

引用格式:常子金,齐彦昌,马成勇,等.NiCrMo合金焊接9Ni钢接头的焊缝组织与力学性能[J].材料工程,2025,53(11):80-89.
CHANG Zijin, QI Yanchang, MA Chengyong, et al. Microstructure and mechanical properties of 9Ni steel joints welded by NiCrMo filler alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 80-89.

NiCrMo合金焊接9Ni钢接头的焊缝组织与力学性能

Microstructure and mechanical properties of 9Ni steel joints welded by NiCrMo filler alloy

常子金^{1,2}, 齐彦昌^{1*}, 马成勇¹, 从保强², 魏金山¹, 彭云¹

(1 钢铁研究总院有限公司 焊接研究所, 北京 100081;

2 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 102206)

CHANG Zijin^{1,2}, QI Yanchang^{1*}, MA Chengyong¹,

CONG Baoqiang², WEI Jinshan¹, PENG Yun¹

(1 Welding Research Institute, Central Iron and Steel Research

Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2 School of

Mechanical Engineering & Automation, Beihang

University, Beijing 102206, China)

摘要:采用不同Nb、C含量的NiCrMo系合金对低温用9Ni钢进行焊接,研究焊接接头的微观组织与力学性能,并通过裂纹尖端张开位移(CTOD)实验分析接头在超低温环境下的断裂韧性。结果表明:焊接接头存在明显分区,其中镍基焊缝金属主要由奥氏体柱状晶基体+第二相组成。第二相包括细小的纳米级带状析出相和焊缝熔池凝固最后阶段产生的富Nb凝固相。析出相主要由金属碳化物(MC)和Laves相组成。随着Nb、C含量的增加,镍基合金中第二相数量增多、平均粒径增大,从而使接头的抗拉强度提高,但低温冲击韧性与低温断裂韧性均出现下降。载荷-缺口张开位移曲线($F-V$ 曲线)显示,接头的特征载荷 F_m 随Nb、C含量增加先升高后降低,而相应的特征塑性位移值 V_p 则随第二相数量增加而单调减小。CTOD试样断口存在相同的分区,随Nb、C含量的增加,断口稳定扩展区宽度逐渐减小,表明焊缝的断裂韧性趋于恶化。

关键词: NiCrMo合金; 9Ni钢焊接; Nb含量; 微观组织; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000169 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000169

中图分类号: TG444+.1; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0080-10

Abstract: Welding of cryogenic 9Ni steel is performed using NiCrMo alloy systems with different Nb and C contents. The microstructure and mechanical properties of the welded joints are investigated, and the fracture toughness of the joints under ultra-cryogenic conditions is analyzed by crack tip opening displacement (CTOD) tests. The results show that the welded joint exhibits distinct zoning characteristics. The nickel-based weld metal primarily consists of an austenitic columnar crystal matrix and secondary phases. The secondary phases include fine nanoscale banded precipitates and Nb-rich solidification phases formed in the final stage of weld pool solidification. The precipitates are mainly composed of metal carbides (MC) and Laves phases. With the increase of Nb and C content, the number and average particle size of secondary phases in the nickel-based alloy increase, leading to an improved tensile strength of the joint, but reduced cryogenic impact toughness and fracture toughness. The load-notch opening displacement ($F-V$) curves show that the characteristic load F_m of the joint first increases and then decreases with the addition of Nb and C, while the corresponding characteristic plastic displacement value V_p decreases monotonically with the increase of secondary phases. The fracture surface of the CTOD specimens shows the same zoning characteristics. As the Nb and C content increases, the width of the stable crack propagation region on the

fracture surface gradually decreases, indicating a deterioration in the fracture toughness of the weld.

Key words: NiCrMo alloy; 9Ni steel welding; Nb content; microstructure; mechanical property

作为清洁能源的代表,液化天然气(liquefied natural gas, LNG)产业近年来发展迅速。9Ni 钢主要由板条马氏体及板条间残余奥氏体组成,具有良好的超低温综合性能,常用于制造 LNG 储罐及运输船舶等低温领域^[1]。基于与母材线膨胀系数匹配、焊接接头强度、焊接件生产成本及灵活性的考虑,采用镍基合金的手工电弧焊接(shielded metal arc welding, SMAW)工艺在 LNG 设备制造领域已被广泛应用^[2]。为防止 LNG 设施的安全性失效,要求 9Ni 钢接头应具有良好的韧性以应对外部载荷剧烈变化而不产生显微裂纹,即接头应具有良好的冲击韧性。此外,影响材料断裂失效的另一个重要因素是其抵抗裂纹扩展能力,即断裂韧性,材料的断裂韧性越高,其抗裂纹扩展能力越强。

Gao 等^[3]研究了不同环境温度下 617 镍基合金的断裂韧性,认为其断裂韧性主要与柱状晶粒的取向、尺寸和第二相情况有关。余春等^[4]系统阐述了核级镍基合金由 600 系列发展到 690 系列的焊接过程中易出现的晶间腐蚀裂纹及失塑裂纹问题,提出了晶界形貌和晶界脆性是影响焊接镍基合金裂纹萌生-发展的主要因素,而析出物和基体之间的晶格错配造成的畸变应力会导致多晶变形时局部区域应变集中,也是诱导微裂纹形成的重要因素。Jeng 等^[5]通过改变元素含量研究 NiCrFe 合金钨极氩弧焊接头的微观组织及力学性能,认为 Nb、Mo 的增多减少了 Cr 的碳化物沿晶界析出现象,且可提高接头的抗拉强度,但未涉及其对焊接接头韧性的影响。国内外关于镍基合金的研究主要集中在高温合金领域,针对以 LNG 工业为代表的低温用镍基合金焊接研究则较少,而以 Nb 等第二相形成元素为变量,评价焊接接头力学性能的研究鲜见报道。

焊后的 NiCrMo 合金微观组织由奥氏体+第二相组成^[6-8],第二相的种类、数量、尺寸和形态等特点对焊缝金属的力学性能具有重要影响^[9-11]。Nb 是重要的碳化物形成元素, Nb₂C₃ 是镍基合金中重要的第二相之一^[12],此外, Nb 在镍基合金中是典型的液相偏析元素,在焊接熔池凝固过程中易发生晶间富集。目前,关于 9Ni 钢焊接后焊缝金属和熔合线的超低温断裂韧性研究尚不充分,因此,本研究通过设计镍基焊缝合金的 Nb、C 元素含量,改善焊缝中析出相水平,取样后进行焊接接头的微观组织观察以及力学性能测试,并进行 -196 °C 下裂纹尖端张开位移(crack tip opening displacement, CTOD)实验来分析第二相对 9Ni 钢焊接接

