

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.11

Cr 对镍基药芯焊丝熔敷金属低温韧性的影响

高铁先, 亢天佑, 姚立春, 王青云, 王杏华, 刘武, 王任甫*

洛阳船舶材料研究所(中国船舶集团有限公司第七二五研究所), 河南 洛阳 471023

摘要: 镍基药芯焊丝以其高熔敷效率、良好的焊接适应性及优异的焊接工艺性, 在超低温储罐、石油化工和海洋平台等领域具有良好的应用前景。但其技术难度大, 成熟度较低, 目前仍处于探索阶段。本文通过多尺度表征, 系统研究了镍基药芯焊丝药芯粉中 Cr 含量对熔敷金属力学性能和显微组织的影响。结果显示, 当药芯粉中 Cr 含量在 7.0~13.0 wt.% 范围内, 熔敷金属显微组织主要由奥氏体树枝晶构成, 并在枝晶间析出 σ 相及 M_6C 碳化物, 析出相的面积分数由 0.92% 增至 1.94%, 同时, 基体中存在大量非金属夹杂物。随着药芯粉中 Cr 含量增加, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下平均夏比冲击吸收能量显著增长, 由 20.0 J 增至 48.7 J。研究发现, 熔敷金属中 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击韧性提升主要归因于非金属夹杂物尺寸和数量变化, 随着药芯粉中 Cr 含量增加, 熔敷金属中夹杂物平均直径从 0.85 μm 降至 0.56 μm , 大尺寸夹杂物数量分数由 59.7% 降至 43.6%, 体积分数从 1.32% 降至 0.55%。在低温冲击载荷下, 熔敷金属组织中作为潜在裂纹源的大尺寸夹杂物是焊缝金属低温韧性下降的主要原因。

关键词: 镍基药芯焊丝; Cr; 熔敷金属; 夹杂物; 低温韧性

中图分类号: TG424 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0093-09

Effect of Cr on Low-Temperature Toughness of Deposited Metal of Nickel-based Flux-Cored Wire

GAO Yixian, KANG Tianyou, YAO Lichun, WANG Qingyun, WANG Xinghua, LIU Wu, WANG Renfu*

Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China

Abstract: Nickel-based flux-cored wire shows promising application potential in ultra-low-temperature storage tanks, petrochemical industries, and offshore platforms owing to its high deposition efficiency, good welding adaptability, and excellent weldability. However, due to high technical challenges and relatively low maturity, it remains in the exploratory stage. In this study, the influence of Cr content in the nickel-based flux-cored powder on the mechanical properties and microstructure of the deposited metal was systematically investigated via multi-scale characterization. It was found that when the Cr content in the flux-cored powder ranged from 7.0 wt.% to 13.0 wt.%, the microstructure of the deposited metal was primarily composed of austenitic dendrites, with σ phase and M_6C carbides precipitated in the interdendritic regions. The area fraction of precipitates increased from 0.92% to 1.94%. In addition, a considerable number of non-metallic inclusions were observed in the matrix. As the Cr content in the powder increased, the average Charpy impact energy at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ was significantly enhanced, rising from 20.0 J to 48.7 J. The improvement in impact toughness at $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ was mainly attributed to changes in the size and distribution of non-metallic inclusions. With increasing Cr content, the average inclusion diameter decreased from 0.85 μm to 0.56 μm , the number fraction of large-sized inclusions decreased from 59.7% to 43.6%, and their volume fraction decreased from 1.32% to 0.55%. Under cryogenic impact loading, large-sized inclusions, serving as potential crack initiation sites in the deposited metal, were identified as the primary cause for the degradation of low-temperature toughness in the weld metal.

Keywords: nickel-based flux-cored wire; Cr; deposited metal; inclusion; low temperature toughness

收稿日期: 2025-11-11 修回日期: 2026-01-05

作者简介: 高铁先(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事镍基焊接材料开发与应用研究。

通讯作者: 王任甫(1965—), 男, 研究员。E-mail: wangrenfu2004@sina.com。

引用格式:高铁先,亢天佑,姚立春,等. Cr对镍基药芯焊丝熔敷金属低温韧性的影响[J]. 电焊机,2026,56(5):93-101.

Citation:GAO Yixian, KANG Tianyou, YAO Lichun, et al. Effect of Cr on Low-Temperature Toughness of Deposited Metal of Nickel-based Flux-Cored Wire[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 93-101.

0 引言

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)是一种清洁、高效的能源,其沸点为 -162°C ,因此要求储运材料具有卓越的低温力学性能。9Ni钢因其具有高强度、良好的加工性能以及优异的低温性能,广泛应用于大型LNG储运装备的制造^[1-3]。镍基填充金属在深冷(-196°C)环境下仍保持优良的强韧性,且热膨胀系数与9Ni钢匹配度高,是9Ni钢的重要焊接材料。目前针对9Ni钢的焊接,虽然焊条电弧焊(SMAW)和埋弧焊(SAW)技术已相对成熟,但SMAW生产效率低且焊接质量不稳定,SAW受焊剂覆盖限制仅适用于平焊和横焊位置^[4],均难以满足大型复杂结构件全位置高效自动化焊接的需求。镍基药芯焊丝具有熔敷效率高、焊缝成形性好、可适应高速自动化焊接等优势,成为低温钢配套焊材研发的热点^[5-6]。

