

# 环冷机风箱结构对球团矿抗压强度影响之初探

朱辛州<sup>1</sup> 张旦<sup>1</sup> 宋文武<sup>2</sup>

(1. 首钢球团厂生产技术科 2. 首钢矿业公司技术处)

**摘 要** 根据首钢球团厂实际生产中出现的氧化球团抗压强度分布不均的情况,通过对环冷机冷却风分布进行有限元分析,初步探讨了国内广泛采用的链-回-环球团工艺中环冷机风箱结构对球团矿抗压强度的影响。

**关键词** 球团矿 抗压强度 环冷机 冷却风

## 1 前 言

首钢球团厂自 2000 年完成截窑改造转产氧化球团以来,已生产了 7 年。作为链篦机-回转窑-环冷机球团工艺的先行者,经过 7 年的探索和发展,我厂已从初期重视产量转而进入了一个更注重产品质量的阶段。

2006 年,首钢球团厂发现生产中存在同一批次球团矿中成品球抗压强度差别较大的问题,平均抗压强度指标无法准确反映球团矿整体强度。尔后,通过大量的取样分析,初步找出问题的症结是在冷却环节,并从强化操作入手进行解决,虽得到一定程度的改善,但未能从根本上解决此问题。于是,从 2007 年 7 月开始,组织对该问题进行了深入研究。通过有限元分析研究了环冷机风箱中冷却风流速和风压的分布,结果发现,现有环冷机风箱结构不合理,致使球团矿冷却速度不一,造成了强度的差异。

我们希望这一现象能引起有关部门和单位的重视,并提出使之完善的方法和措施,以促进链篦机-回转窑球团工艺技术的进步和产品质量的提高。

## 2 实际生产中遇到的难题

我厂在提高球团矿抗压强度的攻关中发现,同一批次的成品球,在物料品种、膨润土配

比、焙烧温度、焙烧时间、窑头球抗压强度等基本一致的情况下,氧化球抗压强度分布范围非常大。尽管采取了一系列操作措施,亦未能得到有效改善。通过分析,初步认为是环冷机冷却速度不均对成品球抗压强度造成的影响。

实验室研究也表明,冷却速度是决定球团矿强度的重要因素。实验指出,经过 1 000 氧化和 1 250 焙烧的磁铁矿球团矿,以 5 /min (随炉冷却) ~ 1 000 /min (用水冷却) 的不同速度冷却到 200 ,其结果是:冷却速度为 70 ~ 80 /min 时,球团强度最高<sup>[1]</sup>。由此可见,球团矿冷却速度对抗压强度影响非常之大。

为了找到提高球团矿抗压强度的方法,我们首先对氧化球团抗压强度的分布进行了专门研究。具体方法是:用自动取样机从成品皮带取样,每 15 分钟取一次,两小时为一个检验单元;筛取试样中 10 ~ 16 mm 的合格球,每个检验单元每次随机取 60 个球作为试样。试验时间为十天,每天八小时(为 4 个检验单元),每个检验单元随机做三次抗压强度试验,构成该单元的三组数据;每组共有四十个检验数据。试验结果如图 1 所示。

由图 1 可以看出,第一组平均抗压强度为 2388 N/个,氧化球抗压强度合格率(> 2 250 N/个者为合格,下同)为 40%;第二组平均抗压强度为 2 164 N/个,抗压强度合格率为 35%;第三组平均抗压强度为 1 853 N/个,抗压强度合格率为 20%。

由数据可见,三组试验球的平均抗压强度

收稿日期:2008-11-24 联系人:张旦(064404)

