

② 铬矿, 氧化焙烧, 回转窑, 热工特性,

### 铬矿氧化焙烧回转窑热工特性综合研究

13-22

TQ 136.11

利西安柯 等

(俄) 化学工业, 1996, (2), 48-53 翻译 纪柱

与各种物料加工及化学工业有关的热工过程常常是在高温下进行。温度高低主要取决于被加工物料及相应的工艺技术。因此, 若热及温度状态失调, 被加工物料的品质就会出现明显下降, 甚至工艺过程遭到破坏, 从而有可能因易挥发组分损失导致物料明显软化形成炉糟。显然, 这与工艺及热状态密切相关。为了符合相应过程所需的热与温度状态, 必须正确地设计工业窑炉及各个部件、燃料燃烧设备及换热器等, 这些设备安置应当能使炉膛实现最佳热交换<sup>(1)</sup>。

物料在回转窑内连续运行的条件下, 控制焙烧过程是热工技术复杂任务之一。化学工业将这种窑炉用于炉料氧化焙烧制铬酸钠 $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ 。这种窑炉热量质量交换及热工数据还不多, 有的甚至彼此矛盾。为了工艺过程控制自动化, 必须了解许多参数。此过程控制的数学模型应考虑炉膛内热量质量转移特性及物料化学反应动力学。进行热工设施综合平衡研究, 可以得到为改进工艺过程控制所必需的可靠数据<sup>(2)</sup>。

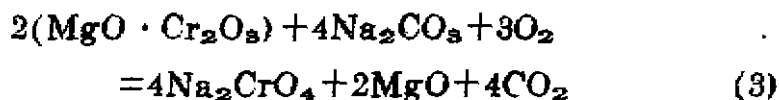
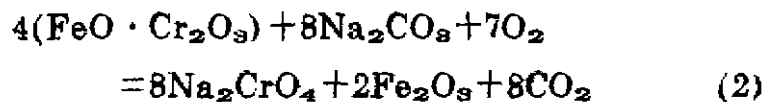
为了补充同歇反应器数据, 利用图1(图1略)所示的回转窑进行综合平衡研究, 以建立控制炉料(铬矿、纯碱、白云石及返渣)氧化焙烧过程的数学模型。

回转窑用天然气加热, 其体积百分组成为(%) :  $\text{CH}_4$  98.5;  $\text{C}_2\text{H}_6$  0.4;  $\text{C}_3\text{H}_8$  0.07;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  0.019;  $\text{CO}_2$  0.024;  $\text{O}_2$  0.065;  $\text{N}_2$  0.922。燃烧热 $Q_{\text{R}}=35387$ 千焦耳/立方米的天然气用量为1200~1300立方米/时。为了使燃料燃烧和使工艺反应得以进行, 往窑内通空气。大部

分空气靠引风机及天然气喷射形成的负压吸入，少部分空气（直至3000立方米/时）用鼓风机经特制的进风管在冷却筒内被熟料预热至120℃。图2试验容装有燃烧器，空气管装在天然气管之上250mm处。这种结构的燃烧器于燃烧过程中为天然气和空气在炉膛内充分混合创造了条件，从而保证有足够长的不能调节的火焰。但在规定几何条件及消耗指标下火焰在炉膛内不够坚挺和稳定，尽管必要时（实际上无此必要）在燃烧过程中可进行极小的调节。

用给料器将生料（铬矿32%，纯碱20.7%，白云石47.3%）连续送入窑内，与燃烧的气体逆流而行，回转窑转速2.5转/分，窑倾角为5°。平衡时，窑的平均产量为8吨/时。试验期间，改变窑的工作参数，以进行热平衡计算。

此类设备进行热平衡计算的复杂性，首先是炉料焙烧时的物理化学过程，即一部分料放热，另一部分吸热<sup>(9)</sup>。炉料氧化焙烧制铬酸钠时进行的氧化放热反应有：



焙烧过程中，除上述放热反应外，伴随一些中间化合物生成还有吸热反应（这些中间物进一步反应形成最终产物）。计算证明，由于放热及中间吸热反应的总热效应近似为零，热平衡计算时，收入项中放热反应的热量可以不考虑。但白云石分解吸收的热量则是热平衡支出项中的重要项目。