研究表明,镍基药芯焊丝通过药芯成分向焊缝金属过渡大量合金化元素(如Cr、Mo、Nb等),这些元素在凝固过程中极易发生偏析并在基体中析出第二相,从而导致焊缝金属强韧性下降^[7]。热力学模拟表明,镍基合金焊缝凝固过程中有P相、 μ 相和碳化物等析出,消耗了大量的Cr、Mo和Nb等元素,这些元素含量的变化可导致析出相种类发生改变,进而影响焊缝性能^[8];不同合金系焊材焊接9Ni钢时,焊缝析出P相和Laves相等硬脆相,基体中固溶强化元素Mo、Nb及Cr等被大量消耗,焊缝强韧性降低^[9];析出相含量增加还导致周围局部应力集中和塑性变形,削弱裂纹扩展阻力,促使裂纹沿沿枝晶间扩展^[10]。

尽管析出相对镍基合金焊缝强韧性的影响已有较多研究,但夹杂物的关键作用尚未得到充分关注。低合金钢焊缝研究表明,焊缝中存在的大尺寸非金属夹杂物易成为潜在的塑性或解理裂纹源,引发应力集中,严重恶化强韧性^[11]。Chen^[12]等研究了焊缝中夹杂物对Q345钢焊缝断裂行为的影响,发

现在载荷作用下,夹杂物周围有大量微裂纹萌生并扩展相连,导致焊缝强度降低。Han^[13]等研究了埋弧焊剂成分对EH36钢焊缝金属韧-脆转变温度的影响,发现焊剂中 SiO_2 在电弧作用下发生分解并向焊缝引入大量夹杂物,大于 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 的粗大夹杂物导致解理断裂,使焊接接头低温韧性恶化。此外,在镍基熔敷金属中也有类似的报道。例如,Guo^[14]等选用钨极氩弧焊(GTAW)和SAW对9Ni钢进行焊接,发现GTAW接头中碳化物均匀分布,力学性能优于SAW接头;在SAW接头枝晶间观察到一定量夹杂物,但并未考虑夹杂物对接头强韧性的影响。Wang^[15]等研究了ENiCrMo-6和ENiCrFe-9两种镍基焊条成分对熔敷金属的组织与力学性能的影响。发现ENiCrFe-9对应的熔敷金属C、S元素含量更高且有更多碳化物在晶界析出,导致其低温韧性更低。尽管在冲击断口中均观察到氧化物夹杂,但并未对其展开深入分析,上述研究表明,镍基熔敷金属中的非金属夹杂物,可能对其强韧性产生一定影响。然而目前仍缺乏针对镍基熔敷金属中夹杂物的系统表征及其对强韧性影响的深入研究。

镍基药芯焊丝中的药芯粉通常由金属粉(如Cr、Ti、Fe等)和矿物粉(如 TiO_2 、 SiO_2 等)构成。金属粉除合金化作用外,部分成分作为脱氧剂,对熔敷金属中来源于活性保护气体(CO_2)和矿物粉分解的O产生关键调控作用。因此,改变药芯粉中金属粉成分对焊缝金属成分、夹杂物特征及低温韧性具有显著调控作用。本文系统研究了镍基药芯焊丝药芯粉中Cr含量对焊缝金属显微组织和低温韧性的影响规律,重点关注其对析出相类型、夹杂物特征(成分、数量密度、体积分等)的作用,并阐明了决定熔敷金属低温韧性的主要因素。

1 试验方法

本文药芯焊丝配方基于ERNiCrMo-4镍基焊丝开发。根据AWS A5.14标准,ERNiCrMo-4熔敷

金属 Cr 含量应控制在 14.0~16.0 wt.%, 因此对药芯粉中金属 Cr 粉含量在 7.0~13.0 wt.% 范围内进行调控。设计配方时, Ni 作为基体成分, 其含量变化对熔敷金属及焊接工艺性无显著影响, Cr 增加时相应减少 Ni 以保持药芯粉总量一致, 其他元素含量保持不变。药芯粉主要组分如表 1 所示。此外, 还包含金属粉 Mn、W 和矿物粉 Al_2O_3 等(纯度>99.9%)。

表 1 药芯焊丝药芯粉主要成分(质量分数, %)
Table 1 Main components of flux-cored powder (wt. %)

材料编号	Ni	Cr	Mo	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O +K ₂ O	其他
HS-7Cr	31.0	7.0	7.0	30.0	5.0	2.0	5.0	余量
HS-10Cr	28.0	10.0	7.0	30.0	5.0	2.0	5.0	余量
HS-13Cr	25.0	13.0	7.0	30.0	5.0	2.0	5.0	余量

药芯焊丝制备工艺如下: 首先进行药芯粉配置。根据表 1 成分称量粉料, 单个配方称量粉料 3 kg, 称量后依次经过烘焙与混料。随后进行药芯焊丝的制备, 焊丝外皮采用 ERNiCrMo-4 钢带, 填充率严格控制在 23%±0.5%, 填充粉料后经轧制和减径, 最终制成 3 盘 $\varnothing 1.2$ mm, 5 kg/盘的镍基药芯焊丝。根据药芯粉中 Cr 含量命名为 HS-7Cr、HS-10Cr 和 HS-13Cr。

采用 CO_2 气体保护焊进行熔敷试板焊接。试板为 9Ni 钢板, 尺寸 400 mm×150 mm×20 mm, 焊前在被焊面堆焊大于 2 mm 的隔离层。焊接工艺参数如表 2 所示, 3 组焊丝制备的熔敷金属编号分别为 7Cr、10Cr 和 13Cr。

表 2 焊接工艺参数

焊接材料编号	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	道间温度 /°C
HS-7Cr	190	34	40	80
HS-10Cr	190	34	40	80
HS-13Cr	190	34	40	80

