

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.09

热输入对800 MPa级高强钢焊丝熔敷金属组织与性能的影响

吕红英¹, 苏霄鹏¹, 刘健波², 郝庆乐^{1*}, 陈睿博¹, 钟素娟³, 龙伟民^{1,3}, 关常勇⁴

1. 中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波 315700

2. 宁波中机松兰刀具科技有限公司, 浙江 宁波 315700

3. 郑州机械研究所有限公司 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001

4. 山东索力得焊材股份有限公司, 山东 肥城 271600

摘要: 研制了一种800 MPa级高强钢实心焊丝, 采用熔化极活性气体保护电弧焊工艺, 系统研究了10 kJ/cm、13.7 kJ/cm、16.4 kJ/cm、22.1 kJ/cm四种热输入对熔敷金属组织与力学性能的影响。通过光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)等表征手段分析发现, 四种热输入条件下的熔敷金属组织均由粒状贝氏体、板条贝氏体、针状铁素体、侧板条铁素体及先共析铁素体组成。随着热输入的升高, 板条贝氏体含量逐渐减少, 针状铁素体含量先增加后减少, 侧板条铁素体、先共析铁素体和晶界铁素体依次析出并长大。力学性能测试表明, 熔敷金属的抗拉强度和屈服强度随热输入增加呈下降趋势, -40 °C冲击吸收功则呈先升高后降低的趋势。当热输入为13.7 kJ/cm时, 熔敷金属综合性能最佳, 抗拉强度达870 MPa, -40 °C冲击吸收功为62~104 J, 均值为84 J, 呈现优异的强韧性匹配。

关键词: 熔敷金属; 高强钢焊丝; 热输入; 微观组织; 低温冲击韧性

中图分类号: TG422.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0089-08

Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Deposited Metal of 800 MPa Grade High-Strength Steel Welding Wire

LV Hongying¹, SU Xiaopeng¹, LIU Jianbo², HAO Qingle^{1*}, CHEN Ruibo¹, ZHONG Sujuan³,

LONG Weimin^{1,3}, GUAN Changyong⁴

1. Ningbo Intelligent Machine Tool Research Institute Co., Ltd., of China National Machinery Institute Group, Ningbo 315700, China

2. Ningbo Songlan Cutting Machine Technology Co., Ltd., Ningbo 315700, China

3. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals & Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

4. Shandong Solide Welding Materials Co., Ltd., Feicheng 271600, China

Abstract: A solid welding wire of 800 MPa high-strength steel was developed, and the effects of four heat inputs of 10 kJ/cm, 13.7 kJ/cm, 16.4 kJ/cm, and 22.1 kJ/cm on the microstructure and mechanical properties of the deposited metal were systematically studied using the polar active gas protection arc welding process. Through characterization methods such as optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectrometer (EDS), it was found that the microstructure of the deposited metal under the four heat input conditions was composed of granular bainite, plate bainite, acicular ferrite, side plate ferrite, and pre-eutectoid ferrite. With the increase of heat input, the content of plate bainite gradually decreased, the content of acicular ferrite first increased and then decreased, and the side plate ferrite, pre-eutectoid ferrite, and grain boundary ferrite successively precipitated and grew. Mechanical property tests showed that the tensile strength and yield strength of the deposited metal decreased with the increase of heat input, while the impact absorp-

收稿日期: 2024-09-23 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 泰山产业领军人才工程战略性新兴产业创新类

作者简介: 吕红英(1992—), 女, 硕士, 主要从事焊接材料及工艺方面的研究。

通讯作者: 郝庆乐(1989—), 男, 博士, 主要从事先进焊接材料方面的研究。E-mail: hao_ql@126.com。

tion energy at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ first increased and then decreased. When the heat input was 13.7 kJ/cm , the comprehensive performance of the deposited metal was the best, with a tensile strength of 870 MPa , a impact absorption energy at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ of $62\text{--}104\text{ J}$, and an average value of 84 J , showing excellent strength and toughness matching.

Keywords: deposited metal; high-strength steel welding wire; heat input; microstructure; low temperature impact toughness

引用格式:吕红英,苏霄鹏,刘健波,等. 热输入对 800 MPa 级高强度焊丝熔敷金属组织与性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 89–96.

Citation: LV Hongying, SU Xiaopeng, LIU Jianbo, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Deposited Metal of 800 MPa Grade High-Strength Steel Welding Wire[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 89–96.

