

TIG 焊接电流对生物医用高氮奥氏体不锈钢 接头组织与力学性能的影响

王朝阳¹, 殷子强^{2a,2b*}, 段鹏^{2a,2b}, 姚鑫^{2a,2b}, 展琰^{2a,2b}, 任远^{2b}, 成巍^{2b}

(1.山东省疾病预防控制中心, 山东 济南 250014; 2.济南大学 a.机械工程学院,

b.山东省金属关键构件表面处理与智能装备重点实验室, 山东 济南 250022)

摘要:针对高氮奥氏体不锈钢焊接过程中组织稳定性与力学性能匹配问题,采用非熔化极惰性气体钨极保护焊 TIG 自熔对接焊工艺,在焊接速度和保护气体条件保持恒定的前提下,以焊接电流为主要变量,系统研究其对焊接接头组织分区特征、Cr₂N 氮化物析出行为及力学性能演化规律的影响。结果表明,焊接接头均形成焊缝区、粗晶热影响区和细晶热影响区的典型组织结构,焊接电流显著影响各区域的晶粒特征与组织均匀性。X 射线衍射分析显示,在 160~200 A 条件下焊缝中可检测到 Cr₂N 析出,而当焊接电流提高至 220 A 及以上时,Cr₂N 衍射峰明显减弱直至消失。结合焊接热循环特征分析认为,较高焊接电流通过改变焊缝区域在 Cr₂N 析出敏感温区的有效停留时间,对氮化物析出过程形成动力学抑制。力学性能测试结果表明,焊接接头的抗拉强度和冲击韧性随焊接电流变化呈现先降低、后升高再降低的非单调规律,其中在 220 A 条件下接头获得较优的强韧性匹配。研究表明,焊接电流通过调控 Cr₂N 析出行为及组织梯度特征,对高氮奥氏体不锈钢焊接接头的组织稳定性与力学性能具有关键影响。

关键词:高氮钢;TIG 焊;微观组织;力学性能;接骨钉;医用材料

中图分类号: TG44

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2026)02-0098-10

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Effects of TIG welding current on the microstructure and mechanical properties of biomedical high-nitrogen austenitic stainless steel joints

WANG Chaoyang¹, YIN Ziqiang^{2a,2b*}, DUAN Peng^{2a,2b}, YAO Xin^{2a,2b},
ZHAN Yan^{2a,2b}, REN Yuan^{2b}, CHENG Wei^{2b}

(1. Shandong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Jinan 250014, China; 2. University of Jinan,

a. School of Mechanical Engineering, b. Shandong Provincial Key Laboratory of Surface Treatment
and Intelligent Equipment for Metal Key Components, Jinan 250022, China)

收稿日期: 2026-01-09 修回日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51305245); 山东省自然科学基金(ZR2020ME150); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2024TSG0130, 2024TSG0111, 2022TSGC1130)

作者简介: 王朝阳(1974—), 男, 工程师, 研究方向为工程技术. E-mail: 13145405737@163.com

* 通信作者: 殷子强, 男, 副教授, E-mail: me_yinzq@ujn.edu.cn

Abstract : To address the compatibility issue between microstructure stability and mechanical property matching during the welding of high-nitrogen austenitic stainless steel, autogenous TIG butt welding was employed. With welding speed and shielding gas conditions kept constant, the welding current was used as the primary variable to systematically investigate its effects on the microstructural zoning characteristics, Cr_2N nitride precipitation behavior, and the evolution of mechanical properties of the welded joints. The results reveal that the welded joints exhibit typical microstructural zones, including the weld zone, coarse-grained heat-affected zone, and fine-grained heat-affected zone. Welding current significantly affects the grain characteristics and microstructural uniformity in each zone. XRD analysis indicates that Cr_2N is detectable in the weld metal at currents from 160 to 200 A, whereas when the welding current is increased to 220 A and above, the diffraction peaks of Cr_2N are significantly weakened and eventually disappear. Based on the analysis of welding thermal cycles, this suggests that higher welding currents kinetically suppress the precipitation process of Cr_2N by reducing the effective residence time of the weld zone within the critical temperature range sensitive to Cr_2N precipitation. Mechanical property tests show that the tensile strength and impact toughness of the welded joints exhibit a nonmonotonic trend with increasing welding current—initially decreasing, then increasing, and finally decreasing again. Optimal strength-toughness matching was achieved at 220 A. Overall, welding current plays a critical role in regulating Cr_2N precipitation behavior and microstructural gradient characteristics, thereby substantially affecting the microstructure stability and mechanical properties of high-nitrogen austenitic stainless steel welded joints.