头超低温断裂韧性的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料及焊接实验

制备焊接接头所用的母材为鞍钢提供的 06Ni9DR 钢板材(下文均称为 9Ni 钢),供货状态为 QT(淬火+回火),规格为 660 mm×200 mm×20 mm,QT 态的 9Ni 钢母材具备优异的超低温力学性能。采用机加工方式在焊接试板上加工出坡口以进行焊接实验,坡口单边 30°,根部间隙 2 mm。焊接镍基合金时,热输入过大(>18 kJ/cm)将使熔池中的凝固偏析更加严重,并容易产生粗大、取向杂乱的二次枝晶^[13],这种组织将恶化接头的低温综合力学性能,当热输入过小(<8 kJ/cm)时则容易在热影响区产生淬硬组织,使得接头脆性增大。因此,综合文献调研^[14],本研究采用的 SMAW 工艺参数如表 1 所示。

表 1 制备焊接接头的焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters for preparing welded joints

Interlayer temperature/ °C	Current/A	Voltage/V	Welding speed/ (cm·min ⁻¹)	Heat input/ (kJ·cm ⁻¹)
<100	130	25	15	13

本实验采用 3 种(编号分别为 1[#]、2[#]、3[#])钢铁研究总院自行研制的 Ni-Cr-Mo 系镍基合金焊条进行焊接实验,焊条的主要差异在于第二相形成元素 Nb、C 含量的变化。焊接过程中保持焊接电源、实验环境等因素不变,所有的焊道均采用如表 1 所示的相同参数,以保证 3 组接头中焊缝金属的结晶冷却速度一致。采用光谱法测试 3 组焊条熔敷金属的化学成分如表 2 所示。焊接实验后在制备的接头上取常规力学性能(拉伸、冲击)试样及 CTOD 试样,试样的提取位置及设计的试样尺寸如图 1 所示。根据 GB/T 228 进行拉伸测试,参考 GB/T 229 进行超低温冲击实验,CTOD 实验方法按照文献报道^[15]及 GB/T 21143 进行。

1.2 焊接接头的表征实验

制备焊接接头后在焊缝金属区取微观组织表征试样,制样后采用光学显微镜(OM, ZEISS Scope A1)、扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-7900F)、透射电子显微镜(TEM, TALOS F200X G2)以及 X 射线衍射(XRD, Rigaku D/MAX-2500)等手段分析焊缝

表2 实验材料的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of materials used for experiments (mass fraction/%)

Material	Nb	C	Si	Cr	Mo	Fe	W	P	S	Ni
Base metal		0.05	0.28		0.064	Bal.		0.0031	0.002	9.2
1 [#]	0.29	0.03	0.25-0.3	12.5-13	6.2-6.5	4.5-4.6	1.37-1.42	<0.01	<0.01	Bal.
2 [#]	0.64	0.04	0.25-0.3	12.5-13	6.2-6.5	4.5-4.6	1.37-1.42	<0.01	<0.01	Bal.
3 [#]	1.04	0.05	0.25-0.3	12.5-13	6.2-6.5	4.5-4.6	1.37-1.42	<0.01	<0.01	Bal.

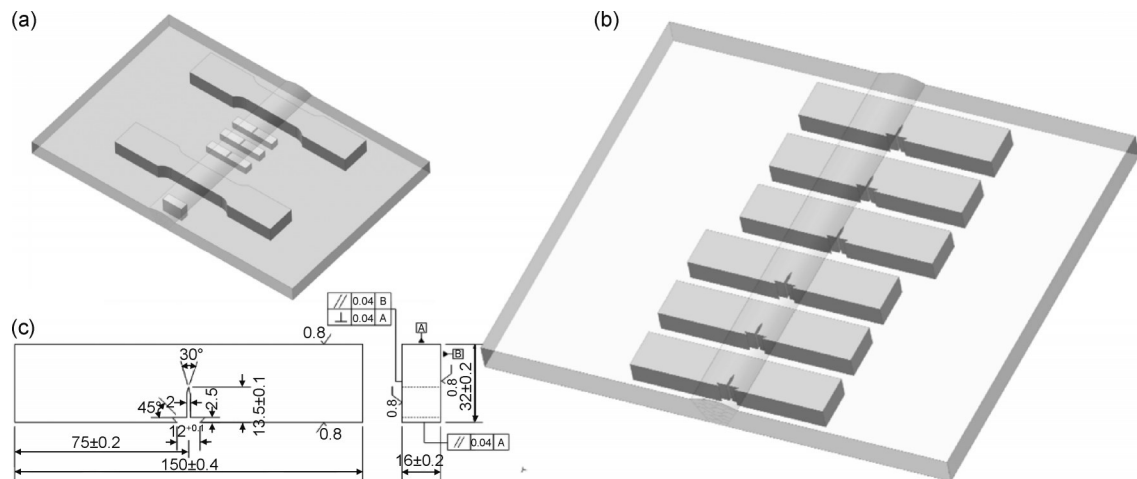


图1 试板焊接后力学性能检测试样取样位置及断裂韧性试样尺寸

(a)拉伸、低温冲击试样取样位置;(b)CTOD试样取样位置;(c)CTOD试样尺寸

Fig.1 Sampling location of the mechanical properties-testing samples and size for fracture toughness sample of test plates after welding

(a)sampling location of the tensile and cryogenic impact samples;(b)sampling location of the CTOD samples;(c)size of the CTOD samples

金属的微观组织;通过电解萃取实验溶解焊缝中的奥氏体基体后获得第二相的特征。采用拉伸试验机(Instron 5565)、夏比冲击摆锤试验机(TSP501J)等测试焊接接头的常规力学性能,采用MTS 880疲劳试验机进行CTOD实验;断裂韧性实验后统计试样的CTOD值并绘制相应试样的载荷-缺口张开位移曲线($F-V$ curve)。每组焊接接头的焊缝金属区(welded metal, WM)及熔合线区(fusion line, FL)均进行CTOD实验,每个区域取3个平行试样,最终取3个数值的平均值作为该规范下试样CTOD特征值;通过SEM以及体视显微镜等确定CTOD断口形貌特征。

2 结果与分析

2.1 焊接接头的微观组织及常规力学性能

2.1.1 焊接接头的微观组织

图2为焊接接头典型的宏观金相组织及各区域的显微组织OM像。焊缝金属基体为全奥氏体,焊缝与母材接触的熔合线处有明显的界面,随着距离熔池越远,热影响区晶粒组织由粗渐细,因此焊接热影响区可分为粗晶区与细晶区,这与焊接热输入有关,距离

