

离心铸造制备双金属复合管的选材设计

刘建彬¹, 武 博², 燕 铸¹

(1. 中国石油技术开发有限公司, 北京 100028; 2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘 要: 根据热平衡方程、凝固传热规律和内外层金属的物理性能, 建立了双金属复合管内外层金属的熔点差与熔合层厚度比的关系模型。由关系式和关系曲线可知, 熔点差 ΔT 与熔合层厚度比 $\Delta d_f/d_o$ 成正比, 随着 $\Delta d_f/d_o$ (0.02%~0.20%) 的逐渐增大, ΔT 的允许最大值也逐渐增大。在熔合层厚度比最大为 0.20% 的条件下, 由关系式可得到组元金属的允许熔点差范围。

关键词: 双金属复合管; 离心铸造; 选材设计

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2023.1.49.51

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Materials Design of Bimetallic Composite Pipe Manufactured by Centrifugal Casting Process

LIU Jianbin¹, WU Bo², YAN Zhu¹

(1. China Petroleum Technology and Development Corporation, Beijing 100028, China;

2. China Nuclear Power Engineering Corporation, Beijing 100840, China)

Abstract: According to the heat balance equation, the solidification heat-transfer law and the physical properties of metals of the inner and outer layers of the pipe, the model of the relationship between melting point difference of inner and outer metals and the thickness ratio of fusion layer of the bimetallic composite pipe is established. It is revealed via the relationship formula and the relationship curve that the melting point difference ΔT to the fusion layer thickness ratio $\Delta d_f/d_o$ is proportional, and that along with the $\Delta d_f/d_o$ (from 0.02% to 0.20%) gradually increases, the maximum allowed value of the ΔT is also increases gradually. When the maximum thickness ratio of the fusion layer gets up to 0.20%, the allowable range of ΔT of component metals can be obtained from the above mentioned relationship formula.

Key words: bimetallic composite pipe; centrifugal casting; material selection design

1 双金属冶金复合管组元金属特点

双金属复合管由内、外两种金属材料构成, 其内、外层材料的选择, 不是任意两种金属的组合, 而要遵循一定的规律或标准。复合管的选材设计应以生产工艺为基础(包括离心浇铸、热挤压和热处理), 根据两种金属的物理性能(包括熔点、过热、凝固潜热等)和工艺性能(包括热塑性、热处理工艺等)确定选材范围^[1-4]。

采用离心浇铸工艺制备双金属复合管, 金属液

进入铸型, 受型壁的冷却作用, 开始结晶凝固。由于热量(金属液过热热量与结晶潜热)是垂直于铸型型壁连续地向外散发的, 因此金属结晶按定向凝固进行^[1]。此时, 外层金属内壁会吸收内层的散热, 当热量足够高时外层内表面凝固外壳发生重熔。散热、吸热量的不同, 外层内表面的重熔深度也随之不同, 界面处内外层金属熔合的厚度也不同。由于界面熔融层的厚度有规定范围(和内外层壁厚要求尺寸相关), 因此两种金属的熔点不能相差过大, 否则会产生如下两种缺陷: ①外层金属熔点高出内层很多, 会造成冷隔现象, 发生分层; ②内层金属熔点高出外层很多, 会造成界面处互溶层厚度过大, 致使尺寸、性能不符合要求, 还会造成结合界

刘建彬(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事双金属复合管的产品与技术开发以及高端不锈钢与镍合金的研究工作。

面不平整^[5-13]。

2 选材设计数学模型与理论研究

内层金属液浇入铸型后,与已浇注外层金属发生热传导,在传热量达到一定值后外层金属发生重熔,与内层金属形成一熔合层。假设只考虑传热的最终状态,忽略其动态过程,根据热平衡原则^[2]建立公式(1)。

$$Q_{\text{内放}}=Q_{\text{外吸}} \quad (1)$$

式中 $Q_{\text{内放}}$ —— 内层金属放热量, kJ;

$Q_{\text{外吸}}$ —— 外层金属吸热量, kJ。

假定此过程为绝热的,则其中 $Q_{\text{内放}}$ 和 $Q_{\text{外吸}}$ 为:

$$Q_{\text{内放}}=c_{\text{nl}}\rho_{\text{nl}}v_{\text{内}}(T_{\text{j}}-T_{\text{mn}})+v_{\text{内}}\Delta H_{\text{mn}}+c_{\text{ns}}\rho_{\text{ns}}v_{\text{内}}(T_{\text{mn}}-T_{\text{mw}}) \quad (2)$$

$$Q_{\text{外吸}}=c_{\text{ws}}\rho_{\text{ws}}v_{\text{外}}(T_{\text{mw}}-T_0)+s\Delta d_{\text{外}}\Delta H_{\text{mw}} \quad (3)$$