0 引言

随着工程机械装备向大型化、轻量化及重载荷方向发展,低合金高强度钢因高强度、高韧性、高承载及良好的焊接性而广泛应用在轻量化车体、大型船舶、能源、船舶等焊接结构件上。熔化极气体保护焊因其高效、高质量、低成本等优点,成为低合金高强度钢焊接的主流工艺之一。近年来,各行业对高强度钢的强韧性要求持续提升^[1–3],更高级别的钢材不断涌现,但随着钢材强度的提高,焊接接头的强韧性降低倾向及裂纹敏感性变大,因此亟需开发配套的高强度高韧性气体保护焊丝及优化焊接工艺。

熔敷金属作为焊缝的重要组成部分,其性能直接决定焊接接头的质量,而强度和韧性的平衡始终是该领域的关键难题。热输入作为焊接电流、焊接电压、焊接速度等参数的综合体现,对焊缝金属的凝固结晶、组织演化具有决定性影响,是调控焊缝性能的核心参数。吴炳智等人^[4]研发的 960 MPa 级高强度钢气体保护焊丝熔敷金属金相组织为粒状贝氏体(GB)+低碳马氏体(M),GB中可见明显的贝氏体铁素体板条(BF),以及板条间薄膜状的残余奥氏体;蒋勇等人^[5]研究发现,低碳贝氏体金属粉芯焊丝随热输入的增加,粒状贝氏体含量先增后减,晶粒粗化导致熔敷金属的强度和硬度呈现先增加后降低的趋势,而断后伸长率及低温冲击韧性持续降低;吴林恩等人^[6]针对 X80 级气保护药芯焊丝的研究表明,热输入增大使焊缝金属中针状铁素体、多边形铁素体及粒状贝氏体的晶粒均长大,低温冲击韧性呈先升后降趋势;冯伟等人^[7]研制的 $1\,000\text{ MPa}$ 级高强度埋弧焊丝则随焊接热输入提高,熔敷金属中针状铁素体含量不断减少,先共析铁素体含量提高,熔敷金属组织粗化,强韧性降低。

目前,针对 800 MPa 级低合金高强度焊丝在熔化极气保护焊中熔敷金属组织及性能变化规律的研究尚不充分,本文通过自主研发的新型高强度气体保护焊丝,系统探究不同热输入对熔敷金属微观组织、拉伸力学性能和低温冲击韧性的影响,确定最佳的焊接工艺参数,为 800 MPa 级高强度焊丝的应用与深入研究提供理论依据和技术参考。

1 焊丝设计与制备

1.1 焊丝成分设计

为使高强度钢气体保护焊丝同时满足高强度和高韧性的要求,设计焊丝成分时,主合金体系选择 Mn–Ni–Cr–Mo,并适当提高合金元素的总含量,以获得贝氏体或贝氏体–马氏体类型的组织。C 元素含量不宜过高,C 含量增加易使焊缝淬硬性提高,从而出现淬硬组织,最终导致低温韧性下降^[8–10],因此试制焊丝采用较低 C 含量,其范围控制在 $0.04\%\sim 0.1\%$ 之间;Cr、Ni 元素可促进针状铁素体的形成,提高熔敷金属的强韧性;Si、Mn 元素可控制熔敷金属中的 O 含量,同时 Mn 氧化物作为针状铁素体的形核点,可提高熔敷金属的韧性;Mo 元素可减少金属化合物在晶界处的偏聚,提高材料的塑韧性;严格控制 S、P 元素及其他杂质元素含量,减少熔敷金属中低熔点化合物,保证熔敷金属的高净化和抗裂性能^[11–14]。综上,设计焊丝的化学成分范围见表 1。

1.2 试验用焊丝选择

制备焊丝时,各成分合金元素调控配备后由真空冶炼制成一定规格的钢锭,钢锭经热轧工艺形成 $\varnothing 6\text{ mm}$ 的盘条,盘条经机械剥壳除锈、多道次拉拔减径,最终精绕成盘,成功制备出 4 种不同成分的气体保护焊丝,其成分如表 2 所示。

表 1 焊丝化学成分范围(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of welding wire (wt. %)				
C	Si	Mn	Cr	Ni
0.04~0.10	0.20~0.75	0.50~2.50	0.26~0.50	0.10~2.75
Mo	Cu	P	S	Ti
0.22~0.60	0.17~0.22	0.01~0.012	0.008~0.012	适量

表 2 焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of welding wire (wt. %)										
编号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ti
1#	0.08	0.63	1.72	0.45	1.62	0.52	0.20	0.010	0.008	适量
2#	0.08	0.57	1.67	0.39	2.05	0.42	0.18	0.011	0.008	适量
3#	0.08	0.62	1.72	0.32	0.54	0.35	0.17	0.012	0.008	适量
4#	0.08	0.65	1.75	0.42	0.81	0.28	0.15	0.010	0.005	适量

通过对以上 4 种不同成分焊丝进行熔敷金属力学性能测试,选择性能最佳的焊丝用于后续不同热输入的焊接研究。图 1 为 4 种焊丝熔敷金属的力学性能对比结果,1#、2#、4#焊丝熔敷金属屈服强度均大于 750 MPa,−40 °C 冲击吸收功大于 60 J,2#焊丝韧性最差;3#熔敷金属屈服强度为 740 MPa,强度偏低,但冲击吸收能量为 70 J。