熔池较近的位置母材受到焊接热循环时的峰值温度较高,晶粒接近熔融态,在焊接冷却过程中发生了再结晶,因此晶粒较粗。焊接接头均成型良好,各区域中均未发现明显的裂纹、气孔、夹渣、未熔合等焊接缺陷。

焊缝金属经磨抛、电解腐蚀后可观察到焊缝的奥氏体基体呈明显的柱状枝晶形态,如图3(a),(b)所示,晶粒尺寸较大,且生长方向垂直于焊道底部弧线的切线;析出相在OM下呈现黑色而在SEM下呈现白色,常存在于枝晶间和奥氏体晶界处。实验中发现,一旦电解腐蚀时间较长(5 V, 1 A, $t > 8$ s),析出相即可容易剥离基体,这说明焊缝中析出相与基体间结合力较弱。经磨制、电解仪双喷减薄($-18 \sim -22$ °C, 10% HClO_4 , 质量分数,下同, 60~90 s)后于TEM下获取的焊缝中析出相的形貌特点如图3(c),(d)所示,可见析出相尺寸较小,几纳米至几十纳米不等,这些纳米级的析出相以条带状存在于焊缝中,在暗场像下亮度较高。

3[#]试样焊缝中心的纵截面金相组织XRD分析结果如图4所示。可以看出,焊缝组织以奥氏体(γ 相)衍射峰为主,其中(200)和(220)的衍射峰较高。除奥氏体衍射峰外,还可以观察到少量的析出相衍射峰。通

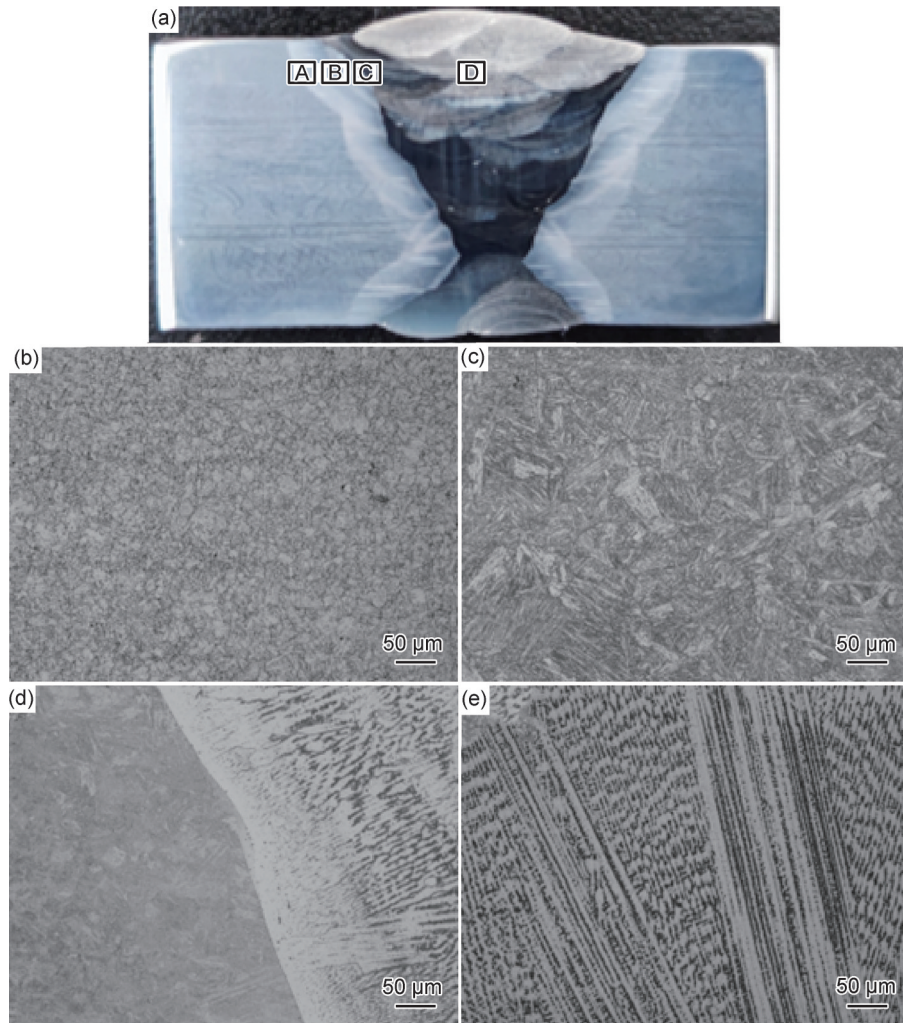


图 2 焊接接头的宏观金相组织及金相宏观试样中的白色矩形视场

(a)宏观金相组织;(b)白色矩形视场A;(c)白色矩形视场B;(d)白色矩形视场C;(e)白色矩形视场D

Fig.2 Macroscopic metallographic structure of welded joints and white rectangular field in metallographic macroscopic samples

(a)macroscopic metallographic structure;(b)white rectangular field A;(c)white rectangular field B;

(d)white rectangular field C;(e)white rectangular field D

通过对衍射峰的标定可以发现焊缝中的析出相主要是 Laves 相和金属碳化物(MC)。由于析出相的相对含量很少,所以析出相的衍射峰并不高。

通过电解萃取实验将奥氏体基体溶解后获得焊缝金属中的第二相 SEM 成像及采用能谱仪测得的相应的化学成分如图 5 所示。可以看出,一部分析出相呈球状或杆状,它们常存在于枝晶内部且尺寸较小 ($<1.5 \mu\text{m}$);另一部分第二相呈骨架状,它们尺寸较大,其成形与熔池凝固过程中 Nb、Mo 等元素易偏聚在液相中有关^[16]。Nb 元素等在熔池凝固的最后阶段富集于残余液相中,此时 Ni、Cr 等固相偏析元素已大部分凝固并固定在 γ 相基体中形成枝晶,残余的金属液相最后凝固在枝晶间形成富 Nb 的骨架状第二相,它们的形成机制特殊,不能被称为析出相,只能算作第二相中较特殊的一类凝固相。EDS 检测发现无论是

第一类析出相还是第二类凝固相,富 Nb 均是它们重要的成分特点。近年来有研究^[8,17]指出,提高镍基合金中的 Nb 含量会诱发另一种脆性相——Laves 相的形成。与通常呈球状的 Nb 碳化物不同,Laves 相多呈现为杆状形态。

