 M_H ——烟囱排放窑灰量kg/h；
 W_H ——烟囱排放窑灰的灼减，%。

A. 15 表面散热损失热按公式 (A. 36) 计算

$$Q_7' = \frac{\sum q_i \times F_i}{M_c} \quad (\text{A. 36})$$

式中： Q_7' ——窑体及窑头罩、窑尾罩、预热器的表面散热损失，KJ/t；
 M_c ——成品氧化铝产出量，t/h；
 F_i ——第 i 部分的表面散热面积， m^2 ；
 q_i ——第 i 部分的平均表面热流， $KJ/m^2 \cdot h$ 。

q_i 可直接测定，也可按公式 (A. 37) 计算：

$$q_i = 20.41 \varepsilon \left[\left(\frac{273 + t_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_\varepsilon}{100} \right)^4 \right] + \alpha_d (t_b - t_\varepsilon) \quad (\text{A. 37})$$

式中： ε ——第 i 部分的表面黑度；
 t_b ——第 i 部分的平均表面温度， $^\circ C$ ；
 t_ε ——环境温度， $^\circ C$ ；
 α_d ——对流给热系数， $KJ/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ 。

环境无风时，

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

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

环境风速 $W_F < 5m/s$ 时，

$$\alpha_d = 22.16 + 15.05 W_F$$

环境风速 $W_F > 5m/s$ 时，

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

附录 B
(资料性)
热力工程数据

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

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			
			克/米 ³ _{湿气}	克/标米 ³ _{干气}	克/标米 ³ _{湿气}	克/公斤 _{干气}
38	1.135	6546	46.2	56.3	52.6	43.4
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 ³)
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/Nm³·°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