

Ti含量对960 MPa高强钢焊缝金属微观结构及力学性能的影响

刘梓申¹ 曹睿¹ 焦世舜¹ 杨飞² 朱宇霆² 张克静² 刘春桃²

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

(2. 四川大西洋焊接材料股份有限公司, 自贡 643000)

摘要: 为提高960 MPa高强钢焊缝金属综合力学性能,揭示了960 MPa高强钢焊缝金属中Ti元素的最佳含量。首先,设计并焊接了4种不同Ti含量(0.01%~0.08%)的焊缝金属,通过扫描电子显微镜、能谱仪、拉伸与冲击试验,系统研究了Ti含量对焊缝微观结构与力学性能的影响。结合断口观察与断口显微形貌,评估了Ti含量对起裂能和扩展能的影响。结果表明,当Ti含量小于0.06%时,焊缝金属显微组织由粒状贝氏体转变为粒状贝氏体+针状铁素体;随着Ti含量提升,针状铁素体含量显著增加。当Ti含量达到0.06%时,抗拉强度为939 MPa,延伸率为23.5%,相较于Ti0.01延伸率提升27%, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功为104 J;Ti含量增至0.08%时,粗大板条贝氏体的形成与TiN的析出导致塑韧性急剧下降,延伸率降至18.2%, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功仅为25 J。Ti通过形成 TiO_2 夹杂物促进针状铁素体形核,改善了焊缝的综合力学性能,但过量的Ti会诱发脆性相析出与粗大的板条贝氏体的形成,显著恶化塑韧性。

关键词: 960 MPa高强钢; 冲击韧性; Ti含量; 针状铁素体; 焊缝金属

中图分类号: TG441 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.017

0 引言

高强钢凭借其高强度、良好的塑韧性与加工成形性能,广泛应用于车辆制造、压力容器、桥梁建造等领域^[1-7]。其中960 MPa低碳贝氏体高强钢由于综合力学性能优异及焊接性能良好,受到了广泛的关注。在实际使用过程中,960 MPa高强钢虽然本身塑韧性良好,但其焊接接头容易出现接头组织粗化、强度韧性不足、疲劳性能恶化等问题,严重危害工程构件的服役安全^[8-13]。现有研究中大多采用不同焊接工艺改善960 MPa高强钢焊缝金属力学性能,陶庭芳等^[14]通过在搅拌摩擦焊中添加底部辅热装置制备了高韧性的无缺陷接头,发现 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热可以降低原奥氏体晶粒尺寸且使马氏体发生回火,韧性显著提高。然而在广泛应用的熔化焊中,直接对焊缝金属组织进行宏观调控较难精确地改善其性能,通过向焊接材料中添加不同种类的合金元素,间接调控焊缝金属组织与力学性能不仅更为灵活可控,工艺上也相对简单。因此,研究并确定合金元素对960 MPa高强钢焊缝金属组织与力学性能的影响十分有必要。

众多研究表明,Ti含量显著影响低合金高强钢焊

缝金属的力学性能、显微组织与夹杂物等^[15-17]。现有研究主要针对Ti与氧元素结合形成夹杂物,进而为针状铁素体提供形核驱动力,促进针状铁素体形成^[18]。同样有研究指出,Ti元素作为强碳化物形成元素,会促进焊缝金属中晶界处碳化物的形成,起到钉扎晶粒、限制晶粒长大的作用^[19]。从相变的角度来说,Ti元素可以降低焊缝金属的相变起始温度并形成以针状铁素体为主的焊缝金属^[20]。然而当焊缝金属调整为960 MPa级高强钢时,焊缝金属将以贝氏体组织为主,而非传统研究中的铁素体。现有研究大多集中于Ti元素对中低强度焊缝的影响,目前尚缺乏关于Ti元素对于960 MPa焊缝金属组织与力学性能影响的有关报道。

本文设计了4种不同Ti含量的焊缝金属并对其组织与力学性能进行了表征,通过对比不同Ti含量的显微组织、力学性能、冲击与拉伸断口形貌,探究Ti含量对960 MPa高强钢焊缝金属组织与力学性能的影响,为实际应用提供指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用CHE107RH焊条为焊材,焊条直径为4 mm,

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 甘肃省重点研发计划(23YFGA0057); 甘肃省拔尖领军人才项目; 中央引导地方科技发展专项(24ZYQA054); 国家自然科学基金项目(52175325,51961024,52071170); 甘肃省科技重大专项(23ZDGA010,22ZD6GA008)

作者简介: 刘梓申,男,2001年生,河北唐山人,在读博士研究生; 主要研究方向为焊缝金属强韧化; E-mail: lzsluzhishen@163.com。

曹睿(通信作者),女,1977年生,甘肃兰州人,博士,教授; 主要研究方向为新材料、异种材料的焊接性、强韧性、腐蚀、变形、损伤及断裂行为; E-mail: caorui@lut.edu.cn。

引用格式: 刘梓申,曹睿,焦世舜,等. Ti含量对960 MPa高强钢焊缝金属微观结构及力学性能的影响[J]. 机械强度,2025,47(9):182-189.

LIU Zishen, CAO Rui, JIAO Shishun, et al. Effect of Ti content on microstructure and mechanical properties of 960 MPa high strength steel weld metal[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9): 182-189.

焊前对焊条进行烘焙处理,加热温度为 380~400 °C,保温 1~2 h。图 1 为焊接过程与焊缝截面示意图,焊前开 V 形坡口,坡口角度为 10°,根部装配间隙为 15 mm 并采用垫板,焊接方式为多层多道焊,焊接工艺参数如表 1 所示。试板完成焊接后进行 250 °C、2 h 的焊后热处理。为取得不同 Ti 元素含量,在原焊条配方基础上调整 Ti 含量并制备新焊条,设计 Ti 元素含量分别为 0.010%、0.028%、0.059%、0.078%,分别命名为 Ti0.01、Ti0.03、Ti0.06、Ti0.08。