2.1.2 焊接接头的常规力学性能

焊接接头的拉伸性能及焊缝中心处的超低温 (-196°C)夏比冲击性能如表 3 所示,其中 K_{V2} 表示冲击吸收功,侧膨胀值 (lateral expansion, LE) 代表试样冲击断裂后断面两侧的最大膨胀值之和。可以发现,由 1[#]试样至 3[#]试样,随 Nb、C 含量的升高,固溶强化和第二相沉淀强化的作用增强,接头的抗拉强度 R_m 逐渐提高;随 Nb、C 含量的升高,焊缝金属的超低温韧性明显降低,相比 1[#]试样,2[#]、3[#]试样的低温冲击功分别下降了 24.6% 和 27.7%,而表征金属在经受冲击时韧性

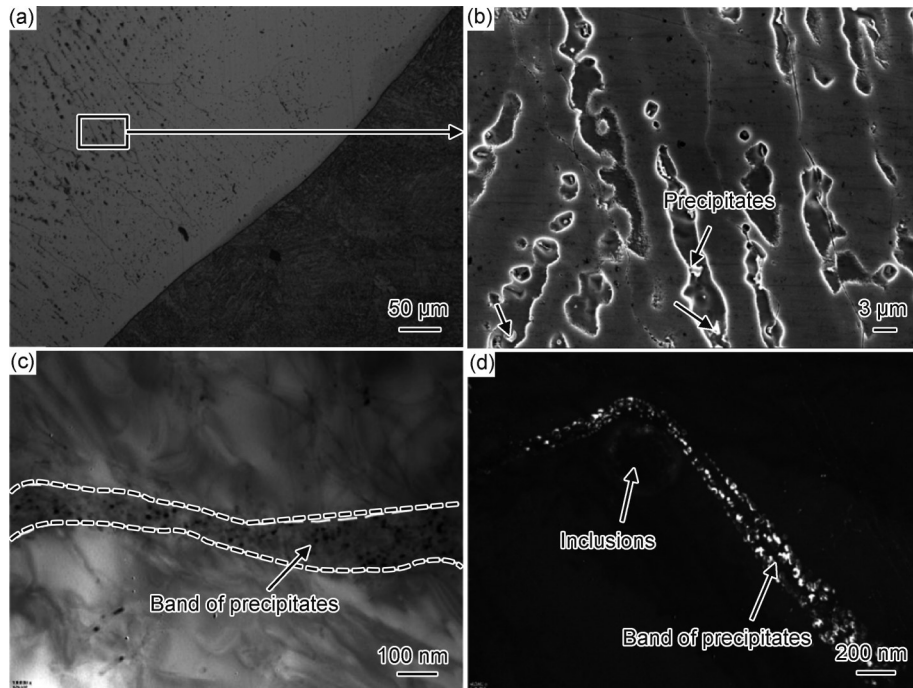


图3 焊缝金属的微观形貌及TEM下的析出相特点

(a)OM下熔合区的微观组织;(b)SEM下焊缝金属的微观组织;(c),(d)TEM下焊缝金属中析出相特点

Fig.3 Microscopic morphology of the welded metal and the characteristics of precipitated phases by TEM

(a)microstructure of the fusion zone by OM;(b)microstructure of welded metal by SEM;

(c),(d)characteristics of the precipitated phases in welded metal by TEM

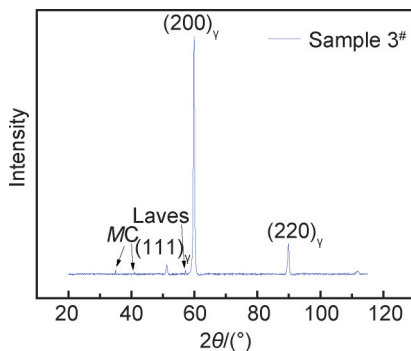


图4 3[#]试样焊缝金属XRD谱图

Fig.4 XRD patterns of the welded metal in sample 3[#]

的另一个指标——侧膨胀值也相应下降了18.2%和21.4%，这表明接头焊缝金属区低温韧性的恶化。

焊缝金属低温冲击试样的断口形貌如图6所示，可以看出，宏观断口剪切断面率较高，因此即使在一196℃的低温下，镍基焊缝金属也呈韧性断裂。由此可见，析出相粒子在低温冲击实验中具有促进沿晶断裂的作用，由于本研究中的镍基合金晶粒尺寸较大，因此，沿晶断裂的微区形貌呈现为石块状或冰糖状，如图6(b)所示，沿晶断裂区周边有大面积的光滑区域和裸露晶界。高倍SEM下韧窝形貌如图6(c)所示，观测到的韧窝呈抛物线形貌，其周边分布有颜色较暗的第二相粒子。这些粒子通常硬度较高，形态呈

球状、杆状或骨架状。在相对较小的应力作用下，它们便与基体发生脱粘或自身断裂，进而形成微裂纹。因此，这些第二相粒子是微孔洞的萌生源。

2.2 CTOD实验结果与分析

3组接头的焊缝金属区(WM)及熔合线区(FL)的CTOD值如图7所示。可以看出，无论是WM还是FL，从1[#]试样到3[#]试样，随着Nb、C含量的增加，两区域的断裂韧性均明显下降。焊缝金属区取3个平行试样平均值进行计算(0.460、0.374、0.310)，2[#]试样相比1[#]试样断裂韧性下降了18.7%，3[#]试样相比1[#]试样断裂韧性则下降了32.6%，而熔合线区域中3组试样取平均值计算后(0.373、0.331、0.305)，2[#]、3[#]试样分别比1[#]试样下降了11.3%和18.2%。

对于3组焊缝，由于第二相形成元素(Nb、C)的不同，焊缝的CTOD值差别较大，1[#]试样的超低温断裂韧性整体明显好于2[#]、3[#]试样，由合金元素含量的变化及其相应的CTOD值的关系，可以得出：当Nb、C元素含量分别大于0.29%、0.03%时，Nb元素含量每增加0.35%~0.4%，相应的C元素含量增加0.01%，焊缝金属的CTOD值即降低0.06~0.08 mm，接头熔合线区的CTOD值降低0.025~0.04 mm。由此可见，Nb、C等第二相形成元素的增多是镍基合金焊接接头断裂韧性恶化的重要因素，可以推断，2[#]、3[#]试样焊接接头