Key words : high-nitrogen steel; TIG welding; microstructure; mechanical properties; bone nail; medical materials

随着高性能医用金属材料在骨科固定器件、心血管介入器械等领域的应用需求不断增加,对材料在强度、耐腐蚀性及结构稳定性方面提出了更高要求^[1-2]。高氮奥氏体不锈钢通过以氮代镍的合金化设计,在保持奥氏体稳定性的同时有效避免了镍元素可能带来的生物学风险,并依托氮元素的间隙固溶强化效应,获得了优于传统 316L 不锈钢的强度和疲劳性能^[3]。因此,该类材料被认为具有良好的工程应用潜力,并逐渐受到关注。

在医用金属器械的制造与装配过程中,焊接、修复及局部连接工艺不可避免。焊接热循环会显著改变材料局部的组织状态与元素分布特征,使焊接接头区域成为材料性能变化最为敏感的部位^[4-5]。相较于母材,焊接接头更易发生晶粒粗化、第二相析出及组织不均匀等现象,这些组织变化可能在后续服役载荷作用下影响接头的力学响应行为^[6-7]。因此,系统研究焊接工艺参数对高氮奥氏体不锈钢焊接接头组织与力学性能的影响,对于其工程应用具有重要意义。

然而,高氮奥氏体不锈钢在焊接过程中面临较为突出的组织稳定性问题。一方面,焊接热循环可能导致固溶氮在局部区域发生重新分配;另一方面,在适宜的温度区间内,过饱和氮元素易以 Cr_2N 氮化物形式析出^[8-9]。已有研究表明, Cr_2N 多沿奥氏体晶界或晶内析出,其存在不仅会削弱晶界结合强度,还可能改变局部组织均匀性,从而对焊接接头的力学性能产生不利影响^[10]。因此, Cr_2N 的析出行为被认为是影响高氮钢焊接接头组织稳定性和性能匹配的重要因素之一。

针对高氮钢的焊接行为,国内外学者已开展了一系列研究。王伟等人^[11]在研究双面同轴非熔化极惰性气体钨极保护焊 TIG 焊高氮钢时发现,保护气体中掺入氮气可有效减少焊接过程中的氮损失。明珠等^[12]系统分析了冷却速率对焊缝组织演化的影响规律,指出提高冷却速率有利于提高固溶氮含量。王立忠等^[13]从热输入角度研究了 TIG 焊接参数对接头组织与力学性能的影响,认为适当提高热输入有助于改善接头综合性能。ZHANG 等^[14]以双相不锈钢焊接接头热影响区为对象,系统分析了铁氧体化及两次再加热过程中微观组织演化、析出行为与点蚀耐腐蚀性的关系。结果表明,次级奥氏体与 Cr_2N 析出及元素分配特征是决定 HAZ 点蚀耐蚀性能的关键因素,不同再加热温度通过调控析出相行为显著影响接头耐腐蚀性。ODNOBOKOVA 等^[15]研究了两种高氮奥氏体不锈钢经 1 000 °C 退火或轧制后的显微组织和第二相弥散度对拉伸力学性能的影响。总体来看,现有研究多集中于保护气体成分、冷却速率或等效热输入等宏观参数对组织与性能的影响规律,而通常将焊接电流视为热输入的间接表征参数加以讨论,对焊接电流如何具体改变焊

接热循环路径及其对 Cr₂N 析出动力学行为的调控机制缺乏系统分析。此外,多数研究侧重组织表征结果与性能响应的相关性描述,而对“热循环—析出行为—力学性能”之间的内在因果关系关注不足。这在一定程度上限制了焊接工艺参数的可预测性与工程可控性,尤其不利于对组织稳定性要求更为严格的生物医用高氮钢构件的工艺优化设计。

基于此,本文以高氮奥氏体不锈钢为研究对象,在焊接速度和保护气体条件保持恒定的前提下,选取焊接电流作为主要工艺变量,系统研究其对焊接接头组织分区特征、Cr₂N 氮化物析出行为及力学性能演化的影响规律。通过分析不同焊接电流条件下焊接热循环特征,重点探讨焊接电流对 Cr₂N 析出敏感温区有效停留时间的调控作用,并结合显微组织、断口形貌及硬度分布结果,揭示焊接接头强韧性变化的组织学机制,为高氮奥氏体不锈钢焊接工艺参数的合理选择提供实验依据。

1 试验方法

1.1 试验材料与焊接工艺

试验采用 Fe-18Cr-18Mn-1.6Ni-0.022C-0.64N 高氮钢热轧板,其化学成分设计充分考虑了生物相容性和力学性能的最佳平衡,具体成分如表 1 所示。该成分设计中,18%的铬含量确保了基体具备良好的耐腐蚀性,锰与氮的组合有效替代了镍的奥氏体稳定化作用,同时避免了镍离子可能引发的生物毒性问题,0.64%的高氮含量则通过固溶强化显著提高了材料的强度和硬度。

表 1 试验母材的化学成分

Table 1 Chemical composition of the base metal used in the tests

<i>w</i> (C)/%	<i>w</i> (Mn)/%	<i>w</i> (Cr)/%	<i>w</i> (Ni)/%	<i>w</i> (N)/%
0.022	18.0	18.0	1.6	0.64

试板加工成符合骨板模拟件要求的规格:120 mm×30 mm×6 mm,开 60°Y 型坡口,留根 3 mm,这一设计充分模拟了实际植入物焊接的典型装配条件。焊接前,试板待焊区域经过严格的预处理流程:首先采用 240#至 2000#系列砂纸逐级打磨,随后使用金刚石抛光剂进行镜面处理,最后采用医用级丙酮进行超声清洗 15 min,确保焊接过程满足医疗产品制造对表面洁净度的严格要求。该预处理流程与生物医用金属器械制造中对表面洁净度与污染控制的要求相一致,可有效降低杂质引入对焊接接头组织演化及后续性能评价结果的干扰。

