

# 45号钢/304不锈钢复合管坯铸造工艺研究

马 严 刘富宇 高朋敏 宋 波 贾品峰

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

**摘要** 采用液-固复合法, 分别在1 560、1 590和1 620 °C的浇注温度下制备了45号钢/304不锈钢复合管坯, 对复合坯进行断面金相显微镜和扫描电镜观察, 并进行剪切强度检测。结果表明, 45号钢和304不锈钢复合界面存在元素扩散区, 浇注温度越高, Cr和Ni元素扩散区增大。SEM观察显示, 3种复合材料均存在一定厚度的复合层, 且随着浇注温度提升, 复合层的元素分布越复杂, 元素扩散越明显。1 560、1 590和1 620 °C时, 复合界面的剪切强度分别为248、262和285 MPa, 说明复合材料的剪切强度随着浇注温度的提升而升高。

**关键词** 复合材料; 浇注温度; 剪切强度; 金相组织; 双金属

中图分类号 TB331 文献标志码 A DOI:10.15980/j.tzzz. T20230506

## Casting Process of 45# Steel /304 Stainless Steel Compound Pipe Billet

MA Yan, LIU Fuyu, GAO Pengmin, SONG Bo, JIA Pinfeng

(College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

**Abstract:** The compound tube billet of 45 steel/304 stainless steel was prepared under 1 560, 1 590 and 1 620 °C by liquid-solid composite method. The cross-section composites were observed by OM and SEM, and shear strength was tested. The results demonstrate that there exists an element diffusion zone at compound interface of 45 steel and 304 stainless steel, and the diffusion zone of Cr and Ni elements is increased with the increase of pouring temperature. SEM observation reveals that compound layers with a certain thickness are generated in all composites. The element distribution becomes more complicated with the increase of pouring temperature, and the element diffusion is obvious. The shear strength of compound interface is 248, 262 and 285 MPa at 1 560, 1 590, and 1 620 °C, respectively, indicating the enhancement of shear strength with the increase of pouring temperature.

**Key Words:** Composites, Pouring Temperature, Shear Strength, Metallographic Structure, Bimetal

不锈钢复合管因其具有良好的耐腐蚀、耐高温和良好的使用强度及韧性等特点, 被广泛应用于石油、化工、机械和建筑给水系统等行业<sup>[1-7]</sup>。目前, 制备不锈钢复合管的方法主要为冷成形法、热挤压法、离心铸造法、爆炸焊成形和堆焊成形法等<sup>[8]</sup>。

近年来, 国内外研究者对不锈钢复合管制备工艺和机理进行了大量研究。高亚男<sup>[9]</sup>采用铜箔作为钎料, 将不锈钢与碳钢钎焊后进行冷拉拔制备了不锈钢复合管。发现在1 150 °C下进行钎焊, 复合管界面强度最

高, 为295 MPa。许祖熙<sup>[10]</sup>采用爆炸焊接制备了不锈钢复合管, 发现基管与复管之间的装药厚度对焊接质量有显著影响, 通过数学方程推导, 建立了药厚和装药比的经验公式。帅铭<sup>[11]</sup>通过挤压成形制备了内衬不锈钢复合管并对其进行了抗腐蚀性能测试, 发现在较大形变量下, 复合管的抗腐蚀性能较差。许云华<sup>[12]</sup>对利用离心技术来实现复合管的铸造工艺做了详细的介绍, 旨在为其生产提供参考。

目前, 采用铸造法制备不锈钢复合管的相关报道

收稿日期: 2023-12-11; 修订日期: 2024-03-03

基金项目: 2024辽宁科技大学国家级大学生创新创业训练项目(202410146036)

第一作者简介: 马严, 男, 2003年出生, 本科生, E-mail: 2573159519@qq.com

通信作者: 贾品峰, 男, 1981年出生, 讲师, E-mail: Jpf635@163.com

引用格式: 马严, 刘富宇, 高朋敏, 等. 45号钢/304不锈钢复合管坯铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(2): 241-244.

MA Y, LIU F Y, GAO P M, et al. Casting process of 45# steel /304 stainless steel compound pipe billet[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(2): 241-244.

[12] 刘孝飞, 刘彦强, 魏少华, 等. 热处理对热等静压Si/Al-Cu复合材料显微组织和力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 111-117.