河北迁安 首钢球团厂生产技术科

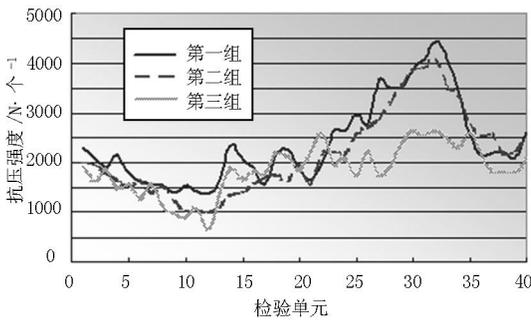


图1 成品球抗压强度分布

随抗压强度合格率的降低而降低;此外,在抗压强度合格率第二组比第三组高15%,第一组仅比第二组高5%的情况下,平均抗压强度却是第一组比第二组高224 N/个,第二组仅比第三组高311 N/个。其原因是第一组、第三组抗压强度分布范围比第二组小,三组球团抗压强度的最大值与最小值之差分别为3 200 N/个、3 600 N/个、1 700 N/个。图1仅仅是一次试验的数据,从实际生产情况来看,成品球抗压强度的高低,直接受抗压强度合格率以及抗压强度分布范围的影响。

为了研究产生上述现象的根源,我们又对环冷机冷却情况进行了研究。具体试验方法是,每天将环冷机分为上、中、下三层,每层再分为内、外侧两点,共计6个点位,同时取样;从每个点位所取样品中挑选60个粒度合格的球进行抗压强度测试,计算每个点位成品球抗压强度大于2 250 N/个的合格率,连续试验4天,结果见图2。

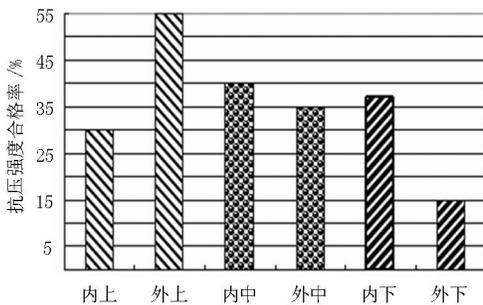


图2 环冷机内外环不同高度氧化球合格率

由图2可以看出,同一批次的成品球,在物料品种、膨润土配比、焙烧温度、焙烧时间、窑头球抗压等条件基本一致的情况下,环冷机台车

同一截面上不同部位的氧化球抗压强度合格率差异较大。环冷机内外环不同高度的氧化球抗压强度合格率差异极大,高的如外环上部可达55%,低的如外环下部仅为15%。

攻关期间,尽管采取了各种操作调控措施,环冷机台车同一截面上不同部位的氧化球抗压强度合格率差异仍然很大,此难题未得到有效的解决。

### 3 风箱结构对成品球抗压强度影响的研究

为了探索环冷机及其配套风箱的结构对球团矿抗压强度的影响,从2007年7月开始,我们利用有限元分析方法对环冷机中冷却风的风流状况进行了研究;并于2008年2月开始,连续三个月对成品球的抗压强度分布进行测定,以检验分析结果的可靠性。

#### 3.1 风箱结构

环冷机风箱由上下两部分焊接而成,上部是弧度为21.5°的圆环台,圆环直径为18 000 mm,圆环台宽2 500 mm,高1 025 mm;下部为一四边锥形台,锥形台顶面为圆环台的底面,锥形台的底面为一边长600 mm的正方形,高为1 600 mm。风管入口为一梯形管,上底边1 800 mm,下底边480 mm,高1 048 mm;梯形管两底边中线比锥形台顶面低624 mm,梯形管为进气管,圆环台上表面为出气面,详见图3。图3中标出的4#白色区域是作为研究对象的风箱,其中2#区域为待冷却球团料层,1#区域为环冷机烟罩,3#、4#区域为风箱。