主要的吸热反应是炉料中CaCO<sub>3</sub>及MgCO<sub>3</sub>的分解：



由上述放热反应可知，为了实现工艺过程，必须往窑内输氧（氧也是天然气燃烧所必需的），亦即窑内气氛应具有高氧化能力。这样，在尾气中除了天然气燃烧产物（ $\text{CO}_2^{\text{气}}$ ， $\text{N}_2^{\text{气}}$ ， $\text{H}_2\text{O}^{\text{气}}$ ）外，还有氧化反应完成后，与工艺原料（ $\text{N}_2^{\text{料}}$ ）及水分（ $\text{H}_2\text{O}^{\text{料}}$ ）一起留下来的  $\text{CO}_2$ 。

这就导致了回转窑热平衡计算的第二种复杂性，即对空气消耗系数进行校正。

用水冷式气体取样管经试验窑尾端砖壁上的孔洞抽取窑气样品进行分析。

为了增加经取样管抽取的气体样，使用了喷射泵，对窑尾端各点用  $\Gamma \times \Pi - 3\text{m}$  气体分析仪取样分析  $\text{CO}_2$  及  $\text{O}_2$ （各点持续半小时）。用分析结果的平均值，按特罗依巴公式<sup>(4)</sup> 计算空气消耗系数（过剩系数）：

$$\alpha = 1 + U \cdot \text{O}_2 / \text{CO}_2$$

$$U = \frac{(V_{\text{CO}_2^{\text{气}}} + V_{\text{CO}_2^{\text{料}}})}{(V_{\text{O}_2^{\text{气}}} - V_{\text{O}_2^{\text{料}}})}$$

式中：U—系数 即  $\text{CO}_2$  总体积同  $\text{O}_2$  总体积之比；

$V_{\text{CO}_2^{\text{气}}}$ —天然气燃烧生成的  $\text{CO}_2$ ， $\text{m}^3/\text{m}^3$  天然气；

$V_{\text{CO}_2^{\text{料}}}$ —炉料焙烧析出的  $\text{CO}_2$ ， $\text{m}^3/\text{m}^3$  天然；

$V_{\text{O}_2^{\text{气}}}$ —天然气烧完所需氧  $\text{O}_2$ ， $\text{m}^3/\text{m}^3$  天；

$V_{\text{O}_2^{\text{料}}}$ —炉料氧化所需氧  $\text{O}_2$ ， $\text{m}^3/\text{m}^3$  天；

$\text{O}_2$ —窑尾气分析含  $\text{O}_2$ ，体%；

$\text{CO}_2$ —窑尾气分析含  $\text{CO}_2$ ，体%。

为了确定系数， $\mu$  燃烧天然气生成的  $\text{CO}_2$  和所需  $\text{O}_2$  依下式计算：

$$V_{CO_2} = 0.01(2CH_4 + 3.5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6.5C_4H_{10} - O_2)$$

两式括号内的分子式代表天然气中该成分的体积百分含量， $V_{CO_2}$  及  $V_{O_2}$  的单位均为  $m^3/m^3$  天。

炉料焙烧既因碱性氧化反应(式1)生成  $CO_2$ ，又因白云石分解(式5及6)放出  $CO_2$ 。前者重量由纯碱消耗重量  $G_{Na_2CO_3}$  计算：

$$G'_{CO_2} = G_{Na_2CO_3} \frac{M_{CO_2}}{M_{Na_2CO_3}} \quad \text{kg/时}$$

式中： $M_{CO_2}$  及  $M_{Na_2CO_3}$  分别为  $CO_2$  及  $Na_2CO_3$  的分子量。

纯碱消耗量由窑的生产能力及纯碱在生料中的分数计算：

$$G_{Na_2CO_3} = \rho \cdot n_{Na_2CO_3} \quad \text{kg/时}$$

式中： $\rho$ —回转窑生产能力(生料计)，kg/时；

$n_{Na_2CO_3}$ —生料中纯碱分数。

白云石分解放出的  $CO_2$  重量按窑生产能力、生料中白云石的分数及白云石分解出的  $CO_2$  分数计算：

$$G''_{CO_2} = \rho \cdot n_{\text{石}} \cdot n_{CO_2} \quad \text{kg/时}$$

式中的  $n_{\text{石}}$  为生料含白云石分数， $n_{CO_2}$  为白云石含  $CO_2$  分数。

试验窑平衡时的生产能力  $\rho = 8000 \text{kg/时}$ ，纯碱分数  $n_{Na_2CO_3} = 0.207$ ，白云石分数  $n_{\text{石}} = 0.473$ ，白云石中  $CO_2$  分数  $n_{CO_2} = 0.44$ 。