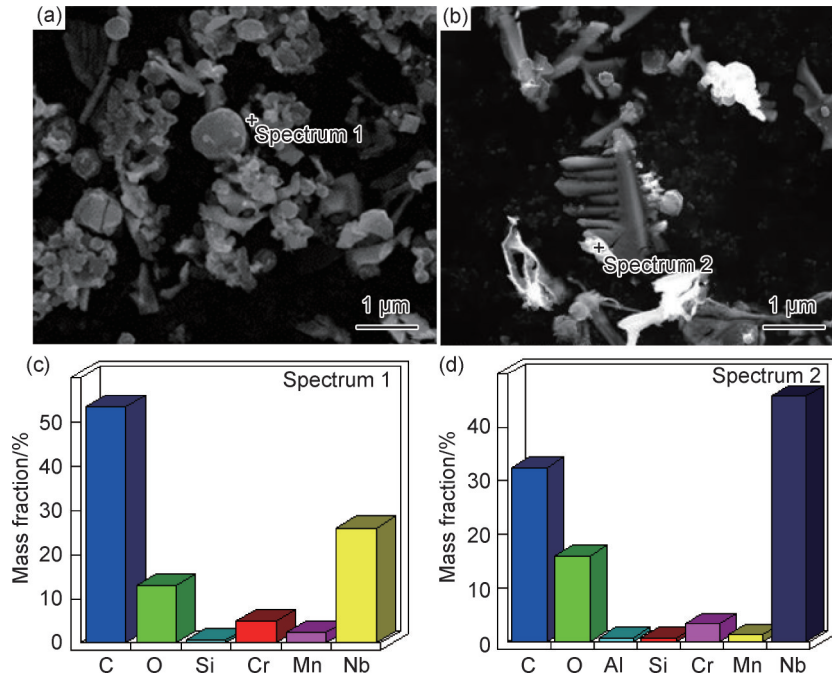


图 5 电解萃取实验后焊缝金属中的第二相形貌及化学成分

(a), (b) 萃取出的第二相形貌; (c) 测试点 1 处的化学成分; (d) 测试点 2 处的化学成分

Fig.5 Morphologies and chemical compositions of the secondary phases in the weld metal after electrolytic extraction experiment
(a), (b)morphology of extracted secondary phases; (c)chemical composition at point 1; (d)chemical composition at point 2

表 3 焊接接头的常规力学性能

Table 1 Basic mechanical properties of welded joints

Sample	R_m /MPa	$K_{V2}(-196\text{ }^\circ\text{C})$ /J	LE/mm	Fracture location
1 [#]	729	99.5	1.59	Welded metal
2 [#]	732	75	1.30	Welded metal
3 [#]	739	72	1.25	Base metal

断裂韧性的降低是由第二相的影响所致。对于 3 组焊接接头试样来说, FL 区的 CTOD 值均明显低于同组试样中的 WM 区 CTOD 值, 这说明 FL 区是焊接接头断裂韧性最薄弱的区域, 这是由接头熔合线区域物理化学性质受母材影响较大, 材料不连续度高所致。此

外, 由于液态 NiCrMo 合金的黏度高、流动性差, 在接头熔合线界面处靠近焊缝一侧的区域内存在“稀释层”, 稀释层内合金元素变化剧烈, 对接头的超低温韧性有不利影响^[18]。

CTOD 实验中, 预制裂纹的张开是通过三点弯曲加载实现, 因此, 这个过程的载荷-缺口张开位移曲线即 $F-V$ 曲线能反映出焊缝在超低温下的变形和断裂行为特点, 本研究中接头 WM 区、FL 区的 $F-V$ 曲线如图 8 所示。在 CTOD 试验机加载过程中, 试样发生的变形可分为弹性变形与塑性变形, 分别对应曲线上前期的倾斜直线段及后期的斜率逐渐减小的曲线段。

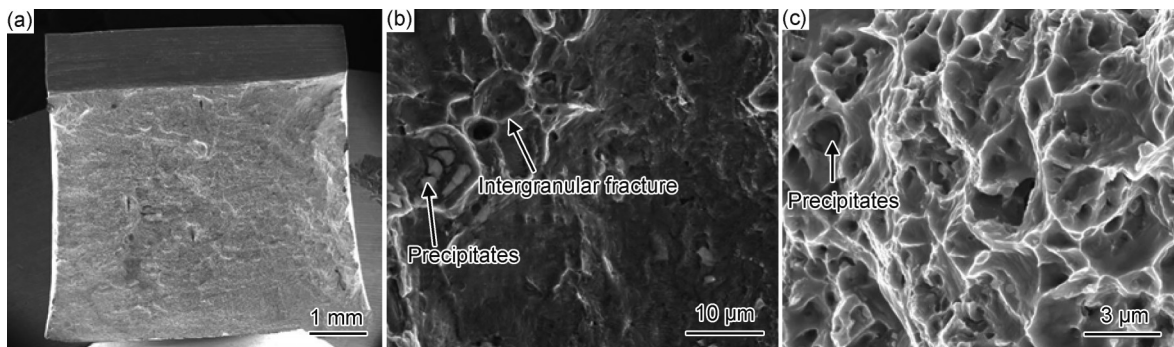


图 6 扫描电镜下冲击试样断口形貌

(a) 宏观形貌; (b) 沿晶断裂微区; (c) 高倍镜下断口韧窝特点

Fig.6 Fracture morphologies of impact samples by SEM

(a)macroscopic morphology; (b)micro zone of intergranular fracture; (c)characteristics of the fracture dimples by high magnification

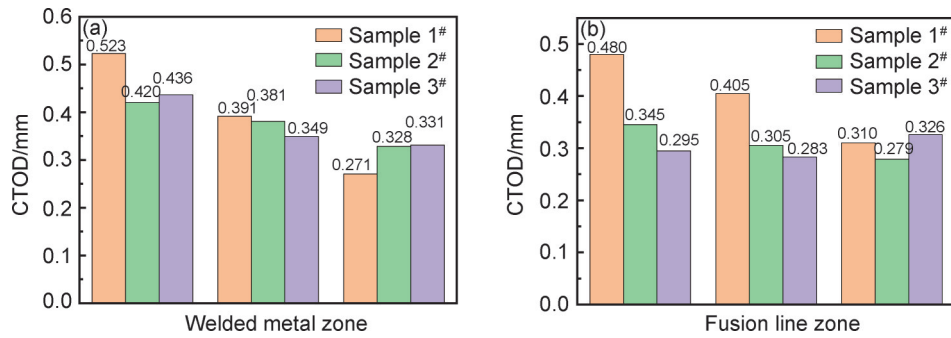


图7 3组试样接头各区域的CTOD值 (a)焊缝金属;(b)接头熔合线

Fig.7 CTOD values of different zones in three groups of sample joints (a)welded metal;(b)fusion line of joints