综合强韧性指标,4#焊丝的熔敷金属性能最

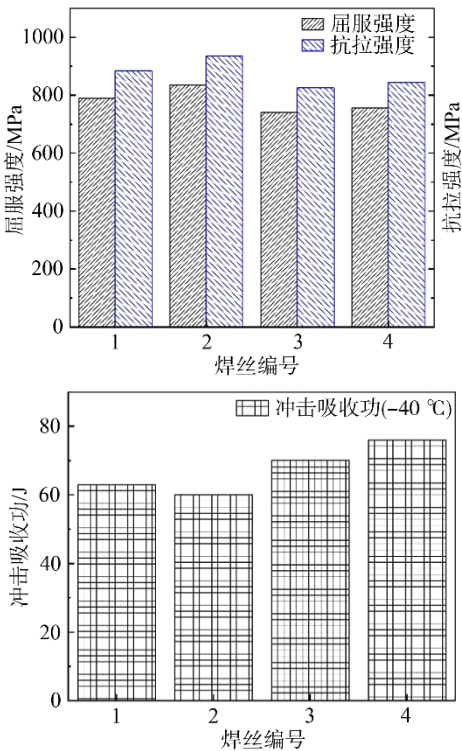


图 1 不同成分焊丝熔敷金属力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of deposited metal

佳,屈服强度为 750 MPa,−40 °C 冲击吸收功均值为 76 J。故选择 4#焊丝进行不同热输入条件下的焊接研究。

2 试验材料与方法

试验所用母材为调质态 Q690 高强钢板,尺寸为 350 mm×170 mm×20 mm,其化学成分如表 3 所示。焊接材料选用自主研发的 4#气保护实心焊丝,规格为 $\varnothing 1.2$ mm。

表 3 Q690 钢化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of Q690 steel (wt. %)									
C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	Cu	P	S
0.15	0.26	1.45	0.26	0.01	0.016	0.01	0.01	0.013	0.001

焊接热输入设为 10 kJ/cm、13.7 kJ/cm、16.4 kJ/cm、22.1 kJ/cm,具体工艺参数如表 4 所示。试板通过线切割加工成带垫板的 V 型坡口,垫板预先固定焊在试板背面。焊接方式为平焊位置多层多道焊,焊前对坡口两侧 30~50 mm 范围进行打磨,并用丙酮擦拭去除油污及杂质。焊接设备采用山东奥太 NBC-630 型气保护焊机,保护气体为 80%Ar+20%CO₂ 混合气体,气体流量为 18~20 L/min。

表 4 焊接工艺参数

Table 4 Welding parameters					
序号	热输入 /(kJ·cm ⁻¹)	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	道间温度 /°C
1	10	220	25	33	150
2	13.7	260	29	33	150
3	16.4	300	30	33	150
4	22.1	300	30	24.48	150

焊接完成后,依据 GB/T 25774.1—2023《焊接材料的检验 第 1 部分:钢、镍及镍合金熔敷金属力学性能试样的制备》制备拉伸试样与冲击试样,分别按 GB/T228—2010、GB/T229—2007 进行拉伸试验及−40 °C 低温冲击试验。

对拉伸后试样进行研磨抛光,并用 4% 硝酸酒精溶液进行金相腐蚀,采用舜宇 ICX41M 倒置金相显微镜观察熔敷金属显微组织;利用 ZEISS EVO 10 型扫描电子显微镜观察−40 °C 低温冲击试样断口微观形貌;利用 Avio200 型 ICP 发射光谱仪对试样进行化学成分分析测定。

3 试验结果与分析

3.1 熔敷金属微观组织分析

图2、图3分别为不同热输入条件下熔敷金属的金相组织及SEM微观形貌。由图2可知,在4种不同热输入下,熔敷金属的组织类型基本一致,均以贝氏体和铁素体为主要组成相,具体可细分为粒状贝氏体、板条贝氏体、针状铁素体、先共析铁素体、侧板条铁素体、晶界铁素体等。

