

双金属铸焊复合辊套的制备工艺

王 迪, 荣守范, 李丹丹, 焦仁宝, 李洪波, 王俊发

(佳木斯大学材料科学与工程学院, 黑龙江佳木斯154007)

摘要: 介绍了一种低合金钢套筒与高铬铸铁工作层复合的双金属铸焊工艺。该工艺是在铸造好的套筒上堆焊一层熔点低于工作层的金属, 通过电磁感应线圈的预热和浇注工作层金属液时的加热, 以堆焊层为中间材质的过渡方式, 将套筒与工作层均匀地复合在一起。结合Fe-Cr-C三元系液相线相图确定堆焊层成分, 并采用正交试验的方法对堆焊工艺参数进行优化。通过COMSOL Multiphysics软件模拟不同预热温度时套筒的应力分布云图和感应加热温度场分布, 对套筒的预热温度及预热时间进行选择。当工作层浇注温度1 440 ℃, 套筒预热温度900 ℃, 感应加热时间60 s时, 成功制备出熔合层均匀、无夹杂缺陷的铸焊复合辊套, 验证了该工艺方法的可行性。

关键词: 双金属铸焊复合工艺; 电磁感应加热; 过渡层

作者简介:

王 迪 (1996-), 男, 硕士生, 主要研究方向为双金属铸焊复合工艺及复合界面的形成机理。E-mail: 1456863106@qq.com

通讯作者:

荣守范, 女, 教授, 博士生导师。电话: 13836659622, E-mail: rsfzz@163.com

中图分类号: TG335.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2020) 08-0866-07

基金项目:

寒带耕层土壤环境下触土部件磨粒磨损随机模型与磨损特性研究 (51875252); 双液异种金属复合界面凝固行为及梯度复合层形成机理研究 (51371090)。

收稿日期:

2019-12-26 收到初稿, 2020-01-09 收到修订稿。

轧辊是轧机用来生产轧材的关键部件。目前, 复合轧辊基本取代了整体轧辊, 离心铸造法因其具有设备简单, 投入量小等优点, 成为了复合轧辊的主流制备方法^[1]。因此, 离心铸造轧辊占轧辊总量的60%以上。离心复合轧辊的工作层多采用合金含量较高的耐磨铸钢或耐磨铸铁制成, 而辊芯多以球铁或高强度铸铁制成^[2]。离心复合轧辊中熔合层夹杂、大型夹杂物、裂纹等问题虽然早就被国内外诸多轧辊企业解决^[3-8], 但高强度、耐腐蚀、长寿命、减量化等高性能产品研发依然是主要的发展趋势^[9]。用低合金钢代替高合金钢, 用价格低廉的合金元素代替价格高昂的合金元素, 用效率更高的生产方式生产轧辊才是轧辊未来的发展方向^[10]。

本文提出一种双金属铸/焊复合工艺, 通过该复合工艺能使铸钢材质的套筒或辊芯与其他材质的工作层复合时达到良好的冶金结合状态, 同时, 还解决了厚大零部件难以均匀焊接成形的疑难问题^[11]。改变轧辊的应用现状, 为双金属铸/焊工艺的应用提供理论依据和生产技术指导。

1 双金属铸/焊复合工艺的原理

双金属铸/焊复合辊套的制备流程: 首先是在制备好的铸钢套筒上堆焊一层熔点低于工作层金属的过渡层, 然后利用电磁感应线圈预热并在浇入工作层铸铁液时加热, 使两者结合 (图1)。其特点一是低熔点过渡层的提出: 通过这种成分和熔点过渡的工艺, 能够使铸钢和铸铁实现完全平整的冶金结合的复合界面; 二是电磁感应线圈的应用: 在电磁搅拌的作用下, 夹杂物及难熔杂质可有效旋浮到铸型上表面, 使过渡层与后浇注的铁合金重熔结晶层更加洁净, 有效解决熔合层夹杂等问题。