焊接工艺参数基于前期大量工艺试验的系统优化而确定,重点考察焊接电流这一核心参数的影响规律。如表 2 所示,焊接电流在 160~240 A 范围内,以 20 A 为步长,梯度变化,其他参数保持恒定,以准确揭示电流参数的单独影响效应。

表 2 TIG 自熔拼焊工艺参数

Table 2 Parameters of the autogenous TIG butt welding process

序号	电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V	焊接速度 <i>v</i> /(mm·min ⁻¹)	保护气流量 <i>Q</i> /(L·min ⁻¹)
1-1	160	15	150	12
1-2	180			
1-3	200			
1-4	220			
1-5	240			

1.2 分析与测试方法

试验采用 WSME-351R 奥太氩弧焊机(TIG 焊)对母材和焊缝采用王水进行腐蚀,使用 4XC 光学显微镜观察高氮钢母材及焊缝金相组织;利用场发射扫描电镜捷克 TESCAN MIRA LMS (SEM)观察拉伸及冲击断口形貌;美国 EDAX-TSL(EBSD)观察相组成及晶粒取向差分布;使用 402MVD 显微维氏硬度计对试样的

表面硬度进行测量,取距离焊缝表面 0.5 mm 处为线硬度的测试位置,自母材区起每隔 0.05 mm 取一点测量,依次穿过热影响区及焊缝区。

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织演化规律

对母材及焊接接头微观组织的多尺度系统表征揭示了材料优异的初始状态及焊接工艺的可行性。电子背散射衍射(EBSD)结果如图 1 所示:母材相分布图显示奥氏体(γ)相分数为 99.8%。这种高度稳定的单相奥氏体结构特征为植入物应用提供了双重保障:在物理特性层面,单一奥氏体相确保了材料在强磁场环境中保持稳定的顺磁性,这对于术后核磁共振检查的兼容性至关重要;在化学稳定性层面,均匀的单相结构有效避免了异相间电位差引发的微观电化学腐蚀,为植入物在生理环境中的长期服役提供了基础保障。

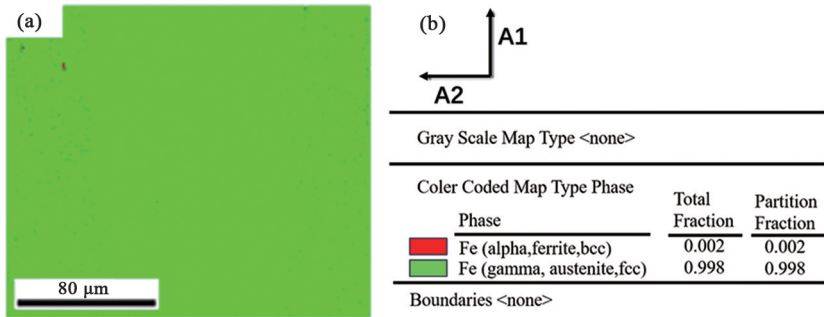
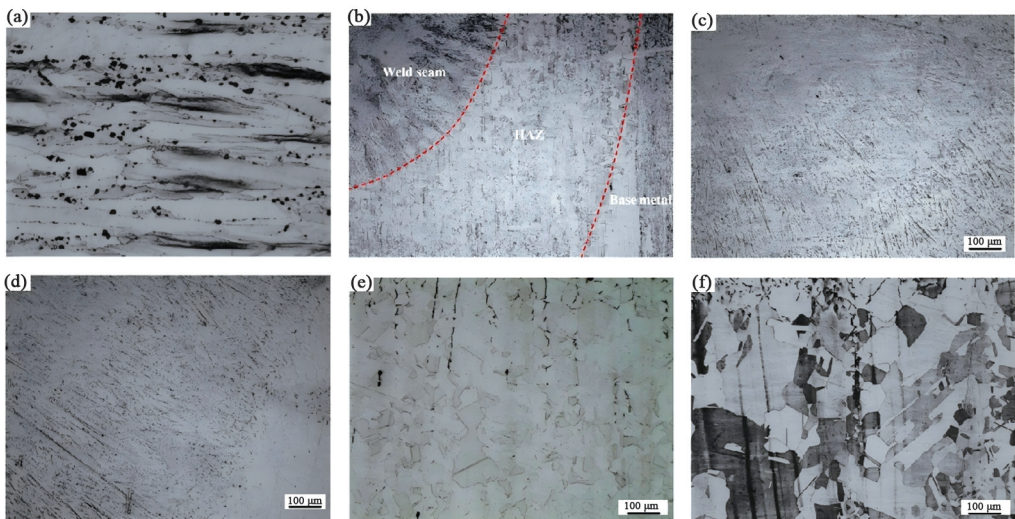


图 1 母材相图

Fig.1 Phase diagram of the base metal

焊接热过程的引入引发了接头区域显著的微观结构重组。如图 2(b)~(f)所示,所有焊接参数下接头均形成了典型的焊缝区(WM)、粗晶热影响区(CGHAZ)、细晶热影响区(FGHAZ)和母材(BM)四层结构。在焊缝区域,由于较高的冷却速率,形成了外延生长的柱状晶结构,晶体学分析显示其生长方向与最大热梯度方向一致。热影响区则表现出明显的晶粒尺寸梯度变化,CGHAZ 区域由于经历峰值温度($>1\,200\,^{\circ}\text{C}$)和较长的高温停留时间,发生了显著的晶粒粗化;而 FGHAZ 区域因峰值温度较低($800\sim 1\,000\,^{\circ}\text{C}$)且冷却较快,晶粒尺寸与母材相当。