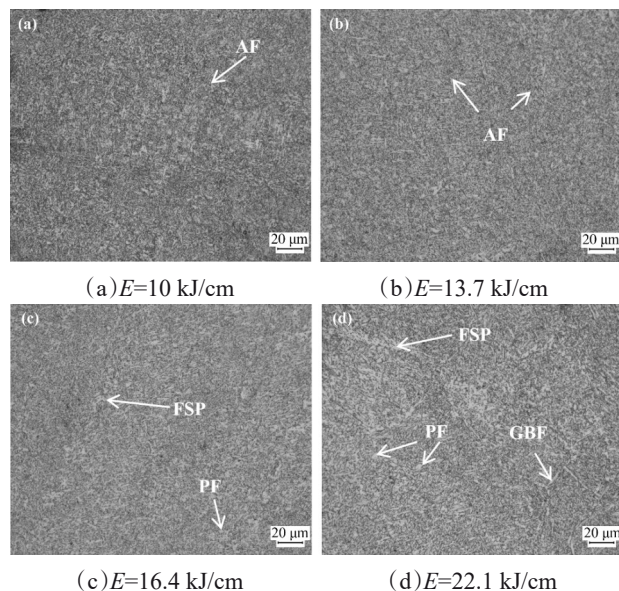


图2 不同热输入下熔敷金属金相组织

Fig. 2 Microstructure of deposited metal under different heat input

热输入 10 kJ/cm 的熔敷金属组织以粒状贝氏体为主,伴有一定量的板条贝氏体,且贝氏体板条方向性较强、呈平行态分布,同时存在少量的以十字交叉状分布的细小针状铁素体(见图2a)。这是由于热输入较小时,焊缝冷却速度较快,熔敷金属在高温停留时间短,原奥氏体中的碳元素来不及充分扩散聚集,使得奥氏体稳定性提高,进而在低温区发生较多相转变,生成尺寸细小的板条贝氏体,而在较高温区形核的针状铁素体数量相应变少。当热输入增至 13.7 kJ/cm 时,熔敷金属中板条贝氏体数量减少,针状铁素体数量增加,同时开始生成侧板条铁素体(见图2b)。热输入为 16.4 kJ/cm 时,熔敷金属组织中出现块状分布的先共析铁素体,且侧板条铁素体数量增加、尺寸变大并呈密集分布(见图2c)。当热输入达到 22.1 kJ/cm 时,熔敷金属晶粒

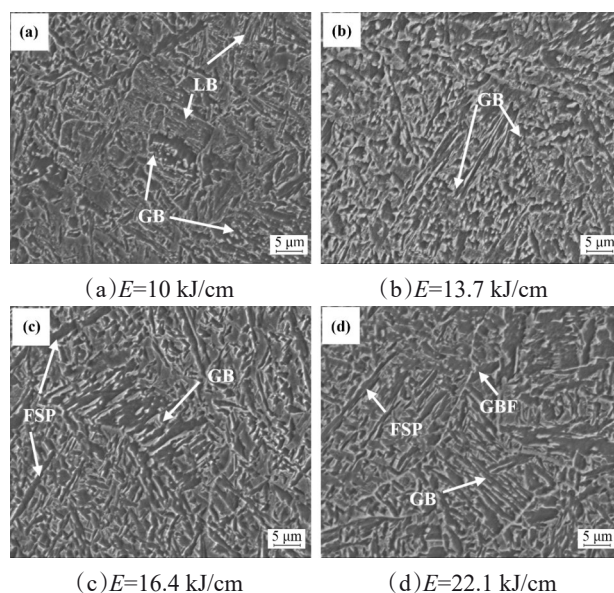


图3 不同热输入下熔敷金属SEM形貌

Fig. 3 SEM morphology of deposited metal under different heat input

明显粗化,晶界处析出粗大的晶界铁素体,未观察到特征明显的板条贝氏体,最终形成粒状贝氏体和铁素体的复相组织(见图3d)。总体而言,随着热输入的增加,焊缝冷却速度逐渐降低,冷却曲线右移,熔敷金属在高温停留时间逐渐变长,促使奥氏体在高温区发生较多相转变,因此,侧板条铁素体和先共析铁素体由于孕育期变短而相继析出并长大;针状铁素体的形核速度小于长大速度,故针状铁素体的形态由细小针状向长宽型转变^[15-16],数量呈现先增加后减少的趋势;所有晶粒均有不断长大的趋势,板条贝氏体数量不断减少。

3.2 熔敷金属力学性能分析

本研究试制的气保焊丝在不同热输入下的熔敷金属力学性能如图4所示。由图4可知,随着热输入的增大,熔敷金属的强度整体呈下降趋势:热输入为 10 kJ/cm 时强度最高,抗拉强度和屈服强度分别为 881 MPa 和 797 MPa;热输入为 22.1 kJ/cm 时,抗拉强度降至 844 MPa;热输入为 16.4 kJ/cm 时,屈服强度降至 755 MPa。熔敷金属的断后伸长率呈现先升高后降低的趋势,热输入为 13.7 kJ/cm 时,伸长率达到 18%;热输入为 22.1 kJ/cm 时,伸长率降至 13%。由此可知,热输入为 22.1 kJ/cm 时的熔敷金属拉伸力学性能最差,热输入为 13.7 kJ/cm 时的熔敷金属拉伸力学性能最佳。分析认为,当热输入较

小时,熔敷金属组织中板条贝氏体含量较多且尺寸较细小,由于板条贝氏体中存在大量的晶格畸变和高密度位错,恶化了变形时的位错滑移条件,故强度较高^[17-20];热输入增加后,低温区形成的板条贝氏体减少,粒状贝氏体和针状铁素体占比上升,由于粒状贝氏体中的铁素体基体较板条贝氏体中的铁素体更为粗大且位错密度低,导致由粒状贝氏体与软相铁素体组成的复相组织强度低于粒状贝氏体与板条贝氏体的复相组织,这是熔敷金属强度降低的主要原因,同时塑性因软相比比例增加而有所提升;热输入过高时,所有组织晶粒粗化,侧板条铁素体和先共析铁素体占比显著增加,针状铁素体减少且尺寸变宽,最终导致强度和塑性均下降。