[13] 顾伟璐, 陆从相, 周鹏飞. Mg对过共晶Al-Si合金组织改性作用研究[J]. 铸造, 2021, 70(8): 921-927.

[14] HAQUE A, SHEKHAR S, MURTY N S, et al. Fabrication of controlled expansion Al-Si composites by pressureless and spark plasma sintering [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29

(12): 3 427-3 439.

[15] 邓正华, 张聪, 王海宝, 等. 烧结温度对粉末冶金Al-24Si合金组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2019, 43(7): 20-23.

[16] 吕梦琴, 陈斯文. 铜、镁复合添加对雷达电子封装用Al/50%Si材料组织和性能的影响[J]. 现代雷达, 2020, 42(8): 86-90.

[17] 刘猛. 电子封装用高导热颗粒增强金属基复合材料制备与研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.

(编辑: 彭瑾)

较少。本研究采用双金属液固复合铸造法制备出不锈钢复合管坯,通过对浇注温度进行研究,确定较为合理的浇注工艺,并进一步对结合机制进行分析<sup>[13-20]</sup>,旨在为相关研究和生产提供参考。

## 1 试验方案

将不锈钢表面进行机械处理,放入保护剂中加热,将模具放入自制电阻炉中加热,通过100 kW,20 kHz中频感应炉对45号钢熔化,待其加热到浇注温度时进行浇注。

### 1.1 试验原料

采用45号钢,以304不锈钢作为芯材,其尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。两种钢的化学成分见表1。

表1 45号钢和304不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 45# steel and 304 stainless steel

材料	$w_B$							
	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Fe
45号钢	—	—	0.43	0.50	0.17	0.04	0.03	余量
304不锈钢	18.50	8.50	0.03	2.00	2.00	0.03	0	余量

### 1.2 试验方法

将模具、碳钢棒等进行加热烘干,利用除氧化皮试剂对试样进行氧化去皮,将处理完的模具放进加热炉中,通入高纯氩气(99.99%)进行吹扫处理,持续2~3 min后放入304不锈钢以及一定量的硼砂后开始加热升温。将碳钢放入中频加热炉内进行加热处理,对已经保温处理的模具进行一定的振动频率处理,以增加冶金结合概率。将碳钢水进行温度测量,再将其倒入模具内。取10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm试样进行打磨抛光后,采用体积分数为4%的硝酸酒精腐蚀,用Q10M型全自动数显维氏硬度计进行硬度测试。对完成制备的合金进行静置并且冷却到室温,对合金进行加工及检测试验,见图1。采用蔡司Axio光学显微镜、ZEISS

EVO MA 10 高分辨应用型扫描电镜观察其显微组织。通过UTM5305电子万能试验机测试试样剪切性能。剪切试样的取样示意图见图2。

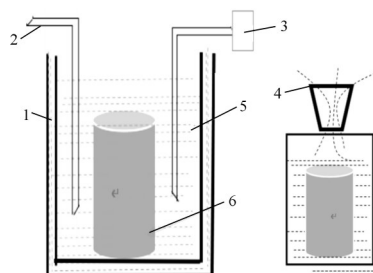


图1 试验示意图

Fig.1 Experimental diagram

1.保护层 2.氩气 3.测温计 4.45号钢水 5.硼砂 6.304不锈钢棒材

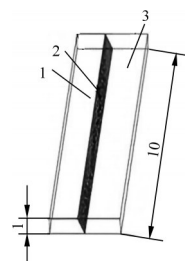


图2 剪切试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of shear specimen

1.304不锈钢棒材 2.复合界面 3.45号钢

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同浇注温度下复合界面宏观组织观察

图3为不同浇注温度下复合坯剖面宏观照片。可以看出,在1560 $^{\circ}\text{C}$ 下浇注后,304不锈钢上部有熔穿现象,与45号钢界面结合良好,45号钢侧有由于裹气所产生的空洞。在1590 $^{\circ}\text{C}$ 下浇注时,不锈钢整体完整,没有熔穿,复合界面结合良好,有局部重熔。在1620 $^{\circ}\text{C}$ 下浇注时,304不锈钢与45号钢界面清晰,结合良好。



