

引用格式:丁铭,鲁立,张禹,等.低合金钢堆焊镍基合金接头中的宏观偏析研究[J].热加工工艺,2023,52(15):55-58.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20211488  
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

# 低合金钢堆焊镍基合金接头中的宏观偏析研究

丁铭<sup>1</sup>, 鲁立<sup>2</sup>, 张禹<sup>1</sup>, 丁永三<sup>1</sup>, 杨佳<sup>2</sup>, 吕一仕<sup>2</sup>, 李克俭<sup>3</sup>, 蔡志鹏<sup>3</sup>

(1. 国家能源集团谏壁发电厂, 江苏 镇江 212006; 2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 3. 清华大学机械工程系, 北京 100084)

**摘要:**在 T23 低合金钢上堆焊了 ERNiCr-3 镍基焊材,研究了低合金钢堆焊镍基合金接头中的宏观偏析特点及形成机理。利用光学显微镜、扫描电镜和电子背散射衍射仪(EBSD)等分析工具,对堆焊后接头焊接界面处的组织进行了表征。结果表明,宏观偏析主要发生在焊道交叠处,在靠近熔合线的焊缝中形成 Fe 含量较高且晶体结构与低合金钢母材一样的条带状组织。宏观偏析的形成主要与母材和焊材的液相线温度差异有关,镍基焊材液相线温度低于低合金钢母材导致在焊道交叠处的局部熔池温度低于母材液相线温度,熔化的母材对流进入该区域会因为过冷而快速凝固,从而导致宏观偏析。选用与母材液相线温度更接近的焊材、降低焊接热输入有利于减少宏观偏析的发生。

**关键词:**堆焊;异种金属焊接;低合金钢;镍基合金;宏观偏析

中图分类号: TG455; TG401

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)15-0055-04

## Study on Macroseggregation in Welding Joint of Nickel-Based Alloy Overlay on Low Alloy Steel

DING Ming<sup>1</sup>, LU Li<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, DING Yongsan<sup>1</sup>, YANG Jia<sup>2</sup>,  
LYU Yishi<sup>2</sup>, LI Kejian<sup>3</sup>, CAI Zhipeng<sup>3</sup>

(1. National Energy Group Jianbi Power Plant, Zhenjiang 212006, China; 2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** ERNiCr-3 nickel-based alloy welding material was overlaid on the low alloy steel T23, and the macroseggregation characteristics and the formation mechanism in the welded joint were investigated. The structure of the welding interface after overlay welding was characterized by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and electron backscatter diffraction (EBSD). The results show that macroseggregation mainly occurs at the overlapping region of weld beads, a band structure in the weld metal near the fusion line is formed with high Fe content and same crystal structure with the low alloy steel base metal. The formation of macroseggregation is mainly related to the liquidus temperature difference between the base metal and the filler material. Because the liquidus temperature of nickel-based filler material is lower than that of the low alloy steel base metal, the temperature of local molten pool at the overlapping region of weld beads is lower than the liquidus temperature of base metal. Hence, the molten base metal flows into the region by convection will quickly solidify due to undercooling, resulting in macroseggregation. Selecting filler material with similar liquidus temperature to that of the base metal and reducing the welding heat input will help to reduce the macroseggregation.

**Key words:** overlay; dissimilar metal welding; low alloy steel; nickel-based alloy; macroseggregation

在低合金钢上堆焊镍基合金在火电、核电设备中具有广泛的应用。其一是利用镍基合金优异的抗腐蚀能力,堆焊镍基合金以隔离、保护耐蚀性较差的低合金钢基体,比如压水堆核电蒸汽发生器的管板

堆焊隔离层 Inconel690<sup>[1-2]</sup>。其二是用于电厂设备的堆焊修复,其焊后不用热处理就能极大提高修复效率,且对冷裂纹有很强的抵抗力<sup>[3]</sup>。但是,由于母材和焊材固有的成分差异,异种金属焊接时容易产生宏观偏析,而在靠近熔合线的焊缝中形成与母材成分更为接近的非均匀组织<sup>[4-6]</sup>。宏观偏析被认为是一种焊接缺陷,对接头服役安全性具有不利影响。Barr<sup>[7]</sup>等在 300M 低合金钢上堆焊 Aermet<sup>®</sup>100 合金时,在焊缝中由于宏观偏析而形成了岛状和半岛状的类似母材组织,并导致了凝固裂纹的产生。Alexandrov