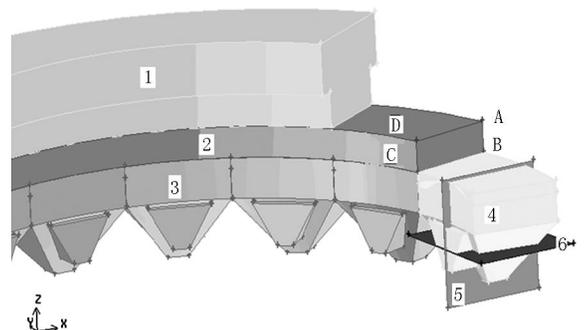


图3 环冷机风箱三维示意图

为便于对重要的断面流速、静压图作分析, 现对 4# 白色区域风箱各部位作如下定义: 出口面: 为风箱与待冷却球团料层接触的顶面, 即圆环台上表面, 详见图 4;  $y_0$  面: 为风箱径向中心的竖直截面, 详见图 3 中 5# 平面;  $z = -624$  面: 入口中线的水平截面 ( $z = -624$ ), 详见图 3 中 6# 平面; 中径面: 为风箱中径截面, 环冷机内、外环平分面与风箱的截面, 详见图 4。

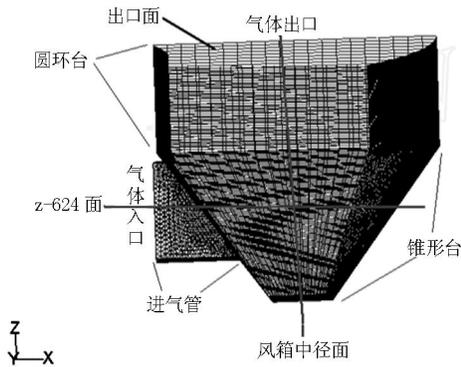


图 4 环冷机风箱网格右视图

### 3.2 冷却风流体分布计算的理论基础

本文采用 Launder-Spalding (1974) 和 Rodi (1980) 建立的  $k-\epsilon$  方程模型计算湍流轨迹。 $k-\epsilon$  模型具有稳定性、经济性和比较高的精度, 是应用最广、最为人熟知的一个二方程湍流模型<sup>[2]</sup>。standard  $k-\epsilon$  模型通过方程求解湍流脉动动能 ( $k$ ) 方程和湍流耗散率 ( $\epsilon$ ) 方程。

需要说明的是,  $k-\epsilon$  方程只在湍流核心处才是正确的, 在近壁处则不适用。此时, 需要采用壁面函数, 一般与壁面法向垂直方向采用速度分布为对数规律, 这样就可以将壁面区与核心区联接起来, 计算方法采用 Spalding 和 Patankar 推荐的 SIMPER 计算方法<sup>[3]</sup>。

计算过程中采用的有限元法是将一个连续的求解域任意分成许多适当形状的微小单元, 并于各小单元分片构造插值函数, 然后根据极值原理, 将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程, 把总体的极值作为各单元极值之和, 即将局部单元总体合成, 形成嵌入了指定边界条件的代数方程组, 求解该方程组就得到各节点上待求的函数值。

### 3.3 冷却风流体分布计算结果

由于有限元计算方法需要将连续的求解域任意分成许多适当形状的微小单元, 计算前, 首先对风箱进行单元划分, 共划分为 205658 个单元, 详见图 4。其中, 上表面为风箱中冷却气体出口。

根据我厂 2006 ~ 2007 年环冷机实际生产使用风量对 13 个风箱平分, 风箱入口流量取 26 849  $m^3/h$ , 入口流速 6.24  $m/s$ 。以此为基础计算风箱的静压和速度分布, 并对比球团矿的抗压强度分布, 分析二者之间的关系。风箱中的静压分布图详见图 5、图 6。(本文所有压力图图例单位均为 Pa, 速度图图例单位为  $m/s$ )。