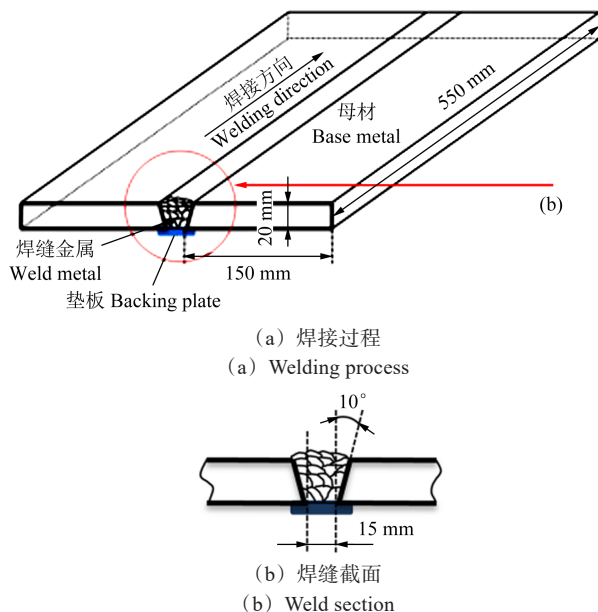


图 1 焊接过程与焊缝截面示意图

Fig. 1 Welding process and weld section diagram

表 1 焊接工艺参数

Tab. 1 Welding process parameters

焊接电压 Welding voltage/V	焊接电流 Welding current/A	焊接速度 Welding speed/ (mm/s)	层间温度 Layer temperature/°C
23~27	163	2.75	140~150

为确保焊缝金属中 Ti 元素含量符合设计值,采用光谱分析法测定焊缝金属中各合金元素的质量分数,测定结果如表 2 所示。

表 2 焊缝金属的合金元素含量

Tab. 2 Alloying element content of the weld metal %

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Fe
Ti0.01	0.07	0.23	1.74	0.09	2.79	0.66	0.006	0.010	余量 Bal.
Ti0.03	0.08	0.30	1.78	0.12	2.78	0.73	0.009	0.028	余量 Bal.
Ti0.06	0.08	0.35	1.40	0.10	2.83	0.69	0.009	0.059	余量 Bal.
Ti0.08	0.08	0.57	1.44	0.11	2.67	0.65	0.011	0.078	余量 Bal.

1.2 力学性能测试

金相试样、拉伸试样与夏比冲击试样的取样位置及尺寸如图 2 所示。拉伸试验参考国家标准 GB/T 25774.1—2010 执行,试样为圆棒状,轴心沿焊接方向于焊缝中心取样。采用 INSTRON-8801 型万能拉伸机

进行拉伸试验,加载速率为 0.1 mm/s。夏比冲击试验参照国家标准 GB/T 2650—2022 执行,在板厚 1/2 处取夏比冲击试样,冲击试样的尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,开 V 形缺口,缺口深度为 2 mm,缺口夹角为 45°,采用 PTMS-4450 型摆锤冲击试验机在 -40 °C 与 -60 °C 下进行夏比冲击试验,采用 Quanta FEG 450 型扫描电镜对断口形貌进行观察并统计塑性裂纹扩展区的延性裂纹扩展长度(简称为“SCL”)、延伸区的宽度(简称为“SZW”)、裂纹失稳扩展区的裂纹断裂距离(简称为“X_r”)。为分析元素变化对焊缝金属不同区域硬度的影响,对焊缝金属截面进行显微硬度分析。试验采用 HV-1000A 型数显显微维氏硬度仪,试验时载荷为 50 g,保载 20 s,每个硬度点间隔为 1.0 mm。

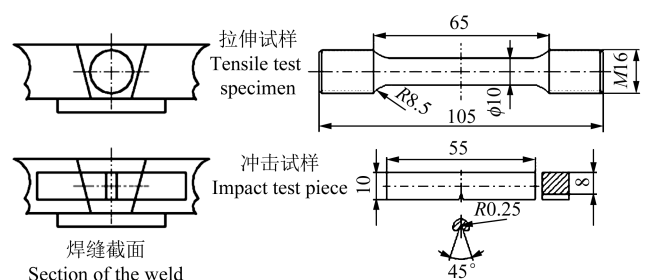


图 2 取样位置与试样尺寸示意图

Fig. 2 Sampling position and sample size diagram

1.3 金相组织观察

为研究焊缝金属组织与夹杂物的变化,将金相试样垂直于焊接方向的截面进行打磨抛光,然后用腐蚀液(4% 硝酸酒精)腐蚀后,使用 Axio Scope A1 型光学显微镜、Quanta FEG 450 型扫描电镜和能谱分析仪对焊缝金属的微观组织进行分析,并分析夹杂物种类。

2 结果与分析

2.1 不同 Ti 含量焊缝金属的显微组织与夹杂物观察

2.1.1 显微组织观察

对不同 Ti 含量的焊缝金属显微组织进行观察,其中 Ti0.01~Ti0.06 的观察结果如图 3 所示,Ti0.08 的观察结果如图 4 所示。由于多层多道焊中后一道次的焊接对前一道次焊缝有再热作用,因此焊缝金属内部组织一般可以分为柱状晶区和再热晶区^[21-22]。如图 3(a)、图 3(b)所示,Ti 含量在 0.01% 时柱状晶区仅含有粒状贝氏体(Granular Bainite, GB)组织,同时有明显的沿柱状晶择优生长取向,马氏体/奥氏体组元(Martensite/Austenite, M/A)呈细条状;再热晶区中除了粒状贝氏体外有铁素体(Ferrite, F)生成,晶粒取向混乱,未表现出明显的择优生长取向,M/A 组元呈粒状分布。Ti 含量提高到 0.03% 时,显微组织如图 3(c)、图 3(d)所示,柱状晶区由粒状贝氏体、多边形铁素体及针状铁素体(Acicular Ferrite, AF)共同构成,粒状贝氏体占 70% 以

上。再热晶区显微组织同样为粒状贝氏体、多边形铁素体及针状铁素体;同时,针状铁素体和多边形铁素体均匀地分布在粒状贝氏体基体中,且相比于柱状晶区,再热晶区中针状铁素体含量明显增多,M/A组元也更细小均匀。进一步提高Ti元素含量到0.06%时,焊缝金属显微组织如图3(e)、图3(f)所示,柱状晶区有大量针状铁素体形成,粒状贝氏体较少,M/A组元发生粗化,呈粒状或条状分布于铁素体基体上。再热晶区同样为大量针状铁素体,含有少量多边形铁素体,粒状贝氏体含量明显下降。