式中 c_{nl} 、 c_{ns} —— 内层金属的液态、固态比热容, kJ/(kg·℃);

ρ_{nl} —— 内层金属的液态密度, kg/m³;

ρ_{ns} —— 内层金属的固态密度, kg/m³;

$v_{\text{内}}$ —— 内层金属的体积, m³;

T_{j} —— 内层金属的浇注温度(一般为熔点以上 50℃左右),℃;

T_{mn} 、 T_{mw} —— 内、外层金属的熔点,℃;

ΔH_{mn} —— 内层金属的凝固潜热, kJ/kg;

c_{ws} —— 外层金属的固态比热容, kJ/(kg·℃);

ρ_{ws} —— 外层金属的固态密度, kg/m³;

$v_{\text{外}}$ —— 外层金属的体积, m³;

$\Delta d_{\text{外}}$ —— 外层金属重熔层的厚度, mm;

s —— 外层金属的内表面面积, m²;

T_0 —— 内层浇注前外层金属的温度,℃;

ΔH_{mw} —— 外层金属的凝固潜热, kJ/kg。

假设,外层金属材质已知,内层金属的熔点 T_{mn} 高于外层金属 T_{mw} ,并且内外层金属的熔点差为 $\Delta T=T_{\text{mn}}-T_{\text{mw}}$ 。此外还假定,内外层金属液、固态时的比热容相同,密度相等,即 $c_{\text{nl}}\approx c_{\text{ns}}$ 、 $\rho_{\text{nl}}\approx\rho_{\text{ns}}$ 。在上述假设条件下,根据热平衡方程,将公式(2)~(3)代入公式(1)整理可得:

$$\Delta T=\frac{s d_{\text{外}} \Delta H_{\text{w}}}{c_{\text{ns}} \rho_{\text{ns}} v_{\text{内}}}\left(\frac{\Delta d_{\text{外}}}{d_{\text{外}}}\right)+\frac{\left(c_{\text{ws}} \rho_{\text{ws}} v_{\text{外}} T_{\text{mw}}-c_{\text{ws}} \rho_{\text{ws}} v_{\text{外}} T_0-50 c_{\text{ns}} \rho_{\text{ns}} v_{\text{内}}-v_{\text{内}} \Delta H_{\text{n}}\right)}{c_{\text{ns}} \rho_{\text{ns}} v_{\text{内}}} \quad (4)$$

公式(4)即为内外层金属的熔点差 ΔT 与熔合层厚度比 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ 的关系式。由于同一系列金属的

比热容、密度、结晶潜热值相差不大,因此设定内外层金属的比热容、密度、结晶潜热值分别近似取为碳钢和不锈钢、镍基合金的一般值,见表1。在挤压设备、外层材质、成品尺寸已知的条件下,将各参数值代入公式(4)就得到 ΔT 与熔合层厚度比 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ ($d_{\text{外}}=30$ mm)的具体关系式(5)~(6)和关系曲线,如图1所示。

表1 组元金属物理性能

钢种	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点/ ℃	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	凝固潜热 ΔH / (kJ·kg ⁻¹)
碳钢	7.85	1 460	0.49	310
不锈钢	7.86	1 450	0.51	286
镍基合金	8.43	1 410	0.44	278

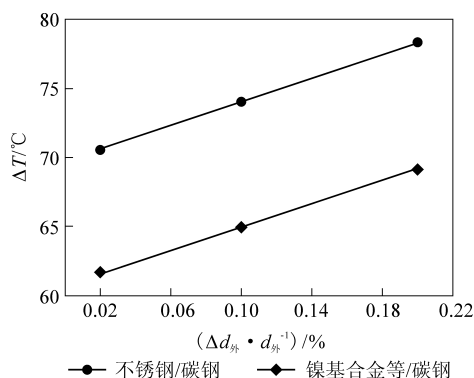


图1 内外金属熔点差 ΔT 与熔合层厚度比 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ 的关系曲线

$$\Delta T=42.76(\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}})+69.78 \quad (5)$$

$$\Delta T=41.56(\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}})+60.83 \quad (6)$$

公式(5)为不锈钢/碳钢组合,公式(6)为镍基合金/碳钢组合。

从公式(5)~(6)和图1可直观看出,内外金属熔点差 ΔT 与 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ 成正比,即随着熔合层厚度比(0.02%~0.20%)的增大,内外层金属的熔点差也逐渐增大,熔点差的最大允许值由熔合层厚度比的上限值决定。