收稿日期:2021-06-04

基金项目:国家能源集团科技项目(GJNY-19-82)

作者简介:丁铭(1973-),男,江苏泰兴人,高级工程师,硕士,从事电力生产管理和技术研发工作;E-mail:ming.ding.g@chnenergy.com.cn

通讯作者:李克俭(1989-),男,河北保定人,助理研究员,博士,研究方向为耐热合金的组织与性能;E-mail:kejianli@mail.tsinghua.edu.cn

等<sup>[8]</sup>在低合金钢上堆焊 625 镍基合金时发现宏观偏析易造成接头具有较高的氢致裂纹敏感性。目前国内对铸造过程中的宏观偏析研究较多<sup>[9-11]</sup>,但是对异种金属焊接接头中出现的宏观偏析报道仍然较少。

文中采用 ERNiCr-3 焊材在 T23 低合金钢上进行了堆焊试验,对堆焊接头中因宏观偏析形成非均匀组织的形态、成分和晶体结构等进行了表征,分析了焊接过程中宏观偏析的形成机理,可为避免此类接头中发生宏观偏析提供指导。

## 1 试验材料与方法

采用 ERNiCr-3 焊材作为填充金属,在 T23 低合金钢上进行多道堆焊,焊材和低合金钢母材的成

表 1 母材和焊材的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base metal and filler material (wt%)

材料	C	Si	Mn	Cr	Ti	Nb	Mo	Fe	Ni	W
T23	0.04~0.10	≤0.50	0.1~0.6	1.9~2.6	-	0.02~0.08	0.05~0.3	余量	-	1.45~1.75
ERNiCr-3	≤0.10	≤0.50	2.5~3.5	18~22	≤0.75	2.0~3.0	-	≤3.0	余量	-