图3 不同浇注温度下复合坯剖面照片

Fig.3 Profile of compound billet at different pouring temperatures

### 2.2 复合界面金相微观组织分析

图4为不同浇注温度下复合界面金相照片。可以看出,当浇注温度为1560 $^{\circ}\text{C}$ 时,复合界面处的熔覆层为

140  $\mu\text{m}$ ,45号钢中的组织为粗大的铁素体,见图4b。当浇注温度为1590 $^{\circ}\text{C}$ 时,复合界面处的熔覆层为200  $\mu\text{m}$ ,45号钢中的铁素体组织比1560 $^{\circ}\text{C}$ 时的细小很多,见图

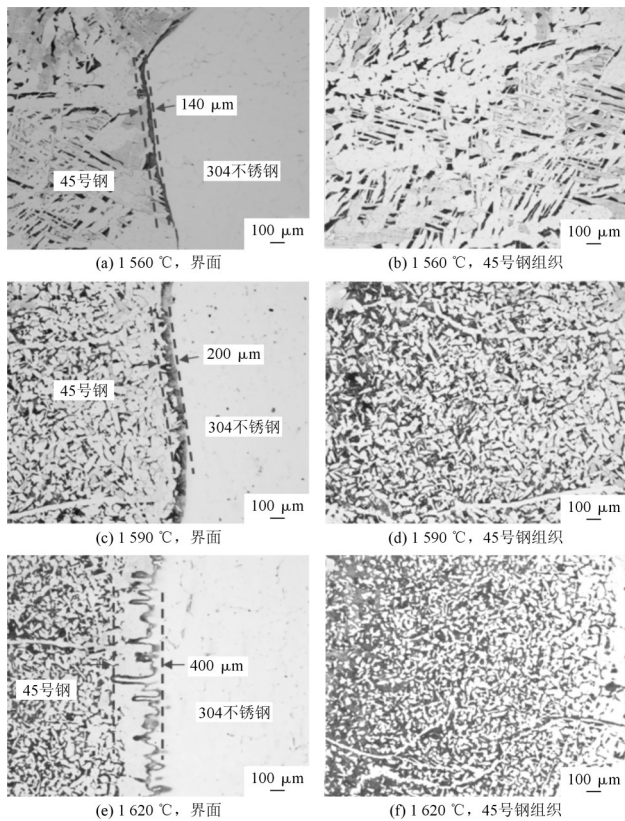


图4 不同浇注温度下复合界面金相照片

Fig. 4 OM images of compound interface at different pouring temperatures

4d. 当浇注温度为1620 °C时,复合界面处的熔覆层为400 μm,45号钢中的铁素体组织更加细小,见图4f。

不同浇注温度下的复合界面SEM组织见图5。

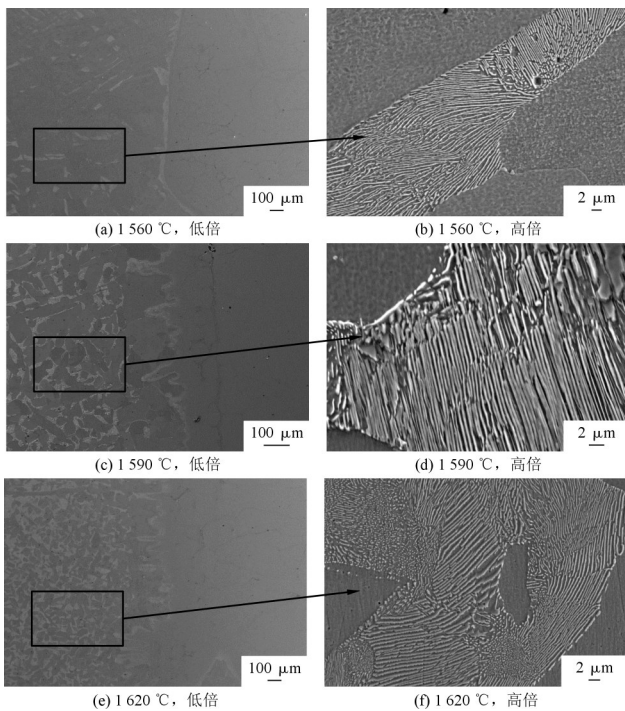


图5 复合界面SEM组织

Fig.5 SEM images of compound interface

可以看出,1560 °C浇注温度下,45号钢与不锈钢之间存在显著的扩散层,45号钢侧有少量亮白色组织,为条状珠光体。1590 °C浇注温度下,45号钢与不锈钢之间的扩散层增大,珠光体组织增多。1620 °C下,扩散层最大,冶金结合效果最好,珠光体组织由粒状和条状构成。