此外,对比表 3 中焊丝化学成分发现,焊接过程中 Mn、Si、Ni 等合金元素均有不同程度的烧损(见表 5),合金元素的烧损在一定程度上会削弱钢的固

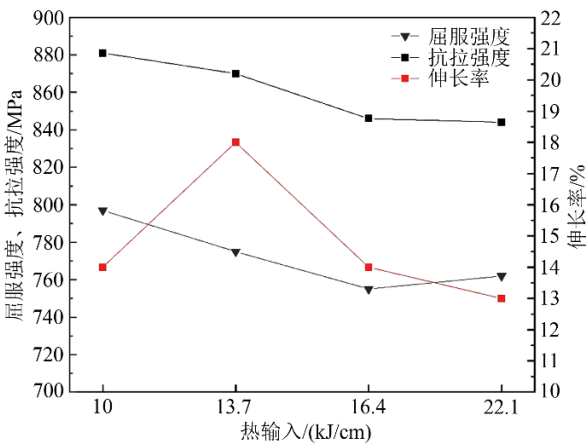


图 4 不同热输入下熔敷金属力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of deposited metal under different welding heat input

溶强化效果。其中热输入 13.7 kJ/cm 时的合金元素烧损程度较低,固溶强化效果更优,因此拉伸强度相对较高。

表 5 不同热输入下熔敷金属化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical composition of deposited metal under different heat input (wt. %)

热输入/(kJ·cm ⁻¹)	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cr	Ti	V	Cu
10	0.09	1.58	0.61	0.009	0.003	0.79	0.31	0.41	0.06	0.008	0.16
13.7	0.08	1.63	0.63	0.008	0.003	0.81	0.31	0.42	0.06	0.007	0.17
16.4	0.08	1.60	0.62	0.008	0.003	0.80	0.30	0.42	0.07	0.006	0.17
22.1	0.08	1.60	0.62	0.008	0.003	0.80	0.30	0.42	0.07	0.006	0.17

3.3 熔敷金属冲击韧性分析

不同热输入下熔敷金属的-40℃低温冲击吸收功如图 5 所示。由图 5 可知,熔敷金属-40℃冲击吸收功差别并不十分显著,整体呈先升高后降低的趋势,各热输入条件下的数值差异并不显著:热输入为 10 kJ/cm 时,熔敷金属冲击吸收功 83.6 J;热输入增至 13.7 kJ/cm 时,熔敷金属冲击吸收功达到最高值 84 J;热输入为 22.1 kJ/cm 时,熔敷金属冲击吸收功降至最低值 64 J。可见,过高的热输入对熔敷金属的冲击韧性不利。分析认为:热输入较低时,熔敷金属中板条贝氏体含量较多,而板条贝氏体中铁素体板条较细并呈小角度晶界,裂纹扩展时在小角度晶界处不易发生偏转,裂纹扩展路径较为平直,导致冲击韧性略低;随着热输入的增加,针状铁素体含量增加且分布密集,且之间常为大角度晶界,裂纹扩展路径曲折,加之针状铁素体组织交织排列的特点,冲击裂纹几乎无法沿针状铁素体晶界传播,而是以连续穿晶断裂形式向前推进,故韧性提

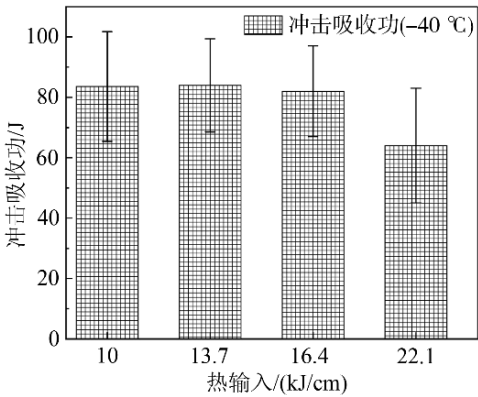


图 5 不同热输入下熔敷金属冲击吸收功

Fig. 5 Impact absorption energy of deposited metal under different heat input

高;当热输入过高时,冷速相对较慢,针状铁素体含量减少且长大速度加快,晶粒组织粗化,综合性能好的针状铁素体能够同时提高材料强度和韧性,其数量的减少和晶粒粗化使强韧性下降,此外,晶界铁素体、侧板条铁素体等脆性相的增加对低温韧性极其不利^[21-24],最终导致熔敷金属冲击韧性变差。

为探究熔敷金属低温冲击后的断裂行为,对不同热输入下熔敷金属 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击试样断口宏观形貌(见图6)及SEM微观形貌(见图7)进行观察。由图6试样断口宏观形貌可以看出,冲击试样断口由纤维区、放射区和剪切唇三个区域组成,四种热输入熔敷金属冲击断口均为穿晶断裂。