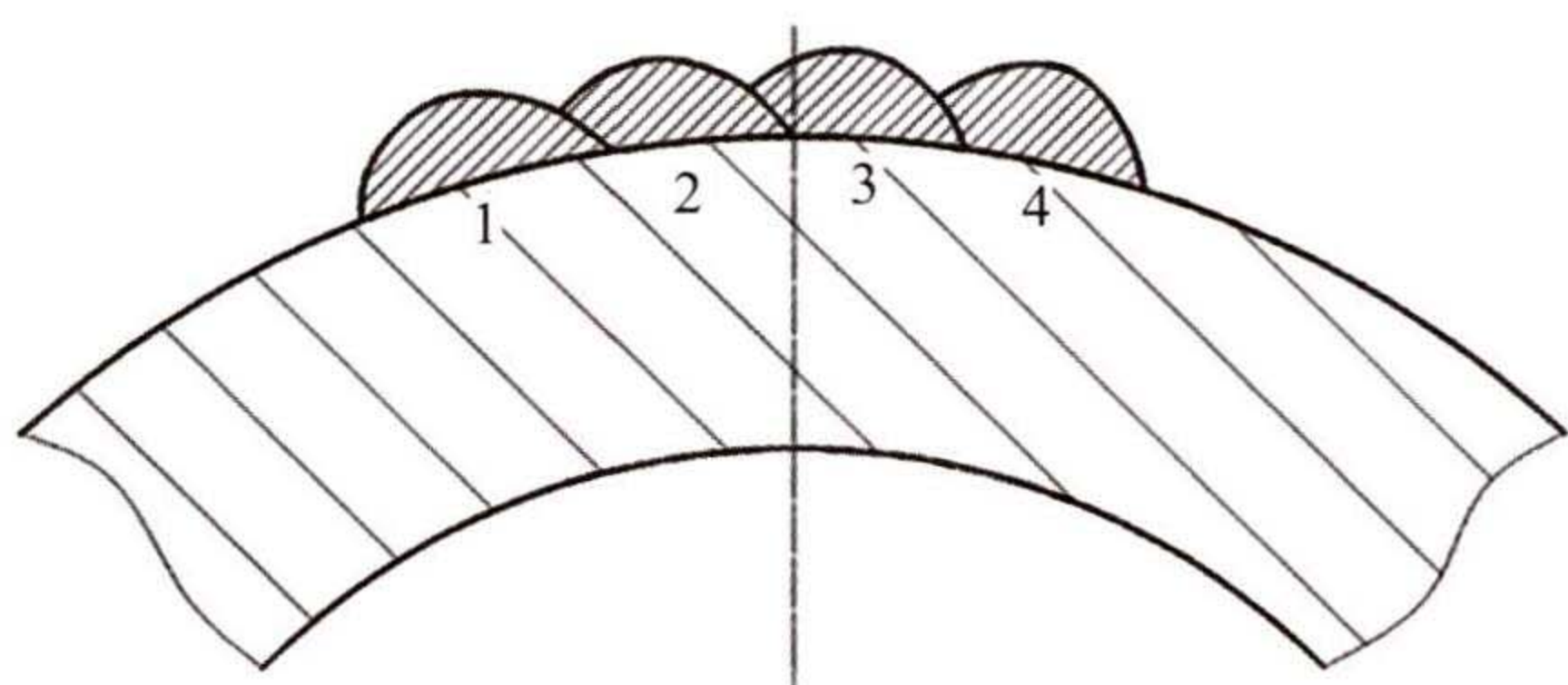


图 1 垂直于焊接方向的堆焊示意图  
Fig.1 Schematic of overlaying in the direction vertical to welding direction

## 2 试验结果及分析

### 2.1 接头界面区域组织表征

焊后对接头进行组织分析,焊接界面区域(熔合线附近)的组织形貌如图 2 所示。由于低合金钢耐腐蚀性低于镍基合金,为了揭示焊缝组织形貌不可避免导致 T23 一侧被过度腐蚀而较暗。图 2 分析位置