由于预热铸钢套筒时, 会产生氧化皮, 直接浇注铸铁液很难将氧化皮冲刷掉, 最终导致复合失败。但低熔点堆焊层的提出, 可以将电磁感应预热温度控制在堆焊层材质熔点以下区域, 铸钢熔点在1 500 ℃附近^[12], 铸铁浇注温度控制在1 400 ℃左右, 浇入铸型后, 在感应加热的温度场中, 合金铸铁液不会立即凝固, 夹杂物和难熔的杂质在电磁搅拌的作用下旋浮到铸型顶部, 使铁合金重熔结晶层洁净度提高。该温度场下, 过渡层熔化, 铸钢套筒未被熔化, 从而实现两者均匀的冶金结合, 使

轧辊辊套的综合性能大幅提升。根据轧辊的使用环境装配合适的辊轴（图2），使得拆装方便，这正是制品高端化趋势下所要求具备的工作特性。除此之外，还可以直接在辊芯上进行堆焊，通过电磁感应线圈预热并在浇注工作层金属液时加热，直接制备出铸焊复合轧辊。

2 工艺方案

铸焊复合辊套的制备需要三个步骤：首先制备套筒，然后制备堆焊层，最后浇注工作层。

2.1 套筒制备

套筒需要高韧性焊接性能好的材料制作。为防止出现裂纹、断裂等问题，因此选用低合金钢，具体成分如表1所示。

采用KGPS-800型20 kg中频熔炼炉熔炼低合金钢，实物如图3所示。

2.2 堆焊层制备

2.2.1 堆焊层试验材料和设备

考虑到预热时堆焊层的抗氧化性和与工作层材质的相容性，选择高铬铸铁材质。图4是由Thermo-Calc软件计算Fe-Cr-C三元系液相线的投影图。从图中可以看出Fe-Cr-C三元系液相线会随着Cr含量的增多而升高，随着C含量的升高而降低。当C含量 > 3.5%，Cr < 15%时液相线处于1 249 ℃和固相线之间。

实际上，焊丝中的合金元素在焊接过程中是有损失的，焊缝金属一般由填充金属和局部熔化的母材组成^[13]。而母材中的合金元素几乎全部过渡到焊缝金属中。这样，焊缝金属中合金元素的实际浓度 C_w 为：

$$C_w = \theta C_b + (1 - \theta) C_d \quad (1)$$

式中： θ 为熔合比； C_b 为元素在母材中的含量，%； C_d 为熔敷金属（焊接得到的没有母材成分的金属）中元素的实际含量，%。

从上式可以看出，焊缝的含碳量主要取决于焊

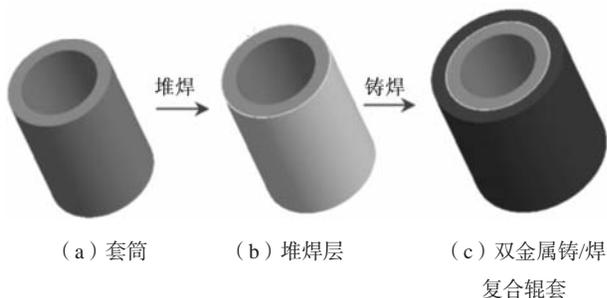


图1 铸/焊复合辊套制备流程

Fig. 1 Casting / welding composite roll sleeve manufacturing process



图2 装配示意图

Fig. 2 Assembly diagram

表1 低合金钢化学成分

Table 1 Chemical composition of low alloy steel $w_B / \%$				
C	Si	Mn	Cr	Mo
0.22 ~ 0.30	1.2 ~ 1.4	1.5 ~ 1.6	1.3 ~ 1.5	0.3 ~ 0.4

