

厚壁离心管坯铸型涂层厚度的确定及其涂层气隙综合传热系数的计算

蔡玉丽¹, 郭明海¹, 庞于思¹, 王黎晖¹, 高义民²

(1. 新兴铸管股份有限公司, 河北 邯郸 056300; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用实验与线性插值、模拟相结合的方法确定了涂层的导热系数、涂层气隙的综合传热系数。分析了涂层厚度对厚壁管坯横截面温度梯度的影响, 并结合实际对不同工艺参数下管坯横截面的温度梯度进行了分析, 确定了不同壁厚管坯的涂层厚度范围。

关键词: 离心铸造; 管坯; 涂层厚度; 导热系数; 综合传热系数; 温度梯度

中图分类号: TG249.4; TG262 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2010)05-0030-04

Determination of Coating Thickness of Centrifugal Casting Mould for Heavy-wall Shell and Calculation of Composite Heat-transfer Coefficient of Coating Air Gap

Cai Yuli¹, Guo Minghai¹, Pang Yusi¹, Wang Lihui¹, Gao Yimin²

(1. Xinxing Tube-casting Co., Ltd., Handan 056300, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The heat conductivity factor of the coating and the composite heat-transfer coefficient of the coating air gap are determined by means of relevant practice and linear interpolation together with simulation. Influence by the coating thickness on the cross section temperature gradient of the heavy-wall shell is analyzed. Also analyzed are the cross section temperature gradients of the shell with different technological parameters on the basis of actual operation status, resulting in determination of the coating thickness ranges for shells with different wall thicknesses.

Key words: Centrifugal casting; Shell; Coating thickness; Heat conductivity factor; Composite heat-transfer coefficient; Temperature gradient

0 引言

与实心坯相比, 采用离心铸造空心毛坯进行加工的制造工艺可省去钻孔(或穿孔)、扩孔等许多工序, 缩短了生产周期, 提高了生产率, 降低了生产成本, 且可以避免实心圆坯因钻孔(或穿孔)而造成产品偏心等问题, 在激烈的市场竞争中占有一定的优势。

但是, 离心铸造厚壁管坯在生产过程中存在气

孔、裂纹等许多质量缺陷。如能消除这些缺陷, 则对低成本生产厚壁无缝钢管将是一个重大的突破。

1 厚壁离心管坯浇铸原理

厚壁管坯采用卧式离心铸造, 管模即铸型绕水平轴心旋转, 钢液在铸型内表面摩擦力的带动下形成空心管坯, 管坯内表面为自由表面。离心力的选取首先要保证钢液不跌落, 其次应保证渣层上浮组织致密。所以, 钢液在离心力的作用下凝固, 不仅管体组织致密, 而且可使渣、杂质从钢液中浮出, 使得钢液在凝固前得到净化。

蔡玉丽(1971-), 女, 工程师, 主要从事离心铸管管坯的研发工作。

2 铸型涂料的选取

离心铸造厚壁管坯和厚壁套筒的生产应采用热模法工艺,由于铸型没有排气孔,涂料发气量大,致使气体来不及通过钢液排出,引起钢管表面产生气孔,所以消除铸管表面气孔是离心铸管生产的关键问题之一。不同的钢种浇铸钢液的温度不同,而不同种类的涂料高温强度和发气量不同,涂层的厚度直接影响离心铸坯横截面的温度梯度。因此,涂料种类及其涂层厚度是影响厚壁离心管坯在浇铸过程中形成气孔和裂纹的主要原因^[1]。在批量浇铸 21CrMo10 钢的生产中,浇注温度 1 530~1 660 ℃,涂层厚度 0.3~3.5 mm。经统计,96 支管坯中有 44 支表面没有缺陷,6 支出现气孔,46 支出现裂纹,带有气孔的管坯所占的比例为 6%左右,带有裂纹管坯所占的比例为 48%左右,消除气孔和裂纹对降低管坯废品率意义重大。

铸型涂料的性能要求^[2]:

(1) 涂料的发气量。采用热模涂料法生产工艺,由于铸型没有排气孔,浇铸时涂料产生的气体一部分留在涂层的间隙中,大部分则向金属液中迁移。这部分气体受涂料发气量的影响最大,是毛坯产生气孔、针孔、凹陷等气体缺陷的源头。

(2) 涂料的高温强度。浇铸时钢液温度一般在 1 450~1 650 ℃,涂层温度在 150~350 ℃,所以涂层必须具有足够的高温强度和抗热冲击能力。同时涂层与铸型之间的附着力也必须与高温强度相当,以防涂层被高温钢液冲击后脱落,造成钢液与铸型粘结。

(3) 涂料的悬浮性。涂料良好的悬浮性是保证涂层各种性能(发气量、高温强度等)均匀性的必要条件。

(4) 良好的脱型性。拔出钢管坯,涂层应具有良好的脱型性,以便于清理铸型。同时耐火骨料的耐火度及纯度对脱型性影响较大,因为这决定了涂层烧结后清理工作的难易程度。

(5) 良好的蓄气性。涂层应具有一定的蓄气性,特别是在高温条件下能存储一定量气体的涂层可消除钢管表面的气孔、针孔缺陷。

选用原料及配比如下:

(1) 涂料原料。选用耐火骨料为锆英粉,粘结剂为聚合氯化铝,悬浮剂为膨润土,水为载体。

(2) 涂料配比。锆英粉:聚合氯化铝:膨润土:水=100:(5~8):(12~15):50,活性剂加入量一般是

锆英粉的 0.5%~0.8%。

所配制的涂料要求粘度(T6 杯)25~39 mm²/s,密度 1 450 kg/m³,发气量≤3 ml/g。

采用以上涂料配方,可保证浇铸出的厚壁钢管坯不出现针孔、气孔、凹陷等缺陷。

3 涂层导热系数的测定

在温度场的计算中用到的物性参数有材料的密度、比热和导热系数等。这些物性参数均随温度的变化而变化。这种变化反映到数值模拟方程中,则每一时间步长都可能包含有很多变化的物性值,这是影响数值模拟精度的主要因素之一。因此如何精确地掌握物性值,是数值模拟研究中的一项重要基础工作。

目前,获得物性值主要通过 3 种方式:一是查现有的物性参数手册;二是进行专门的实验测试;三是用实验与数学计算相结合的方法。其中涂层的热物性参数特别关键,因为该涂层是由硅藻土、膨润土等复合配制而成,它的物性参数在现有的资料中是查不出来的,故需要测试。其密度和比热容随温度的变化不大,可取为常值,经实验测得其密度为 1 850 kg/m³,比热容为 1 880 J/(kg·K)。而其导热系数与温度近似成线性关系。由于测试结果的准确性会直接影响到模拟的精度,故需要考虑测试方法,通过查阅各种资料,选用了“圆球法”近似绝热装置。具体测试原理:通过测试球壁径向热流 Q 和 d₁/2、d₂/2 处的温度 T₁、T₂,运用式(1)算出导热系数 λ,即:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{Q(d_2 - d_1)}{2\pi d_1 d_2 (T_1 - T_2)}$$

式中 d₁、d₂——待测材料的内、外径,mm;

T₁、T₂——待测材料的内、外表面温度,℃。

圆球体绝热法测试导热系数装置如图 1 所示。

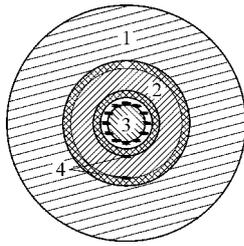
涂层导热系数的测试结果见表 1。

由于表 1 所列数据的 4 个测试点近似在 1 条直线上,且耐火涂料的导热系数 λ 与温度 T 的关系为近似的线性关系^[3]:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bT) \quad (2)$$