注:(a)母材;(b)焊接接头;(c)220 A 焊缝;(d)240 A 焊缝;(e)160 A CGHAZ;(f)220 A CGHAZ。

图 2 母材及焊接接头组织形貌

Fig.2 Microstructural morphologies of the base metal and welded joint

2.2 氮化物析出行为分析

如图 3 所示,X 射线衍射分析揭示了一个关键现象:焊接电流对 Cr_2N 氮化物析出行为具有显著影响。在对焊缝衍射图谱分析时发现 160 A、180 A 及 200 A 接头均有 Cr_2N 析出,220 A 及 240 A 接头无析出相,所有接头均未发现 M_{23}C_6 析出。研究表明,若高氮钢 $w(\text{C})/w(\text{N}) < 0.1$,焊缝中将析出 Cr_2N ,本试验钢碳氮两种元素质量比为 0.034,符合规律。但 220 A 接头均未发现 Cr_2N 析出,240 A 接头几乎无 Cr_2N 析出。结合图 4 试验钢的 Fe-N 伪二元相图分析,虽然较高焊接电流对应更大的热输入,但其同时导致焊缝区峰值温度显著升高并扩大熔池尺寸,使焊缝及邻近区域在高温区间 ($>1\ 100\ ^\circ\text{C}$) 停留时间延长,而在 Cr_2N 析出敏感温区 (约 $850\sim950\ ^\circ\text{C}$) 的有效停留时间反而缩短。在快速通过该析出温区的条件下,氮化物形核与长大受到动力学限制,从而抑制了 Cr_2N 的析出。

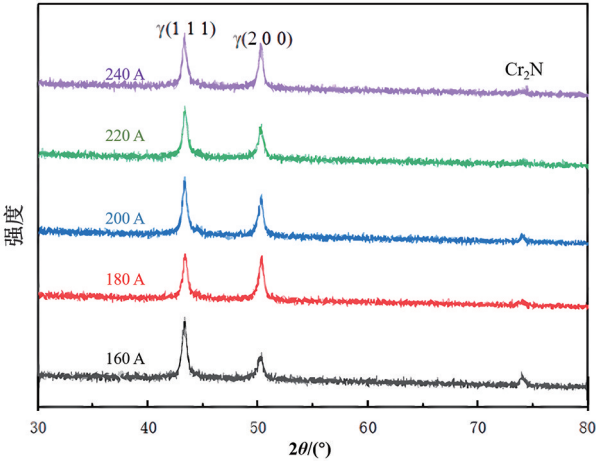


图 3 不同焊接电流下高氮钢焊缝的 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD diffraction patterns of high-nitrogen steel welds at different welding currents

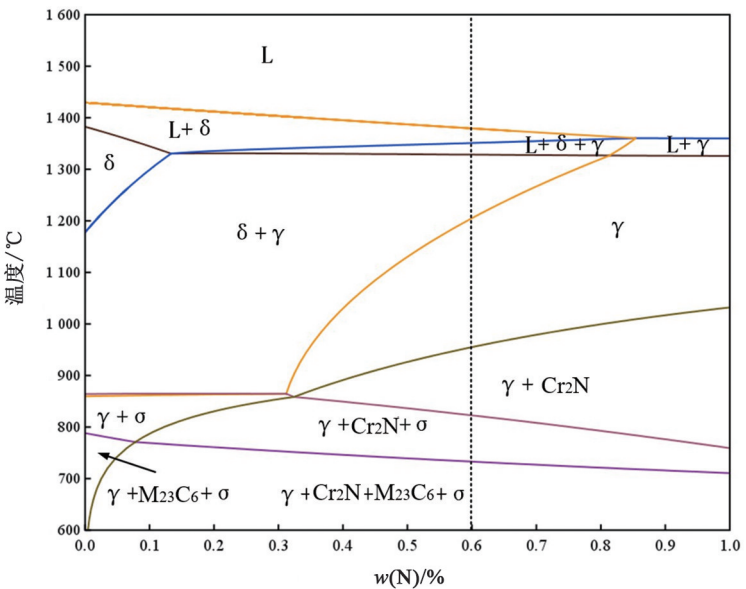


图 4 试验钢的 Fe-N 伪二元相图

Fig.4 Fe-N pseudo-binary phase diagram of the steel under test

从生物学应用角度评估, Cr_2N 氮化物的析出是一个需要严格控制的负面现象。 Cr_2N 主要沿奥氏体晶界以连续薄膜状析出,这种析出形态不仅严重破坏材料的晶界结合强度,成为微观裂纹的优先萌生位置,更重要的是会导致晶界附近形成的贫铬区。在含有氯离子的人体体液环境中,这些贫铬区将作为优先腐蚀起始点,显

著加速材料的局部腐蚀进程,并促进铬、锰等金属离子的释放,可能引发植入物周围的炎症反应和组织不良反应。XRD 表明焊接热循环对 Cr_2N 的析出行为具有显著影响,该变化将直接影响焊接接头的组织稳定性。