为精确测定熔敷金属中各化学元素含量, 针对不同元素分别采用特定的实验方法。O 元素采用氧氮氢分析仪 (ONH836) 测定, C、S 采用碳硫分析仪 (CS800) 测定, 其他元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Avio 500) 测定。熔敷金属化学成分如表 3 所示。

使用电火花线从焊缝中心切取金相试样, 尺寸 50 mm×30 mm×20 mm, 经超声清洗、梯度研磨和精

表 3 熔敷金属化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical compositions of deposited metal (wt. %)

材料	C	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Si	O
9Ni	0.05	0.003	0.004	0.65	8.94	0.01	0	—	0.17	—
7Cr	0.02	0.001	0.001	0.32	56.05	14.02	15.85	3.36	0.36	0.129
10Cr	0.02	0.001	0.003	0.33	56.03	14.77	16.18	3.35	0.29	0.109
13Cr	0.02	0.001	0.003	0.34	56.10	15.69	16.12	3.35	0.30	0.072

细抛光处理后, 使用 4 vol.% 硝酸酒精溶液对抛光面腐蚀 15 s, 再用王水浸蚀 30 s。金相试样宏观形貌如图 1 所示, 采用 XRD (D8 Advance) 进行 X 射线物相分析。

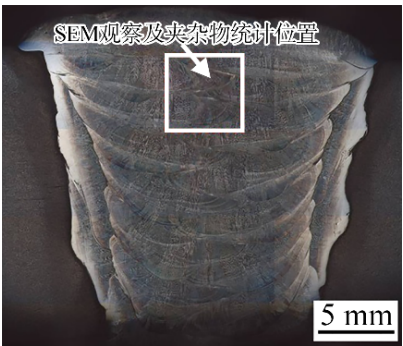


图 1 熔敷金属截面宏观形貌(方框为微观组织观察及夹杂物统计区域)

Fig. 1 Macroscopic feature of deposited metal section (dotted box in the figure is the area of microstructure observation and inclusion statistics)

微观组织及析出相分析流程: 在焊缝切取尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm 的金相试样, 取样位置见图 2; 经研磨、磨光、腐蚀后, 在 SEM (Quanta650) 下观察微观组织, 并在 5000× 下统计析出相的面积, 每个试样至少分析 100 个视场, 累计观测面积≥0.23 mm², 采用 Image J 软件统计析出相的面积分数。采用 TEM (JEM-2100) 对析出相进行选区电子衍射花样 (SADPs) 标定, 试样经电解双喷和离子减薄制备。

夹杂物分析流程: 对 SEM 试样依次进行机械粗磨和镜面抛光, 对抛光试样统计夹杂物直径 d 、数量密度 N 及大尺寸夹杂物 ($d > 1.0 \mu\text{m}$) 数量分数 f_v , 结合 SEM-EDS 表征夹杂物形貌及成分。根据文献 [16], 夹杂物特征的表达式为:

$$d_v = \frac{\pi}{2} d \tag{1}$$

$$N_v = \frac{N}{d_v} \tag{2}$$

$$f_v = \frac{4}{3} \left(\frac{d_v}{2} \right)^3 N_v \tag{3}$$

式中 d 为夹杂物在观察平面内的平均直径; N 为观察平面内的夹杂物数量密度; d_v 为夹杂物的空间平均直径; N_v 为空间数量密度(每单位体积的夹杂物数量); f_v 为体积分数(夹杂物总体积占 SEM 试样的比率)。

按照 GB/T 25774.1—2023《钢、镍及镍合金熔敷金属力学性能试样的制备及检验》采用电火花线切割机进行熔敷金属力学性能取样, 取样位置如图 2 所示。按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验: 室温试验方法》和 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》采用材料拉伸试验机(MTS E45.305-C)和摆锤式冲击试验机(ZBC2602-B)进行室温拉伸试验和-196 °C 冲击试验测试。

2 试验结果与讨论

2.1 熔敷金属显微组织

2.1.1 XRD 及金相组织特征

图 3a~3c 分别为 7Cr、10Cr、13Cr 熔敷金属试样 XRD 图谱, 图谱中面心立方相(fcc)的特征峰明显, 其他特征峰强度过低可忽略, 表明各焊缝组织主要

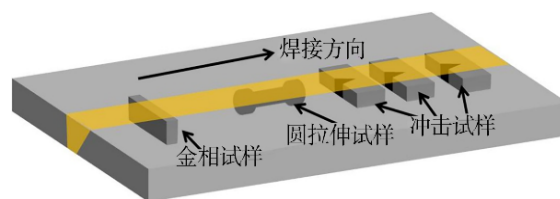


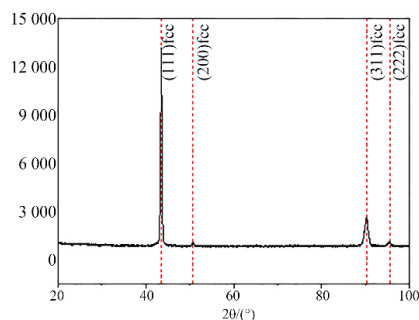
图 2 熔敷金属拉伸及冲击试样取样位置

Fig. 2 Diagram of sampling position of tensile and impact samples of deposited metal