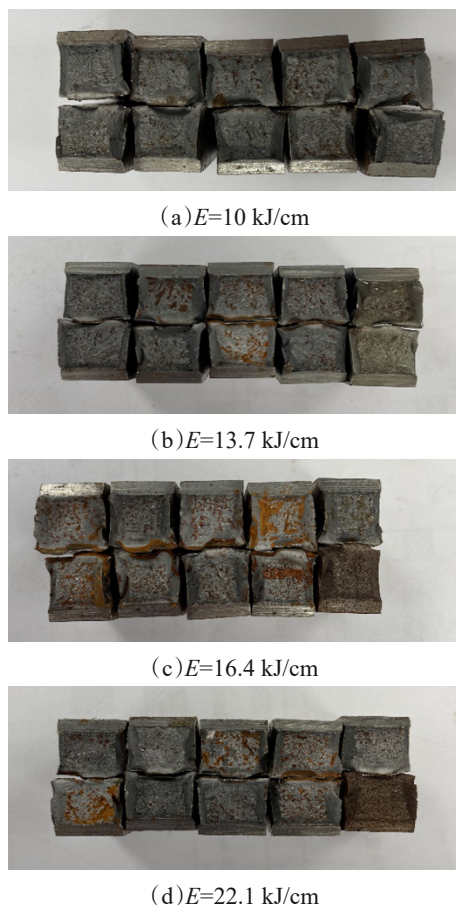


图6 熔敷金属冲击试样断口宏观形貌

Fig. 6 Fracture macroscopic morphology of impact test

由图7可知,热输入为 10 kJ/cm 时,断口处存在较大尺寸准解理断面台阶,有少量撕裂脊,纤维区韧窝较浅(见图7a、7b);热输入为 13.7 kJ/cm 时,断口处准解理断面上分布较多单元小刻面,准解理区周围还存在由韧窝组成的撕裂脊,纤维区韧窝数量多且深度较深,呈撕裂态(见图7c、7d),为韧窝聚集提供条件,有利于冲击韧性的提高;随着热输入继续增加,准解理断面的撕裂脊消失,断面逐渐平整,准解理区周围的韧窝减少,纤维区韧窝形似抛物线状,韧窝尺寸变大但深度变浅(见图7e~7h),最终导致冲击韧性变差。

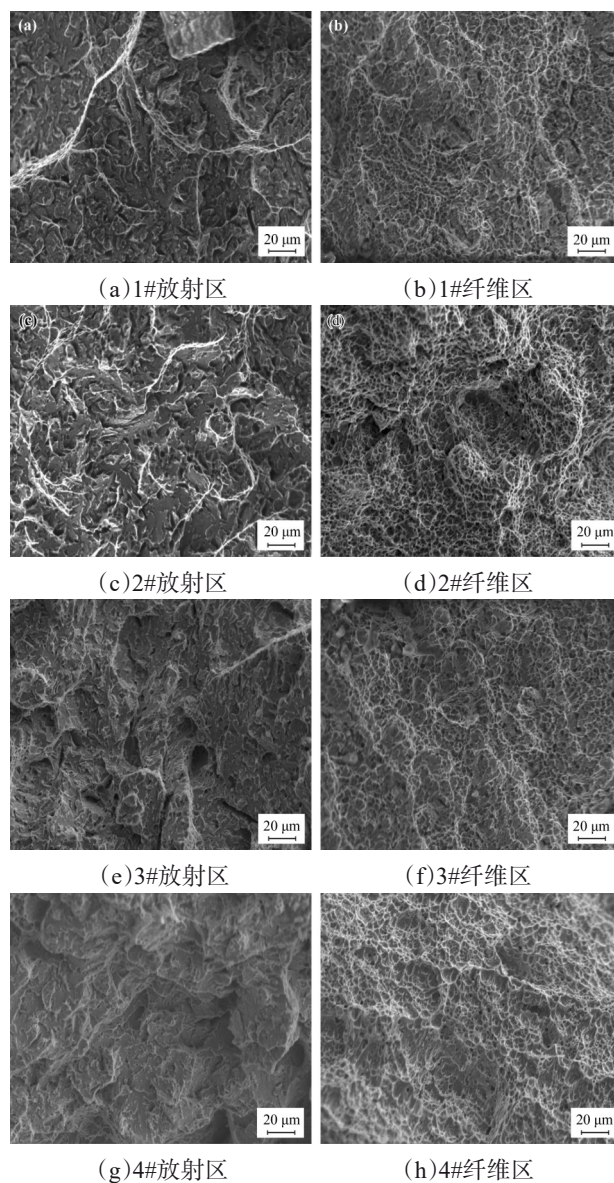


图7 熔敷金属冲击试样断口SEM微观形貌

Fig. 7 SEM morphology of fracture of impact sample of deposited metal

为评判熔敷金属综合力学性能,绘制不同热输入下熔敷金属强韧性关系,如图8所示。由图8可知,自制 $\varnothing 1.2\text{ mm}$ 焊丝在热输入为 13.7 kJ/cm 时强韧性最佳,综合力学性能最好,此时熔敷金属抗拉强度为 870 MPa , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功为 $62\sim 104\text{ J}$,均值 84 J 。