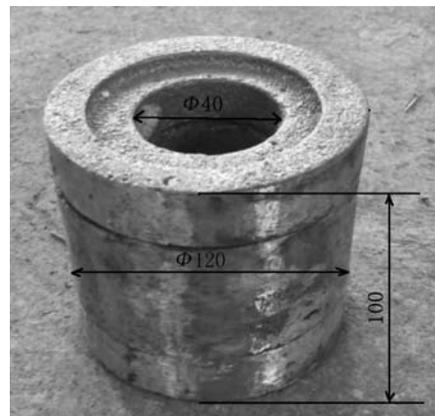


图3 套筒

Fig. 3 Sleeve

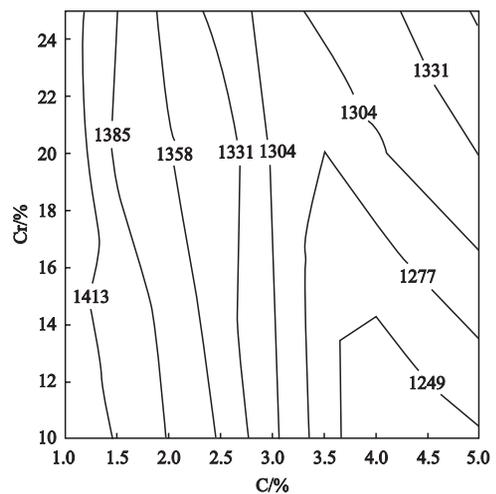


图4 Fe-Cr-C三元系液相线投影

Fig. 4 Liquidus projection of Fe-Cr-C ternary system

丝、母材的原始含碳量，母材低合金钢的含碳量为0.22%~0.3%，因此焊缝中的碳主要来自于焊丝，但焊丝中含碳量过高会引起飞溅和气孔。结合低合金钢熔点及工作层高铬铸铁成分选择堆焊层中的含碳量为3.5%，含铬量为15%，熔点范围为1 249~1 277 ℃。

试验设备采用CPXDS-500型CO₂气体保护自动药芯焊丝电弧堆焊机，焊丝采用JD-YD1068型Φ1.6 mm耐磨药芯焊丝。通过熔化焊丝形成熔滴的方式在辊芯表面进行堆焊制备过渡层。

2.2.2 堆焊工艺参数确定

为了制备具有一定厚度和冶金结合力强的堆焊

层，结合工艺特点设计了图5的堆焊层示意图。

采用正交试验的方法，对堆焊工艺参数，如电流、电压和送气量进行优化组合，优化后的堆焊工艺参数如表2所示。

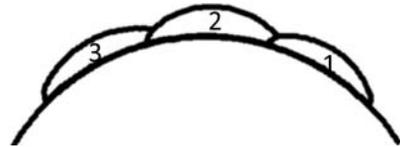


图5 堆焊层焊道分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of welding pass distribution of surfacing layer

表2 堆焊工艺参数
Table 2 Surfacing welding process parameters

电流/A	电压/V	车速/(mm·s ⁻¹)	摆幅/mm	摆速/(m·min ⁻¹)	气流量/(L·min ⁻¹)	喷嘴距工件高度/mm
220~240	22~24	1.5	40	22	10~15	10

2.2.3 堆焊层成分检测

堆焊后实物如图6所示。堆焊过渡层的厚度约4 mm。从图中可以看到堆焊表面的氧化皮和轻微裂纹，由于低熔点堆焊层主要起过渡作用，裂纹会通过浇注辊身金属液使其重熔，氧化皮会在电磁搅拌的作用下旋浮到铸型顶部。因此该缺陷对该工艺无影响。

