

氧化铝熟料窑窑皮厚度的数值研究

周子民¹, 马爱纯¹, 李旺兴²

(1. 中南大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙, 410083;

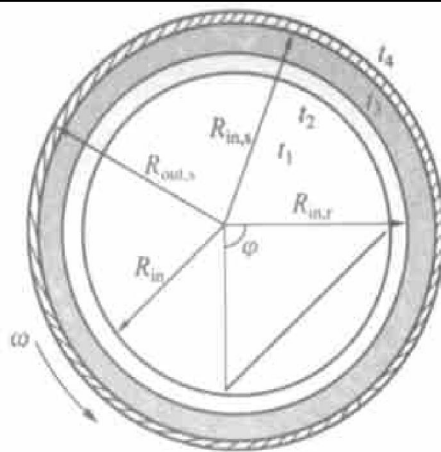
2. 中国铝业股份有限公司郑州轻金属研究院, 河南 郑州, 450041)

摘要: 以一直径为 4.5 m、高为 90 m 熟料窑的烧成带为研究对象, 应用数值计算的方法, 对烧成带有窑皮存在和没有窑皮存在时耐火层内的温度分布进行对比分析, 同时对窑皮在不同厚度时耐火层内的温度分布进行数值计算。计算结果表明: 烧成带无窑皮时, 窑外壁温度较高, 在 232~270 °C 之间; 当窑皮厚度从 200 mm 增大到 300 mm 时, 窑外壁温度从 215 °C 降低至 161 °C; 在熟料窑操作中, 窑皮过薄将缩短耐火内衬的使用寿命, 并限制加煤提产; 窑皮过厚则缩小了烧结带的有效截面积, 也限制了熟料窑的提产; 对直径为 4.5 m 左右的大型回转窑, 窑皮厚度可根据生料浆成份和窑况在 200~300 mm 内调节。

关键词: 氧化铝熟料窑; 窑皮; 耐火内衬; 温度分布; 数值计算

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9792(2003)06-0633-04

在氧化铝熟料窑的各个部分, 烧成带的温度最高。物料在此带的温度由 1 000 °C 左右加热到 1 200 ~ 1 300 °C, 而燃烧产物——窑气的实际平均温度约为 1 500 °C^[1]。加之物料的冲刷磨损, 在熟料窑生产过程中, 烧成带耐火内衬的使用寿命较短, 往往不能满足熟料窑增长运行周期的需要。据统计, 在影响熟料窑运转率的因素中, 内衬更换的影响最大。内衬更换费用较高, 而且更换耐火内衬而停窑所导致的损失也非常大。为了更好地保护耐火内衬, 通常在耐火层上粘结一层一定厚度的熟料层, 该熟料层称为窑皮。窑皮的导热系数远小于耐火层的导热系数^[2], 在窑皮内温度迅速降低, 可对耐火层起很好的隔热保护作用, 并且使耐火层免于火焰和物料的高温冲刷。但窑皮厚度要适宜, 窑皮层太薄和太厚都将限制熟料窑的提产。所以, 研究最佳的窑皮厚度对提高耐火层的使用寿命和提产很有必要。



R_{in} —窑皮内径; t_1 —窑气温度;
 $R_{in,r}$ —耐火层内径; t_2 —窑皮内衬厚度;
 $R_{in,s}$ —窑壁内径; t_3 —耐火衬内侧温度;
 $R_{out,s}$ —窑壁外径; t_4 —窑壳外表温度;
 φ —物料中心角; ω —转速, 2.0 r/min
图 1 熟料窑横剖面上几何参数

1 数学模型的建立

1.1 解析域及网格划分

以某厂一直径为 4.5 m、高为 90 m 氧化铝熟料窑烧成带为研究对象。解析域中烧成带长度方向取 10 m 计算, 横剖面上几何参数如图 1 所示。

图 1 中的烧成带耐火层采用高铝砖, 厚度为 200 mm, 由熟料产量、窑转速和倾斜度等参数计算得到物料中心角为 66°~98°。数值计算中对有窑皮存在和无窑皮存在以及有窑皮存在但窑皮厚度不同时耐火层和窑皮内温度分布分别进行对比计算。

在网格划分过程中, 采用先进的多块网格结构

收稿日期: 2003-01-22

基金项目: 国家教育部博士点基金资助项目(20010533009)

作者简介: 周子民(1948-), 男, 山东济南人, 中南大学教授, 从事热工测量、热工仿真的研究。

以及结构化非均匀网格技术, 轴向均匀划分为 30 个网格节点, 径向在中心区域的温度变化不大, 故网格划分较疏; 而熟料、窑皮和耐火层为主要研究对象, 网格划分较密. 横截面网格划分如图 2 所示.

