

文章编号: 1004-0609(2004)01-0138-04

# 氧化铝熟料窑喷射干燥段参数的仿真优化<sup>①</sup>

马爱纯<sup>1</sup>, 周子民<sup>1</sup>, 李旺兴<sup>2</sup>

(1. 中南大学 能源与动力工程学院, 长沙 410083;

2. 中国铝业股份有限公司 郑州轻金属研究院, 郑州 450041)

**摘 要:** 以  $d4.5\text{m} \times 90\text{m}$  熟料窑的喷射干燥段为研究对象, 建立了三维传热、传质数学模型。应用数值方法, 研究了不同窑尾压力和料浆粒径时, 窑内温度分布和水蒸气的浓度分布, 并对操作参数和工艺参数进行了优化。结果表明: 窑尾负压和生料浆的平均粒径对窑内温度分布和水蒸汽浓度分布有较大影响; 需要提高窑尾温度和窑尾烘干能力时可提高负压, 反之则减小负压; 减小料浆粒径, 有利于降低窑尾烟气温度, 加快物料的升温过程; 对直径为  $4.5\text{m}$  左右的大型回转窑, 窑尾负压可根据窑况在  $-200 \sim -300\text{Pa}$  之间调节, 生料浆的平均粒径不宜大于  $0.1\text{mm}$ 。

**关键词:** 氧化铝熟料窑; 喷射干燥; 温度分布; 仿真优化

中图分类号: TK124

文献标识码: A

## Parameters optimization of spray drier zone in alumina clinker rotary kiln

MA Aì-chun<sup>1</sup>, ZHOU Jie-min<sup>1</sup>, LI Wang-xing<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Light Metal, China Aluminum Corp, Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** A 3-D numerical model of spray drier zone in a  $d4.5\text{m} \times 90\text{m}$  alumina rotary kiln was established. With the spray drier model, the effects of particle size of raw slurry and pressure of kiln end on temperature and water vapor concentration profile in kiln are studied numerically and some parameters are optimized. The results show that the pressure of kiln end and particle diameter of raw slurry affect the performance of spray drier zone obviously. Drying capability can be enhanced by increasing negative pressure of kiln end and decreasing mean particle diameter of raw slurry. According to the work conditions, the pressure of kiln end is supposed to be regulated between  $-200 \sim -300\text{Pa}$  and the mean particle diameter of raw slurry should be within  $0.1\text{mm}$  for large kiln.

**Key words:** alumina rotary kiln; spray drier; temperature profile; numerical simulation

喷入法喂料的氧化铝熟料窑的预热分解带较长, 占全窑长的  $60\% \sim 65\%$ <sup>[1]</sup>, 是整个窑传热的薄弱环节, 也是制约熟料窑提高热效率、降低能耗的重要因素。要增强这个薄弱环节的传热, 必须提高窑尾烘干能力, 减轻预热分解带的加热负担, 延长物料在该带的停留时间<sup>[2~4]</sup>, 使进入烧成带前的物料温度较高, 从而提高熟料的溶出率<sup>[5]</sup>。同时, 提

高窑尾烘干能力, 还可降低出窑烟气温度, 减少热损失, 提高熟料窑热效率。

窑尾烟气温度和水蒸汽浓度分布是衡量喷射干燥的重要指标, 受料浆粒径和窑尾压力变化的影响较大。由于熟料窑高温封闭的工作环境, 窑内各相的热工参数很难进行检测, 本文作者应用计算机仿真模拟, 研究料浆粒径和窑尾压力变化对喷射干燥

① 基金项目: 国家教育部博士点基金奖励项目(20010533009)

收稿日期: 2003-01-22; 修订日期: 2003-05-30

作者简介: 马爱纯(1972-), 女, 讲师, 博士研究生。

通讯作者: 马爱纯, 博士研究生; 电话: 88761111. E-mail: maaichun@yahoo.com.cn

段窑内温度、水蒸汽浓度分布等参数的影响规律, 并对操作参数和工艺参数进行了优化。

## 1 数学模型

### 1.1 解析域及网格划分

以某厂  $d4.5\text{m} \times 90\text{m}$  氧化铝熟料窑为研究对象。距窑尾 30m 内为刮料器和扬料板区域, 该段物料以雾状喷出, 与高温烟气进行强烈的热交换, 然后又受到扬料板的作用, 以料幕形式与烟气进行热交换, 主要脱除料浆中的附着水和结晶水<sup>[6]</sup>, 这一带称为喷射干燥带。其烘干能力对整个窑的性能和指标非常重要, 故以这一段为解析区域。考虑刮料器、扬料板及返灰的影响, 内径取 4.1m, 轴向长度方向取 30m 的窑体再加 1.5m 窑尾罩, 并考虑 3.5% 的倾斜。图 1 所示为熟料窑简图<sup>[7]</sup>。