通过SPECTROMAXx电弧/火花OES金属分析仪对堆焊后的过渡层进行成分检测，检测各点及结果如表3所示。

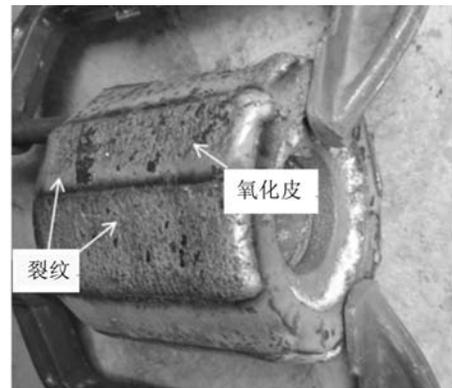


图6 堆焊后套筒

Fig. 6 Sleeve with surfacing layer

2.3 工作层浇注

2.3.1 工作层试验材料和设备

工作层需具备较良好的耐磨性、耐热性、耐蚀性和硬度，因此选用高铬铸铁^[4]，具体成分如表4所示^[4]。

采用KGPS-800型20 kg中频熔炼炉熔炼高铬铸铁，用DZK线切割机将试样切成方条，用OLYMPUS-GX71型光学电子显微镜进行金相观察。

2.3.2 套筒预热温度确定

工作层高铬铸铁的浇注温度要高于其熔点，同时要低于低合金钢的熔点，因此工作层浇注温度分别为1 380 ℃、1 400 ℃、1 420 ℃、1 440 ℃和1 460 ℃时，套筒预热800 ℃、900 ℃、1 000 ℃、1 100 ℃进行热应力模拟。在COMSOL Multiphysics 软件中，通过模型向导→二维轴对称→热应力接口进行几何绘制、材料属性定义和边界条件设定，根据上述材料的性质设定完毕后进行网格划分并研究。当浇注温度为1 460 ℃时，模拟的结果中堆焊层处上下两端的应力图都出现了变形，随着浇注温度的升高，不同预热温度的套筒堆焊

表3 堆焊层化学成分

Table 3 Chemical composition of surfacing layer w_B/%

项目	C	Cr
检测值1	3.51	15.06
检测值2	3.49	14.96
检测值3	3.49	14.91
平均值	3.495	14.983
设计值	3.5	15
误差	0.05	0.02

表4 高铬铸铁化学成分
Table 4 Chemical composition of high chromium cast iron w_B/%

C	Mn	Cr	B	Ni	Mo
2.9~3.1	1.1~1.3	24~26	0.1~0.2	0.4~0.6	0.5~0.7

层侧应力也随之升高,且未出现变形的情况,其余不同浇注温度的结果中浇注温度1 440 ℃时的应力变化最为清晰。图7是1 440 ℃时不同预热温度引起的热应力分布截面图。

从图7可以看出,在浇注工作层金属液的温度场中套筒的内壁及上下均受到应力,堆焊层处所受到的应力随着预热温度的升高而随之下降,预热温度达到1 100 ℃时与预热1 000 ℃相对比,应力变化略有降低,但变化不大。结合堆焊层、套筒熔点和在工作层浇注温度之间的热量传递关系,最后确定套筒的预热温度为900 ℃。

2.3.3 套筒预热时间确定

采用KGPS-800型70 kg中频熔炼炉进行电磁感应加热,根据设备参数结合COMSOL Multiphysics 对套筒进行感应加热模拟,结果如图8所示。

从图8可以看出,感应加热时间30 s时表层温度迅速升温达到800 ℃,60 s时堆焊层温度升到900 ℃,套筒温度在542~676 ℃范围,90 s时套筒内壁温度在764~853 ℃范围,由于套筒整体温度的不同会导致应力的出现,因此工作层金属液的最佳时间应在套筒整体的预热温度处于900 ℃时。从升温曲线可以看出100 s时升温达到900 ℃。因此升温100 s时即可浇注工作层金属液。在实际浇注过程中通过测温枪及调节中频炉功率大小来保证预热温度的准确性。

2.3.4 浇注温度与感应加热时间确定

为保证轧辊的复合质量,必须使浇注金属液后最初凝固的结晶层重熔,这就需要吸收足够的热量,这些热量是从浇注金属液和感应热中获取的。通过理论计算^[15],得出的最佳浇注温度范围为 $T_{\min}=1\ 380\text{ ℃}$ 、 $T_{\max}=1\ 440\text{ ℃}$,感应加热时间范围为 $t_{\max}=60\text{ s}$ 、 $t_{\min}=30\text{ s}$ 。