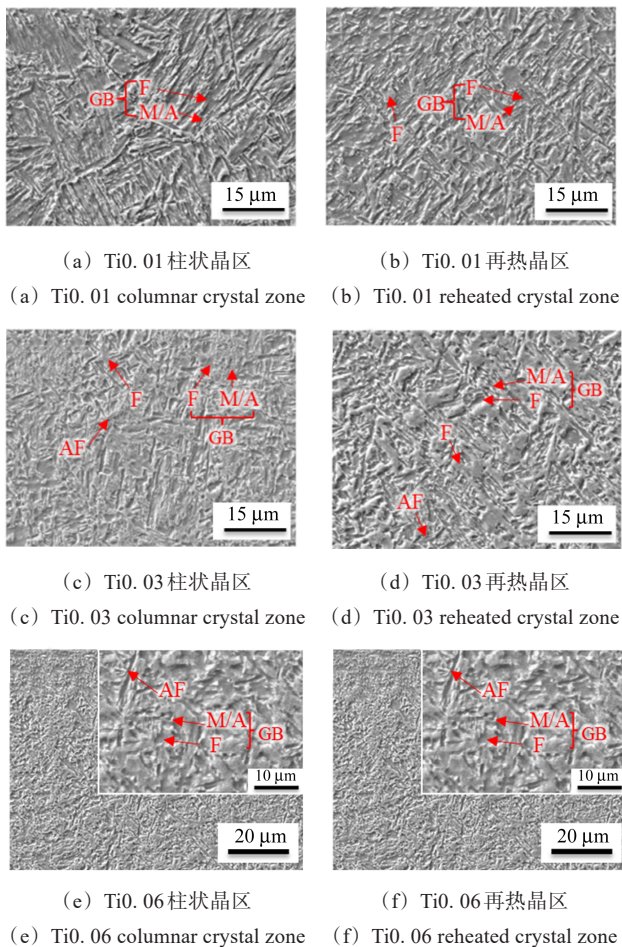


图3 Ti0.01~Ti0.06焊缝金属显微组织观察结果

Fig. 3 Microstructure observation results of Ti0.01~Ti0.06 weld metal

当Ti含量达到0.08%时,宏观上焊缝金属组织呈现出明显变化。如图4(a)所示,焊缝金属在柱状晶区(A_0)与再热晶区(C_0)中出现了明显的中心粗晶区(B_0)。扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察结果如图4(b)~图4(d)所示,焊缝柱状晶区仅含有针状铁素体与粒状贝氏体组织,大多数M/A组元呈细小颗粒状分布在铁素体基体中;中心粗晶区可以观察到晶粒内部有明显的晶粒生长取向,中心粗晶区内贝氏体组织呈一定规律、沿一定方向生长,形成等轴的板条贝氏体(Lath Bainite, LB)组织,基本不存在针

状铁素体组织,同时伴有第二相析出。原因在于Ti含量过高时会形成氧化物夹杂,为板条贝氏体提供形核位点,促进板条贝氏体的形核与生长^[23]。再热晶区组织相比于柱状晶区粒状贝氏体含量有所下降,同样也可以观察到第二相的析出。

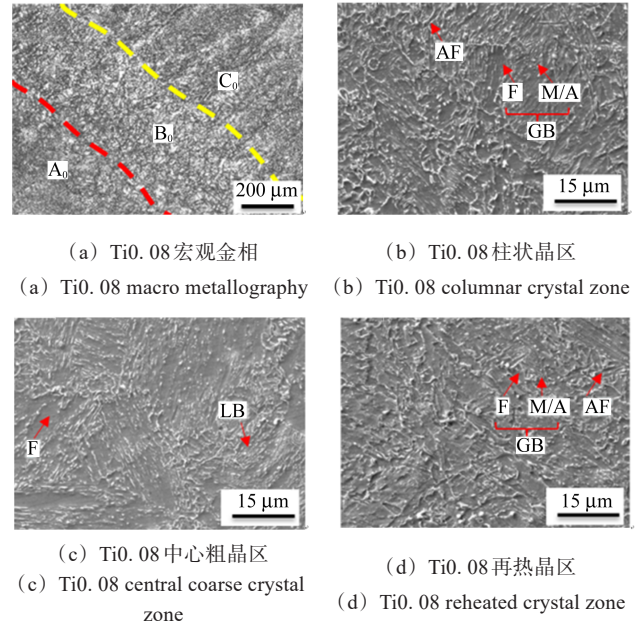


图4 Ti0.08焊缝金属显微组织观察结果

Fig. 4 Microstructure of Ti0.08 weld metal observation results

2.1.2 夹杂物与析出相能谱分析

不同Ti含量下焊缝金属内夹杂物构成能量色散谱仪(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)结果如图5所示。当Ti含量为0.01%时,焊缝中心夹杂物成分主要有O、Si、Mn、Al、Ti五种元素。从含量上看,夹杂物为 SiO_2 、 MnO_2 为主, Al_2O_3 、 TiO_2 为辅的复合型夹杂物。Ti含量增大至0.03%和0.06%时,夹杂物种类没有发生明显变化,但Si、Mn元素含量均出现明显下降,Ti元素含量分别提升至5.21%和9.46%,复合型氧化物逐渐转换为以 TiO_2 为主。当Ti含量增大至0.08%时,夹杂物和析出相出现了明显变化,夹杂物中Ti含量提升到20.36%,Si、Mn元素含量降低到0.68%和0.58%,Al元素消失,夹杂物完全为 TiO_2 。同时在Ti0.08中可以观察到出现富N、Ti的析出相,为析出的TiN第二相。

2.2 不同Ti含量的焊缝金属力学性能表征

2.2.1 显微硬度

通过维氏硬度仪测量不同Ti含量下焊缝再热晶区与柱状晶区平均硬度,结果如表3所示。对比柱状晶区和再热晶区的硬度可以发现,柱状晶区硬度普遍高于再热晶区。当Ti含量在0.01%时,再热晶区明显取得了低值,柱状晶区硬度较高;当Ti含量在0.03%时,其柱状晶区和再热晶区硬度略有提高;当Ti含量为0.06%时,焊缝再热晶区与柱状晶区平均硬度均出现