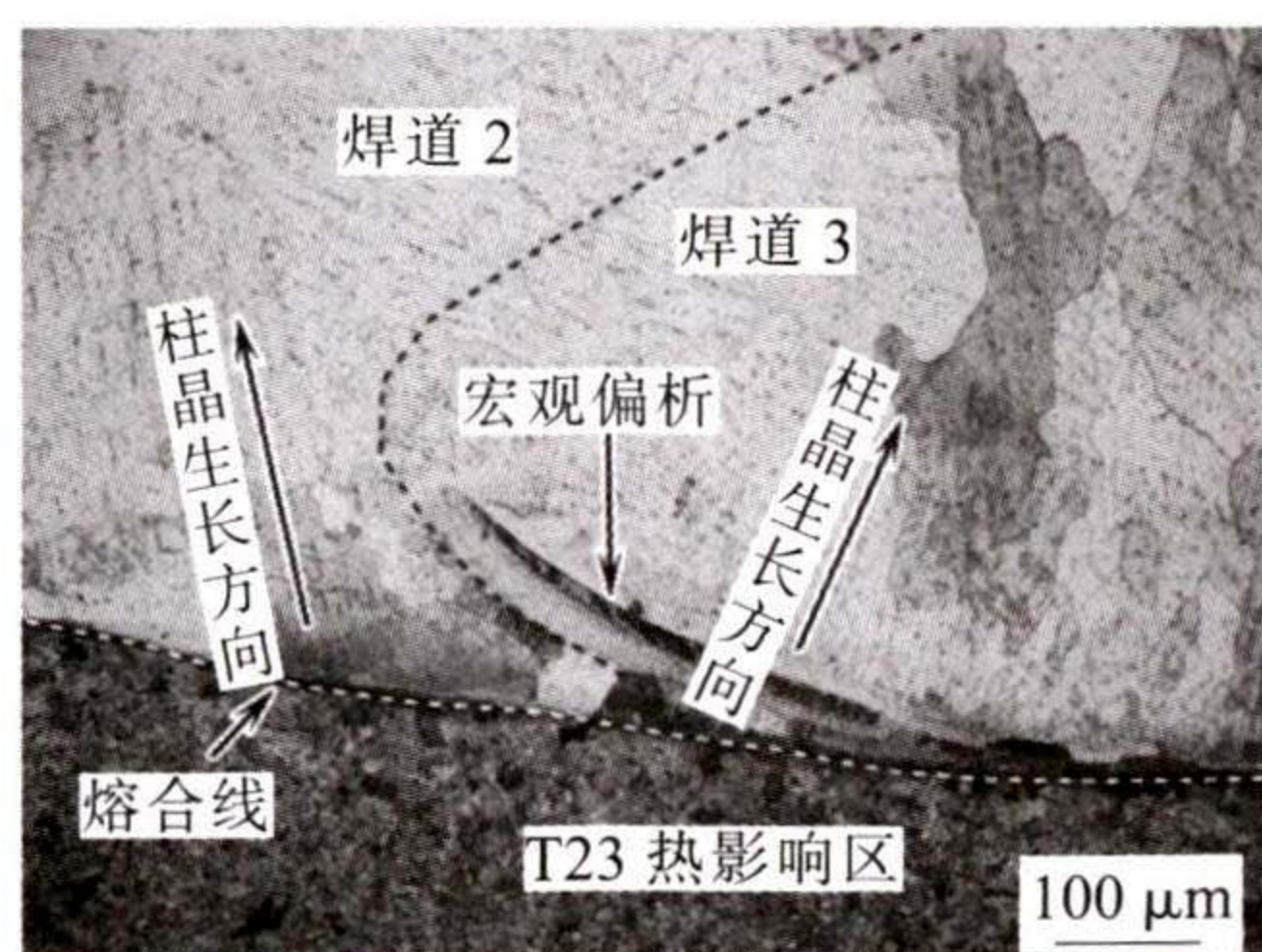


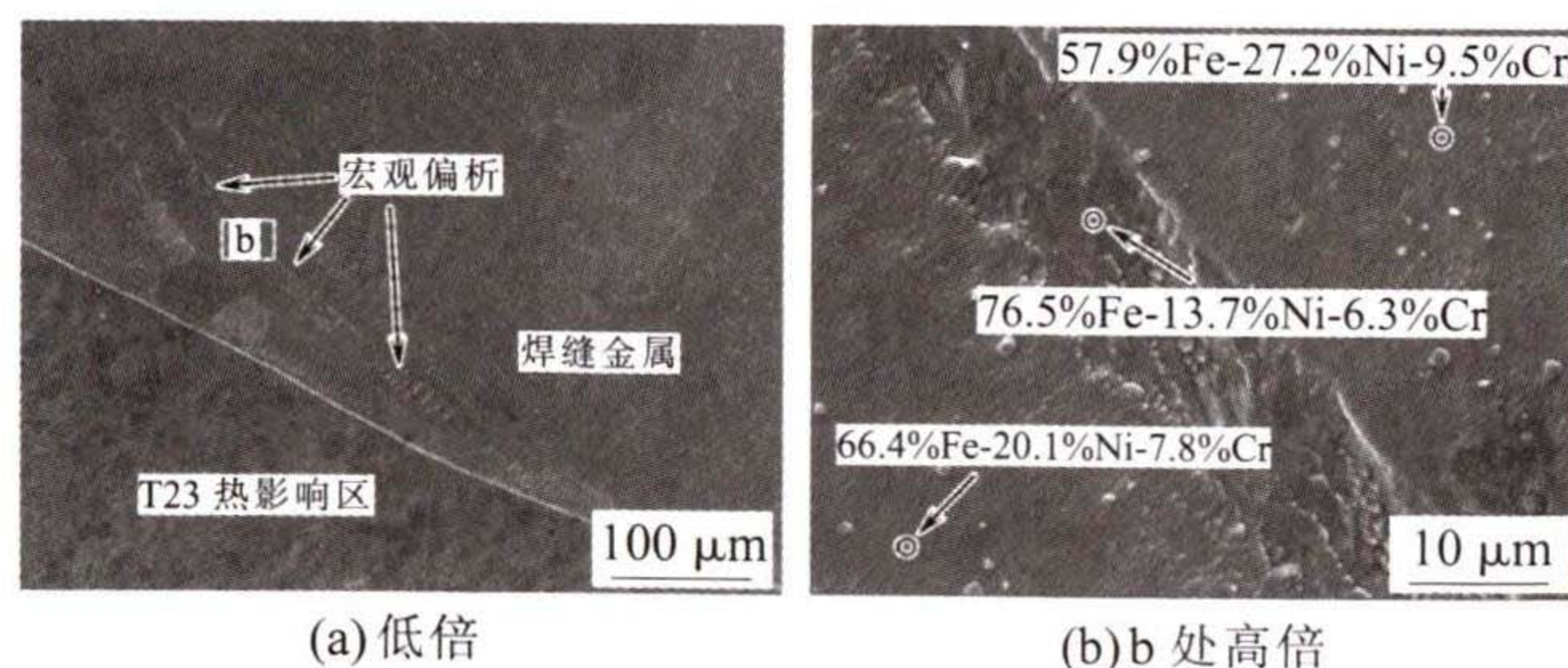
图 2 焊接界面区域光镜照片  
Fig.2 Optical microscope image of weld interface region