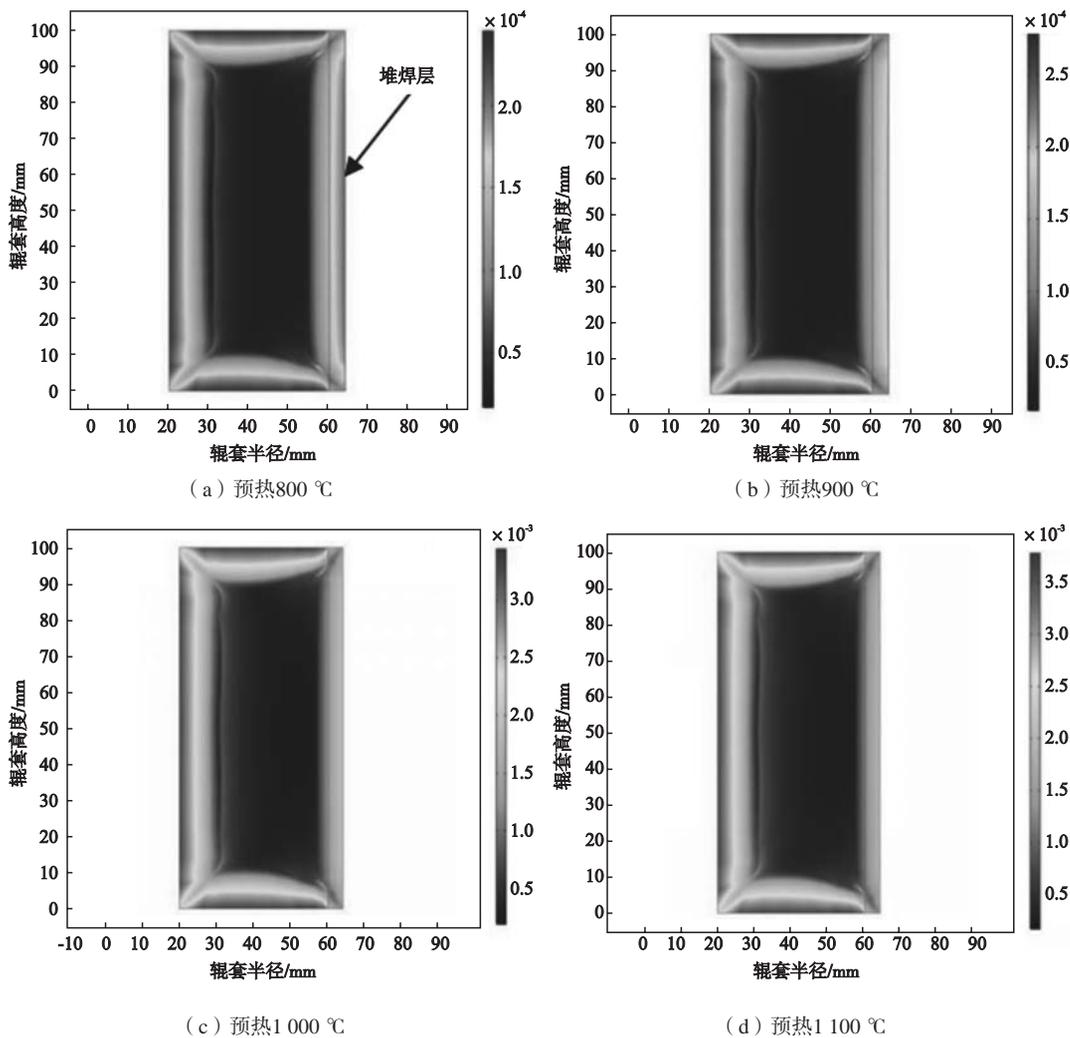


图7 不同预热温度引起的热应力分布图

Fig. 7 Thermal stress distribution at different preheating temperatures

3 试验结果

对制备好的辊套进行切割处理。图9a、b为浇注温度为1 380 ℃、1 440 ℃，感应加热时间为30 s，套筒预热温度为900 ℃时的试验结果。可以看出图 9a中由于浇注温度过低，感应加热时间不足，导致金属液黏度

过大，加上金属液进入型腔后很快结晶，两者合力阻碍了金属液的顺畅充填，使得型腔并未充满；图 9b中提高了浇注温度后，由于感应加热时间不足导致浇口凝固，金属液来不及补缩，使得上半部分出现缩孔。