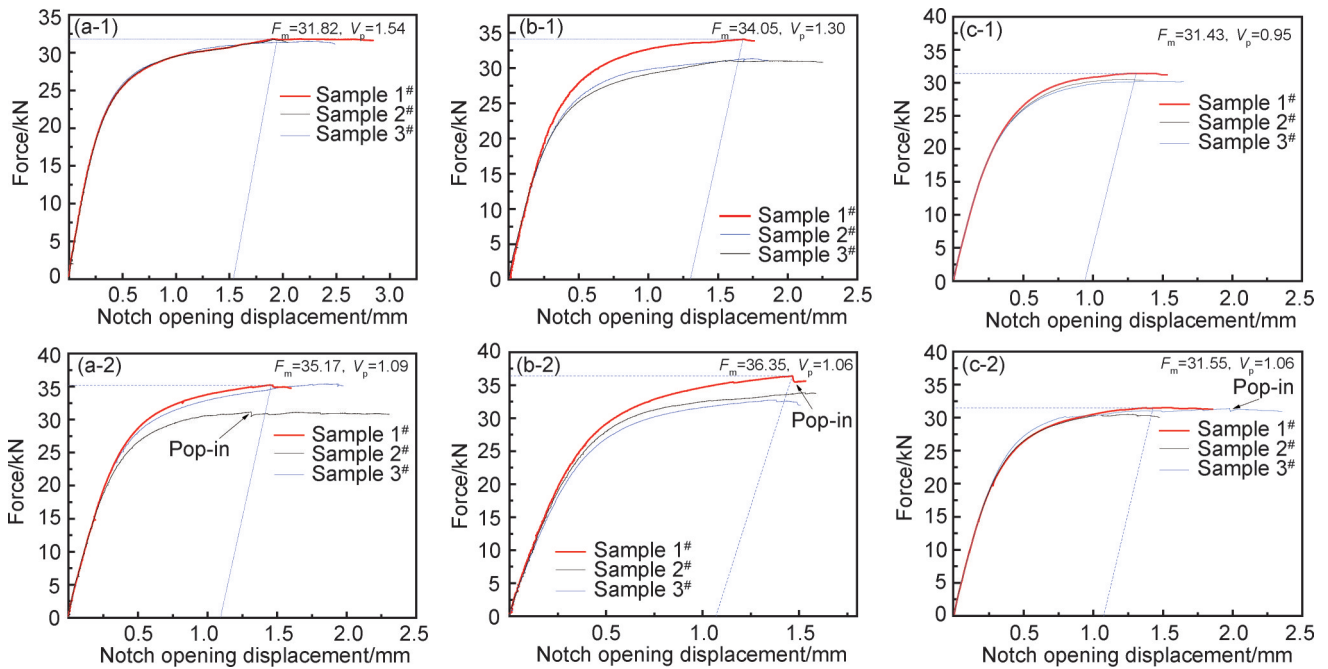


图8 不同第二相含量焊接接头焊缝金属区(1)及熔合线区(2)载荷-缺口张开位移曲线

(a)1#试样;(b)2#试样;(c)3#试样

Fig.8 Force-notch opening displacement curves of the welded metals(1) and fusion line(2) zones in welded joints with different contents of secondary phases

(a)sample 1#;(b)sample 2#;(c)sample 3#

将 $F-V$ 曲线上载荷最大点处作为特征点,其相应的特征载荷和缺口张开位移总和分别记为 F_m 及 V_m ,在特征点处作与弹性变形段斜率相同的平行线,该平行线与横轴的交点即为特征点的塑性位移分量 V_p 。从图8可以看出,无论是焊缝金属区还是熔合线区,超低温下3组接头的特征载荷 F_m 随第二相的增多先增加后减小,而相应的特征塑性位移值则随第二相的增多而单调递减。这主要是由以下3方面的原因导致:(1) Nb、C元素含量水平较低时,析出相的增加导致焊接接头中第二相强化效应增加,接头强度逐渐增大,因此合金的特征载荷起初会先增加;(2) Nb、C含量继续增加时(高于2#试样中的元素水平),焊缝中析出相的数量增多且平均尺寸增大。在焊缝中心处等距取多个视场,通过ASPEX扫描电镜采集析出相的形貌特

点,并借助图像处理软件,可得析出相的数量分别为887、964以及1002个;析出相的粒径分布如图9所示,计算可得其平均粒径分别为1.51、1.60 μm 和1.62 μm 。

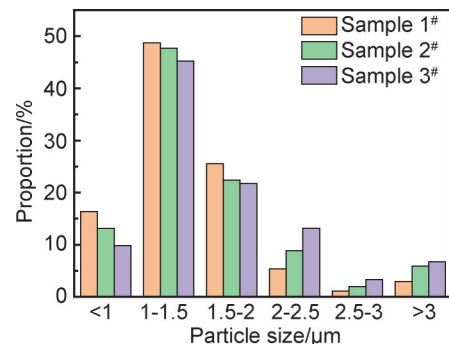


图9 焊缝中析出相的粒径分布

Fig.9 Particle size distribution of the precipitated phases in welds

大粒径的析出相常被视作合金中的缺陷,导致接头强度下降。(3)合金元素的增加使接头中的固溶强化作用更加明显,位错增殖和开动所需的能量增加,合金的塑性变形能力下降,因此焊接接头的特征塑性位移减小。

接头焊缝金属区的 CTOD 试样断口形貌如图 10 所示。可将超低温下 CTOD 试样断口分为 5 个区域^[19]:机加工区(machining gap region, MG region),由制备试样时机械加工产生;预制裂纹区(pre-fatigue crack region, PC region),在裂纹初始阶段,呈现出光亮且较光滑的块状表面;稳定扩展区(stable crack propagation region, SCP region),表面粗糙且较暗,其微观形貌对应于图 10(a-2)~(c-2)中所呈现的韧窝特征。图 10(a-2)~(c-2)取自图 10(a-1)~(c-1)中的实线白框内,此区最能反映不同材料超低温下的断裂行

为特征,此区越宽,裂纹扩展路径越长,所需消耗的塑性应变能越大,材料的断裂韧性越好;二次疲劳区(secondary fatigue crack region, SFC region),接头一般要经过二次疲劳,生成光亮的二次疲劳区,此区的断口特点与预制疲劳区基本一致;拉断区(crushed fracture region, CF region),试样最终断裂的区域。3 组接头均包含以上 5 个区域,它们的主要差别在于 SCP 区的裂纹扩展长度。本研究通过“九点法”来测量 SCP 区的裂纹扩展长度,统计结果如图 11(a)所示,1[#]焊缝试样在超低温下的裂纹扩展长度明显大于 2[#]、3[#]焊缝试样,超低温下 1[#]焊缝试样平均裂纹扩展长度比 2[#]试样多 31.6%,比 3[#]试样多 43.0%,而 2[#]试样的平均裂纹扩展长度也比 3[#]试样多 16.7%,裂纹扩展长度的下降趋势与焊缝中心的超低温冲击韧性的下降趋势(图 11(b))非常相似。