分如表 1 所示。堆焊在直径 36 mm、厚 7 mm 的 T23 钢管材上进行,以考虑其潜在的堆焊修复用途。堆焊示意图如图 1 所示,从左到右共堆焊了 4 道焊道。焊接方法为 TIG 焊,无预热,焊接电压为 9.5 V,电流为 120~160 A,送丝速度为 550~1000 mm/min,焊接速度为 66~110 mm/min。

焊接完成后,沿垂直于焊接方向切取组织分析试样,试样主要包含堆焊层和热影响区。对试样使用砂纸打磨至 3000 目后进行抛光,然后采用卡林试剂(100 mL HCl+100 mL CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH+5 g CuCl<sub>2</sub>)对试样进行浸蚀,时间为 100 s。采用光学显微镜、扫描电镜和 EBSD 对试样进行了组织分析,并使用扫描电镜配备的能谱仪对特定位置进行了成分测试。

为焊道 2 和焊道 3 的相邻位置,通过焊道内柱晶生长方向的不同可以判断焊道的分界线,如图中虚线所示。可以清楚地看到,在焊道 3 内靠近熔合线附近有一长约 300 μm 的黑色条带,该条带较暗同样是被过度腐蚀的结果,表明其成分更接近低合金钢母材,即发生了宏观偏析。另外,根据观察结果,宏观偏析仅出现在后一道焊道与前一道焊道相邻的区域。

采用扫描电镜对上述区域进一步进行了观察,结果如图 3 所示。焊缝中弥散分布着较多的析出相,而 T23 热影响区因过度腐蚀而看不到析出相,如图 3(a)所示。对黑色条带进行放大观察,其宽约 10 μm,内部局部区域分布着密集的析出相,如图 3(b)所示。用能谱仪对图 3(b)中条带内部、靠近熔合线一侧和远离熔合线一侧三个位置的成分进行了测试,测试位置和主要元素 Fe、Cr 和 Ni 的含量如图 3(b)所示。条带内部含有 76.5%的 Fe、13.7%的 Ni 和



(a) 低倍 (b) b 处高倍  
图 3 条带及其附近扫描电镜照片  
Fig.3 SEM images of the band structure and its surroundings

6.3%的Cr,具有较高的Fe含量,相比于母材,其Cr和Ni含量明显升高,说明其为母材与焊缝金属发生了有限的扩散或混合的结果。而条带两侧Fe含量均进一步下降,同时Ni、Cr含量均升高,但是仍以Fe为主要元素,表明在临近条带的两侧区域为部分混合区,但相比于条带内部,母材和焊缝金属混合得更为充分一些。

采用EBSD分析了上述条带及其附近区域组织的晶体结构,如图4所示(彩图见电子版),其中绿色代表体心立方结构(BCC),红色代表面心立方结构(FCC)。T23一侧为低合金铁素体钢,其晶体结构为BCC,而镍基焊缝一侧则为FCC。值得注意的是,上述条带为BCC结构,也就是其组织仍以铁素体为主,与低合金钢母材一致。而其周围的部分混合区由于较高的合金元素含量表现为FCC结构,与焊缝一致。