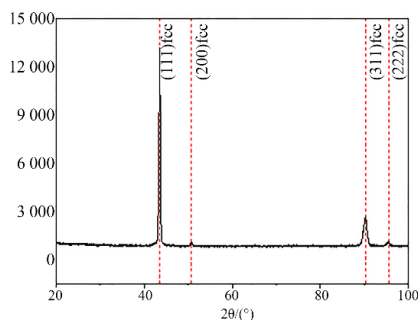
由 γ 相构成。金相观察显示, 各焊缝组织特征无显著差异, 均以奥氏体枝晶为主, 一次枝晶臂间距约为 20 μm , 二次枝晶臂间距为 10 μm , 见图 3d~3f。

2.1.2 析出相观察

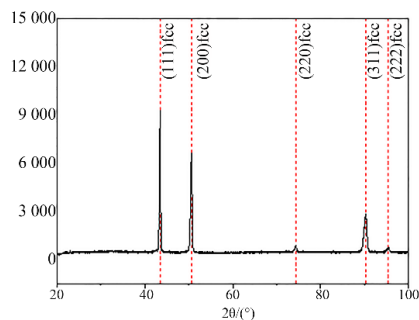
图 4a~4c 分别为 SEM-BSE 模式下观察到的 7Cr、10Cr、13Cr 熔敷金属微观形貌, 析出相主要分布在奥氏体晶界和非金属夹杂物周围, 少量分布在奥氏体晶内, 形貌不规则, 尺寸 1.0~15.0 μm 。图 4d~4e 分别展示了熔敷金属的 TEM 析出相形貌及选区衍射花样。结果表明, 各焊缝析出相类型一致, 均主要由 M_6C 碳化物和 σ 相构成。析出相面积分数统计结果见图 4f, 随着药芯粉中 Cr 含量提高, 析出相面积分数由 7Cr 的 0.92% 增至 13Cr 的 1.94%, 增幅达 111%。