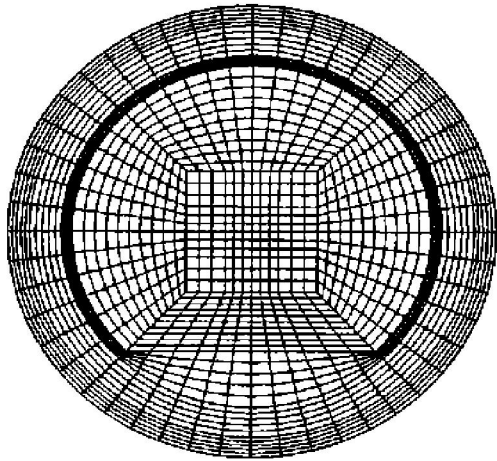


图 2 熟料窑横剖面网格划分

1.2 数学模型

1.2.1 基本方程

对窑内传热过程, 其模型可由连续性方程、动量方程、能量方程分别表示如下^[3,4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = B + \nabla \cdot \mathbf{\Pi}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} H) - \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_T}{Pr} \right) \nabla H = \frac{\partial p}{\partial t} + Q_{rad} + Q_R. \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度; \mathbf{U} 为气体的速度矢量; B 为体积力; H 为总热焓; Pr 为普朗特数; c_p 为气体比热容; λ 为气体导热率; μ_T 为湍流粘度; p 为压力.

辐射计算采用蒙特卡洛法和单个灰体气体模型^[5-7].

1.2.2 边界条件

本计算中各入口处风速和温度、出口压力、物料填充率和窑转速等是在已完成的热工测试、热工计算和仿真工作的基础上确定.

进口采用 Dirichlet 条件, 直接设定入窑速度; 出口采用压力边界条件, 计算区域出口压力为 -50 Pa; 对于近壁面, 沿流动方向采用壁面函数. 具体计算工况如表 1 所示. 其中, 燃煤消耗指每吨熟料.

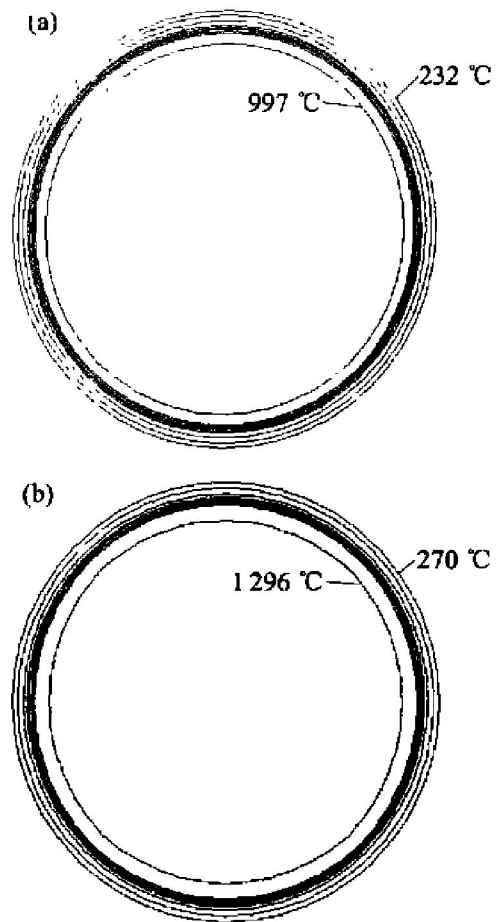
表 1 计算工况

工况	熟料产量/ (t·h ⁻¹)	燃煤消耗/ (kg·t ⁻¹)	烟气温度/ °C	气体速度/ (m·s ⁻¹)	填充率/ %
1	60.0	224.0	1 000~ 1 500	15.3~ 21.3	9.1~ 10.2
2	60.0	224.0	1 000~ 1 300	12.0~ 14.0	0.03~ 0.07

2 计算结果与分析

2.1 计算结果

图 3 所示为烧成带无窑皮, 烟气温度分别为 1 000 °C 和 1 300 °C 时窑内衬温度分布情况.