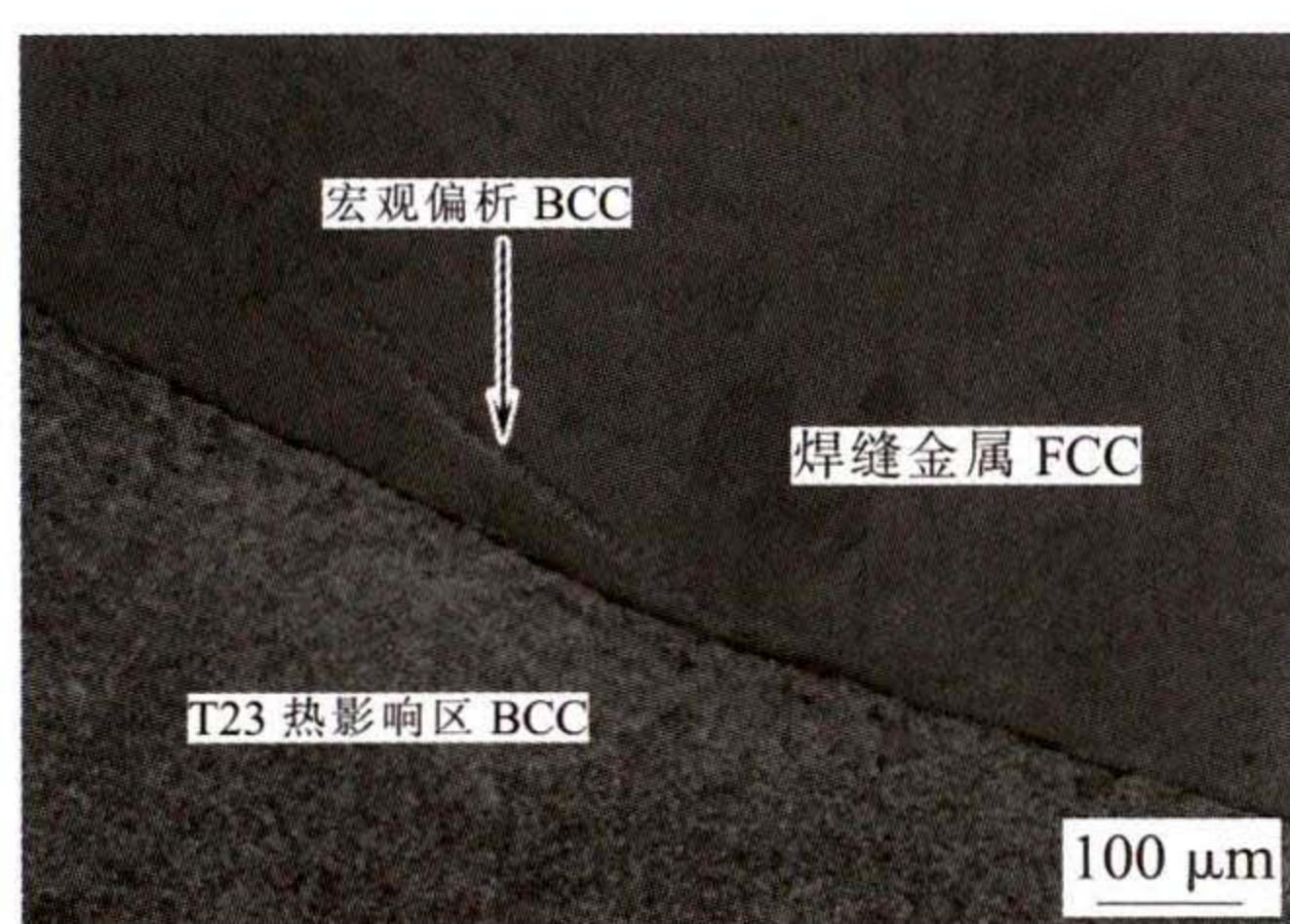


图4 接头界面区域晶体结构分布图  
Fig.4 Crystal structure map of weld interface region

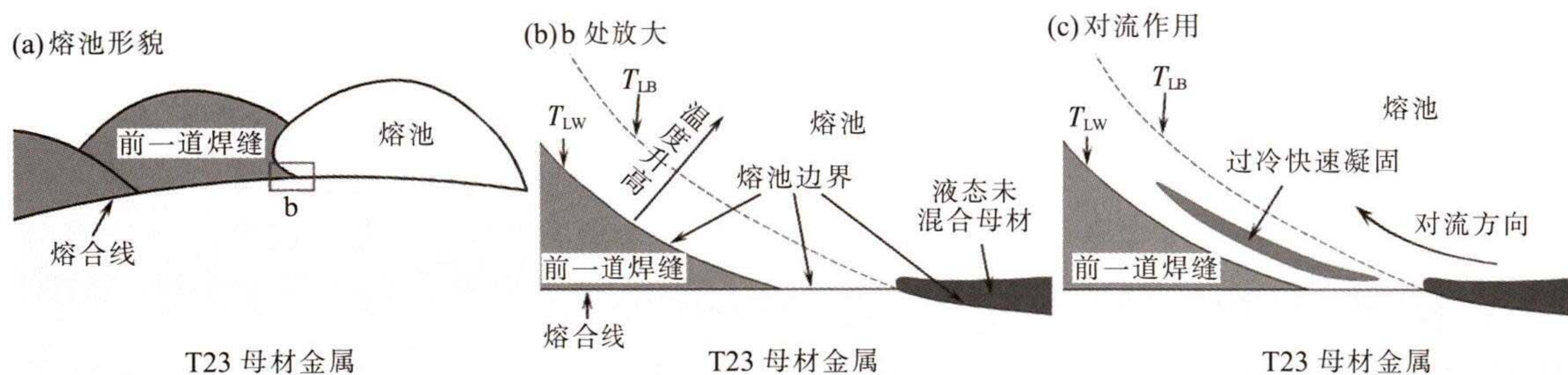


图5 宏观偏析形成机理图  
Fig.5 Schematic of macrosegregation formation mechanism

流作用,液态未混合母材金属被冲进等温线 $T_{LW}$ 和 $T_{LB}$ 之间的区域时,这部分液态母材金属将会因为过冷快速凝固,而来不及与熔池进行充分的混合或扩散,从而导致宏观偏析,如图5(c)所示。

根据上述宏观偏析形成机理,焊缝金属液相线温度低于母材导致在焊道交叠处形成的温度介于 $T_{LW}$ 和 $T_{LB}$ 之间的液态区域是宏观偏析形成的敏感区域。因此可以考虑从减小该敏感区域方面以避免

## 2.2 宏观偏析形成机理

根据试验结果,宏观偏析导致在靠近熔合线的焊缝内形成了成分与T23母材接近且晶体结构与T23母材相同的条带组织。可以判断,该条带组织是低合金钢母材和镍基焊缝金属有限扩散或混合的结果,因此其形成可能与熔化的低合金母材在熔池内快速凝固而来不及与熔池充分扩散、混合有关。