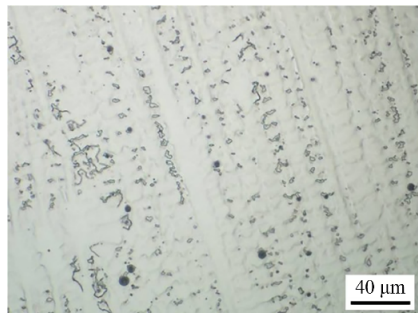
(a) 7Cr XRD 图谱



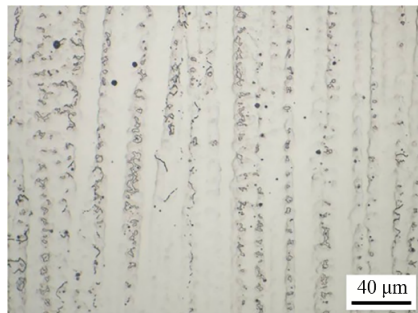
(b) 10Cr XRD 图谱



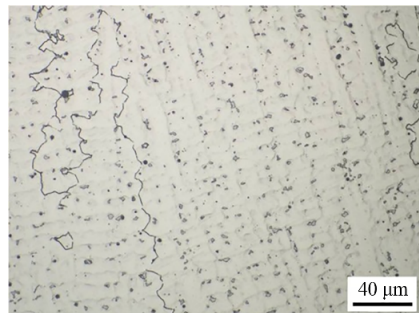
(c) 13Cr XRD 图谱



(d) 7Cr 金相组织



(e) 10Cr 金相组织



(f) 13Cr 金相组织

图 3 熔敷金属 XRD 图谱及金相组织特征

Fig. 3 XRD patterns and metallographic microstructure of deposited metal

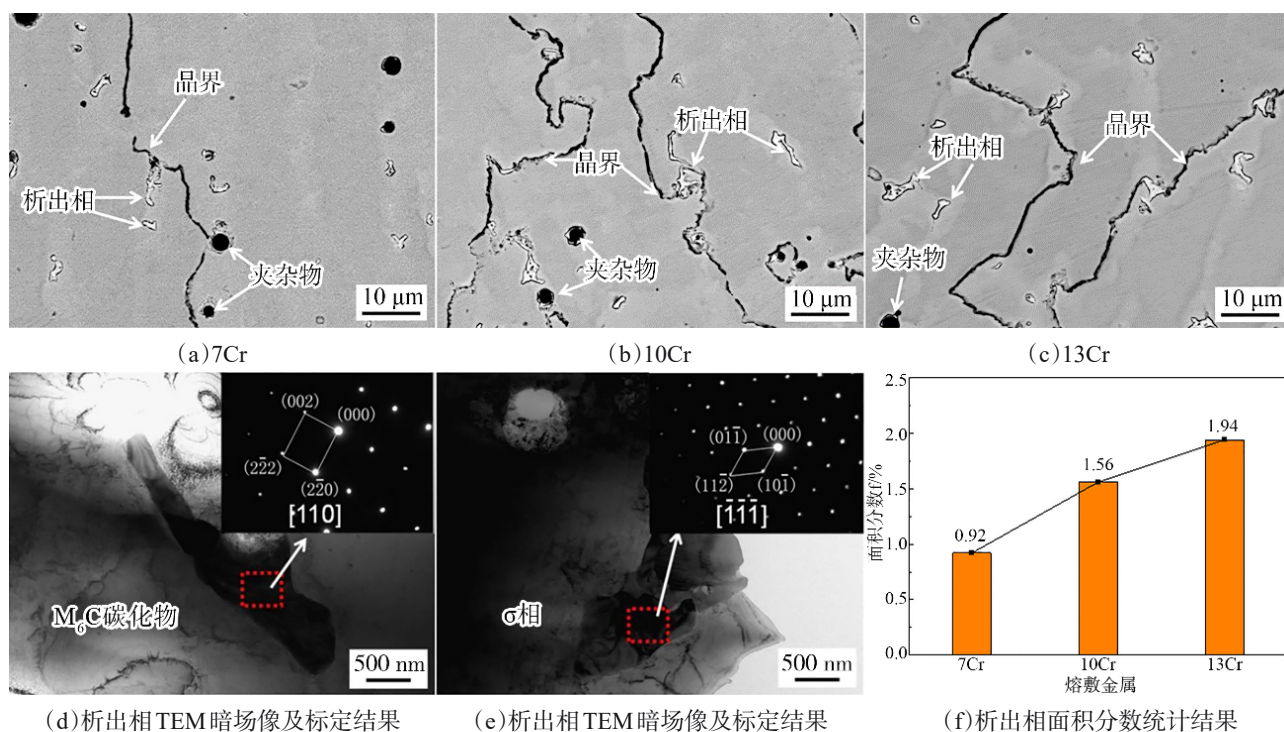


图4 熔敷金属微观形貌及析出相特征

Fig. 4 Microstructure of deposited metal by SEM and Precipitated phase characteristic

2.1.3 夹杂物特征

图5为SEM-SE模式下观察到的7Cr、10Cr、13Cr熔敷金属典型夹杂物特征。熔敷金属中夹杂物呈近似球状,随机分布于基体中,尺寸0.3~4.0 μm,各熔敷金属夹杂物成分基本一致,主要为Si-Cr-Mn-Ti-Al-O相。夹杂物的尺寸和分布特征将在2.3节详细分析。

2.2 熔敷金属低温韧性

7Cr、10Cr、13Cr熔敷金属-196℃低温韧性如表4所示。随着药芯粉中Cr含量增加,-196℃夏比冲击吸收能量由7Cr的20.0 J提高至10Cr的33.3 J和13Cr的48.7 J,增幅分别为66.5%和143.5%,低温韧性显著改善。值得注意的是,随药芯粉Cr含量提高,熔敷金属中析出相面积分数由0.92%增至1.94%,析出相增多本应恶化韧性,但实测韧性反而显著提升,二者趋势相反,需从其他因素寻找韧性变化的原因。

2.3 夹杂物对低温韧性的影响

文献[17]指出在载荷作用下,σ相内部及周围易产生微裂纹,导致焊缝中裂纹萌生及扩展加剧、韧性下降;文献[18]发现625镍基合金中有MC和

M₆C型碳化物析出,碳化物在晶界处密度增加导致晶界开裂、韧性降低。两者均证实了σ相及M₆C碳化物的析出恶化镍基合金强韧性。但本实验中析出相增多并未导致韧性下降,表明析出相并非本实验条件下决定韧性变化的主导因素。

为探究韧性变化的主要原因,对-196℃冲击断口进行形貌观察,如图6所示。7Cr试样断口由大量准解理面及少量直径为6~20 μm的韧窝构成(见图6a);10Cr试样断口准解理面消失,由大量直径4~12 μm的韧窝构成(见图6b);13Cr试样断口形貌由大量直径为4~10 μm的韧窝和直径1~2 μm的微孔构成(图6c)。韧窝直径统计结果如图7所示,7Cr为12.3±6.3 μm,10Cr为8.2±3.4 μm,13Cr为6.9±2.3 μm。随着药芯粉中Cr含量提高,断口准解理面逐渐消失,韧窝分布更加均匀且直径减小,韧性显著改善。

断口韧窝中观察到大量夹杂物。已有研究表明,直径>1.0 μm的大尺寸夹杂物在载荷作用下易发生应力集中,因非金属夹杂物硬而脆、难以与基体协调变形而成为裂纹源^[19]。为定量评估夹杂物的分布特征,对熔敷金属中夹杂物的数量和尺寸特征进行统计,结果如图8所示。熔敷金属中夹杂物