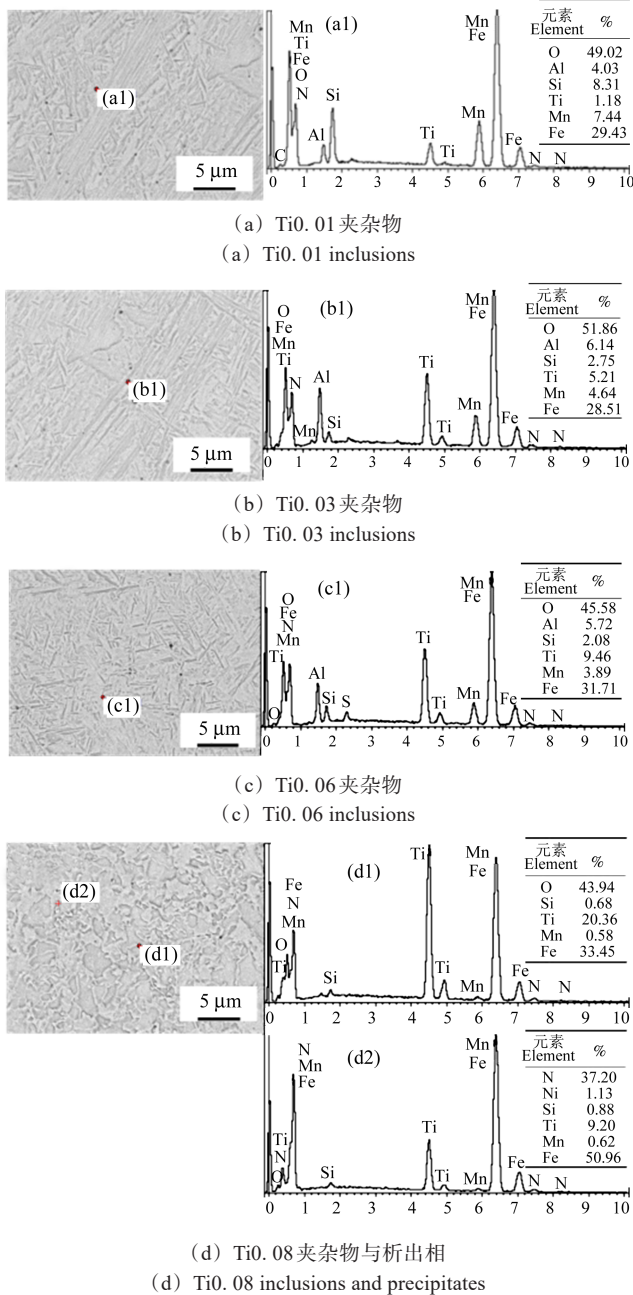


图 5 不同 Ti 含量焊缝金属夹杂物与析出相点扫描结果

Fig. 5 Scanning results of inclusions and precipitates in weld metal with different Ti contents

较低值;当 Ti 含量为 0.08% 时,柱状晶区与再热晶区硬度变化不大,但新出现的等轴晶区由于形成了脆硬的板条贝氏体与 TiN 析出相,取得了非常高的硬度值。

表 3 不同 Ti 含量下焊缝金属不同区域的硬度变化

Tab. 3 Changes of hardness in different regions of weld metal with different Ti content

样品 Specimen	再热晶区 Reheated crystal zone/HV	柱状晶区 Columnar crystal zone/HV	中心粗晶区 Central coarse crystal zone/HV
Ti0.01	274	316	—
Ti0.03	303	318	—
Ti0.06	286	292	—
Ti0.08	303	305	350

2.2.2 拉伸试验与断口观察

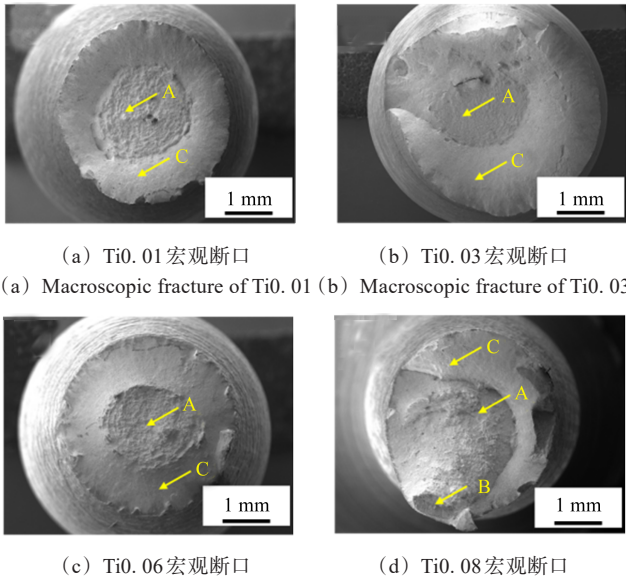
合金元素 Ti 对于焊缝金属的拉伸性能存在较为明显的影响,表 4 为不同 Ti 含量下焊缝金属的拉伸数据。其中, Ti 含量为 0.01% 时,焊缝金属中心屈服强度及抗拉强度明显较其他含量低,且其抗拉强度仅为 866 MPa,无法满足焊缝等强匹配原则。逐步提高 Ti 含量的过程中,屈服强度与抗拉强度显著增加。延伸率呈现出先增加后降低的趋势,在 Ti 含量为 0.06% 时,延伸率达到最大值 23.5%,原因在于大量的针状铁素体的形成为 Ti0.06 提供了足够的塑性,但由于 M/A 组元的粗化导致强度有所下降。在 Ti 含量达到 0.08% 时,由于中心粗晶区中大量脆硬的板条贝氏体的形成,屈服强度与抗拉强度达到最大值,延伸率达到最低值,相较 Ti0.06 下降了 22.6%。

表 4 不同 Ti 含量下焊缝金属的强度与延伸率

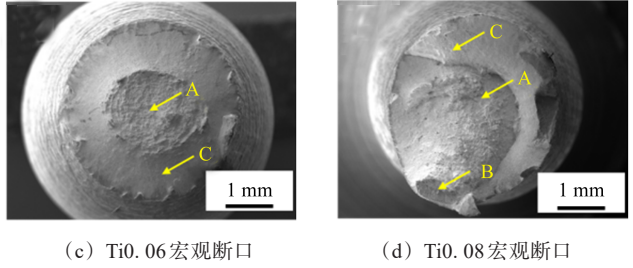
Tab. 4 Strength and elongation of weld metal with different Ti content

样品 Specimen	屈服强度 Yield strength/MPa	抗拉强度 Tensile strength/MPa	延伸率 Elongation/%
Ti0.01	821	866	18.5
Ti0.03	894	958	20.0
Ti0.06	868	939	23.5
Ti0.08	938	998	18.2