(a) — $t_{气}$ = 1 000 °C; (b) — $t_{气}$ = 1 300 °C

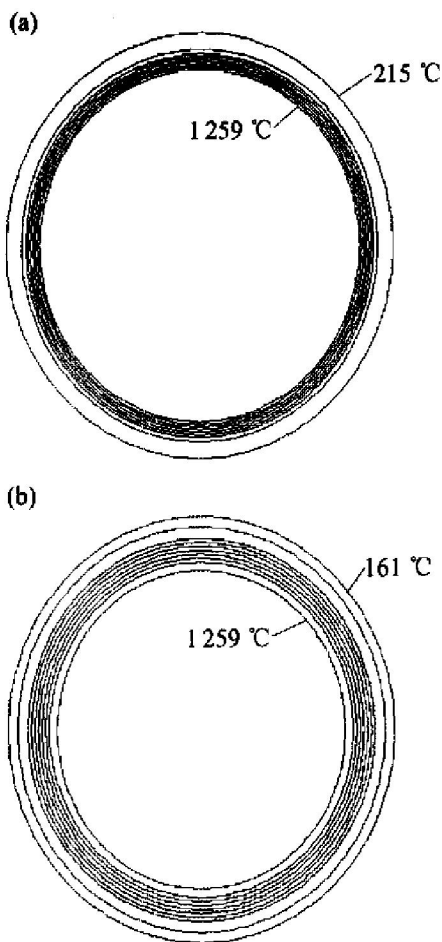
图 3 无窑皮时耐火内衬温度分布

由图 3 可见, 当烟气温度为 1 000 °C 时, 窑外壁温度为 232 °C, 当烟气温度增加到 1 300 °C 时, 窑外壁温度也相应增加到 270 °C. 对混联法氧化铝生产工艺, 生料浆中铝硅比为 3.20 左右, 这时烧成带烟气平均温度约为 1 450~1 500 °C; 而与高温烟气接触的窑皮或耐火层(无窑皮时)区域, 温度为 1 000~1 300 °C. 所以, 在烧成带, 若无窑皮保护, 则窑外壁温

度较高,约为 232~ 270 °C. 对于熟料窑内烧成带以外的其他区域,气体平均温度都在 1 300 °C 以下,与高温烟气接触的耐火层温度在 1 000 °C 以下,窑外壁温度在 232 °C 以下. 所以对燃烧带外的其他区域不需要窑皮保护,只需使用厚度为 200 mm、使用温度不低于 1 200 °C 的耐火粘土砖就可对窑壁起到很好的保护作用.

由于烧成带窑皮与高温烟气接触区域的温度在 1 000~ 1 300 °C 之间,所以考虑有窑皮存在时,只给出烟气温度的计算结果.

当烟气温度为 1 300 °C,窑内窑皮厚度分别为 200 mm 和 300 mm 时烧成带窑皮和耐火内衬的温度分布情况如图 4 所示.



(a) 一窑皮厚度为 200 mm; (b) 一窑皮厚度为 300 mm

图 4 有窑皮时耐火内衬温度分布

由图 4 可见:窑皮厚度为 200 mm 时,窑外壁温度为 215 °C;当厚度增大到 300 mm 时,窑外壁温度降低到 161 °C;由于窑皮导热系数比耐火层导热系数小得多^[2],在厚度为 200~ 300 mm 的窑皮内,温度迅速降低到 300~ 500 °C,耐火层由于导热系数较大,温度降低相对缓慢,耐火层内温度也较低.