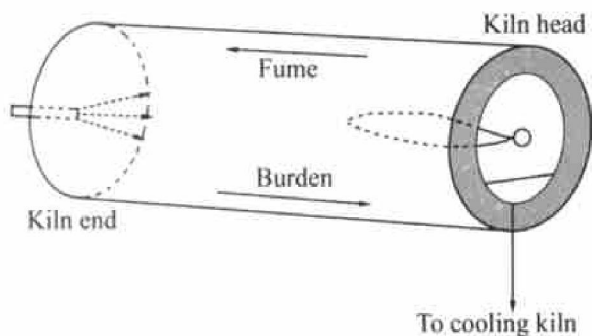


图 1 熟料窑简图

Fig. 1 Plan sketch of alumina rotary kiln

采用先进的多块网格结构及结构化非均匀网格技术, 轴向均匀划分为 63 个网格节点, 径向在中心区域因喷枪直径较小, 及物料强烈的湍流作用, 网格划分较密, 其它区域考虑计算成本划分较疏, 共 6 万多单元。横截面和纵截面网格划分如图 2 所示。

### 1.2 数学模型

#### 1) 喷射干燥模型

在喷射干燥模型<sup>[8]</sup>中, 颗粒的总流动通过追踪小量穿过连续流体的颗粒而建模, 各颗粒穿过连续相时被独立地追踪。模型中颗粒包含了一个传质分量和一个传热分量。颗粒是否低于沸点由 Antoine 方程决定并由式 (1) 给出

$$p_{\text{vap}} = \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right) \quad (1)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数。若蒸汽压  $p_{\text{vap}}$  高于气相压力则颗粒沸腾, 反之则低于沸点。

当颗粒超过沸点时, 质量传递由对流传热支

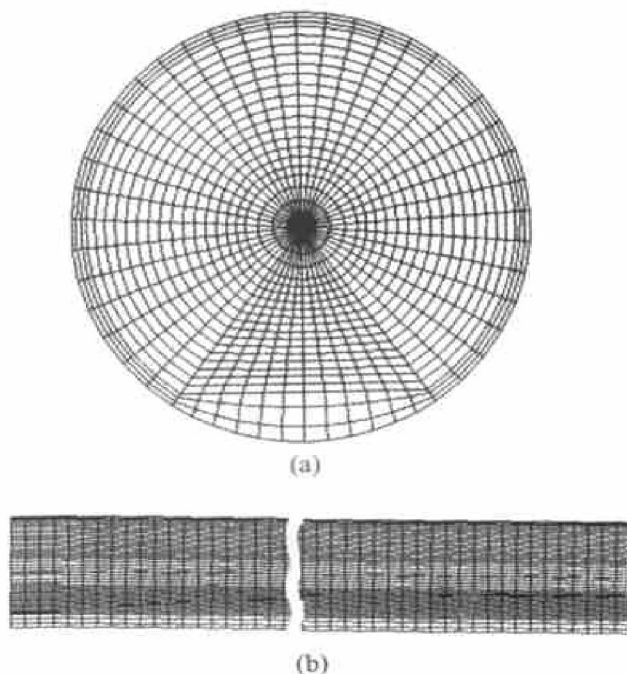


图 2 解析域横截面和纵截面网格划分

Fig. 2 Grid plot in cross and longitudinal section of computational zone

(a) —Grid plot in cross section;  
(b) —Grid plot in longitudinal section

配, 表达式如下:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{Q_c}{V} \quad (2)$$

当颗粒低于沸点时, 质量传递由以下公式给出:

$$\frac{dm}{dt} = \pi d \rho D Sh \frac{W_c}{W_G} \lg \left[ \frac{1-x}{1-x_G} \right] \quad (3)$$