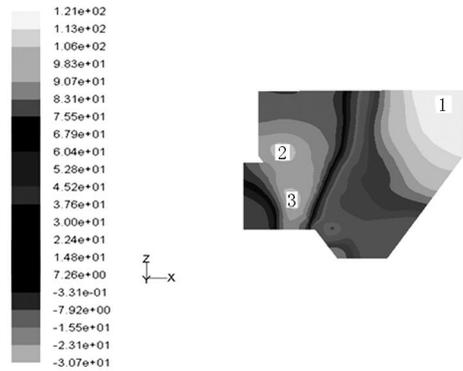


图 5 环冷机风箱  $y_0$  面流体静压右视图

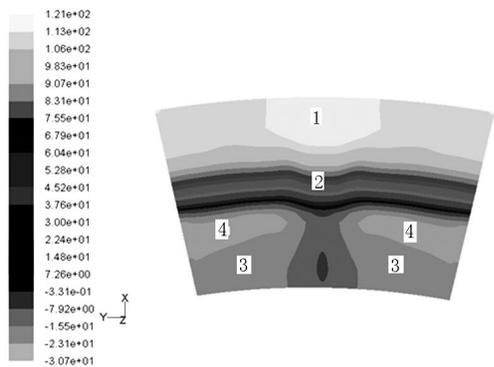


图 6 环冷机风箱出口面流体静压图

由静压分布图可以看出, 冷却风流出风箱, 穿过台车进入料层前静压力由外环向内环逐渐降低。比较明显的分布为四个区域: 一是最外环的高压区, 即图 6 中的 1# 区域; 二是中环部分的中压区, 即图 6 中的 2# 区域; 三是内环部分除两侧之外的常压区, 即图 6 中的 3# 区域; 四是内

环两侧部分的低压区,即图 6 中的 4# 区域。  
风箱中的速度分布见图 7、图 8。

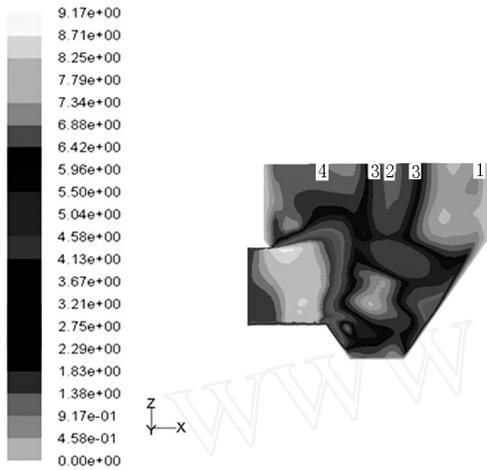


图 7 环冷机风箱 y0 面流体速度右视图

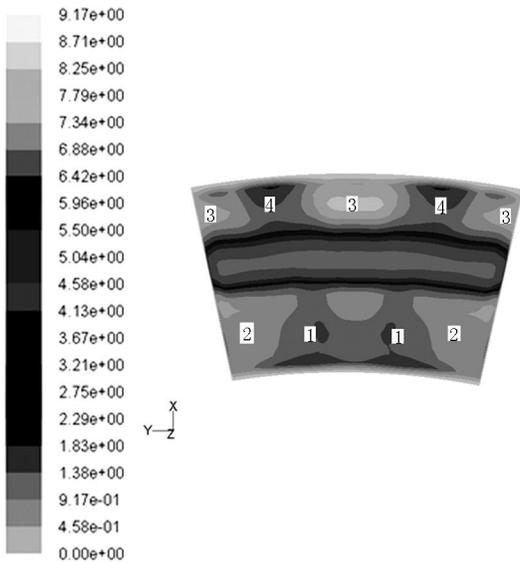


图 8 环冷机风箱出口面流体速度顶视图

如图 7 所示,风箱出口速度大致可以分为三部分:一是最外环的低速区,即图 7 中 1# 区域;二是中环的高速区,图 7 中 2#、3# 区域;三是内环的次高速区,图 7 中 4# 区域。同时,速度分布图显示,在风箱底部进气管前方、外环部分、以及内环进气管上方分别有一明显的低速区。分析认为,这些低速区可能是由于风箱固有结构造成气体回流形成涡流产生的。