2.3 力学性能表征

对于承载型生物医用植入物而言,材料在服役过程中不仅需承受静态载荷,还需长期经受复杂的交变应力与局部应力集中作用。焊接接头的强度、塑性与冲击韧性直接关系到植入物在体内服役过程中的抗裂能力与结构可靠性,因此对接头力学性能的系统表征对于评估其生物医用适用性具有重要意义^[16]。系统的力学性能测试结果表明,通过工艺参数优化可获得满足医用要求的焊接接头。

图 5 为本文焊接试件的拉伸断口宏观形貌,试样主要断裂位置是焊缝区,部分断裂位置为热影响区,均有颈缩现象,且拉伸断口显微形貌均为形态及大小不一的等轴韧窝(图 6),所以断裂类型为韧性断裂。受拉伸载荷作用,初始裂纹沿拉伸方向延长,形成空洞,在拉伸载荷的持续加载下,空洞互相连接,出现断裂情况,正应力作用下的韧窝一般呈等轴状。图 6 为室温拉伸断口微观形貌 SEM 图,结果表明母材及 220 A 接头韧窝底部未见第二相粒子,其余接头韧窝底部均存在第二相粒子。对该粒子进行 EDS 测定,结果如图 7,判断其为 Cr_2N 析出,与 XRD 结果相符。

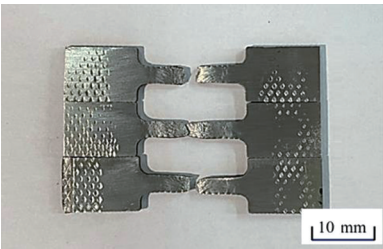
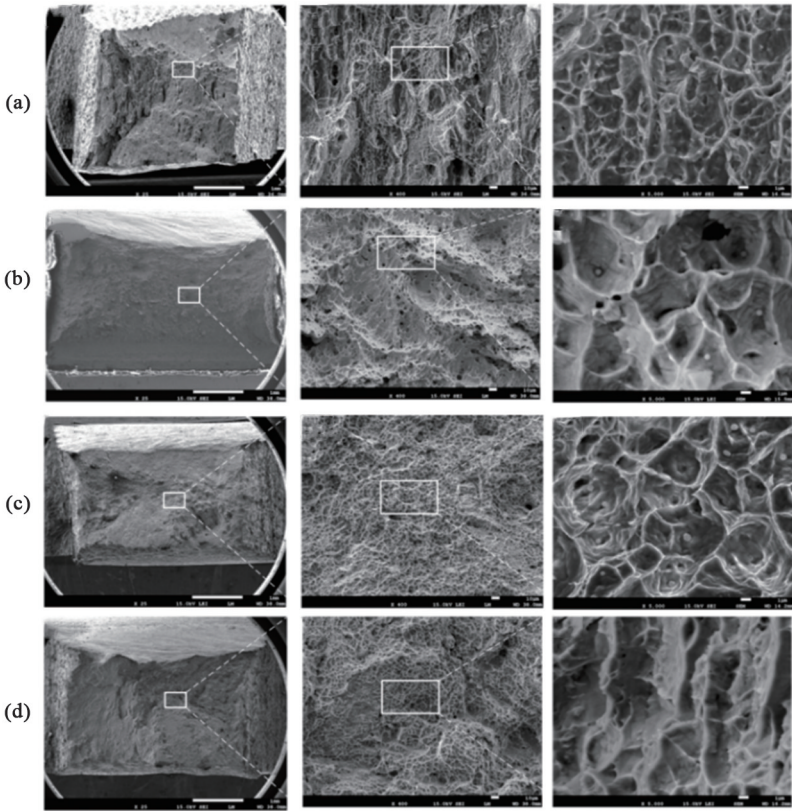


图 5 拉伸断口宏观形貌

Fig.5 Macroscopic morphology of the tensile fracture

母材平均抗拉强度为 1 126 MPa,焊接接头的抗拉强度随着焊接电流的增大呈现先减小后增大再减小的趋势,在焊接电流为 220 A(1~4 试样)时出现抗拉强度极大值,为 900.8 MPa,如图 8 所示。



注:(a)母材;(b)160 A;(c)200 A;(d)220 A。

图 6 室温拉伸断口微观形貌 SEM 图

Fig.6 SEM micrograph of the tensile fracture at room temperature

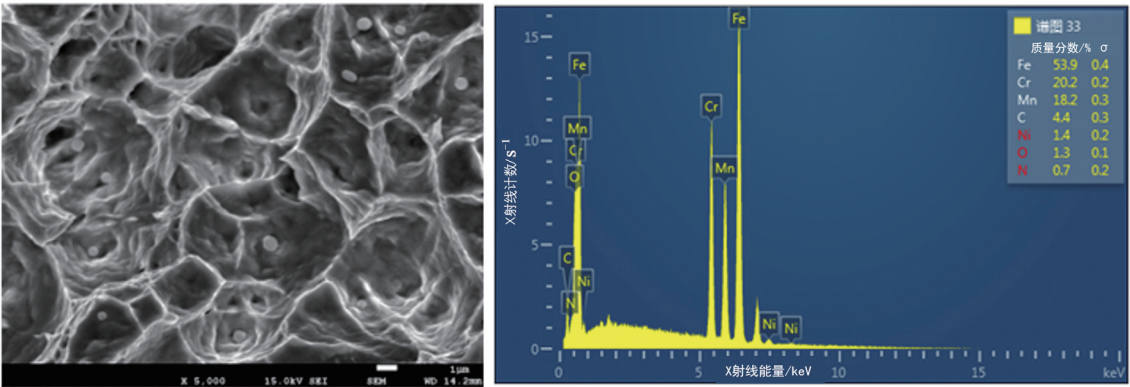


图 7 拉伸断口形貌及韧窝底部第二相粒子 EDS 谱图

Fig.7 Tensile fracture morphology and EDS spectra of second-phase particles at the bottom of the dimples