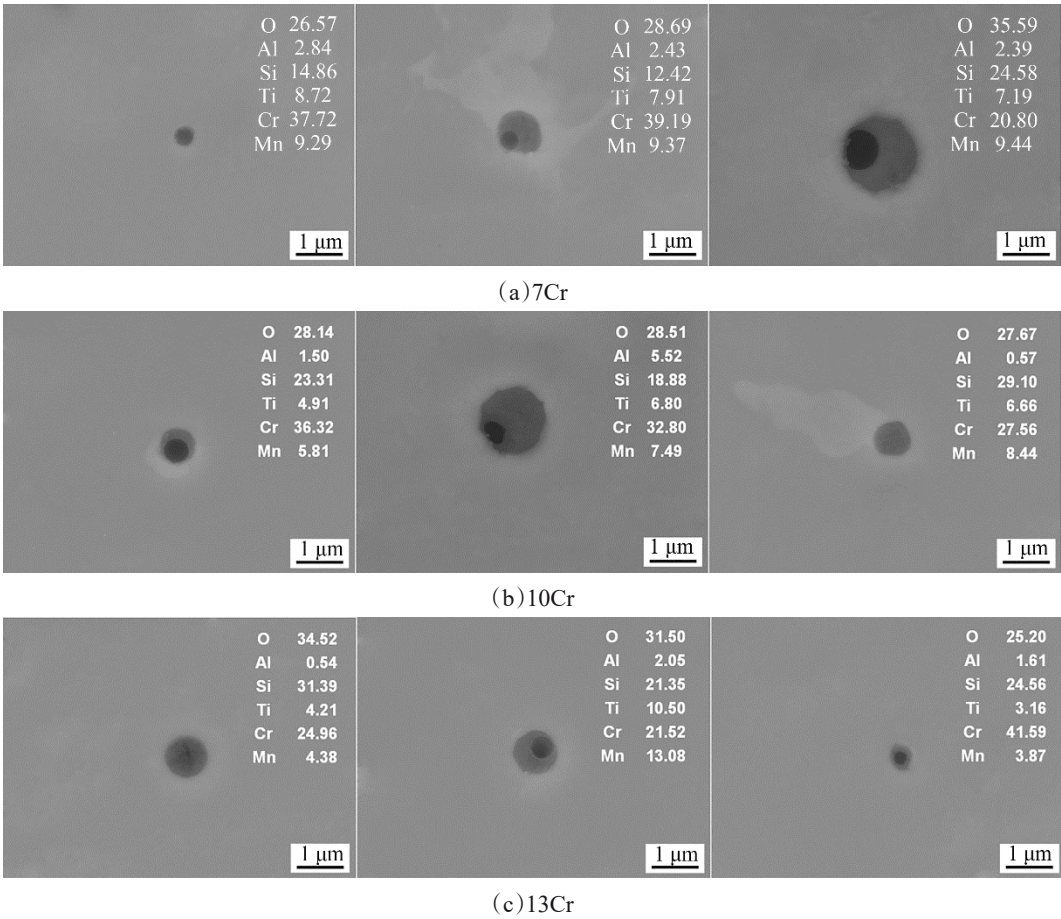


图5 熔敷金属典型夹杂物形貌及EDS结果
Fig. 5 Morphology and EDS results of typical inclusions in deposited metal

表4 熔敷金属-196℃低温韧性

Table 4 Low temperature toughness of deposited metal at -196℃		
熔敷金属编号	夏比冲击吸收能量 KV ₂ /J(-196℃)	平均夏比冲击吸收能量 KV ₂ /J(-196℃)
7Cr	23, 19, 18	20.0
10Cr	30, 34, 36	33.3
13Cr	49, 46, 51	48.7

广泛分布于0.3~4.0 μm内并有明确的数量分数峰值:7Cr试样中夹杂物数量分数峰值位于0.5~1.0 μm内,平均直径0.85 μm;10Cr试样夹杂物数量分数峰值同样位于0.5~1.0 μm内,但相较7Cr试样向小尺寸方向移动,夹杂物平均直径降至0.74 μm;13Cr试样中夹杂物数量分数峰值进一步向小尺寸方向移

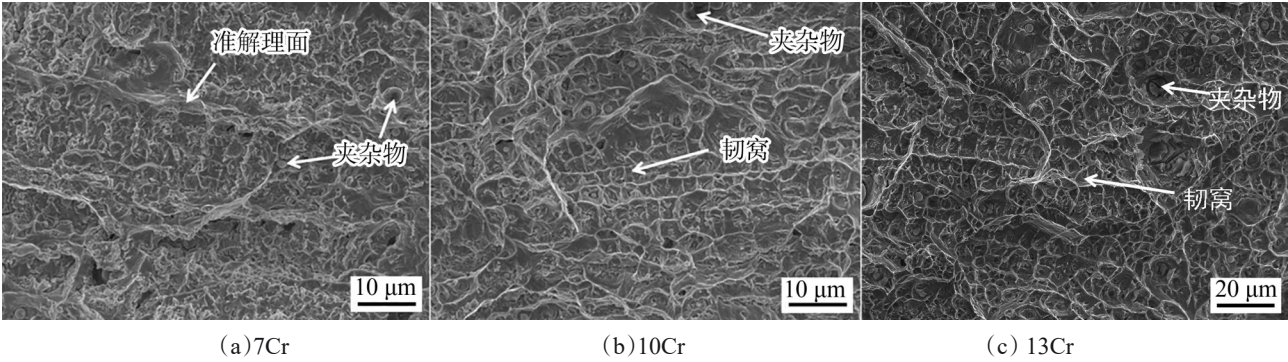


图6 熔敷金属冲击断口典型形貌
Fig. 6 Fracture surface morphologies of impact specimens at -196℃ by SEM

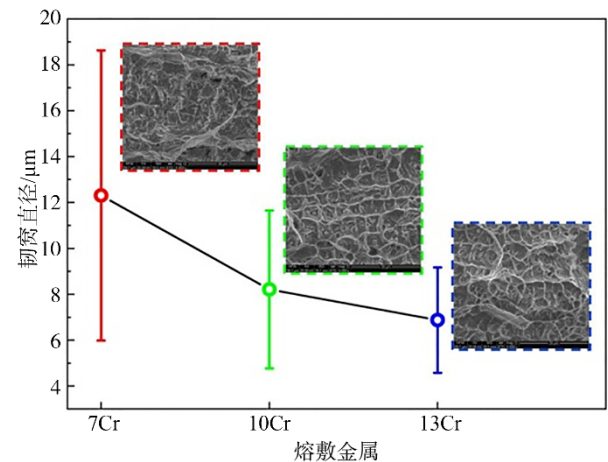


图 7 冲击断口韧窝直径统计

Fig. 7 Statistics of dimple diameter of fracture surface morphology
至 0~0.5 μm 内, 平均直径降至 0.56 μm。根据式(1)~式(3)计算夹杂物空间分布参数, 统计结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 随药芯粉 Cr 含量增加, 夹杂物平均直径从 0.85 μm 降至 0.56 μm, 体积分数由 1.32% 降至 0.55%, 大尺寸夹杂物空间数量分数由 59.7% 降至 43.6%。夹杂物尺寸和体积分数的减小降低了大尺寸夹杂物作为裂纹源的概率, 与低温韧性的改善趋势一致。