从表 1 中的数据可以确定 λ₀=0.075 85, b=0.009 162 82。

其他温度涂层的导热系数的插值结果见表 2。



1—隔热材料 2—待测材料 3—加热器 4—热电偶

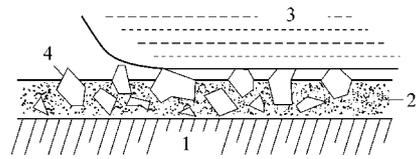
图1 测试导热系数装置

表1 涂层导热系数测试结果

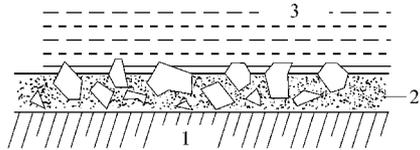
涂层温度 T/°C	90	100	110	140.5
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	0.138 4	0.145 5	0.152 3	0.173 5

表2 涂层导热系数插值结果

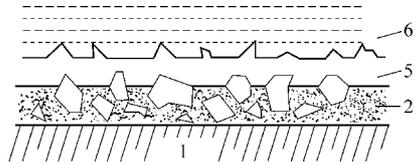
涂层温度 T/°C	20	200	400	600	800	1 000
导热系数 /[W·(m·K) ⁻¹]	0.09	0.21	0.35	0.49	0.63	0.77
涂层温度 T/°C	1 200	1 400	1 430	1 470	1 530	1 600
导热系数 /[W·(m·K) ⁻¹]	0.91	1.05	1.07	1.10	1.14	1.19



(a) 充型



(b) 充型完毕



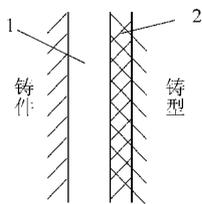
(c) 产生气隙

1—金属型 2—涂层 3—金属流
4—粗颗粒 5—气隙 6—管坯

图3 管坯-铸型界面间产生气隙示意

4 涂层气隙综合传热系数的计算

当金属液浇入铸型(管模和涂层)并与铸型接触后,液态金属开始凝固。在凝固前,液态金属一般与铸型接触良好,液态金属与涂料层及涂料层与管模之间为理想接触,无界面热阻,从而在界面处无温差。当凝固到一定程度后,在粘有涂料的凝固层外表面和带有涂料层的管模内表面开始出现间隙,形成很薄的气体层(图2),界面上有接触热阻存在,因而存在一定的温差,使其传热条件迅速恶化。在许多情况下界面换热往往是整个系统传热的关键。



1—气体层 2—涂层层

图2 铸型-铸件界面间气隙

金属液充型至其凝固期间,管坯-铸型界面间产生气隙如图3所示。

所以凝固过程中应采用涂层气隙综合传热系数进行计算,其计算公式如下:

$$K = \ln(d_3/d_1) / \{ [\ln(d_2/d_1)] / \lambda_g + [(\ln(d_2/d_1)) / \lambda_{d0}] \} \quad (3)$$

式中 K —— 涂层气隙综合传热系数, W/(m·K);
 λ_g 、 λ_{d0} —— 分别为气隙和涂层的导热系数, W/(m·K);
 d_1 、 d_2 、 d_3 —— 分别为管坯、气隙、涂层的外径, m。

具体算法为:先假定涂层厚度为2 mm,用涂层的导热系数代入有限元模型,计算出不同管坯温度下管坯的变形量,即确定出 d_1' 、 d_2' 、 d_3' ,代入上式求出K',再用K'作为涂层气隙的综合传热系数代入有限元模型……如此反复计算,直至 $|K_n - K_{n+1}| \leq 0.001$ W/(m·K),则可将其作为最终的涂层气隙综合传热系数,见表3。

表3 涂层气隙综合传热系数

涂层温度 T/°C	20	1 430	1 470	1 560
涂层气隙综合传热系数 /[W·(m·K) ⁻¹]	0.06	1.05	1.10	1.14

5 热裂纹形成原因及其涂层厚度的确定

热裂(图4)的根本原因:当钢种和浇铸工艺确定之后,浇铸温度较高、涂层厚度较薄时,管坯内外壁的温差较大,温度梯度较大,致使管坯成型过程中已形成固相骨架的外层金属对内层刚刚凝固尚处于薄弱环节的金属形成很大的拉应力,同时该处金属在收缩时得不到钢液量的充分补缩而形成热裂^[4]。