对拉伸断口进行 SEM 观察,结果如图 6、图 7 所示。当 Ti 含量为 0.01%、0.03%、0.06% 时,拉伸断口为纤维区(A)和剪切唇(C)构成的杯锥状断口,纤维区为大量韧窝结构,剪切唇显微形貌呈抛物线式拉长韧窝形貌。原因在于当 Ti 含量小于 0.06% 时,基体组织为粒状贝氏体和针状铁素体,且随着 Ti 含量的增加,粒状贝氏体含量逐渐降低、针状铁素体含量逐渐增加,更高含量的针状铁素体起到了分割晶粒、细化晶粒的效果,为基体提供了足够的塑性与强度^[24]。因此屈服强度、抗拉强度与延伸率可以同时提高,且断口由于较高的塑性变形形成了大量的韧窝。当 Ti 含量进一步增大到 0.08% 时,试样拉伸断口与其余 Ti 含量试样不同,由纤维区(A)、放射区(B)和剪切唇(C)构成,其中纤维区与剪切唇形貌没有发生明显变化,放射区为完全脆性解理断裂,解理面上可以观察到第二相颗粒脱落导致的微孔洞。原因在于 Ti 含量达到 0.08% 时,粗大的板条贝氏体无法如针状铁素体一样为基体提供足够的塑性,且由夹杂物与析出相的能谱分析可知,脆硬的 TiN 在 Ti0.08 试样中发生大量析出,在承受拉伸载荷时造成应力集中,导致材料发生解理断裂^[25]。



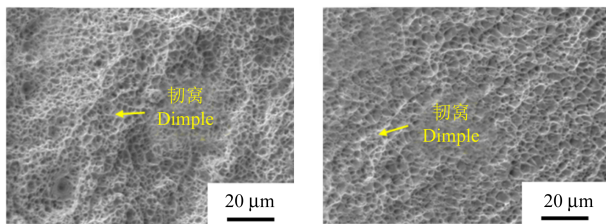
(a) Ti0.01 宏观断口 (b) Ti0.03 宏观断口
(a) Macroscopic fracture of Ti0.01 (b) Macroscopic fracture of Ti0.03



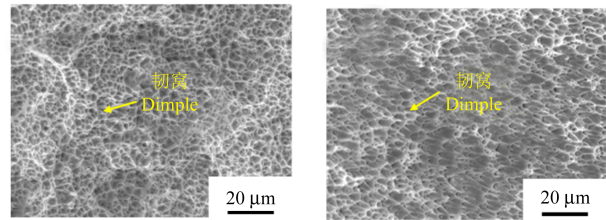
(c) Ti0.06 宏观断口 (d) Ti0.08 宏观断口
(c) Macroscopic fracture of Ti0.06 (d) Macroscopic fracture of Ti0.08

图 6 不同 Ti 含量下焊缝金属的拉伸断口宏观形貌

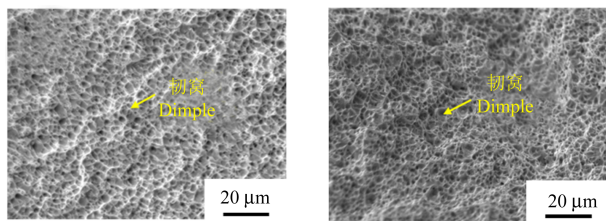
Fig. 6 Macroscopic morphology of tensile fracture of weld metal with different Ti content



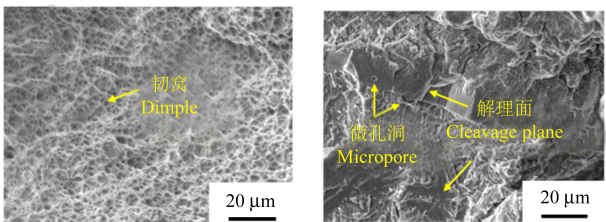
(a) Ti0.01 纤维区 (b) Ti0.01 剪切唇
(a) Ti0.01 fiber zone (b) Ti0.01 shear lip



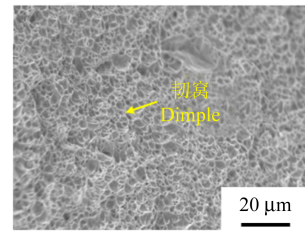
(c) Ti0.03 纤维区 (d) Ti0.03 剪切唇
(c) Ti0.03 fiber zone (d) Ti0.03 shear lip



(e) Ti0.06 纤维区 (f) Ti0.06 剪切唇
(e) Ti0.06 fiber zone (f) Ti0.06 shear lip



(g) Ti0.08 纤维区 (h) Ti0.08 放射区
(g) Ti0.08 fiber zone (h) Ti0.08 radiation zone



(i) Ti0.08 剪切唇
(i) Ti0.08 shear lip

图 7 不同 Ti 含量下焊缝金属的拉伸断口显微形貌

Fig. 7 Morphology of the tensile fracture of weld metal with different Ti content

2.2.3 低温冲击试验与断口观察

合金元素 Ti 的加入对于焊缝低温冲击韧性有着较为明显的影响,不同 Ti 含量焊缝金属在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冲击功如表 5 所示。由表 5 可知, Ti0.01、Ti0.03、Ti0.06 试样在低温下均取得了较为良好的低温韧性,而 Ti0.08 低温冲击功急剧下降,仅为 25 J、19 J。

表 5 不同 Ti 含量焊缝金属在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冲击功

Tab. 5 Impact energy of weld metal at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ under different Ti content

样品 Specimen	冲击功 Impact energy/J	
	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ti0.01	94	80
Ti0.03	96	77
Ti0.06	104	82
Ti0.08	25	19

为进一步探究 Ti 含量变化对于低温冲击韧性的影响,分别将 Ti0.01、Ti0.03、Ti0.06、Ti0.08 四组试样在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冲击断口进行扫描电镜观察,并对比起裂源区和放射区形貌,结果如图 8 所示。当 Ti 含量较少时,裂纹源区显微形貌显示网状韧窝包裹解理台阶。网状韧窝较为细小,分布密集。放射区显微形貌解理台阶与网状韧窝相间排布。当 Ti 含量增大至 0.03% 时,裂纹源区与 Ti0.01 相似,均为网状韧窝包裹解理平台;放射区基本以解理河流花样为主,部分区域有少量网状韧窝存在。当 Ti 含量为 0.06% 时,可以看到裂纹在红色线条汇聚处形核,并迅速向下扩展,形核处有明显球状夹杂物脱落后的形貌;放射区含有大量细密的网状韧窝包裹在解理台阶周围。当 Ti 含量达到 0.08% 后,断口以完全解理断裂为主,几乎不包含网状韧窝形貌,说明 Ti0.08 低温韧性骤降。