综上所述,通过公式(4)可确定不同条件下的复合管的金属组合,因此可把其作为复合管选材设计的简易标准。

3 结 论

根据热平衡方程、凝固传热规律和内外层金属的物理性能,建立了复合管内外层金属的熔点差与熔合层厚度比的关系模型。由关系式和关系曲线可

知, 熔点差 ΔT 与熔合层厚度比 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ 成正比, 随着 $\Delta d_{\text{外}}/d_{\text{外}}$ (0.02%~0.20%) 逐渐增大, ΔT 的允许最大值也逐渐增大。在熔合层厚度比最大为 0.20% 的条件下, 由下述关系式可求出组元金属的允许熔点差范围。

4 参考文献

- [1] 周磊磊, 林大为, 周灿栋, 等. 不同冷却速度下双相不锈钢 δ/γ 相变过程的原位观察[J]. 上海金属, 2007, 29(3): 19-23.
- [2] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] 符寒光, 王勇. 离心铸造高速钢轧辊在钢管张力减径机上的应用研究[J]. 钢管, 2004, 33(6): 40-43.
- [4] 郭明海, 蔡玉丽, 孙红波, 等. 离心铸造碳钢—高铬铸铁双金属复合管工艺初探[J]. 钢管, 2008, 37(1): 38-41.
- [5] 於方, 秦建平. 双金属管在管道输送中的应用[J]. 钢管, 2000, 29(1): 34-36.
- [6] 李为卫, 秦长毅, 贾君君, 等. 一种油气田开发用新型

双金属复合管[J]. 钢管, 2009, 38(4): 22-24.

- [7] 刘建彬. X60/2205 双金属复合管短流程制备工艺研究[J]. 钢管, 2012, 41(4): 23-27.
- [8] 郭明海, 刘俊友, 庞于思, 等. 双金属管复合技术的研究进展[J]. 钢管, 2013, 42(1): 11-16; 2013, 42(2): 6-11.
- [9] 马海宽, 刘继高, 李培力, 等. 双金属复合管高压液胀成形理论分析与有限元计算[J]. 钢管, 2013, 42(5): 26-30.
- [10] 曹晓燕, 邓娟, 上官昌淮, 等. 双金属复合管复合工艺研究进展[J]. 钢管, 2014, 43(2): 11-15.
- [11] 巩国平. 双金属复合管的挤压生产工艺[J]. 钢管, 2014, 43(2): 36-40.
- [12] 叶富明, 景旭冉, 郭明海, 等. 离心铸造双金属复合辊的制备及应用[J]. 钢管, 2014, 43(1): 72-77.
- [13] 何小东, 李记科, 梁明华, 等. 双金属复合管成型焊接方式探讨及应用——采用冶金复合板材焊接[J]. 钢管, 2015, 44(6): 10-14.

(收稿日期: 2021-12-22; 修定日期: 2022-01-10)

●专利信息

一种钢管热浸镀锌前处理自动上料码垛机构

公开了一种钢管热浸镀锌前处理自动上料码垛机构, 属于钢管加工技术领域。包括: 一号输送机的支撑架上设有链条, 链条与链轮传动配合; 举升夹紧机构设于一号输送机前端; 二号输送机与一号输送机结构组成相同; 自重拦料机构设于一号输送机与二号输送机之间; 移动料车设于二号输送机前端。该机构减少了钢管热浸镀锌前处理上料所需工人数量及劳动强度, 只需一至两人即可完成整个上料段工作; 提高了酸洗上料速度, 满足钢管热浸镀锌更大产能的需要。(专利申请号: CN202010985868.7 公开号: CN112141945A 申请日: 2020.09.18 公开日: 2020.12.29 申请人: 徐州瑞马智能技术有限公司)

一种钢管内壁可控爆破除尘清洗装置

公开了一种钢管内壁可控爆破除尘清洗装置, 属于除尘清洗设备技术领域。钢管本体内设有探杆, 探杆上固定套设有清洁刷, 探杆内设有空腔, 空腔的顶部内壁、底部内壁和探杆的一侧内壁上均开设有通风口, 空腔内设有爆破风管, 爆破风管的顶部内壁、底部内壁和一侧内壁上均开设有多个出风孔, 探杆的一侧焊接有两个固定板, 固定板上均滑动安装有推拉杆, 两个推拉杆相靠近的一端均焊接有压紧块, 爆破风管远离钢管本体的一侧设有高压气管。该装置结构简单、使用方便, 可利用清洁刷和空气爆破冲击波之间的配合完成钢管内壁的清洁, 使得清理更加彻底。(专利申请号: CN202021889799.1 公开号: CN212240484U 申请日: 2020.09.02 公开日: 2020.12.29 申请人: 苏州知瑞光电材料科技有限公司)

(王元荪)