图 8 显示,除了中环高速区速度分布较为均匀外,内、外环的低速区、次高速区速度分布

就不太均匀。内环次高速区大致分为三部分:两侧的两个低速区、中部高速区、中部靠近中环部分的低速区;外环低速区大致分为五个部分:中部以及两侧三个低速区,三个低速区间隔的两个高速区。

由此可见,风箱出口面风速分布极不均匀,各部分流量也就相应的不均匀,造成同一台车上的氧化球团得不到均匀冷却,这也是上述试验中,内外环氧化球团合格率相差很大的原因。从风箱入口截面与 y0 面相交直线段 y0 入口线,以及风箱入口截面与 z - 624 面相交直线段 z - 624 入口线两处入流的流体在风箱中的轨迹线分别见图 9、图 10。

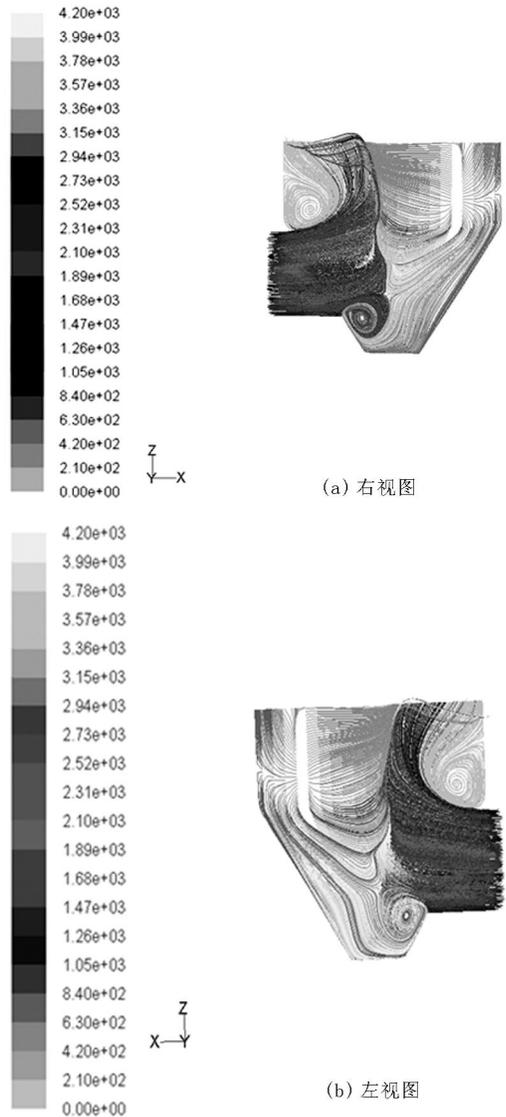


图 9 y0 入口线流体在环冷机风箱中的轨迹线

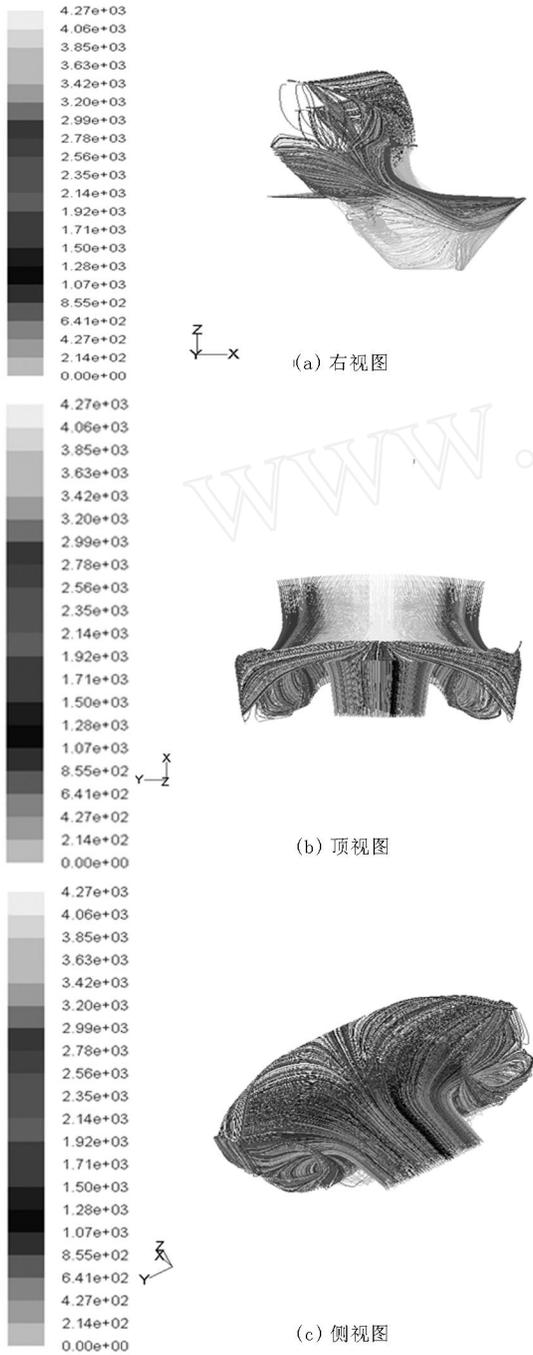


图 10 z=624 入口线流体在环冷机风箱中的轨迹线示意图

由入口面上  $y = 0$  处进入的气体在风箱中的轨迹线如图 9 所示,图 9 中 a、b 分别为轨迹线的左、右视图。两幅轨迹线图均清楚地显示,由于风箱结构的原因,气体轨迹在风箱底部进气管前方形成一漩涡状轨迹线(见进气管下方黑灰相间的圆环轨迹线);在内环进气管上方也形成了另一漩涡状轨迹线(见进气管上方灰色圆

环轨迹线);在进气管上边水平延长与外环相交部位同样有一分流状轨迹线(见进气管上边水平延长与外环相交部分黑色、灰色轨迹线交界面处)。由气体流线轨迹可以表明,图 7 中风箱  $y_0$  面流速分布中三个异常的低速区是正确的,它们是由于风箱结构造成的涡流引起的。