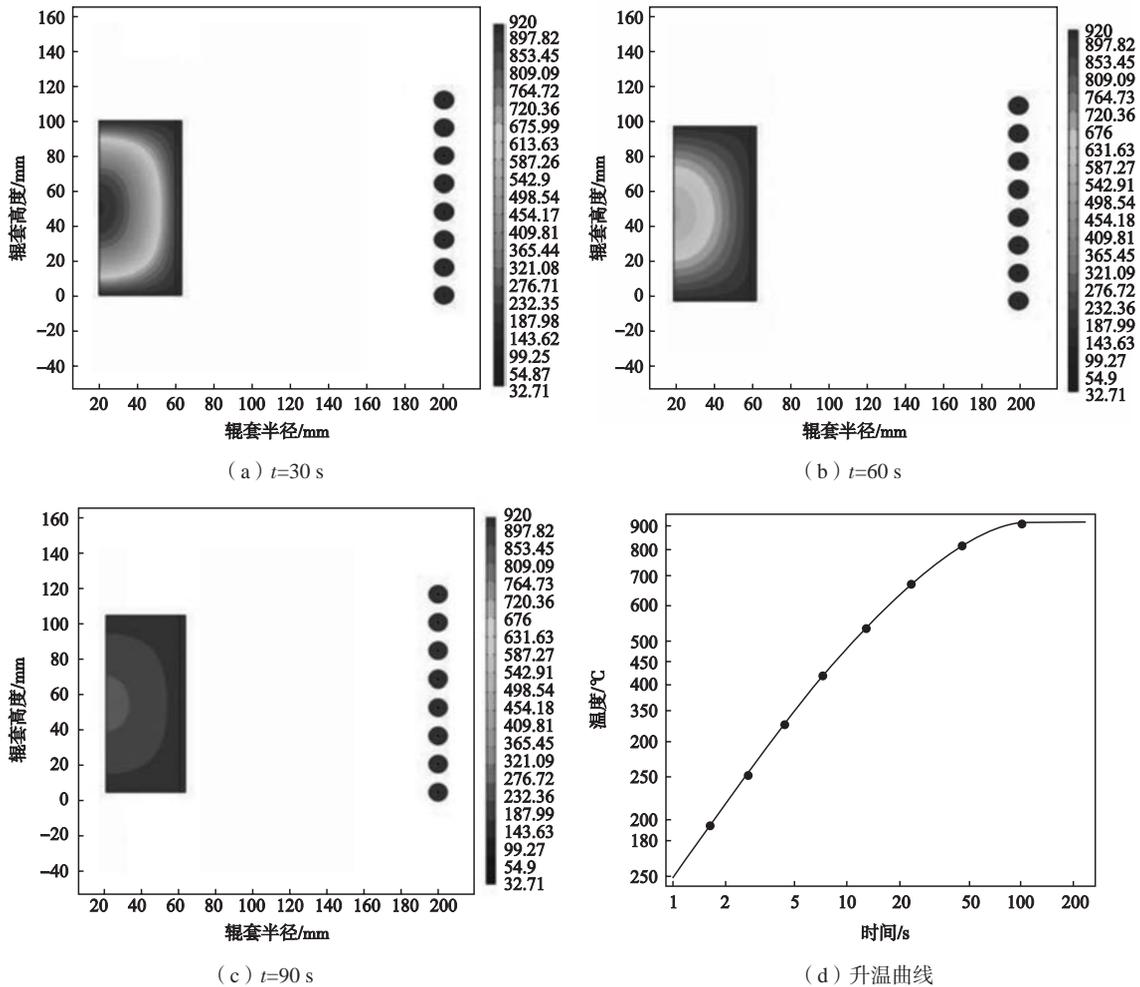
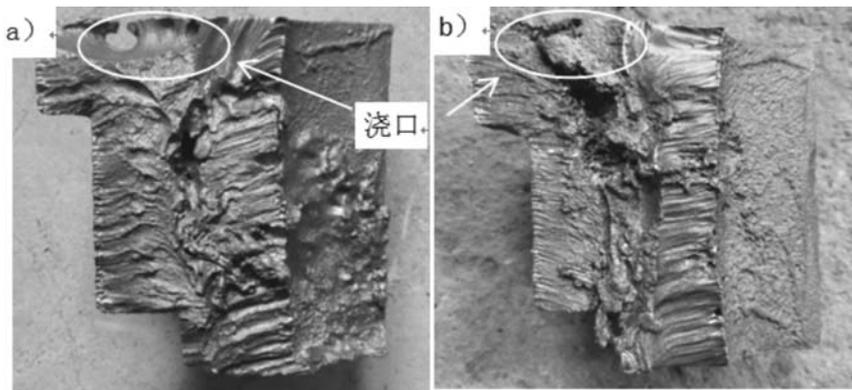