式中  $T$  为颗粒温度;  $Q_c$  为对流传热;  $V$  为蒸发潜热;  $d$  是颗粒直径;  $\rho$ 、 $D$  是连续相中质量分数的扩散系数;  $Sh$  是谢伍德准数;  $W_c$  和  $W_G$  是水蒸汽和连续相中混合物的分子量,  $x$  和  $x_G$  是液滴和汽相中的摩尔分数。当颗粒中所有水分已经蒸发时, 传质速度设置为 0。

#### 2) 边界条件

入口速度: 假定料浆流量  $76\text{m}^3/\text{h}$ , 约  $35.34\text{kg/s}$ ; 烟气速度根据窑内烟气量及烟气温度计算, 约  $13.32\text{m/s}$ 。

出口采用压力边界条件, 对于近壁面, 沿流动方向采用壁面函数。生料浆初始温度为  $60^\circ\text{C}$ , 水分含量为  $36.0\%$ 。具体工况计算参数如表 1 所示。

## 2 计算结果与分析

图 3 给出了窑内烟气温度分布计算结果。由图

表 1 工况计算参数表

Table 1 Calculated conditional parameters

| Case | $v_{\text{gas}} /$<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $t_{\text{gas}} /$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $Q_{\text{slurry}} /$<br>( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $d_{\text{slurry}} /$<br>mm | $p^* /$<br>Pa |
|------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| 1    | 13.32                                                    | 1050                                     | 35.34                                                        | 0.1                         | -300          |
| 2    | 13.32                                                    | 1050                                     | 35.34                                                        | 0.1                         | -200          |
| 3    | 13.32                                                    | 1050                                     | 35.34                                                        | 5.0                         | -300          |
| 4    | 13.32                                                    | 1050                                     | 35.34                                                        | 1.0                         | -300          |

$p^*$  is pressure at kiln end;  $w(\text{H}_2\text{O})$  is 36%.

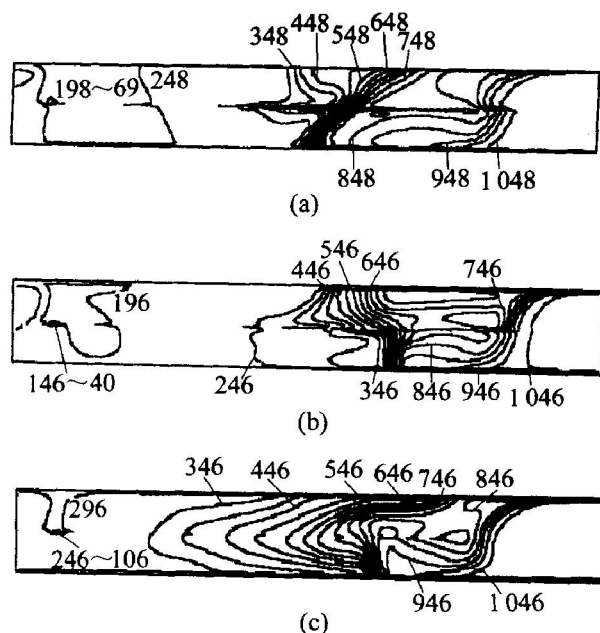


图 3 喷射干燥段内烟气温度分布

Fig. 3 Temperature profile of fume in spray drier zone

(a)  $-d_{\text{slurry}} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -300 \text{ Pa}$  (Case 1);

(b)  $-d_{\text{slurry}} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -200 \text{ Pa}$  (Case 2);

(c)  $-d_{\text{slurry}} = 1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -300 \text{ Pa}$  (Case 4)

3(a)、(b)可知,物料平均粒径相同时,窑尾负压对喷射干燥段内烟气温度分布有较大影响。负压越大,窑内烟气温度衰减越慢,出窑烟气温度越高;反之,则窑内烟气温度衰减加快,出窑烟气温度降低。窑尾负压为 $-300 \text{ Pa}$ 时,出窑烟气平均温度为 $248^{\circ}\text{C}$ ;负压为 $-200 \text{ Pa}$ 时,出窑烟气温度降低到 $215^{\circ}\text{C}$ 左右。此外,当喷射干燥区域的入口烟气温度相同时,窑尾负压大小对离开该段的固体物料颗粒的温度也有一定影响。负压较大时,由于烟气温度衰减缓慢,所以物料加热速度较均匀;负压较小时,由于烟气温度衰减较快,物料开始加热较慢,而后加热速度增快。