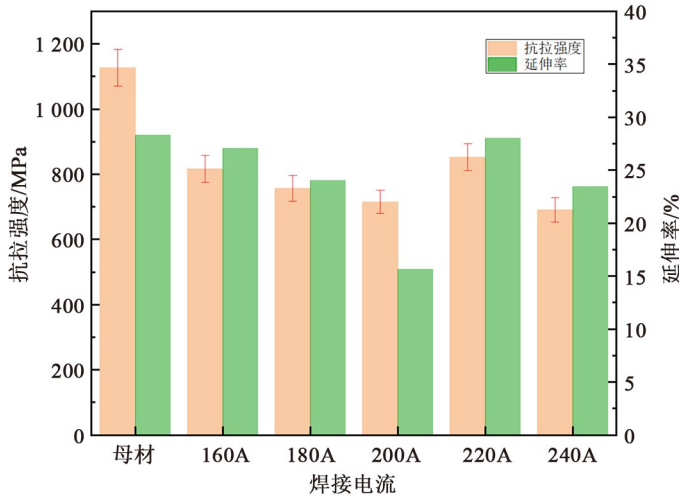
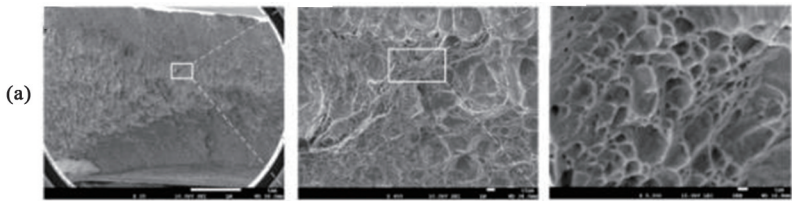


图 8 不同焊接电流下焊接接头抗拉强度及延伸率

Fig.8 Tensile strength and elongation of welded joints at different welding currents

冲击断口显微形貌如图 9 所示,母材及焊接接头的断口形貌均呈现韧性断裂特征,其断口形貌为韧窝,母材及 220 A 接头断口韧窝尺寸较大,一般来说,韧窝尺寸越大,材料的塑性越好。母材及 220 A 接头韧窝底部无第二相粒子,其余接头均存在第二相粒子,图 10 为第二相粒子 EDS 测定结果,判断其为 Cr_2N 析出,与 XRD 结果相符。

如图 11 所示,母材低温平均冲击韧性为 174.38 J/cm^2 ,室温平均冲击韧性为 177.86 J/cm^2 。焊接接头的冲击韧性随着焊接电流的增大呈现先减小后增大再减小的趋势,数值分布较为集中。在焊接电流为 220 A 时出现极大值,低温冲击韧性为 153.59 J/cm^2 ,达到母材的 88%左右;室温为 160.33 J/cm^2 ,达到母材的 90%左右。



注:(a)母材;(b)180 A;(c)200 A;(d)220 A。

图 9 室温冲击断口微观形貌 SEM 图

Fig.9 SEM micrograph of the impact fracture microstructure at room temperature

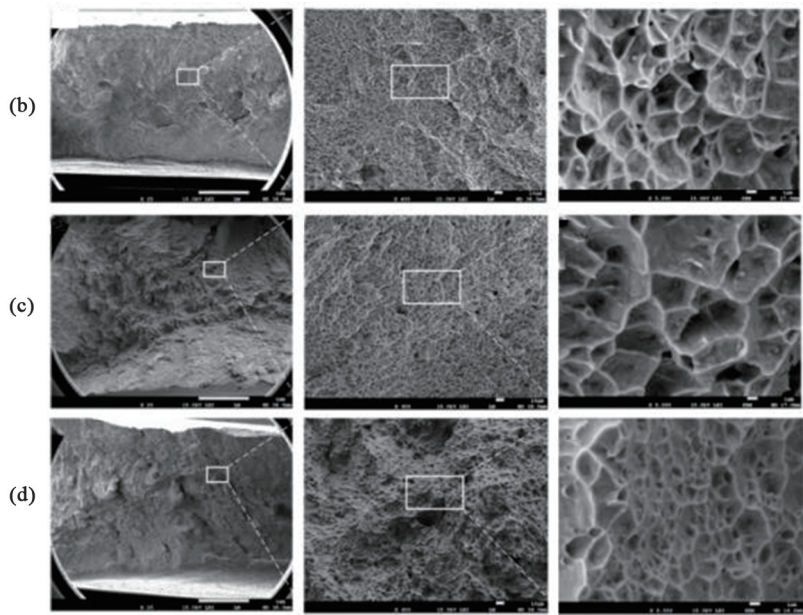


图 9(续)