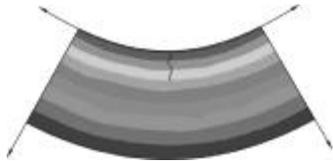


图4 热裂示意

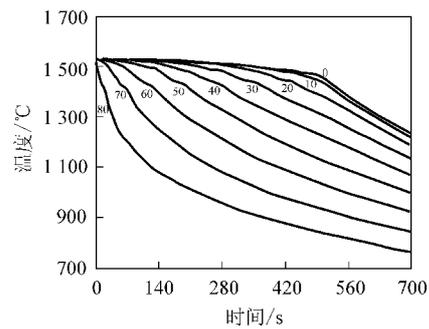
涂层导热系数的大小、隔热能力的强弱,直接影响管坯的传热。涂层种类确定之后其厚度又成为影响管坯散热的一个主要因素。涂层越厚其隔热能力就越强,导致热量难于散出,管坯内外壁温差就越小、横截面温度梯度就越小。随着涂层厚度的减薄,正处于凝固成形过程中的热态管坯的冷却速度就越大,内外壁温差就越大、横截面温度梯度就越大。

结合不同涂层浇铸管坯实际裂纹检验结果及温度场的数值模拟得知,对于内径为329 mm的管模,若浇铸60 mm壁厚的管坯,涂层厚度太薄,管坯内壁钢液固相率达83%,横截面的平均温度梯度 $\Delta T/\Delta L$ 大于 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时,则易形成热裂纹。

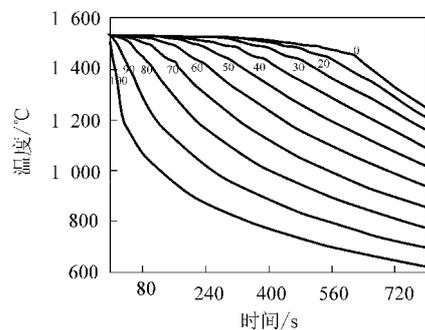
故 $\Delta T/\Delta L=10\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 理论上可作为产生热裂纹的判据,当厚壁管坯横截面上的温度梯度大于 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时,将会产生热裂纹;小于 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时,处于安全区。

同理可确定80 mm和100 mm壁厚管坯的最小涂层厚度。距厚壁管坯内表面不同距离各点的温度随时间的变化曲线如图5所示。

壁厚为100 mm的管坯,将涂层厚度控制在0.6~3.5 mm;壁厚为80 mm的管坯,涂层厚度控制在1.0~3.5 mm。按此工艺参数浇铸的98支21CrMo10管坯中,有96支表面没有出现裂纹,无一支出现径向裂纹,2支出现轴向裂纹,轴向裂纹管坯所占的比例为2%左右。这两支管坯出现裂纹的原因,主要是由于浇铸前没有检查到位,在浇铸过程中,带动管模(即铸型)旋转的托轮轨道上粘有前次浇铸时飞溅出的钢液凝固成的钢屑,导致运转不平稳、径向跳动大于要求值所造成的。



(a) 80 mm 壁厚管坯



(b) 100 mm 壁厚管坯

图5 管坯不同点温度与时间的变化曲线

6 结论

(1) 采用实验与线性插值、模拟相结合的方法计算出涂层的导热系数、涂层气隙的综合传热系数。

(2) 通过实际检验并结合温度场的数值模拟得知,涂层太薄才是导致轴向裂纹的主要原因,当温度梯度大于 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$ 时管坯易出现轴向裂纹。

(3) 确定了不同厚度的管坯在一定的离心转速和涂层的条件下,浇铸材质为21CrMo10钢管坯的涂层厚度范围。

7 参考文献

- [1] 蔡玉丽,郭明海,王黎晖,等.厚壁离心管坯温度场和热应力场的数值模拟及其轴向裂纹分析[J].钢管,2009,38(2):19-27.
- [2] 张鑫.离心铸造合金钢管涂料研制[J].铸造,2004,53(7):538-541.
- [3] 奚同庚.无机材料热物性学[M].上海:上海科学技术出版社,1981:92-96.
- [4] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:8-36.

(修定日期:2009-04-23)