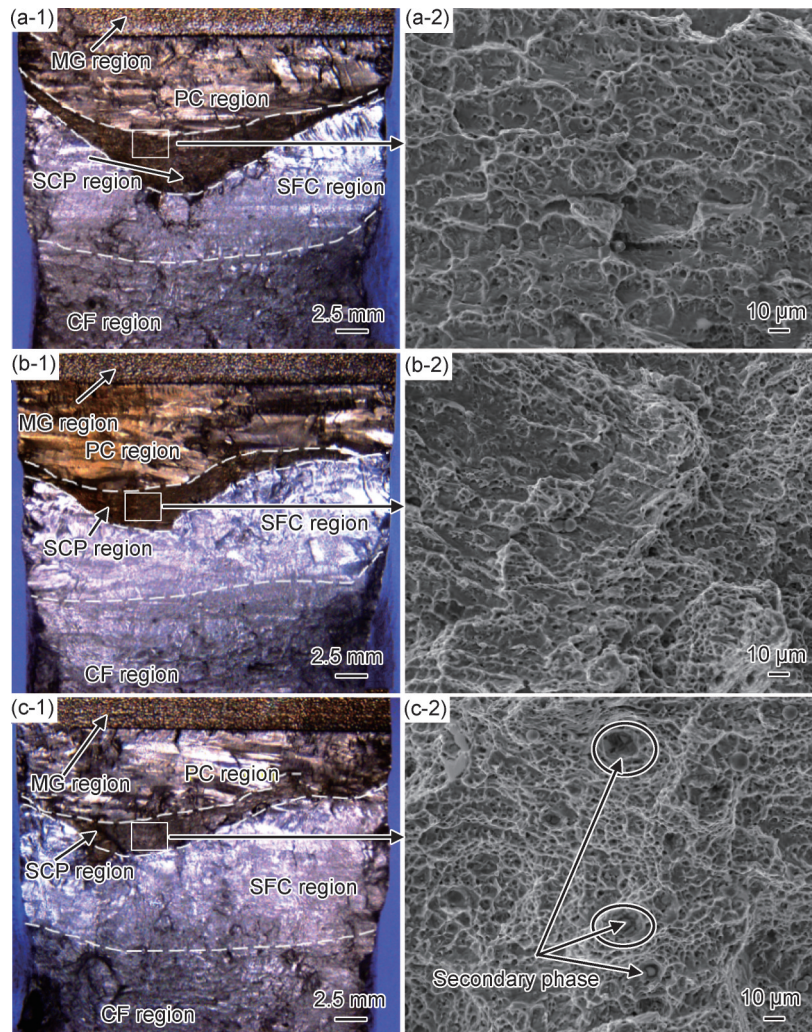


图 10 焊接接头超低温 CTOD 试样断口宏观形貌(1)和裂纹稳定扩展区微观形貌(2)
(a)1[#]试样;(b)2[#]试样;(c)3[#]试样

Fig.10 Macro fracture morphologies of CTOD samples of welded joints at cryogenic temperatures(1) and microstructures of stable crack propagation region(2)
(a)sample 1[#];(b)sample 2[#];(c)sample 3[#]

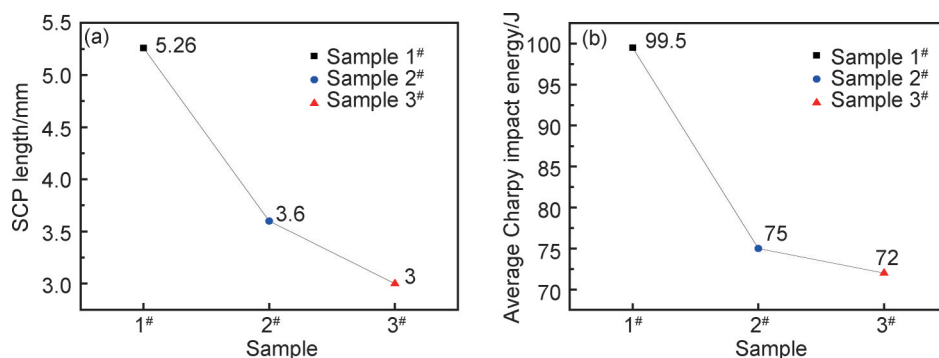


图11 裂纹稳定扩展长度(a)及焊接接头焊缝金属区夏比冲击功(b)

Fig.11 SCP length(a) and the Charpy impact energy in welded metals of welded joints(b)

裂纹稳定扩展区的断口微观形貌如图10(a-2)~(c-2)所示。可以看出,对于3种焊接接头焊缝金属区来说,随着Nb元素含量的提高,即使第二相形成最多的3#试样,其裂纹稳定扩展区的断口均可观测到大量尺寸不一的韧窝,这表明它们均为韧性断裂。此外,在3种焊缝中随Nb元素的增加,微观韧窝呈现尺寸减小、数量增多的特点,这是金属材料韧性提高的标志,然而,如图11(b)所示的试样冲击韧性及前文所展示的断裂韧性实验结果表明,接头的超低温韧性呈现降低趋势,说明超低温下存在更重要的因素影响焊缝的韧性。在Nb等元素含量最高的3#试样断口中发现第二相的存在,如图10(c-2)中标注的圆圈内,可以推断,第二相的增多及尺寸增大降低了焊接合金的抗裂纹扩展能力;另外,观察到的第二相通常是破裂的,这是由于在CTOD试验机施加的载荷作用下或裂纹萌生-扩展过程中裂纹尖端造成的应力集中作用下应力水平超过了硬而脆的第二相的断裂强度,使其破裂,这都会使接头的断裂韧性降低。

3 结论

(1)采用不同Nb、C元素含量的3组焊条焊接9Ni钢均未发现明显的焊接缺陷,冶金质量良好,接头由焊缝金属区、熔合线区及热影响区组成,其中热影响区又分为粗晶区与细晶区。纳米级的析出相通常以条带状存在于焊缝中的枝晶间和奥氏体晶界处,且析出相与基体间结合力较弱。镍基合金焊缝金属中的析出相主要是Laves相和金属碳化物(MC)。此外,焊缝金属中还存在一种由Nb等元素在凝固过程中最后富集于液相并凝固在枝晶间形成的富Nb的骨架状第二相。