### 2.3 复合界面元素分布分析

图6为在1560、1590和1620 °C浇注温度下的复合界面元素分布情况。可以看出,不同温度下不锈钢中Cr和Ni元素均向碳钢侧进行扩散,扩散距离依次为60、250和400 μm。

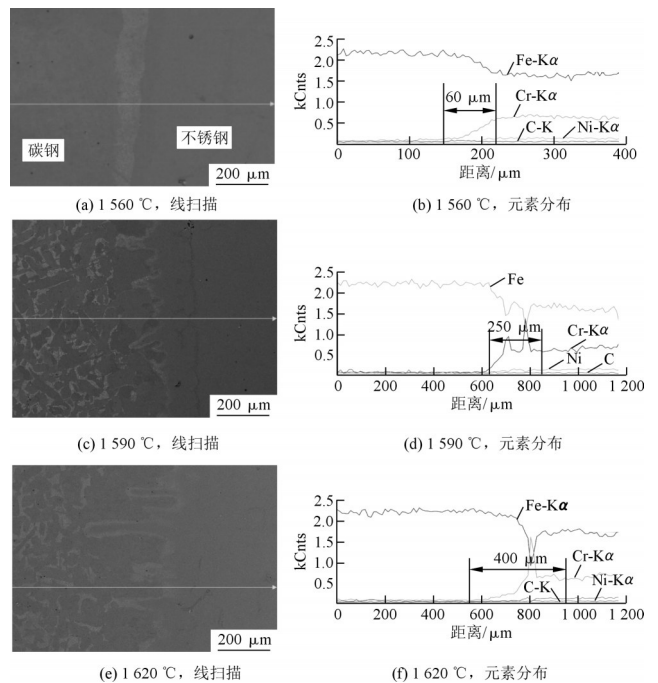


图6 不同温度下复合界面元素分布

Fig.6 Element distribution of compound interface at different temperatures

### 2.4 不同浇注温度下的剪切强度检测

图7为不同浇注温度下复合界面剪切强度。可以看出,1560、1590和1620 °C浇注温度下,复合界面的

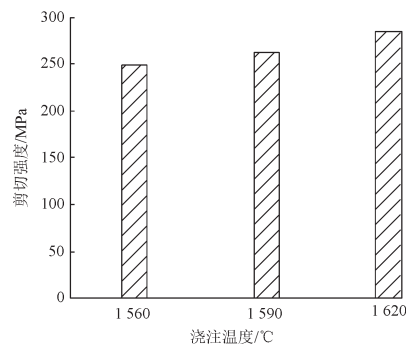


图7 不同浇注温度下的剪切强度

Fig. 7 Shear strength at different pouring temperatures

剪切强度分别为248、262和285 MPa。随着浇注温度上升,复合材料的剪切强度提高。

## 2.5 不同浇注温度条件下的硬度

图8为不同浇注温度下复合界面两侧的硬度变化。可以看出,当浇注温度为1 560 °C时,不锈钢侧距界面50 μm处的硬度值(HV)为108,而距界面10 μm处的硬度(HV)为113,硬度值变化较为平缓。而界面处硬度(HV)迅速增大至212,碳钢侧又稍微下降至197,随后保持稳定。因此,复合界面处的硬度值最高,说明其结合处硬度性能最佳。1 590 °C下,不锈钢侧硬度值变化不大,界面处硬度(HV)增加至220,随后又降落到碳钢侧的202,因此在该浇注温度下,两种钢的结合界面处硬度最高,硬度性能最佳。1 620 °C下浇注,界面处的硬度(HV)最高,达到234,后又下降至碳钢侧的203,可见复合界面处的硬度最高。对比可知,1 620 °C条件下形成的复合材料其界面处硬度性能最理想。这是由于随着浇注温度升高,复合界面的元素扩散更加充分,形成牢固的冶金结合,使界面强度逐渐增大,同时,由于芯材的预热温度较低,复合处碳钢的过冷度增大,使晶粒得到细化,导致硬度提高。