对不同 Ti 含量焊缝金属的冲击断口显微形貌进行观察,统计 SCL、SZW、 X_f 长度并对 (SCL+SZW) 长度与冲击功进行拟合,其结果如图 9 所示。文献[26]指出,(SCL+SZW) 的长度与冲击功成正比,其中起裂功与 SZW 的长度成正比,而裂纹扩展功与 SCL 的长度成正比,图 9 的结果也可以验证这一点。

而由图 10 可知,不同 Ti 含量试样的 SZW 长度没

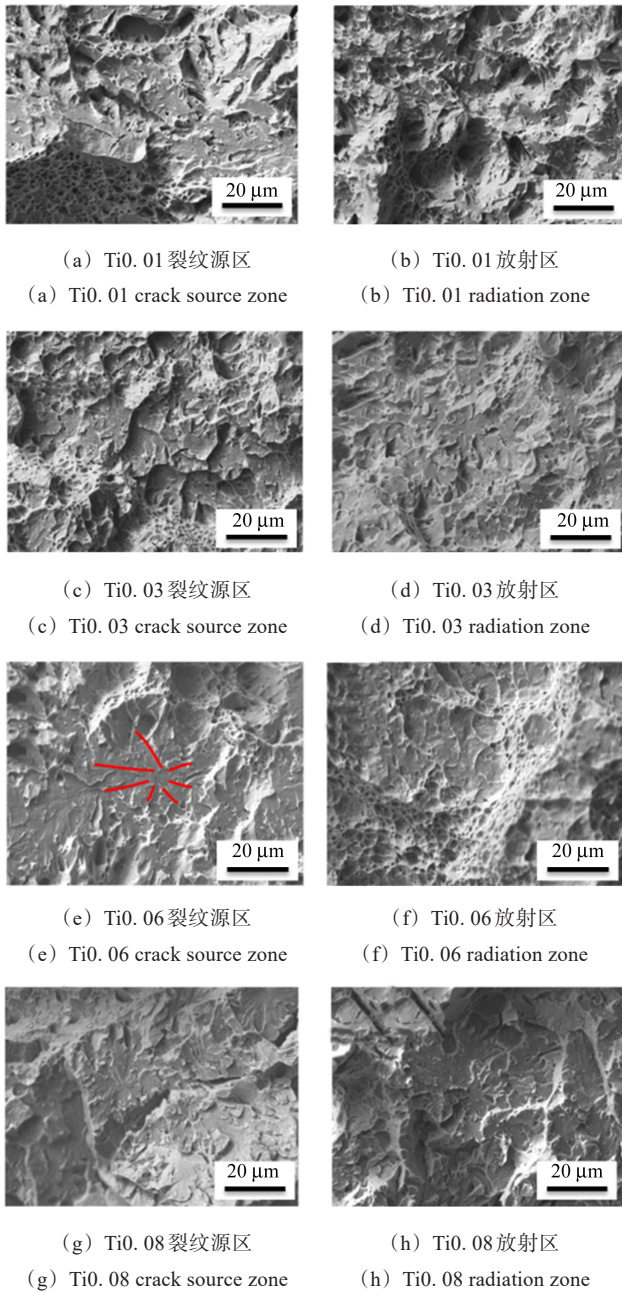


图 8 -60 °C 下不同 Ti 含量冲击试样起裂源区与放射区形貌
 Fig. 8 Morphology of crack initiation zone and radiation zone of impact specimens with different Ti content at -60 °C

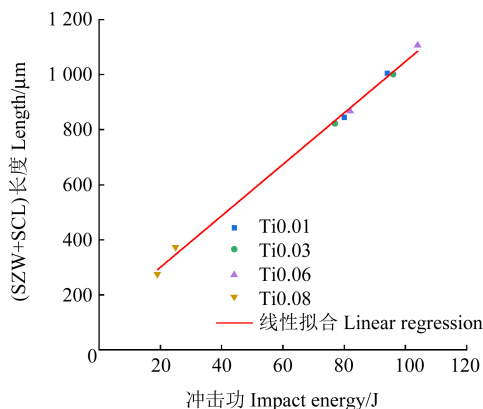


图 9 冲击功与 (SZW+SCL) 长度的关系

Fig. 9 Relation between the impact energy and (SZW+SCL) length

有明显变化,而 SCL 长度在 Ti 含量达到 0.08% 时急剧下降,说明 Ti 含量的增大对于起裂功而言并没有使其产生明显恶化,过量 Ti 的添加,则使裂纹扩展功产生急剧下降,因此导致冲击功急剧下降。结合图 3、图 4 的观察结果,中心粗晶区中板条贝氏体的产生是 Ti0.08 在显微组织上区别于其他试样的显著特征。其中,粗大的板条贝氏体致使解理面尺寸增加^[27-28],且板条贝氏体的韧性比粒状贝氏体与针状铁素体更差^[29]。TiN 第二相的析出同样会降低裂纹阻力,诱发微裂纹的萌生与扩展。TiN 和板条贝氏体的共同作用导致了扩展能的降低,进而降低了低温冲击韧性。

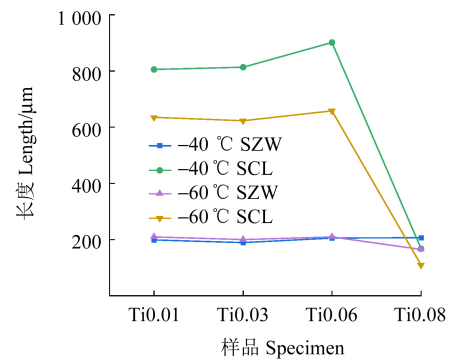


图 10 Ti 含量对 SZW 与 SCL 的影响
 Fig. 10 Effect of Ti content on SZW and SCL

3 结论

以 960 MPa 高强钢焊缝金属为研究对象,设计了 4 种不同 Ti 含量的焊缝金属,研究了 Ti 含量对 960 MPa 高强钢焊缝金属组织与力学性能的影响,主要结论如下:

1) 随着焊缝金属中 Ti 含量由 0.01% 增大至 0.08%,焊缝金属组织由粒状贝氏体逐渐转变为粒状贝氏体+针状铁素体;针状铁素体含量随 Ti 含量增加逐渐增加;夹杂物由 Si、Al、Mn、Ti 的复合夹杂物逐渐转变为 TiO₂。焊缝金属 Ti 含量为 0.08% 时,焊缝组织在再热晶区与柱状晶区之间出现新的等轴晶区,等轴晶区组织为粗大的板条贝氏体,同时析出了 TiN。

2) Ti 含量由 0.01% 增至 0.06% 时,由于 Ti 的氧化物为针状铁素体提供了形核位点,焊缝金属中针状铁素体占比显著提高,抗拉强度由 866 MPa 提升至 939 MPa,延伸率由 18.5% 增至 23.5%,相较 Ti0.01 提升了 27%, -40 °C 冲击功由 94 J 提升至 104 J,显著提升了综合力学性能。

3) Ti 含量增加到 0.08% 时,尽管抗拉强度持续升高至 998 MPa,但塑韧性急剧恶化,延伸率降低至 18.2%, -40 °C 冲击功降低至 25 J,延伸率与冲击功分别下降 22.6% 和 76.0%,原因在于粗大的板条贝氏体和 TiN 的形成显著降低了裂纹阻力。

参考文献(References)

- [1] 骆文泽,成慧梅,刘红艳,等. 高强钢Q960E对接接头残余应力与焊接变形的数值模拟[J]. 中国机械工程,2023,34(17):2095-2105.
LUO Wenze, CHENG Huimei, LIU Hongyan, et al. Numerical simulation of residual stress and welding deformation for high strength steel Q960E butt-welded joints [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(17):2095-2105. (In Chinese)
- [2] ZHU M L, JIN L, XUAN F Z. Fatigue life and mechanistic modeling of interior micro-defect induced cracking in high cycle and very high cycle regimes[J]. Acta Materialia, 2018, 157:259-275.
- [3] 赵阳,刘旭明,张楠,等. 准动态模型预估的Q960E大梁钢SR-CGHAZ疲劳裂纹扩展机理[J]. 焊接学报,2024,45(9):84-93.
ZHAO Yang, LIU Xuming, ZHANG Nan, et al. Fatigue crack extension mechanism of SR-CGHAZ in Q960E girder steel based on quasi-dynamic model prediction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(9):84-93. (In Chinese)
- [4] SUN L, ZHANG X C, WANG R Z, et al. Evaluation of fatigue and creep-fatigue damage levels on the basis of engineering damage mechanics approach [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 166:107277.
- [5] 张显程,王润梓,涂善东,等. 工程损伤理论:内涵、挑战与展望[J]. 机械工程学报,2023,59(16):2-17.
ZHANG Xiancheng, WANG Runzi, TU Shantung, et al. Engineering damage theory: connotation, challenge and prospect [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(16):2-17. (In Chinese)
- [6] GU H H, WANG R Z, TANG M J, et al. Creep-fatigue reliability assessment for high-temperature components fusing online monitoring data and physics-of-failure by engineering damage mechanics approach[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 169:107481.
- [7] GU H H, WANG R Z, ZHANG K, et al. System-level creep-fatigue reliability evaluation by engineering damage mechanics incorporating cumulative damage-damage threshold interference [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 176:107768.
- [8] LI K S, WANG R Z, ZHANG X C, et al. Process-performance-prediction integration for fatigue life improvement technologies: an implementation in cold expansion of hole structures [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 170:107507.
- [9] LI K S, WANG R Z, YUAN G J, et al. A crystal plasticity-based approach for creep-fatigue life prediction and damage evaluation in a nickel-based superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143:106031.
- [10] YUAN G J, ZHANG X C, CHEN B, et al. Low-cycle fatigue life prediction of a polycrystalline nickel-base superalloy using crystal plasticity modelling approach [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 38:28-38.
- [11] 李扬,刘汉武,杜云慧,等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J]. 材料导报,2011,25(13):101-104.
LI Yang, LIU Hanwu, DU Yunhui, et al. Applications and developments of AHSS in automobile industry [J]. Materials Review, 2011, 25(13):101-104. (In Chinese)
- [12] 袁耀,王金凤,蔡笑宇,等. Q960E超高强钢焊接接头组织和性能研究[J]. 精密成形工程,2023,15(5):97-104.
YUAN Yao, WANG Jinfeng, CAI Xiaoyu, et al. Microstructure and properties of welded joints of Q960E ultra-high strength steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5):97-104. (In Chinese)
- [13] 吴兴欢. 先进高强钢的焊接性研究现状与趋势[J]. 焊接技术, 2014,43(3):1-7.
WU Xinghuan. Research status and trends of weldability of advanced high strength steel[J]. Welding Technology, 2014, 43(3):1-7. (In Chinese)
- [14] 陶庭芳,王铮,虎雅雯,等. Q960高强钢辅热搅拌摩擦焊接头组织演变与韧性[J]. 材料工程,2025,53(8):110-117.
TAO Tingfang, WANG Zheng, HU Yawen, et al. Study on microstructure evolution and toughness of auxiliary heating friction stir welded joints for Q960 high-strength steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(8):110-117. (In Chinese)
- [15] 陈茂爱,武传松,王建国,等. 含Ti微合金钢中的第二相粒子对焊接粗晶热影响区组织及韧性的影响[J]. 焊接学报,2002,23(3):37-40.
CHEN Mao'ai, WU Chuansong, WANG Jianguo, et al. Effect of second phase particle on microstructure and toughness of CGHAZ in HSLA [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3):37-40. (In Chinese)
- [16] KANG Y, JANG J, PARK J H, et al. Influence of Ti on non-metallic inclusion formation and acicular ferrite nucleation in high-strength low-alloy steel weld metals [J]. Metals and Materials International, 2014, 20(1):119-127.
- [17] 阿荣,乔建设,李建萍,等. Ti对低合金高强钢大热输入焊缝夹杂物的影响[J]. 机械工程学报,2014,50(8):34-39.
A Rong, QIAO Jianshe, LI Jianping, et al. Effects of titanium on inclusion in high heat input welds of high strength low alloy steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8):34-39. (In Chinese)
- [18] SEO J S, KIM H J, LEE C. Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMA welds [J]. ISIJ International, 2013, 53(5):880-886.
- [19] 石明浩,段争涛,张朋彦,等. 夹杂物对Ti,Zr微合金钢中针状铁素体形成的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(10):1424-1427.
SHI Minghao, DUAN Zhengtao, ZHANG Pengyan, et al. Effect of inclusions on formation of acicular ferrite in Ti and Zr microalloying steel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(10):1424-1427. (In Chinese)
- [20] ILMAN M N, COCHRANE R C, EVANS G M. Effect of titanium and nitrogen on the transformation characteristics of acicular ferrite in reheated C-Mn steel weld metals [J]. Welding in the World, 2014, 58(1):1-10.
- [21] 焦继军,曹睿,李义民,等. 焊后热处理对Q690高强钢焊缝金属冲击韧性的影响[J]. 材料导报,2025,39(4):131-138.
JIAO Jijun, CAO Rui, LI Yimin, et al. Effect of post-welding heat treatment on impact toughness of Q690 high strength steel welded metal [J]. Materials Reports, 2025, 39(4):131-138. (In Chinese)
- [22] 李文清,马景平,曹睿,等. P91钢焊缝金属碳化物聚集程度的差异对焊缝金属冲击韧性的影响[J]. 材料导报,2024,38(20):202-208.
LI Wenqing, MA Jingping, CAO Rui, et al. Effect of different degree of carbide aggregation in P91 steel weld metal on the impact