于是，炉料析出的  $CO_2$  总重量为：

$$\Sigma G_{CO_2} = G'_{CO_2} + G''_{CO_2}$$

利用下式将炉料析出的  $CO_2$  重量换算成体积，式  $\rho_{CO_2}$  为标准状态下  $CO_2$  密度 ( $\text{kg}/m^3$ )：

$$V_{CO_2} = G_{CO_2} / \rho_{CO_2} \quad m^3/时$$

由于变量  $V_{CO_2}$  及  $V_{O_2}$  均以单位天然气计，为了得到变量  $V_{CO_2}^{\text{料}}$ ，也要用析出的体积  $V_{CO_2}$  除以天然气消耗量  $\beta$ ：

$$V_{CO_2}^{\text{料}} = V_{CO_2} / \beta \quad m^3 / m^3 \text{天}$$

最后，炉料氧化焙烧需氧量按基本反应式(1)计算：

$$G_{O_2} = 1.5P_{Cr_2O_3} \cdot \frac{M_{O_2}}{M_{Cr_2O_3}} \quad \text{kg/时}$$

式中， $P_{Cr_2O_3}$  是以  $Cr_2O_3$  计的密生产能力  $kg/时$ ， $M_{O_2}$  及  $M_{Cr_2O_3}$  分别为  $O_2$  及  $Cr_2O_3$  的分子量。

试验窑平衡时，生料含铬矿 32%，矿含  $Cr_2O_3$  47.3%。

需氧量以体积计为 ( $\rho_{O_2}$  氧密度)

$$V_{O_2} = G_{O_2} / \rho_{O_2} \quad m^3 / \text{时}$$

$$V_{O_2}^{\text{料}} = V_{O_2} / \beta \quad m^3 / m^3 \text{天}$$

为了得到回转窑热工特性的客观数据，对各参数进行了多次测量。出窑熟料温度用铬—铝热电堆测量，热电堆的头部伸进回转窑前端落下的熟料流。热电堆读数用电位计测定。

回转窑尾气温度用带有两块石英护板的抽吸式热电偶XA测量，护板的作用是防止热电偶头端受窑壁热辐射影响。热电偶读数亦用便携式电位计测定。

为了查明窑壳的热损失，测量窑外壳表面的温度。为此使用特制的接触式热电偶，借助弹性薄片将热电偶的敞口式热端紧贴在窑壳上，顺窑长测出回转窑 12 个断面圆周上的平均温度。二次仪表使用便携式毫伏计。

环境空气温度则用玻璃温度计测量：

窑壳热损失依下式计：

$$q = 0.001 \alpha^* (t_{\text{壳}} - t_{\text{环}}) \cdot F_{\text{壳}}$$

式中： $\alpha_{壳}$ —窑壳外表面向环境空气传热系数，瓦/ $m^2 \cdot$ 度；

$t_{壳}$ —窑壳外表面温度， $^{\circ}C$ ；

$t_{环}$ —环境空气温度， $^{\circ}C$ ；

$F_{壳}$ —窑壳外表面积， $m^2$ 。

传热系数  $\alpha_{壳}$  按伊万佐娃的静止表面方程<sup>(9)</sup>计算，考虑到在窑转速2.5速转/分时，窑外壳点的圆周速度  $W_{壳}$  仅为0.33m/秒。

$$\alpha_{壳} = 10 + 0.06t_{壳} \quad \text{瓦}/m^2 \cdot \text{度}$$

为了进行回转窑热平衡计算，除了天然气消耗外，还需考虑进窑空气的热耗，以及工艺气体和燃烧尾气的带损。

如上所述，由于燃烧装置的特殊结构（见图2），燃烧天然气和使炉料氧化所需的空气，用两种方式送进炉膛。大部分空气在引风机及天然气喷射形成的负压下从大气经窑头开口吸入，其量无法测量，只能经计算确定。少部分空气用鼓风机吹入已预热过的空气，其温度用玻璃温度计测，其量用流量管及微压计测定。