夹杂物尺寸减小可能与 Cr 的脱氧作用有关。文献[20]研究了镍基焊条药皮中脱氧剂对各金属组分传质系数的影响, 发现药皮中脱氧剂含量提高使各金属组分的传质系数显著提高。在镍基药芯焊丝中, Cr 在作为重要合金元素的同时也作为主要的脱氧剂, Cr 会与熔池中的 O 发生如下反应:

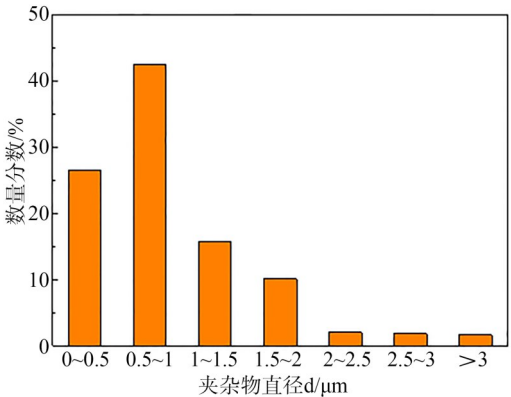


随着药芯粉中 Cr 含量提高, 更多的金属 Cr 过渡进入熔池内, Cr 的脱氧作用增强, 熔敷金属 O 含量从 7Cr 的 0.129% 降至 13Cr 的 0.072% (见表 3)。Babu^[21]等提出了焊缝中夹杂物的直径计算公式:

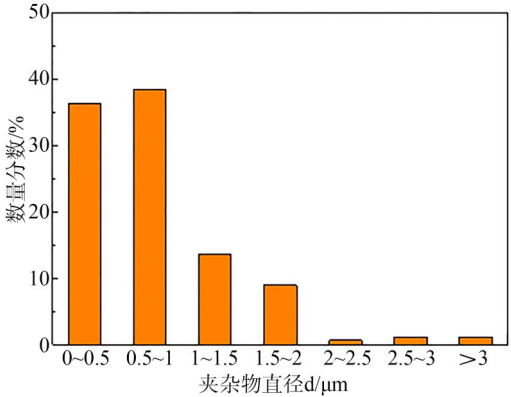
$$r \approx \alpha_3^* \sqrt{t}$$

(5)

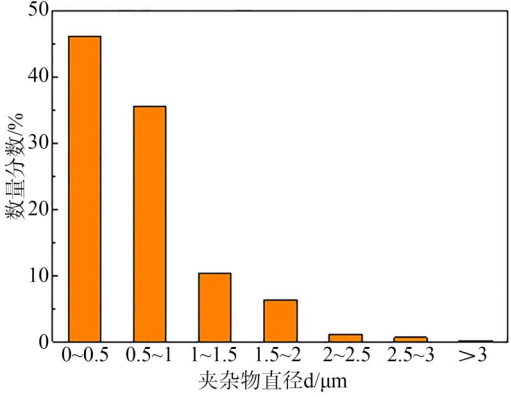
式中 α_3^* 与熔敷金属 O 含量正相关; t 为熔池凝固时



(a) 7Cr



(b) 10Cr



(c) 13Cr

图 8 熔敷金属夹杂物尺寸统计

Fig. 8 Diameter statistics of inclusions in deposited metal
间。本实验除药芯粉成分外其他条件一致, 可认为熔敷金属凝固时间相同, 因此夹杂物直径与 O 含量

表 5 熔敷金属的夹杂物统计结果

Table 5 Results of statistics of inclusions in deposited metal

熔敷金属	平均直径 $d/\mu\text{m}$	数量密度 $(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	空间平均直径 $d_v/\mu\text{m}$	大尺寸夹杂物数量分数/%	空间数量密度 $N_v/(10^6 \text{ m}^{-3})$	体积分数 $f_v/\%$
7Cr	0.85	4 485	1.33	59.7	3.37	1.32
10Cr	0.74	4 342	1.16	53.2	3.74	0.97
13Cr	0.56	4 233	0.88	43.6	4.81	0.55

成正比。根据式(5)可知,随着药芯粉中Cr含量增加,熔池中剩余O含量减少,夹杂物空间平均直径减小,大尺寸夹杂物数量分数及体积分数随之减小,应力集中概率降低,这可能是13Cr试样低温韧性优于Cr含量较低试样的原因。

3 结论

本文系统研究了镍基药芯焊丝药芯粉中Cr含量对焊缝金属显微组织和低温韧性的影响规律,分析其对析出相类型、夹杂物特征(成分、数量密度、体积分数等)的作用,并阐明了决定熔敷金属低温韧性的主要因素。主要结论如下:

(1)药芯粉中Cr含量从7.0 wt.%增至13.0 wt.%时,熔敷金属显微组织均以奥氏体为主,在晶内和枝晶间存在一定量析出相,主要为 σ 相和 M_6C 碳化物,,析出相面积分数由0.92%增至1.94%。

(2)随着药芯粉中Cr含量增加,熔敷金属-196℃夏比冲击吸收能量由7Cr的20.0 J增至10Cr的33.3 J和13Cr的48.7 J,低温韧性显著改善。

(3)随着药芯粉Cr含量增加,熔敷金属O含量从0.129%降至0.072%,夹杂物平均直径从0.85 μm 降至0.56 μm ,大尺寸夹杂物($d>1.0 \mu\text{m}$)数量分数由59.7%降至43.6%,体积分数由1.32%降至0.55%。夹杂物特征的变化可能是熔敷金属低温韧性改善的主要原因。