考虑到对该接头进行组织观察时,宏观偏析主要发生后一焊道与前一道焊道相邻的位置,因此对焊道相邻位置的熔池形态、温度场和对流等进行分析,从成分过冷角度提出了宏观偏析形成机理,如图5所示。

图5(a)为焊接时垂直焊接方向的熔池形貌示意图,在焊接后一道焊道时由于热作用会导致前一道焊道局部熔化,即焊道发生交叠。对焊道交叠处也就是图5(a)中矩形框位置进行放大分析,如图5(b)所示。图5(b)中蓝色实线为熔池边界(彩图见电子版),其与前一道焊相邻位置的温度应该为焊缝金属的液相线温度( $T_{LW}$ ),而与T23母材相邻位置的温度应该为母材液相线温度( $T_{LB}$ ),也就是熔池边界并非是一条等温线。使用热力学软件JMatPro分别计算了镍基焊缝和T23母材的液相线温度,分别为 $1360^{\circ}\text{C}$ 和 $1462^{\circ}\text{C}$ ,即 $T_{LW} < T_{LB}$ 。考虑温度梯度方向,图5(b)中给出了等温线 $T_{LW}$ 和 $T_{LB}$ 的分布。由于液态金属的粘性,在靠近熔池边界的地方液态金属流动性差,存在一层熔化的未混合母材金属<sup>[12]</sup>。由于对