由入口面上  $z = -624$  处进入的气体在风箱中的轨迹线如图 10 所示,图 10 中 a、b、c 分别为轨迹线的右、顶、侧视图。三幅轨迹线图显示,由入口面上  $z = -624$  处进入的气体,进入风箱后,一部分直接向前运行至外环风箱壁面后,向下运行至风箱底部,并在风箱底部形成一漩涡状轨迹线(见 a 右视图中风箱下方灰色圆状轨迹线);另一部分进入分箱后竖直向上运行,在风箱内环两侧部位形成两个较大的漩涡状轨迹(见 b、c 图中,黑、灰色入流轨迹线两侧部位的螺旋状轨迹线)。这两个较大漩涡,可以清楚地解释图 6(出口静压分布图)中,内环两侧部分产生低压区以及图 8(出口面流速分布图)中,内环两侧形成两个低速区、中部产生高速区、中部靠近中环部分形成低速区的原因。

综上所述,由于风箱结构的原因,冷却风进入风箱后形成漩涡流,造成风箱静压、流速的不均匀分布,特别是对流速影响尤为严重(详见图 8),造成同一台车同一截面上的球团矿冷却速度大不一样。

### 3.4 对生产球抗压强度的验证

为了验证上述分析结果,我们以实际生产中同一台车底部不同部位的氧化球为对象进行抗压强度试验,通过抗压强度分布检验分析结果的正确性。

试验方法:将环冷机台车下层(详细位置如图 3 中的 BC 段)由内环起、外环止,用 4 段等长直线均分为 5 个点,由内至外编号 1 至 5,每天对 5 个点同时取样;从每个点位所取样品中挑选 60 个粒度合格的球进行抗压强度测试,统计每个点位成品球抗压强度的分布。为了确保检验数据的准确,每天做一次,连续试验 3 个月,以 3 个月的试验数据为基础进行分析。