图 3(a)、(c)比较了料浆粒径对窑内烟气温度分布的影响。物料平均粒径增加到 $1 \text{ mm}$ 时,窑内

烟气温度衰减较平均粒径为 $0.1 \text{ mm}$ 时慢,窑尾烟气平均温度上升到 $264^{\circ}\text{C}$ 左右。可见物料粒度增加,使换热面积减小,窑内换热效果变差,出窑烟气温度将上升,而物料被加热的温度则降低,平均粒径为 $1 \text{ mm}$ 的物料在喷射干燥段出口处只被加热到 $240^{\circ}\text{C}$ 左右。由于物料温度较低,加重了预热分解带的负担,使预热分解带增长,烧成带相应缩短,影响熟料的产量和质量。

喷射干燥中另一个重要的指标是窑内水蒸汽的浓度分布。图 4 所示为窑内水蒸汽浓度分布计算结果。与图 3 中的烟气温度分布相对应,水蒸汽浓度在靠近料浆喷嘴 $15 \text{ m}$ 处较高,其余区域很低,而且负压较高时,料浆中水分蒸发也较快,相应地,负压较低时,靠近窑尾区域温度相对较低,水蒸汽蒸发区域增长。所以增大窑尾负压,可提高窑尾区域的温度,增强窑尾烘干能力。在相同的窑尾负压下,增大料浆颗粒粒度,将使窑尾的烘干能力降低。如图 4(c)所示,当生料浆颗粒粒度增加到 $1 \text{ mm}$ ,窑内水蒸汽浓度急剧减小,约为图 4(a)中的一半。

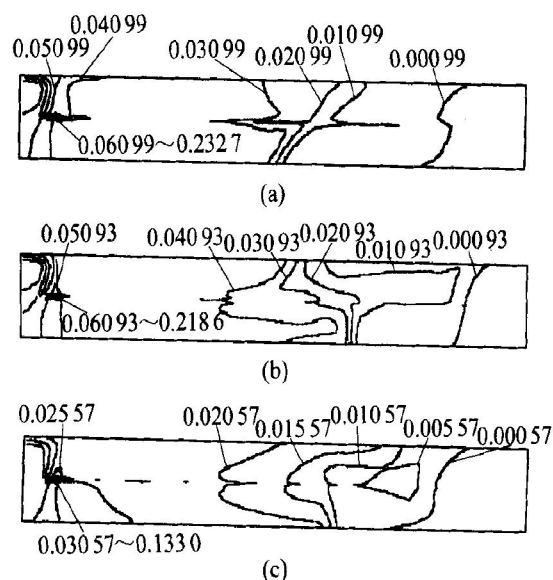


图 4 喷射干燥段内水蒸汽浓度分布

Fig. 4 Moisture content profile in spray drier zone

(a)  $-d_{\text{slurry}} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -300 \text{ Pa}$  (Case 1);

(b)  $-d_{\text{slurry}} = 0.1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -200 \text{ Pa}$  (Case 2);

(c)  $-d_{\text{slurry}} = 1 \text{ mm}$ ,  $p^* = -300 \text{ Pa}$  (Case 4)

### 3 讨论

根据以上计算结果可以看出,窑尾负压大小对窑内温度分布和水蒸汽浓度分布影响很大。负压增

大, 窑内抽力增大, 过剩空气增多, 火焰被拉长, 窑内烟气温度衰减减慢, 出窑烟气温度升高, 余热损失也将增加, 但窑尾的烘干能力增强; 相反, 负压减小, 可降低出窑烟气温度, 减少余热损失, 但燃烧带变短, 窑内温度衰减加快, 窑尾烘干能力下降, 使预热分解带的加热能力也降低。所以必须将窑尾负压控制在合适范围。生产中窑尾负压应在 $-200 \sim -300 \text{ Pa}$ 之间, 并根据窑况进行调节。需要加长火焰、提高窑尾温度时可提高负压, 相反则减小负压。另外, 生料浆的平均粒径大小对窑内温度、水蒸汽浓度分布有一定影响。小粒径有利于降低窑尾烟气温度, 减小物料离开烘干带时的含水量, 加快物料的升温过程。计算结果显示, 窑尾负压相同( $-300 \text{ Pa}$ )情况下, 生料浆平均粒径由 $0.1 \text{ mm}$ 增大到 $1 \text{ mm}$ 时, 窑尾烟气平均温度由 $248 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $264 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 窑内烟气中水分浓度显著减小, 表明料浆没有得到有效的烘干, 加重了预热分解带的负担。所以料浆的平均粒径应不大于 $0.1 \text{ mm}$ 。现场的料浆平均粒径一般应控制在 $0.097 \sim 0.125 \text{ mm}$  ( $120 \sim 160 \text{ 目}^{[10]}$ )内。