- toughness of weld metal[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(20): 202-208. (In Chinese)
- [23] 宋峰雨,刘思远,张元祥. Ti、B 对 780 MPa 级焊缝金属组织相变的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(11): 173-178.
SONG Fengyu, LIU Siyuan, ZHANG Yuanxiang. Effect of Ti and B on microstructure transformation of 780 MPa grade weld metal [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(11): 173-178. (In Chinese)
- [24] 董万龙,曹睿,蒋勇,等. Cr-Mo-V 耐热钢焊条电弧焊焊缝金属低温冲击韧性研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(15): 146-150.
DONG Wanlong, CAO Rui, JIANG Yong, et al. Investigation on the low-temperature impact toughness of shielded metal arc welding weld metals in Cr-Mo-V heat-resistant steel [J]. *Materials Reports*, 2022, 36(15): 146-150. (In Chinese)
- [25] 杨跃标,李宗强,邓深,等. 热轧钛微合金化高强度钢低温冲击韧性的控制[J]. *钢铁*, 2021, 56(3): 41-50.
YANG Yuebiao, LI Zongqiang, DENG Shen, et al. Low temperature impact toughness controlling for Ti-microalloyed high strength steel[J]. *Iron & Steel*, 2021, 56(3): 41-50. (In Chinese)
- [26] 陈剑虹,曹睿. 焊缝金属解理断裂微观机理[J]. *金属学报*, 2017, 53(11): 1427-1444.
CHEN Jianhong, CAO Rui. Micromechanism of cleavage fracture of weld metals[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(11): 1427-1444. (In Chinese)
- [27] 李文清,曹睿,杨飞,等. 影响 P91 耐热钢焊缝金属冲击韧性的因素分析[J]. *材料导报*, 2024, 38(3): 147-151.
LI Wenqing, CAO Rui, YANG Fei, et al. Analysis of factors affecting the impact toughness of P91 heat-resistant steel weld metal[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(3): 147-151. (In Chinese)
- [28] 窦贵山,曹睿,蒋勇,等. 焊接热输入对耐热钢埋弧焊(SAW)焊缝金属冲击韧性的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(增刊 2): 334-338.
DOU Guishan, CAO Rui, JIANG Yong, et al. Effect of welding heat input on impact toughness of submerged arc welding (SAW) weld metal of heat-resistant steel [J]. *Materials Reports*, 2022, 36 (Suppl. 2): 334-338. (In Chinese)
- [29] 石俊亮,栗身保,郑为为. 贝氏体形态对细晶铁素体/贝氏体双相钢室温力学性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2020, 32(2): 166-174.
SHI Junliang, LI Shenbao, ZHENG Weiwei. Effect of bainite characteristics on room temperature mechanical properties of fine ferrite/bainite dual phase steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2020, 32(2): 166-174. (In Chinese)

Effect of Ti content on microstructure and mechanical properties of 960 MPa high strength steel weld metal

LIU Zishen¹ CAO Rui¹ JIAO Shishun¹ YANG Fei² ZHU Yuting² ZHANG Kejing² LIU Chuntao²

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Atlantic China Welding Consumables Co., Ltd., Zigong 643000, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive mechanical properties of 960 MPa high strength steel weld metal, the optimum content of Ti element in 960 MPa high strength steel weld metal was revealed. Firstly, four kinds of weld metals with different Ti contents (0.01%-0.08%) were designed and welded. The effects of Ti content on the microstructure and mechanical properties of welds were systematically studied by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, tensile and impact tests. The effect of Ti content on the initiation energy and propagation energy was evaluated by fracture observation and fracture morphology. The results show that when the Ti content is less than 0.06%, the microstructure of the weld metal changes from granular bainite to granular bainite + acicular ferrite. With the increase of Ti content, the content of acicular ferrite increases significantly. When the Ti content reaches 0.06%, the tensile strength reaches 939 MPa, the elongation reaches 23.5%, the elongation increases by 27% compared with Ti0.01, and the impact absorption energy at -40 °C reaches 104 J; when the Ti content increases to 0.08%, the formation of coarse lath bainite and the precipitation of TiN lead to a sharp decrease in plasticity and toughness, the elongation decreases to 18.2%, and the impact energy at -40 °C is only 25 J. Ti promotes the nucleation of acicular ferrite and improves the comprehensive mechanical properties by forming TiO₂ inclusions. However, excessive Ti will induce the precipitation of brittle phase and the formation of coarse lath bainite, which significantly deteriorates the plasticity and toughness.

Key words: 960 MPa high strength steel; Impact toughness; Ti content; Acicular ferrite; Weld metal

Corresponding author: CAO Rui, E-mail: caorui@lut.edu.cn

Fund: Gansu Province Key R&D Plan (23YFGA0057); Top Leading Talents Project of Gansu Province; Central Leading Local Science and Technology Development Special Project (24ZYQA054); National Natural Science Foundation of China (52175325, 51961024, 52071170); Major Scientific and Technological Project of Gansu (23ZDGA010, 22ZD6GA008)

Received: 2025-04-14