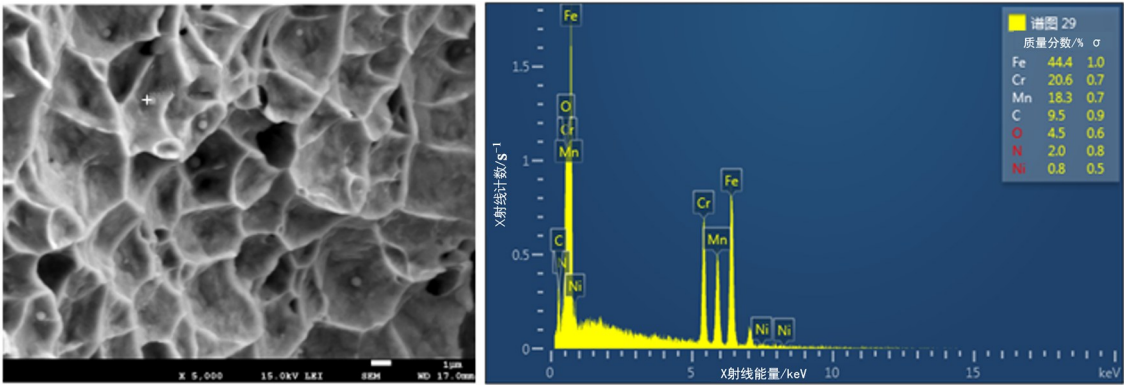


图 10 冲击断口形貌及韧窝底部第二相粒子 EDS 谱图

Fig.10 Impact fracture morphology and EDS spectra of second-phase particles at the bottom of the dimples

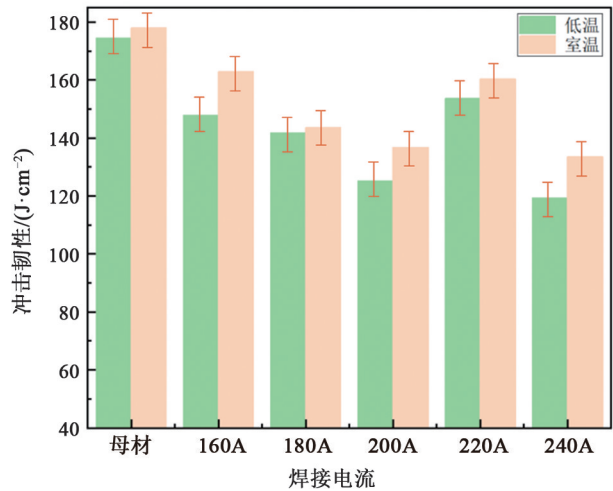


图 11 不同焊接电流下焊接接头冲击韧性

Fig.11 Impact toughness of welded joints at different welding currents

由图 12 中焊缝显微硬度分布曲线可见,焊缝区硬度集中在 290~330 HV,热影响区硬度介于焊缝区和母材之间,母材硬度在 400 HV 左右。观察所有焊接电流所得的接头硬度分布,发现硬度值均在热影响区陡

然下降,于焊缝中心又稍有回升,硬度值曲线均呈“W”形。图 13 中虚线为熔合线位置,硬度值在虚线左侧 FGHZ 及 CGHAZ 陡然下降;焊缝区近熔合线处,柱状晶较大,硬度持续降低;焊缝心部组织为细小的等轴晶,硬度值有一定的回升。

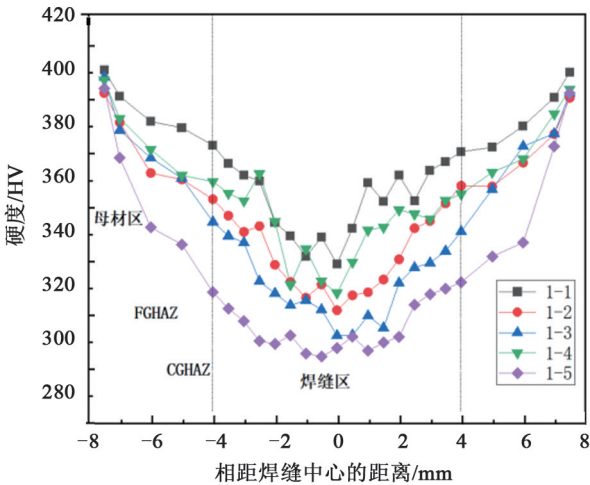


图 12 不同焊接电流下的焊缝显微硬度分布曲线

Fig.12 Microhardness distribution curve of welds at different welding currents

从植入物设计角度考虑,相对平缓的硬度过渡有利于降低应力集中倾向,提高结构的服役可靠性。从生物医用服役角度看,焊接接头区域硬度分布的均匀性同样具有重要意义。局部硬度突变或显著软化不仅可能引起应力集中,还可能在植入物服役过程中与微动磨损和腐蚀行为相互耦合,加速局部损伤与金属离子释放。相对平缓的硬度梯度有助于降低焊接接头处的失效风险,提高植入物在复杂体内环境中的长期稳定性。