对该窑进行的热工综合测试结果<sup>[9]</sup>表明, 窑尾负压为 $-300 \text{ Pa}$ 时, 窑内过剩空气系数为 $1.38$ , 窑尾烟气温度为 $236 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与仿真计算结果 $248 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比, 两者相差 $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 这主要是由于测试时测点位置在出窑后 $10 \text{ m}$ 处, 烟气受到窑尾漏风的冷却而温度下降。当窑尾负压为 $-200 \text{ Pa}$ 时, 出窑烟气温度的仿真计算结果为 $215 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 窑内过剩空气系数约为 $1.08$ 左右。文献[1]认为, 生产正常时, 合适的窑内空气过剩系数应为 $1.10$ 。仿真计算结果与热工测试及工程实际基本一致。

## 4 结论

1) 加强窑尾喷射干燥段的换热, 减小烟气的出窑温度, 能增强窑尾的烘干能力, 强化预热分解带的传热和分解过程, 提高熟料窑的热效率和产量。

2) 生产中窑尾负压应在 $-200 \sim -300 \text{ Pa}$ 之间根据窑况进行调节。需要加长火焰、提高窑尾烘干能力时可提高负压, 反之则减小负压。

3) 缩小料浆粒径, 有利于降低窑尾烟气温度, 减小物料离开烘干带时的含水量, 加快物料的升温。

## REFERENCES

[1] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出

版社, 1993. 234 - 235.

YANG Zhong-yu. Process Technology of Alumina[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993. 234 - 235.

[2] Lebas E, Hanrot F, Ablitzer D, et al. Experimental study of residence time, particle movement and bed depth profile in rotary kilns[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995, 73: 173 - 180.

[3] Sai P S T, Surender G D, Damodaran A D, et al. Residence time distribution and material flow studies in a rotary kiln[J]. Metall Mater Trans B, 1990, 21B: 1005 - 1011.

[4] Woodle G R, Munro J M. Particle motion and mixing in a rotary kiln[J]. Powder Technology, 1993, 76: 241 - 245.

[5] 《联合法生产氧化铝》编写组. 联合法生产氧化铝—基础知识[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1975. 38 - 44.  
Compiling Group of "Bayer-Sintering Combination Process of Alumina". Bayer-Sintering Combination Process of Alumina—Basic Knowledge[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1975. 38 - 44.

[6] Mazeli B A. 冶金工业部前有色金属工业管理局编译科译. 轻金属冶炼[M]. 北京: 中国工业出版社, 1961. 164 - 166.

Mazeli B A. Editor Office of Ministry of Metallurgical Industry transl. Smelting of Light Metal[M]. Beijing: Chinese Industry Press, 1961. 164 - 166.

[7] Mastorakos E, Massias A, Tsakiroglou C D, et al. CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry[J]. Applied Mathematical Modelling, 1999, 23: 55 - 76.

[8] Sperring T P, Mpdwell J O, Gethin D T. Fluid and heat transfer mechanism in the spray desposition of ubular performs[J]. International Journal of Numenical Methods for Heat and Fluid Flow, 2000, 10(3): 268 - 285.

[9] 马爱纯, 周子民, 李旺兴. 混联法氧化铝生产中熟料窑节能降耗的研究[J]. 冶金能源, 2003, 22(2): 7 - 10.

MA Aì-chun, ZHOU Jie-min, LI Wang-xing. Study on energy saving in soda-lime sintering process of alumina production[J]. Metallurgical Energy, 2003, 22(2): 7 - 10.

[10] 《动力工程师手册》编辑委员会编. 动力工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 3 - 84.

Edit Committee of "Handbook of Power Engineer". Handbook of Power Engineer[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. 3 - 84.

(编辑 龙怀中)