4 结论

本文通过设计与制备低合金高强钢焊丝成分,

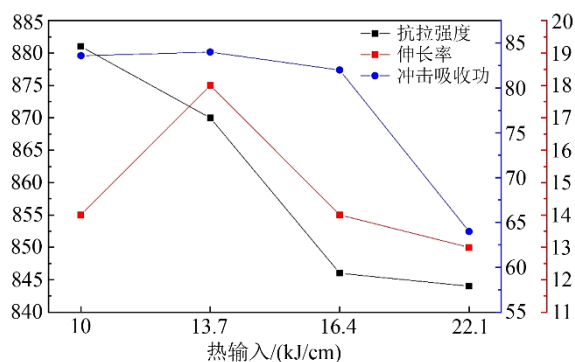


图8 不同热输入下熔敷金属强韧性关系

Fig. 8 Relationship of strength-toughness of deposited metal under different welding heat input

对比不同焊丝熔敷金属的综合力学性能,优选出一种强韧性较优的焊丝,并在10 kJ/cm、13.7 kJ/cm、16.4 kJ/cm、22.1 kJ/cm四种热输入条件下进行熔化极活性气体保护电弧焊,研究了热输入对熔敷金属组织与力学性能的影响,分析了其组织转变、强韧性变化趋势及机理,得出以下结论:

(1)研制了一种Mn-Ni-Cr-Mo主合金体系的高强钢焊丝,其中最佳强韧性焊丝焊态熔敷金属抗拉强度为845 MPa,屈服强度755 MPa, -40℃冲击吸收功为76 J,可用于800 MPa级以上高强钢的焊接。

(2)当热输入由10 kJ/cm提高至22.1 kJ/cm时,熔敷金属的强度呈下降趋势,抗拉强度从881 MPa降至844 MPa,屈服强度从797 MPa降至755 MPa;伸长率和-40℃冲击吸收功则呈先升高后降低的趋势;在热输入为13.7 kJ/cm时,熔敷金属的强韧性达到最高,抗拉强度为870 MPa, -40℃冲击吸收功62~104 J,均值为84 J。

(3)在四种焊接热输入条件下,熔敷金属组织主要由粒状贝氏体、板条贝氏体、针状铁素体、先共析铁素体和侧板条铁素体组成。随着热输入的提高,熔敷金属组织晶粒有长大趋势,伴随板条贝氏体含量的不断减少,先共析铁素体、侧板条铁素体和晶界铁素体相继出现并长大,针状铁素体含量先增加后减少。

参考文献:

- [1] 彭云,宋亮,赵琳,等. 先进钢铁材料焊接性研究进展[J]. 金属学报,2020,56(4):601-618.
PENG Y, SONG L, ZHAO L, et al. Research progress on weld ability of advanced steel materials [J]. Acta Metallurgica Sinica,2020,56(4):601-618.
- [2] 吴炳智. 高强钢气体保护焊丝熔敷金属强韧化研究[D]. 北京:机械科学研究总院,2014.
WU B Z. Investigation on Strengthening and Toughening Factors of Deposited Metals in HSLA welds [D]. Beijing: Acad-emy of Machinery Science and Technology,2014.
- [3] 何实,储继君,齐万利. 中国焊接材料的发展现状与未来趋势[J]. 焊接,2015(12):1-5.
HE S, CHU J J, QI W L. The Development Status and Future Trends of Welding Materials in China [J]. Welding&Joining,2015(12):1-5.
- [4] 吴炳智,荆文,徐玉君,等. 960 MPa级熔敷金属组织及冲击韧性分析[J]. 焊接学报,2015,36(6):77-81.
WU B Z, JING W, XU Y J, et al. Analysis of microstructure and impact toughness of 960 MPa grade deposited metal [J]. Transactions of the China Welding Institution,2015,36(6):77-81.
- [5] 蒋勇,郭栖利,梁晨,等. 焊接热输入对低碳贝氏体金属粉芯焊丝(CHT120CK4)熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 电焊机,2021,51(6):32-41.
JIANG Y, GUO X L, LIANG C, et al. Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of deposited metal of low-carbon bainite metal powder type of flux-cored wire (CHT120CK4) [J]. Electric Welding Machine,2021,51(06):32-40+113.
- [6] 吴林恩,刘宇,夏培培,等. 热输入对X80级气保护药芯焊丝焊缝金属组织性能的影响[J]. 电焊机,2023,53(10):90-97.
WU L E, LIU Y, XIA P P, et al. Effect of heat input on the microstructure and properties of X80 grade gas shielded flux cored wire weld metal [J]. Electric Welding Machine,2023,53(10):90-97.
- [7] 冯伟,于庭祥,徐锴,等. 1000 MPa级高强钢埋弧焊熔敷金属组织及性能[J]. 焊接,2023(11):6-12.
FENG W, YU T X, XU K, et al. Microstructure and properties of metal deposited by submerged arc welding of 1000MPa high strength steel [J]. Welding&Joining, 2023(11):6-12.
- [8] TUMA J, GUBELJAK N, SUSTARSIC B. Fracture toughness of a high-strength low-alloy steel weldment [J]. Materiali in Tehnologije,2006,40(6):263-268.
- [9] 薛磊. 高强焊材成分优化及熔敷金属组织性能与强化机理研究[D]. 江苏:江苏科技大学,2023.
XUE L. Study on Composition Optimization of High strength Welding Materials and Microstructure, Properties and strengthening Mechanism of deposited Metal