送进炉膛的空气总量由下式算出：

$$V_{空总} = 4.76 \alpha \beta (V_{O_2} + V_{O_2}^{预}) \quad m^3/时$$

式中  $\beta$  为天然气消耗量  $m^3/时$ 。

然后，由空气总量  $V_{空总}$  与预热过的空气量  $V_{空预}$  之差，算出从大气吸入的空气量：

$$V_{空吸} = V_{空总} - V_{空预} \quad m^3/时$$

所有测得的参数及算出的变量见下表，它们都是计算（铬矿氧化焙烧制铬酸钠的）回转窑热平衡所必需的<sup>(8-10)</sup>。

参 数	单 位	数 值
窑生产能力	kg/时	8000
生料组成: 铬	%	32
生料组成: 碱	%	20.7
生料组成: 白云石	%	47.3
生料水分	%	1.0
天然气燃烧热	千焦耳/m <sup>3</sup>	35387
天然气需空气理论量	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	9.405
天然气耗量	m <sup>3</sup> /时	1242
空气耗量	m <sup>3</sup> /时	2437
空气总耗量	m <sup>3</sup> /时	19078
空气量	m <sup>3</sup> /时	16641
尾气平均组成: CO <sub>2</sub>	%	13.3
尾气平均组成: O <sub>2</sub>	%	7.10
计算系数U的函数: $V_{CO_2}^*$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 天	1.9881
计算系数U的函数: $V_{CO_2}^*$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 天	0.9961
计算系数U的函数: $V_{CO_2}^*$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 天	0.958
计算系数U的函数: $V_{CO_2}^*$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 天	0.215
空气过剩系数		1.478
从大气吸入的空气量	m <sup>3</sup> /时	30
从鼓入预热空气量	m <sup>3</sup> /时	114
尾气量, 包括燃烧产物及工艺气体	m <sup>3</sup> /时	2074
尾气温度	°C	66
生料出窑温度	°C	31
生料出窑温度	°C	92
白云石分解热 $q_d$	千焦耳/kg	153
白云石分解热 $q_d$	%	3
单位窑壳表面热损失平均值	千瓦/m <sup>2</sup>	1.514
窑壳表面热损失平均值	千瓦/m <sup>2</sup>	0.975
窑壳表面积	m <sup>2</sup>	41.5
窑壳外表面积	m <sup>2</sup>	60

根据测定及计算结果, 生产各酸钠的回转窑热平衡见表:

热平衡, 收入项

名称及计 算 式	千 瓦	%
燃料化学热 $Q_{化} = \beta \cdot Q_m^0 = \frac{1242 \times 35387}{3600}$	12208	97.75
吸入的预热空气物理热 $Q_{吸} = \frac{V_{空气} \cdot t_{空气} \cdot C_p}{3600} = \frac{2437 \cdot 115 \cdot 1.301}{3600}$	101	0.81
从大气吸入的air的物理热 $Q_{吸} = \frac{V_{空气} \cdot t_{空气} \cdot C_p}{3600} = \frac{6641 \cdot 30 \cdot 1.297}{3600}$	160	1.4
合 计	12469	100

名称及计算式	千瓦	%
加热生料耗热 $Q_{料} = P \cdot C_{料}(t'_{料} - t_{料})$ $= 8000 \times 1.45(921 - 30) / 3600$	2870	23.0
白云石分解耗热 $Q_{d} = q_{d} \cdot \rho \cdot n_{d}$ $= 1535 \times 8000 \times 0.473 / 3600$	1613	12.91
料中水分加热、蒸发及过热的耗热 $Q_{水} = 0.01(W_{始} - W_{终})P[C(100 - t_{水始}) + i_{蒸} + C_{汽}(t_{尾气} - 100)]$ $= 0.01(1.01 - 0) \times 8000[4.187(100 - 30) + 2675 + 2.1(660 - 100)] / 3600$	93	0.74
尾气热损失 $Q_{尾气} = V_{尾气} \cdot t_{尾气} \cdot C_{尾气}$ $= 20744 \times 660 \times 1.413 / 3600$	5375	43.04
窑灰热损失 $Q_{灰} = P_{灰} \cdot C_{灰} \cdot t_{灰}$ $= 0.13 \times 8000 \times 1.214 \times 660 / 3600$	231	1.85
窑壳表面热损失 $Q_{壳} = q_{壳} \cdot F_{壳}$ $= 1.504 \times 414.5$	623	5.00
窑头砌筑物表面热损失 $Q_{头} = q_{头} \cdot F_{头}$ $= 0.975 \times 60$	58	0.43
窑头开口热辐射损失 $Q_{辐} = 0.001C_0(T_{窑} / 100)^4 \times F_0 \times \Phi$ $= 0.001 \times 5.7[(1000 + 273) / 100]^4 \times 5.5 \times 0.9$	741	5.93
未考虑到的热损失	885	7.1
合计	12489	100

表中： $C_0$ —绝对黑体辐射系数 瓦/ $m^2 \cdot K$

$T_{窑}$ —窑头段的窑温，K(绝对温度)