(4)析出相面积分数随Cr含量提高而增大(0.92%→1.94%),其趋势与韧性变化相反,表明在本实验条件下夹杂物特征对韧性的影响大于析出相。

参考文献:

- [1] Mu W, Li Y, Cai Y, et al. Low-cycle fatigue and fracture behaviour of 9 % Ni steel flux cored arc welding joint at cryogenic temperature[J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 269: 1-8.
- [2] Qu Z, Xia L, Wang X. The study on welding technology of 9Ni steel[J]. Materials Science Forum, 2019, 941: 516-523.
- [3] Kim Y, Lee S H, Park M, et al. Enhanced ultra cryogenic impact toughness in 9 wt.% Ni steel through lamellar microstructure refinement[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 914: 1-9.
- [4] Saini S, Singh K. Recycling of steel slag as a flux for submerged arc welding and its effects on chemistry and performance of welds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114 (3): 1165-1177.
- [5] Kim B E, Park J Y, Lee J S, et al. Effects of the welding process and consumables on the fracture behavior of 9 wt.% nickel steel[J]. Experimental Techniques, 2020, 44(2): 175-186.
- [6] Sham K, Liu S. Flux-coating development for SMAW consumable electrode of high-nickel alloys[J]. Welding Journal, 2014, 93: 271-281.
- [7] Liu D, Ao W, Xue N, et al. Microstructure and mechanical properties of 9% nickel steel welded joints using a CoCrNi filler wire for cryogenic storage tanks[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 212: 1-12.
- [8] 蔡群, 李刚, 徐圣宇, 等. 一种Ni-Cr-Mo镍基合金焊丝凝固过程元素偏析及相转变规律研究[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(2): 28-34.
CAI Q, LI G, XU S Y, et al. Study on solidification segregation and phase transformation of a Ni-Cr-Mo alloy filler wire[J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(2): 28-34.
- [9] Peng H, Liu X, Deng C, et al. Evolution of microsegregation induced precipitations and bending fracture mechanisms of 9% Ni steel weldments filled with nickel-based alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 42-57.
- [10] Mu W, Li Y, Cai Y, et al. Cryogenic fracture toughness of 9%Ni steel flux cored arc welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 804-812.
- [11] 寇伟祥, 张明洋, 韩欢庆. MnO对碳钢药芯焊丝性能影响研究[J]. 材料开发与应用, 2023, 38(1): 17-22.
KOU W X, ZHANG M Y, HAN H Q. Study on effect of MnO on properties of carbon steel flux cored wire[J]. Development and Application of Materials, 2023, 38(1): 17-22.
- [12] Chen G, Luo H, Yang H, et al. Effects of the welding inclusion and notch on the fracture behaviors of low-alloy steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 447-456.
- [13] Han C, Zhong M, Zhu Z, et al. DBTT reduction enabled by SiO_2 -bearing flux in submerged arc welds[J]. Welding Journal, 2025, 104(10): 418-433.

- [14] Ying G, Shangyu Y, Cong Z, et al. Low-temperature toughness enhancement of 9% Ni steel girth welds in LNG storage tanks via a TIP-TIG welding process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(14): 7098–7110.
- [15] Wang H, He G. A comparative study of microstructures and properties of two types of nickel-based alloy covered electrodes [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(1): 94–104.
- [16] Han C, Zhong M, Kaldre I, et al. Role of SiO₂ upon weld metal inclusion characteristics in EH36 shipbuilding steels treated by CaF₂-SiO₂ fluxes[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(3): 989–995.
- [17] Guo X, Xu K, Wei C, et al. Effect of Mo in Ni-30Cr filler metal on the eutectic phases of weld metal [J]. Welding in the World, 2023, 67(5): 1145–1153.
- [18] Liu J, Qin L, Zhao M. The hydrogen-induced twin boundary cracking behavior in nickel-based alloy 625: Insights from secondary carbide dissolution[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 941: 148624.
- [19] 苏小虎, 栗卓新, 马思鸣, 等. 氧含量及夹杂物对高强钢金属芯焊丝 E120C-K4 熔敷金属冲击韧性的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(11): 49–52.
- SU X H, LI Z X, MA S M, et al. Effect of oxygen content and inclusions on impact toughness in deposited weld metal of high strength steel metal cored wire E120C-K4[J]. Materials Review, 2020, 34(11): 49–52.
- [20] Qin R, He G. Mass transfer of nickel-base alloy covered electrode during shielded metal arc welding [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(3): 1475–1484.
- [21] Babu S, David S, Vitek J, et al. Model for inclusion formation in low alloy steel welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4(5): 276–284.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 92 页

- 50:365–369.
- [9] 张欣盟, 何广忠, 王贝贝, 等. 氧化膜对 6082 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(4): 299–305.
- ZHANG X M, HE G Z, WANG B B, et al. Influence of Oxide Film on Fatigue Property of Friction Stir Welded 6082 Al Alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(4): 299–305.
- [10] 邢松龄, 李充, 周海鹏, 等. 铝合金型材搅拌摩擦焊无减薄接头组织和性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(11): 124–128.
- XING S L, LI C, ZHOU H P, et al. Structure and properties of friction stir welding joint of aluminum profile [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(11): 124–128.
- [11] Ren S R, Ma Z Y, Chen L Q. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 69–72.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>