图8 不同感应加热时间套筒温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution of sleeve at different induction heating times



(a) 浇注温度1 380 ℃时纵向切割图

(b) 浇注温度1 440 ℃时纵向切割图

图9 试验结果1

Fig. 9 Experimental results 1

将工作层金属液的浇注温度调整为1 440 ℃，感应加热时间增加到60 s，套筒预热900 ℃进行浇注，试验结果如图10所示。从图10 a中的浇口断面处观察，无明显缺陷，从图10 b、d可看出横向和纵向的切割面上呈

现整齐的结合线，堆焊层消失，熔合层均匀，无夹杂缺陷，高铬铸铁与低合金钢两侧组织致密，良好的结合状态保证了复合质量。

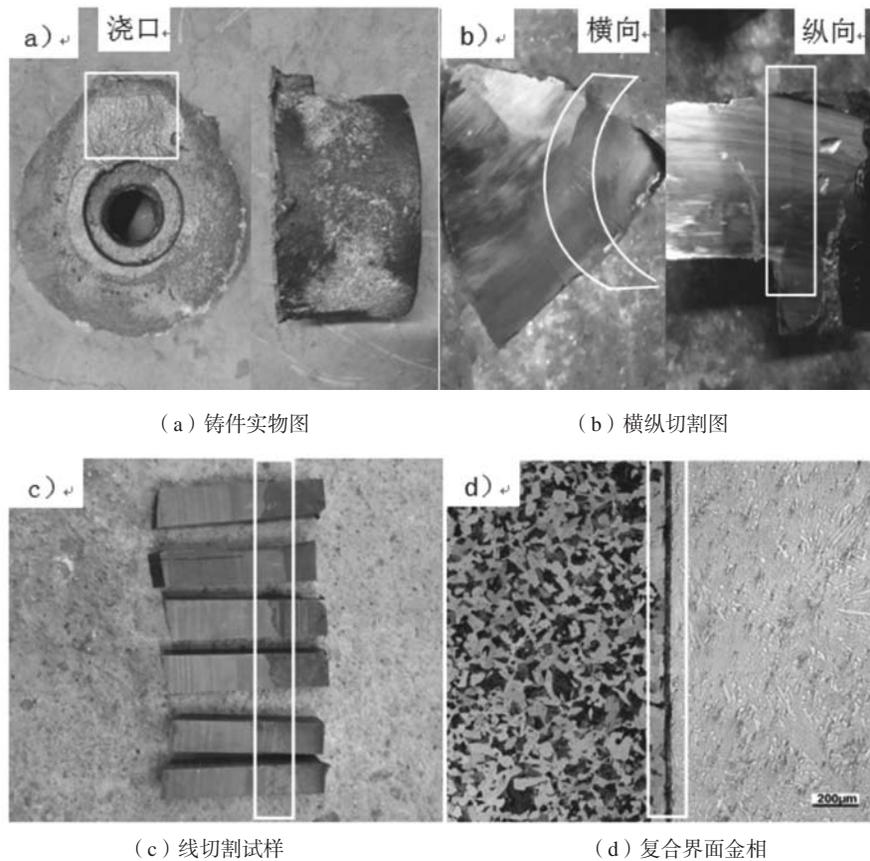


图10 试验结果2

Fig. 10 Experimental results 2

4 结束语

(1) 通过COMSOL Multiphysics 软件对不同预热温度时套筒的应力分布和感应加热温度场分布进行模拟并实际浇注，表明采用套筒预热900 ℃，工作层高铬铸铁液浇注温度1 440 ℃，感应加热时间60 s时，能够成功制备出 $\Phi 200$ mm， $H=100$ mm的铸焊复合辊套。

(2) 辊套的复合界面均匀平整，无夹杂、裂纹等缺陷，实现了界面的冶金结合。验证了双金属铸焊复合工艺的可行性。

参考文献:

- [1] FU H G, ZHANG X H. A study on centrifugal casting of high speed steel roll [J]. China Foundry, 2004 (2): 49-53.
- [2] 乐庸志, 钱国钢, 曾明. 提高铸铁轧辊心部强度的工艺研究 [J]. 铸造, 2011, 60 (1): 80-82.
- [3] LU Suling, XIAO Furen, GUO Zhihong, et al. Numerical simulation of multilayered multiple metal cast rolls in compound casting process [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 518-528.
- [4] BAI Yunlong, LUAN Yikun, SONG Nannan, et al. Chemical compositions, microstructure and mechanical properties of roll core used ductile iron in centrifugal casting composite rolls [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28 (9): 53-858.
- [5] FU Hanguang, XIAO Qiang, XING Jiandong. A study of segregation mechanism in centrifugal cast high speed steel rolls [J]. Materials

- Science and Engineering: A, 2008, 479 (1-2): 253-260.
- [6] 孙绍恒, 赵爱民, 赵立波, 等. 高铬钢复合轧辊工作层离心铸造中大型夹杂物的分析及控制办法 [J]. 铸造, 2016, 65 (3): 211-215.
- [7] 滕子浩, 廖敦明, 吴棣, 等. 轧辊铸件成形过程热裂纹萌生与扩展数值模拟 [J]. 铸造, 2019, 68 (9): 1042-1047.
- [8] 陈兴富, 董国卿, 孙建勋, 等. 离心铸造高镍铬复合轧辊中夹杂物分析 [J]. 铸造, 2017, 66 (11): 1213-1215, 1219.
- [9] 李万明, 姜周华, 董艳伍, 等. 复合轧辊界面理论研究的现状 [J]. 材料与冶金学报, 2011, 10 (S1): 77-80.
- [10] 韩翔. 高速钢复合轧辊材料及制造技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (18): 10-12.
- [11] RONG S F, ZHOU H T, ZHONG Y C, et al. Study on liquid-liquid bimetal composite casting hammers [J]. China Foundry, 2014 (5): 412-417.
- [12] 武拥军, 姜周华, 梁连科, 等. 钢的液相线温度的计算 [J]. 钢铁研究学报, 2002 (6): 6-9.
- [13] 于月光, 郑益民. CO₂保护电弧堆焊用药芯焊丝中合金元素的过渡系数 [J]. 机械工程材料, 1997 (4): 19-21.
- [14] ZHU Y C, WEI Z J, RONG S F, et al. Formation mechanism of bimetal composite layer between LCS and HCCI [J]. China Foundry, 2016, 13 (6): 396-401.
- [15] 王迪, 荣守范, 张圳炫, 等. 双金属液-固复合工艺对界面层影响的研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (1): 29-32.

Manufacturing Process of Bimetal Cast-Weld Composite Roll Sleeve

WANG Di, RONG Shou-fan, LI Dan-dan, JIAO Ren-bao, LI Hong-bo, WANG Jun-fa
(School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

Abstract:

This paper introduces a bimetal cast-weld composite process. The bimetal roll sleeve contains a sleeve of low alloy steel and a working layer of high chromium cast iron. The composite process is that the surfacing by welding produces a layer of metal with a lower melting point than the working layer on the cast sleeve, and then the surfacing layer is used as the intermediate material, and by means of the heat from the preheated cast sleeve by the electromagnetic induction coil and the heat from the working layer metal liquid poured, the sleeve and the working layer are tightly combined together. The composition of the surfacing layer was determined based on the Fe-Cr-C ternary liquidus phase diagram, and the surfacing welding process parameters were optimized by using orthogonal test method. The stress distribution cloud diagram and induction heating temperature field distribution of the sleeve at different preheating temperatures were simulated by using COMSOL Multiphysics software to select the preheating temperature and preheating time of the sleeve. When the pouring temperature of the working layer was 1 440 °C, the preheating temperature of the sleeve was 900 °C, and the electromagnetic induction heating time was 60 s, the cast-welded composite roll sleeve with uniform fusion layer and no inclusion defects could be successfully produced, which verified the feasibility of the process.

Key words:

bimetal cast-weld composite process; electromagnetic induction heating; transition layer