宏观偏析:①选用液相线温度与母材更接近的焊材;②降低焊接热输入以减小温度使其介于 $T_{LW}$ 和 $T_{LB}$ 之间的液态区域体积。


## 3 结论

(1) 在T23低合金钢上堆焊镍基合金的接头中存在宏观偏析现象,且主要发生在焊道交叠的区域。宏观偏析导致在靠近熔合线的焊缝中形成Fe含

量较高、晶体结构与母材一致的条带状组织。

(2) 低合金钢母材和镍基焊缝金属的液相线温度差异导致在焊道交叠处金属局部温度均低于母材液相线温度,当液态未混合母材金属进入该区域,由于过冷而快速凝固,从而导致宏观偏析。选用与母材液相线温度更接近的焊材、降低焊接热输入,有利于减少宏观偏析的发生。

#### 参考文献:

- [1] 张红斌,李守军,胡尧和,等. 国外关于蒸汽发生器传热管用 Inconel 690 合金研究现状[J]. 特钢技术, 2003,8(4):2-11.
- [2] 郭彦兵,庞亚龙,鲁艳红,等. 核电安全端 Inconel 690 合金堆焊层界面微观组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺,2020,49(11):6-10.
- [3] Dupont J N. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys[M]. Hoboken:John Wiley & Sons,2009.
- [4] Soysal T,Kou S,Tat D,et al. Macroseggregation in dissimilar-metal fusion welding[J]. Acta Materialia,2016,110:149-160.
- [5] Wang Y,Cui H,Fan M,et al. Characterization on the gradient microstructure near the fusion interface of dissimilar metal between high Cr heat-resistant steel and Ni-based Alloy 617 [J]. Materials Characterization,2019,151:227-236.
- [6] Yang Y,Kou S. Macroseggregation mechanisms in arc welds made with dissimilar filler metals [J]. Science and Technology of Welding and Joining,2013,15:15-30.
- [7] Barr C, Da Sun S, Easton M, et al. Influence of macroseggregation on solidification cracking in laser clad ultra-high strength steels [J]. Surface & Coatings Technology, 2018,340:126-136.
- [8] Alexandrov B T,Lippold J C,Sowards J W,et al. Fusion boundary microstructure evolution associated with embrittlement of Ni-base alloy overlays applied to carbon steel[J]. Welding in the World,2012,57:39-53.
- [9] 吴春雷,李德伟,朱晓伟,等. 电磁旋流水口连铸技术对小方坯凝固组织形貌和宏观偏析的影响 [J]. 金属学报,2019,55(7):875-884.
- [10] 申玉彬,于占举,孙胃涛,等. 低压铸造铝合金轮毂宏观偏析机理研究[J]. 特种铸造及有色合金,2020,40(9):993-995.
- [11] 沈厚发,陈康欣,柳百成. 钢锭铸造过程宏观偏析数值模拟 [J]. 金属学报,2018,54(2):151-160.
- [12] Savage W F,Nippes E F,Szekeres E S. Study of weld interface phenomena in a low alloy steel[J]. Welding Journal,1976,55:260-268. 

## 关于热加工工艺聘请编委的通告

为了顺应“十四五规划”这个新时期,促进热加工工艺期刊发展,热加工工艺编辑部特聘请新一届编委:2021-2025 届编委。

热加工工艺期刊由中国船舶集团主管,中国船舶集团热加工工艺研究所(十二所)和中国造船工程学会船舶材料委员会主办,创刊于 1972 年。主要报道铸造、锻压、焊接、金属材料及热处理等领域的试验研究论文。在国内外具有较大影响,是金属学及金属工艺类全国中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,常年被中国知网数据库收录。

为进一步加强与外界合作与学术交流,发挥专业技术媒体的平台作用,更好地服务于热加工工艺领域,推广交流新技术,加强科技成果向生产力转化,推动技术进步,提高行业经济效益,特聘请具有一定造诣的专家、学者和具有一定代表性的单位负责人担任本刊编委。专家应该具备高工、研究员及以上职称,学者应该具备副教授、教授及以上职称。热烈欢迎相关领域院士担任本刊编委。编委享有以下权利:颁发编委证书;优先发表论文;获赠期刊;编委成就宣传。

如您愿意担任本刊编委,请您索取并填写本刊编委申请登记表。

本刊邮箱:rjggy@vip.163.com

联系电话:029-38316274 029-38316271