在试验期间,同步检验、分析窑头球抗压强

度分布,如图11。由图可以看出,窑头球96.5%集中在1500~2500 N/个之间,整体分布较为均匀稳定。然而,经环冷机冷却后,球团抗压强度分布范围急剧增大。从图12可见,在台车同一断面上抗压强度分布最稳定的部位为第2点,也仅有55%的球抗压强度集中在1000 N范围内,较窑头球的比例下降了41.5%。由于比较是以台车上最好点位为对象,所以实际成品球抗压强度分布集中在1000 N范围内的比例会比窑头球下降更大。这就排除了试验期间,因干燥、预热、焙烧等工序控制造成窑头球抗压强度分布不稳定,影响成品球抗压强度分布的可能性。

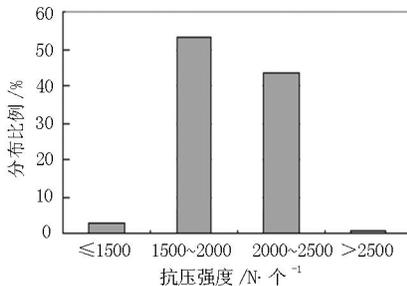


图11 窑头球抗压强度分布

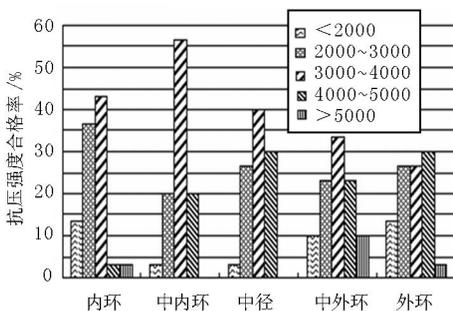


图12 台车同一截面不同部位球的抗压强度分布

由图12可见,内环球抗压强度相对均匀,抗压强度分布较为集中;外环球抗压强度差别较大,抗压强度分布较为分散。对比图11可知,窑头球96.5%集中在1500~2500 N/个之间,抗压分布较为集中,而成品球抗压强度分布较为分散。

分析原因,是由于风箱的固有结构,使进入的冷却风流速分布在环冷机台车中线至内环壁部分较台车中线至外环壁部分更为均匀(见图8),因此氧化球冷却速度也较为均匀。故内环部分球团抗压强度相对比较集中,如内壁处球团抗压强度80%集中在2000~3000 N/个、3000~4000 N/个两个区间,环冷机台车中线与内环壁中点处球团抗压强度分布更为集中,56%集中在3000~4000 N/个区间内。

## 4 结论

现有环冷机风箱结构容易产生涡流,造成风箱出口面流速、静压分布不均匀,部分区域跨度密而大,影响环冷机中球团矿的均匀冷却。不均匀的冷却速度使得抗压强度基本一致的窑头球,经冷却后得到的成品球抗压强度分布范围非常大,且不均匀,个体之间差别极大,对球团矿整体强度造成不利影响,制约了球团矿质量的稳定与提高。

### 参考文献

- 1 张一敏. 球团理论与工艺. 北京:冶金工业出版社,2004. 126
- 2 吴德铭,郜冶. 实用计算流体力学. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006. 313~315
- 3 苏铭德,黄素逸. 计算流体力学基础. 北京:清华大学出版社,1997. 349~360

## On the Influence of Wind Box Structure of Circular Cooler on Pellets Compression Strength

Zhu Xinzhou et al.

**Abstract** Pointed at the phenomenon of non-uniformity distribution of pellets compression strength presented in SHOU GANG, the wind distribution in circular cooler was finite element analysed. Through this analysis, the influence of wind box structure of circular cooler on pellet compression strength was discussed.

**Keywords** pellet, compression strength, circular cooler, cooling wind