$F_0$ —热辐射所经开口的面积， $m^2$

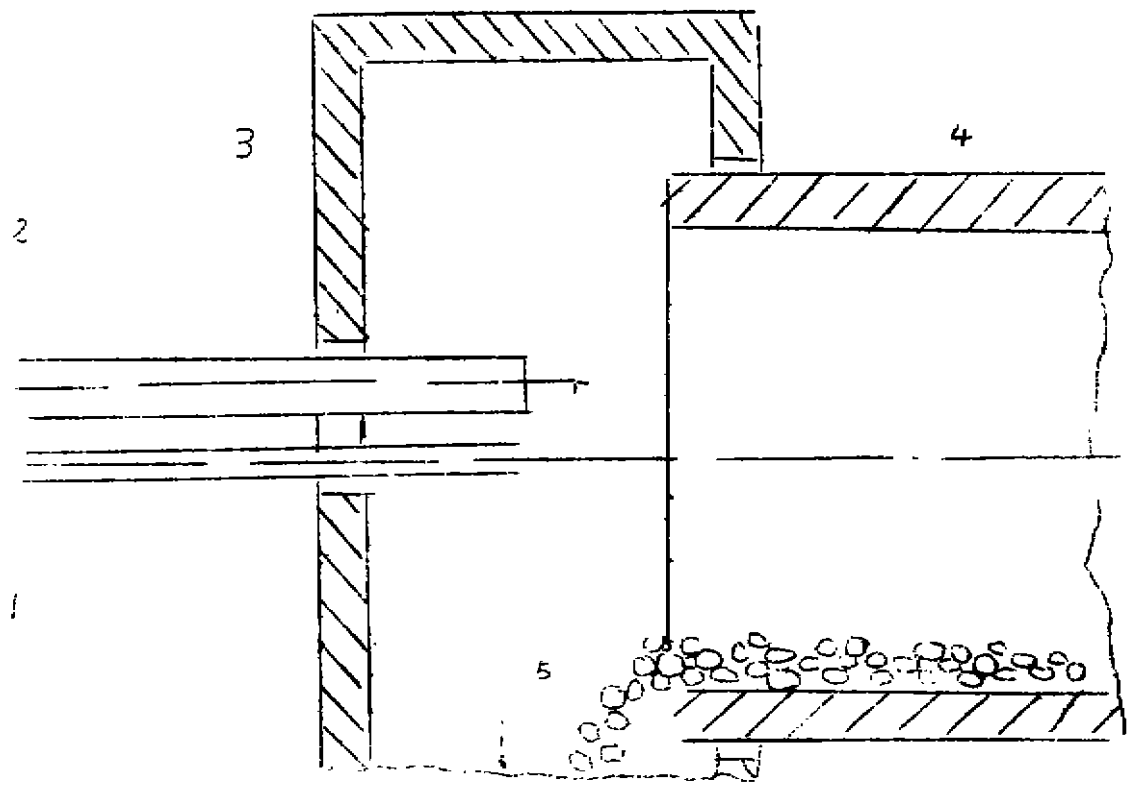
$\Phi$ —遮光系数

$C_{水}$ 、 $C_{料}$ 、 $C_{汽}$ 、 $C_{尾气}$ 、 $G_{水}$ 、生料、水蒸汽、尾气、窑灰的比热



对试验窑的上述热平衡分析证明：尾气热损失( $>43\%$ )是最主要的热损失。这是由于尾气温度高( $660^{\circ}\text{C}$ )且量大(由于从周围环境吸入空气，其量几乎增大1倍)。另外，不太高的窑壳热损失( $5.0\%$ )证明：窑的绝热性能很好。因此，绝热的回转窑的有效热几乎达到 $36\%$ ，如果考虑空气预热水平还较低，可以认为此窑在同类型装置中热效率是很高的。

但是，单位热耗相当高，以标准燃料计，其消耗为 $187.5\text{kg}/\text{t}$ 生料。因此，必须综合考虑回转窑节能并予以实施。更有效的一种热工制度是：改进燃烧装置，使之可以调节火焰长度以适应炉料组成及回转窑生产能力。对炉膛外缘热交换进行优化，有可能提高炉料吸热作用并降低尾气温度，调整空气消耗系数，从而减少热损失，并建立用以计算热工特性优化参数的回转窑热量质量交换的数学模型。



- 1. 天然气喷管
- 2. 热空气进气管
- 3. 回转窑燃烧端
- 4. 回转窑
- 5. 熟料

图2 窑头燃烧装置图