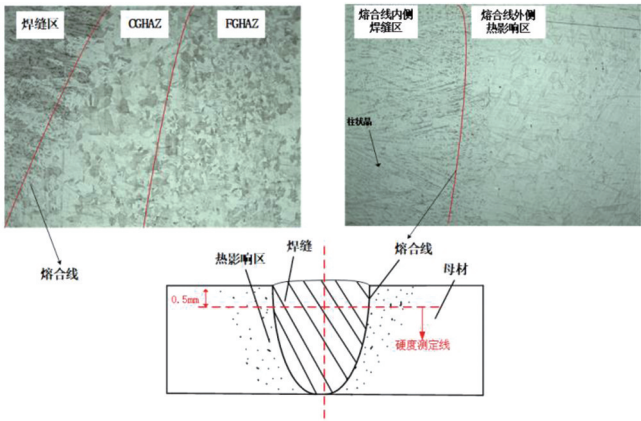


图 13 焊接接头示意图

Fig.13 Schematic diagram of the welded joint

3 结论

- (1) 本研究从焊接热循环动力学角度揭示了焊接电流对高氮奥氏体不锈钢接头组织稳定性的本质调控机制。焊接电流不仅改变热输入水平,更通过调节焊缝区域在 Cr_2N 析出敏感温区的有效停留时间,直接影响氮化物的形核与长大动力学行为,从而决定接头的组织稳定性与潜在性能风险。
- (2) 结果表明,在适宜电流区间内可实现对 Cr_2N 析出的有效抑制,同时维持合理的组织分区与硬度梯度分布,避免中低电流条件下氮化物诱发的微裂纹敏感性,也避免过高电流带来的组织粗化与性能衰减问题。这一“窗口型工艺区间”的提出,为高氮钢焊接过程中的组织稳定性控制提供了明确的工艺导向。
- (3) 从工程应用角度看,合理匹配焊接电流可在保证接头强度的同时显著提升塑性与冲击韧性,并降低

组织不均与局部性能突变带来的服役失效风险。对于承载型生物医用构件而言,该优化策略有助于提升焊接接头在复杂体液环境和交变载荷条件下的长期结构可靠性与服役安全性。

综上,焊接电流可作为调控高氮奥氏体不锈钢焊接接头组织稳定性与力学性能匹配的关键控制参数。本文提出的基于热循环动力学与第二相析出协同调控的工艺优化思路,可为生物医用高氮钢焊接工艺设计及工程应用提供具有可操作性的参考依据。

参考文献:

- [1] 赵利媛, 李小琳, 丁然, 等. 高氮 316LN 奥氏体不锈钢的微观组织调控与摩擦学行为[J/OL]. 金属学报, 2025: 1-11. [2025-12-22]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.tg.20250701.1451.026>.
- [2] 施进发, 武胜金, 王星星, 等. 高氮钢焊接技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2025, 54(1): 7-11. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.20211155.
- [3] 姜歆, 周敏靓. 金属增材制造医疗器械生产环节关键控制点与案例研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2024, 48(1): 94-98. DOI:10.3969/j.issn.1671-7104.230217.
- [4] 张浩然, 丁家亮, 张旭敏, 等. 高氮钢双丝 CMT 增材工艺参数对熔滴过渡影响规律[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 82-86. DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.05.019.
- [5] 龙翔, 罗小平, 邱国庆. 骨关节金属植入物 MRI 伪影抑制技术的临床应用[J]. 当代医学, 2021, 27(23): 49-51. DOI:10.3969/j.issn.1009-4393.2021.23.018.
- [6] 白茹. 金属增材制造医疗器械的特点及风险防控要点[J]. 中国医疗器械信息, 2020, 26(5): 1-3. DOI:10.15971/j.cnki.cmdi.2020.05.001.
- [7] 庞午骥, 曹振伟. 金属粉末注射成形技术在医疗产品上的应用[J]. 热加工工艺, 2017, 46(14): 15-17. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.14.004.
- [8] KOSTINA V S, KOSTINA M V. Welding of high-nitrogen austenitic steels (review)[J]. Inorganic Materials: Applied Research, 2023, 14(5/6): 1152-1164. DOI:10.1134/s2075113323050209.
- [9] TAO R, LI G, SONG S N, et al. Study on salt spray corrosion behavior of nitrogen-containing duplex stainless steels via wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025: 12927. DOI:10.1007/s11665-025-12927-3.
- [10] 卢立斌, 王海鹏, 管迎春, 等. 激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102005.
- [11] 王伟, 王克鸿, 侯瑶. 保护气体中氮气比例对高氮钢双面同轴 TIG 焊接工艺性的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 70-74. DOI:10.12073/j.hjxb.20160819003.
- [12] 明珠, 王克鸿, 王伟, 等. 冷却速率对高氮钢焊缝组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 31-35. DOI:10.12073/jhxb.2019400259.
- [13] 王立忠, 王利, 王彦元, 等. 高氮钢 TIG 焊接头组织与性能研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(9): 13-16. DOI:10.13846/j.cnki.cn12-1070/tg.2020.09.004.
- [14] ZHANG Z Q, QU S C, CHU H R, et al. Effect of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of simulated heat-affected zone of duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(21): 25603-25620. DOI:10.1007/s11665-025-11132-6.
- [15] ODNOKOVA M V, BELYAKOV A N, DOLZHENKO P D, et al. On the strengthening mechanisms of high nitrogen austenitic stainless steels[J]. Materials Letters, 2023, 331: 133502. DOI:10.1016/j.matlet.2022.133502.
- [16] XIA Y X, MIYASAKA F, SERIZAWA H, et al. Effects of cooling rate and nitrogen content on morphologies and precipitation of widmanstätten austenite in welds of duplex stainless steels[C]//TMS 2025 154th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. ChamSpringer Nature Switzerland, 2025: 1373-1382. DOI:10.1007/978-3-031-80748-0_121.