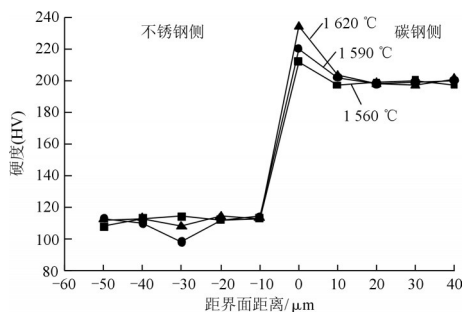


图8 不同浇注温度下的硬度变化曲线

Fig.8 Hardness variation curves at different pouring temperatures

## 3 结 论

(1)在不同浇注温度下,45号钢/304不锈钢复合管中碳钢侧组织为铁素体和珠光体。在1 560~1 620 °C范围内,随着浇注温度升高,复合界面处的熔覆层增大,冶金结合效果更好。

(2)不同的浇注温度下,3种复合材料均存在一定厚度的复合层,而随着浇注温度的提升其复合层的元素分布越复杂,元素扩散越明显。

(3)随着浇注温度提升,45号钢/304不锈钢复合材

料的剪切强度提升。

## 参 考 文 献

- [1] 李永松,沈怡琳. 不锈钢复合板制作新工艺及市场前景的研究[J]. 装备制造技术, 2001(4):34-36.
- [2] 王纯,毕宗岳,张万鹏,等. 国内外双金属复合管研究现状[J]. 焊管, 2015,38(12):7-12.
- [3] 刘建彬,王扬,钱进森,等. 耐蚀合金复合管的生产与发展现状[J]. 钢管, 2014,43(5):1-7.
- [4] 吕世敬,谢敬佩,王爱琴,等. 铜铝复合材料研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2017,37(8):844-849.
- [5] XIAO X F, YE S P, YIN W X, et al. HCWCI/carbon steel bimetal liner by liquid-liquid compound lost foam casting [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012,19: 13-19.
- [6] 戴伟. 巢马铁路大桥不锈钢复合板焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2024(6):101-105.
- [7] 吴世常,贾素琴. 加筋复合高铬铸铁的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 1997, 19(2): 42-47.
- [8] 赵晨光,彭清华,马宏伟,等. 双金属复合管焊接技术探讨[J]. 焊管, 2013,36(1):60-63.
- [9] 高亚男. 不锈钢/碳钢拉拔钎焊复合管的实验研究[J]. 中国金属通报, 2017(11):96-97.
- [10] 许祖熙. 爆炸焊接复合管[D]. 武汉:武汉科技大学, 2018.
- [11] 帅铭. 双金属复合管制备及性能分析[D]. 西安:西北大学, 2015.
- [12] 许云华. 双金属管的制造工艺, CN:95106239[P]. 1996-02-07.
- [13] 张军. 双金属复合铸造工艺的研究[D]. 郑州:郑州大学, 2006.
- [14] 张剑锋,姜世杭,金朝阳,等. Cu中间层 SiC<sub>p</sub>/AlMMCs TLP 扩散连接过程分析[J]. 焊接技术, 2005,34(1):12-14.
- [15] 方洪渊,冯吉才. 材料连接过程中的界面行为[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [16] 黄华贵,季策,董伊康,等. 双金属复合管固-液铸轧复合工艺环形布流器设计及其流场模拟[J]. 复合材料学报, 2016,33(10): 2 246-2 252.
- [17] 黄华贵,季策,杜凤山. 双金属复合管固-液铸轧复合制力模型研究[J]. 机械工程学报, 2017,53(10):10-17.
- [18] HUANG H G, JI C, YANG Z Q, et al. Implementation and forming mechanism of the solid-liquid cast-rolling bonding (SL-CRB) process for steel/Al clad pipes [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017,30:343-352.
- [19] JI C, HUANG H G, SUN J N. Process window prediction of solid-liquid cast-rolling bonding (SLCRB) process through numerical analysis to fabricate bimetallic clad pipes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018,120:1 305-1 314.
- [20] JI C, HUANG H G, SUN J N, et al. Experiment and simulation research on bonding mechanism of bimetallic clad pipes fabricated by solid-liquid cast-rolling bonding (SLCRB) process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018,34:593-602.

(编辑:彭瑾)