- [D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [10] 刘政军, 裘荣鹏, 武丹, 等. 960 MPa 高强钢金属粉芯型药芯焊丝焊缝金属韧化机理[J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 102-106.
- LIU Z J, QIU R P, WU D, et al. The toughening mechanism of weld metal in 960MPa high-strength steel metal powder type of flux-cored wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 102-106.
- [11] 官春平. Ni 对 600 MPa 级高强钢焊缝组织和性能的影响[J]. 电焊机, 2017, 47(11): 120-124.
- GUAN C P. Effect of Ni on microstructure and properties of welds in 600MPa grade high strength steel[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(11): 120-124.
- [12] 武丹. 合金元素对 Q960 钢焊缝金属强韧化作用机理研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2019.
- WU D. Study on strengthening and toughening mechanism of alloy elements on weld metal of Q960 steel[D]. Lingning: Shenyang University of Technology, 2019.
- [13] Evans G M. Effect of manganese on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits[J]. Welding Journal, 1980, 59(3): 67-75.
- [14] 杨恒闯, 蔡俊, 汪涛, 等. Ti 含量对熔敷金属力学性能及焊缝中心显微组织的影响[J]. 焊接技术, 2021, 50(09): 124-126.
- YANG H C, CAI J, WANG T, et al. Influence of Ti content on mechanical properties of deposited metal and the microstructure of the weld center[J]. Welding Technology, 2021, 50(09): 124-126.
- [15] JIANG Q L, Li Y J, Wang J, et al. Effects of inclusions on formation of acicular ferrite and propagation of crack in high strength low alloy steel weld metal[J]. Materials Science and Technology, 2011, 27(10): 1565-1569.
- [16] 张德勤, 雷毅, 刘志义. 微合金钢焊缝金属中的针状铁素体[J]. 石油大学学报, 2003, 27(4): 141-145.
- ZHANG D Q, LEI Y, LIU Z Y. Acicular ferrite in the weld metal of microalloy steel[J]. Journal of Petroleum University, 2003, 27(4): 141-145.
- [17] 曾道平, 安同邦, 郑韶先, 等. 热输入对船用 440MPa 级低合金高强度钢焊缝组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2023, 44(8): 74-82.
- ZENG D P, AN T B, ZHENG S X, et al. Effect of heat input on microstructure and properties of welds of 440MPa grade high-strength low-alloy steel for marine use[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(8): 74-82.
- [18] 栗卓新, 苏小虎, 李红, 等. 690 MPa 级以上高强钢焊接熔敷金属微观组织及其联合贝氏体的研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(12): 1169-1176.
- LI Z X, SU X H, LI H, et al. Research progress on microstructure and coalesced bainite of welded deposited metal to high-strength steel with tensile strength above 690MPa[J]. Materials China, 2019, 38(12): 1169-1176.
- [19] 刘宗昌, 任慧平. 贝氏体与贝氏体相变[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [20] 张天理, 武雯, 于航, 等. 合金元素对高强钢焊缝金属贝氏体形成及力学性能影响的研究进展[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14): 1743-1756.
- ZHANG T L, WU W, YU H, et al. Research progresses on influences of alloying elements on formation of bainite and mechanical properties for high-strength steel weld metals[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(14): 1743-1756.
- [21] 杨宇龙, 贾潇, 朱伏先, 等. 大线能量焊接用钢粗晶热影响区针状铁素体形成过程控制技术的进展[J]. 材料导报, 2022, 36(5): 145-155.
- YANG Y L, JIA X, ZHU F X, et al. Research progress on control technology of acicular ferrite in CGHAZ for large heat-input welding steels[J]. Materials Reports, 2022, 36(5): 145-155.
- [22] 张天理. 800MPa 级高强钢金属粉芯焊丝熔敷金属复相分割微观组织及强韧化研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- ZHANG T L. Study on interlaced multiphase microstructure and strengthening and toughening mechanism of deposited metals of metal powder-cored wires for 800MPa grade high strength steels[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [23] 曹志龙, 朱浩, 安同邦, 等. 1000MPa 级高强钢熔敷金属强韧化机理分析[J]. 焊接学报, 2023, 44(7): 116-122.
- CAO Z L, ZHU H, AN T B, et al. Analysis of strengthening and toughening mechanism of metal deposited for 1000MPa high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(7): 116-122.
- [24] 邹宗园, 韩舒婷, 李银潇, 等. 大线能量焊接用钢 CGHAZ 冲击韧性内在机理分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(01): 18-24.
- ZOU Z Y, HAN S T, LI Y X, et al. Analysis of internal mechanism of impact toughness of CGHAZ for high heat input welding steels[J]. China Metallurgy, 2019, 29(01): 18-24.