(2)由1#试样至3#试样,随Nb、C元素含量的升高,焊接接头的抗拉强度提高,但焊缝金属的超低温

韧性明显降低,相比1#试样,2#、3#试样的低温冲击功分别下降了24.6%和27.7%。在低温冲击断口中可观察到由析出相等粒子引发的促进沿晶断裂作用以及促进微裂纹形成的作用。

(3)随着Nb、C含量的增加,接头焊缝金属区与熔合线区的断裂韧性均明显下降。与焊缝金属区2#试样及3#试样相比,1#试样断裂韧性分别下降了18.7%和32.6%,而在熔合线区,2#、3#试样分别比1#试样下降了11.3%和18.2%。熔合线区的CTOD值均明显低于同组试样中焊缝金属区的CTOD值,因此熔合线处是9Ni钢接头断裂韧性最薄弱的区域。由CTOD实验所绘制的F-V曲线显示,在焊缝金属区及熔合线区,3组试样的特征载荷 F_m 随第二相的增多先增加后减小,而相应的特征塑性位移值 V_p 则随第二相的增多而单调递减。

(4)CTOD试样断口均存在相同的分区特点,其中稳定扩展区的宽度代表了微裂纹的扩展长度,宽度越大,金属的断裂韧性越好。通过计算,超低温下1#焊缝试样平均裂纹扩展长度比2#试样多31.6%,比3#试样多43.0%,而2#试样的平均裂纹扩展长度也比3#试样多16.7%。

参考文献

- [1] 刘东风,杨秀丽,侯利锋,等.液化天然气储罐用超低温9Ni钢的研究及应用[J].钢铁研究学报,2009,21(9):1-5.
LIU D F, YANG X L, HOU L F, et al. Research and application of ultralow temperature 9Ni steel for LNG storage tank[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(9): 1-5.
- [2] DUPONT J N. Welding of nickel-based alloys for energy applications[J]. Welding Journal, 2014, 93(2): 31s-45s.
- [3] GAO Y, SHAO C D, CUI H C, et al. Study on fracture toughness of 617 Ni-based alloy welded joint under different elevated temperatures[J]. Journal of Materials Research, 2020, 35(14): 1790-1802.
- [4] 余春,徐济进,魏啸,等.核级镍基合金焊接材料失塑裂纹研究现状[J].金属学报,2022,58(4):529-540.

- YU C, XU J J, WEI X, et al. Research status of ductility-dip crack occurring in nuclear nickel-based welding materials[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(4): 529-540.
- [5] JENG S L, CHANG Y H. The influence of Nb and Mo on the microstructure and mechanical properties of Ni-Cr-Fe GTAW welds [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 555: 1-12.
- [6] 葛华龙. 镍基高温合金第二相微观结构与作用机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- GE H L. Transmission electron microscopy investigation on the secondary phases in nickel-based superalloys [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [7] 徐志强, 杨树峰, 赵朋, 等. 镍基高温合金 GH4151 的偏析及析出行为[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(6): 588-595.
- XU Z Q, YANG S F, ZHAO P, et al. Phase precipitation and segregation behavior of nickel-based superalloy GH4151 [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(6): 588-595.
- [8] 杨金龙, 龙安平, 熊江英, 等. 一种新型镍基粉末高温合金组织和力学性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(3): 1031-1039.
- YANG J L, LONG A P, XIONG J Y, et al. Microstructure and mechanical properties of novel nickel-based P/M superalloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(3): 1031-1039.
- [9] 常子金, 晏嘉陵, 齐彦昌, 等. NiCrFe 合金补焊 15Cr2Mo1 耐热钢焊缝组织与力学性能[J]. *材料工程*, 2023, 51(3): 156-165.
- CHANG Z J, YAN J L, QI Y C, et al. Microstructure and mechanical properties of weld of 15Cr2Mo1 heat resistant steel repaired by NiCrFe filler alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(3): 156-165.
- [10] TUCHO W M, CUVILLIER P, SJOLYST K A, et al. Microstructure and hardness studies of Inconel 718 manufactured by selective laser melting before and after solution heat treatment [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 689: 220-232.
- [11] RAMIREZ A J, LIPPOLD J C. High temperature behavior of Ni-base weld metal Part II—insight into the mechanism for ductility dip cracking [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 380(1/2): 245-258.
- [12] 唐正柱, 陈佩寅, 吴伟. Nb 对镍基合金高温失塑裂纹敏感性的影响机理[J]. *焊接学报*, 2008, 29(1): 109-112.
- TANG Z Z, CHEN P Y, WU W. Effect of niobium on ductility drop cracking susceptibility of nickel-base alloys [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(1): 109-112.
- [13] 程昊, 周炼刚, 刘健, 等. 热输入对 Inconel 617 镍基高温合金激光焊接接头显微组织与力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2023, 51(1): 113-121.
- CHENG H, ZHOU L G, LIU J, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of Inconel 617 nickel-based superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(1): 113-121.
- [14] 王久军. 镍基合金低热输入电弧堆焊工艺及性能研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- WANG J J. Study on process and performance of nickel-based alloy low-heat input arc surfacing welding [D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019.
- [15] 钟飞, 史耀武, 李晓延, 等. BT20 钛合金激光焊接接头的断裂韧性研究[J]. *材料工程*, 2005(4): 33-37.
- ZHONG F, SHI Y W, LI X Y, et al. Study on fracture toughness of laser-welded joint for BT20 titanium alloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005(4): 33-37.
- [16] 郭泉, 徐锴, 霍树斌, 等. 镍基合金焊丝 GTAW 熔敷金属凝固偏析行为[J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 105-108.
- GUO X, XU K, HUO S B, et al. Investigation on the solidification segregation behavior of GTAW nickel alloy deposited metal [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7): 105-108.
- [17] MU W D, CAI Y, WANG M. Effect of precipitates on the cryogenic fracture toughness of 9%Ni steel flux cored arc weld [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 819: 1-13.
- [18] MU W D, CAI Y, WANG M, et al. Microstructure characteristics and properties of fusion boundary in 9%Ni steel joint filled with Ni-based alloy [J]. *Materials Characterization*, 2020, 165: 110390.
- [19] 沐卫东. 超低温环境下 9Ni 钢药芯焊丝电弧焊接接头低周疲劳及断裂行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- MU W D. Low-cycle fatigue and fracture behavior of 9% nickel steel flux cored arc welding joint under cryogenic environment [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

收稿日期: 2023-03-14; 录用日期: 2023-05-25

通讯作者: 齐彦昌(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事镍基焊材开发及超低温用镍基合金焊接工艺研发工作, 联系地址: 北京市海淀区学院南路 76 号中国钢研科技集团公司焊接研究所(100081), E-mail: qiyanchang@163.com

(本文责编: 寇凤梅)