2.2 讨论与分析

当窑皮厚度为 200 mm 时,窑外壁温度为 215 °C 能满足生产安全需要;进一步增加窑皮厚度,窑外壁温度将减小. 本计算中窑皮导热系数取的是散料的导热系数,由于窑皮比散料致密,所以其导热系数也比散料的导热系数大,实际窑外壁温度也相应地比计算值稍高. 生产中可根据生料浆成分和窑况进行调节,使窑皮厚度在 200~ 300 mm 之间. 用纯烧结法工艺生产氧化铝时,生料浆的铝硅比较高(5.20 左右),烧成温度比混联法生产工艺中高 100~ 200 °C,此时窑皮可稍厚;相反,对铝硅比较低的生料浆,窑皮可稍薄. 计算中只考虑温度对耐火内衬的影响,其中气体温度保持不变,但实际上由于生料浆成分和用煤量不稳定、火焰不稳定等原因,烧成带的温度并不稳定,而是在一定范围内波动,同时,窑皮还要受到火焰和物料的机械冲刷和磨损. 所以,窑皮不能过薄,厚度不能低于 200 mm,窑皮过薄不能很好地保护耐火内衬,也限制了加煤提产;但窑皮厚度也不应超过 300 mm. 因为窑皮过厚,将减小燃烧带的有效容积,不利于熟料窑提产,而且由于燃烧带空间过小,火焰更易冲刷炉料,引起熟料过烧和烧成带结圈等. 同时,燃烧带直径突然变小,将影响窑内物料的顺畅运动,形成死角区域,使窑的有效容积进一步减小^[8,9].

3 实验验证

由于熟料窑工作环境高温封闭,要直接获得窑皮的厚度比较困难,一般通过目测结合测试窑外壁温度来了解工作中的熟料窑窑皮的状况. 在该窑生产稳定时,窑外壁温度为 180~ 200 °C,此时窑皮厚度为 300 mm;当燃烧带温度过高,窑外壁温度明显上升,最高达 280 °C,此时窑皮变薄,平均厚度 150 mm.

4 结 论

窑皮是粘结在熟料窑烧成带耐火内衬上的一层致密的过烧熟料,它保护烧成带内衬不受高温火焰和物料的腐蚀和磨损. 在熟料窑操作中,窑皮太薄,将缩短耐火内衬的使用寿命,同时限制了加大煤粉提温,也就限制了熟料窑提产. 窑皮过厚,则缩小了

烧结带的有效截面积,也限制了熟料窑的提产.计算结果表明,对直径为 4.5 m 左右的大型回转窑,窑皮厚度可根据生料浆成分和窑况调节到 200~ 300 mm,在能很好地保护耐火内衬的情况下,窑皮越薄越好.

参考文献:

- [1] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [2] ЕИХодоров, Техника Спекания Шихт Глинозем Ной Промышленности[M]. Москва: Металлургия, 1978.
- [3] 梅 焱. 有色冶金炉窑仿真与优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [4] 贺友多. 传输理论和计算[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [5] Silcox G D, Pershing D W. The effects of rotary kiln operating conditions and design on burden heating rates as determined by a mathematical model of rotary kiln heat transfer[J]. J Air Waste Manage Assoc, 1990, 40: 337-344.
- [6] Barr P V, Brimacombe J K, Watkinson A P. A heat-transfer model for the rotary kiln: part II. Development of the cross section model [J]. Metallurgical Transactions B, 1989, 20B: 403-419.
- [7] Gorog J P, Adams T N, Brimacombe J K. Regenerative heat transfer in rotary kilns[J]. Metallurgical Transactions B, 1982, 13B: 153-163.
- [8] Woodle G R, Munro J M. Particle motion and mixing in a rotary kiln [J]. Powder Technology, 1993, 76: 241-245.
- [9] 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.

Numerical study on the thickness of the clinker attached onto the alumina clinker rotary kiln refractories

ZHOU Jie-min¹, MA Ai-chun¹, LI Wang-xing²

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

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

Abstract: A 3-D numerical study on the effects of attached clinker on temperature profile for refractory in sintering zone of an alumina rotary kiln (4.5 m in diameter, 90 m in height) is presented. The results show that, without attached clinker, the temperature of kiln shell is 232~ 270 °C higher. The temperature of kiln shell decreases from about 215 °C to 161 °C with the thickness of the attached clinker increasing from 200 mm to 300 mm. The service life of the refractory will be shortened when the attached clinker is too thin, whereas the output of clinker is limited when the attached clinker is too thick. For a large rotary kiln, the thickness of the attached clinker should be regulated between 200 to 300 mm according to the components of raw slurry and work conditions of kiln.

Key words: alumina rotary kiln; attached clinker; refractories; temperature profile; numerical simulation