

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.06

P700L/SAPH440-B 异种高强钢焊接接头组织与性能分析

章 哲, 张 明, 张朋彦*

安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243032

摘 要: 异种钢由于化学成分、力学性能等方面的差异, 焊接接头容易出现各种质量问题。本研究以 P700L/SAPH440-B 异种高强钢为对象, 使用 ER69-G 焊丝及二氧化碳保护焊进行焊接, 在焊接线能量为 7 kJ/cm 的条件下得到的焊接接头力学性能优良。使用光学显微镜(OM)观察分析焊缝及两侧热影响区金相组织形貌, 对焊缝中诱导针状铁素体的夹杂物采用扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)进行观察分析, 使用冲击试验机、万能试验机、维氏硬度仪检测焊接接头力学性能。试验结果得出, 焊缝区域显微组织为针状铁素体和贝氏体, 其中针状铁素体占据大部分面积; SAPH440-B 侧热影响区和 P700L 侧热影响区显微组织主要为粒状贝氏体和板条贝氏体, P700L 侧热影响区的粒状贝氏体组织更加粗大; 焊缝中诱导针状铁素体形核的夹杂物主要是 Ti、Al、Si 的氧化物, 夹杂物周围产生了一定的贫 Mn 区; 焊接接头平均抗拉强度为 536 MPa 高于两种钢材抗拉强度的平均值 517 MPa; 焊接接头两侧热影响区存在软化现象, P700L 侧热影响区软化现象十分明显且是整个焊接接头硬度值的最低点; 焊接接头的特征区域中, P700L 侧热影响区平均冲击能量最高, 达到 88 J, 整个焊接接头特征区域的冲击功在母材 70% 以上, 冲击韧性良好; 焊接接头面弯与背弯均未出现裂纹。

关键词: 高强度大梁钢; CO₂ 气体保护焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0064-09

Microstructure and Properties Analysis of Welded Joint of P700L/SAPH440-B Dissimilar High Strength Steel

ZHANG Zhe, ZHANG Ming, ZHANG Pengyan*

School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China

Abstract: In this experiment, P700L/SAPH440-B dissimilar high-strength steel was used for welding with ER69-G wire and carbon dioxide-shielded welding. Under the condition of welding line energy of 7 kJ/cm, the welded joint has excellent mechanical properties. An optical microscope (OM) was used to observe and analyze the microstructure of the weld and heat-affected zone (HAZ) on both sides, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were used to observe and analyze the inclusion of acicular ferrite induced in weld, and impact testing machine, universal testing machine and Vickers hardness tester were used to detect the mechanical properties of welded joints. It is concluded that the microstructure of the weld area is acicular ferrite and bainite, in which acicular ferrite occupies most of the area. The microstructure of the HAZ on the SAPH440-B side and P700L side is mainly granular bainite and lath bainite, while the granular bainite on the P700L side is more coarse. The inclusions inducing acicular ferrite nuclei in the weld are mainly oxides of Ti, Al, and Si, and a certain Mn-poor zone is generated around the inclusions. The average tensile strength of the welded joint is 536 MPa, which is higher than the average tensile strength of the two kinds of steel 517 MPa. There is a softening phenomenon in the HAZ on both sides of the welded joint, and the softening phenomenon in the HAZ on the P700L side is very ob-

收稿日期: 2024-07-07 修回日期: 2025-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(52274375); 安徽省重点研发计划(202104a05020020)

作者简介: 章 哲(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属材料焊接的相关研究。

通讯作者: 张朋彦, 博士, 副教授, 主要从事钢材焊接性能与工艺的研究。E-mail: zpy5102@163.com。

vious and is the lowest hardness value of the whole welded joint. In the characteristic region of the welded joint, the average impact energy of the HAZ on the P700L side is the highest, reaching 88J. The average impact energy of the whole characteristic region of the welded joint is more than 70% of the base material, and the impact toughness is good. There were no cracks in the surface bend and back bend of the welded joint.

Keywords: high strength large beam steel; CO₂ gas shielded welding; microstructure; mechanical property

引用格式:章哲,张明,张朋彦. P700L/SAPH440-B 异种高强钢焊接接头组织与性能分析[J]. 电焊机, 2025, 55(7): 64-72.

Citation: ZHANG Zhe, ZHANG Ming, ZHANG Pengyan. Microstructure and Properties Analysis of Welded Joint of P700L/SAPH440-B Dissimilar High Strength Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 64-72.

0 引言

汽车产业对国民经济和社会发展至关重要,但随着汽车的普及,环境污染、能源消耗和安全挑战等问题也随之而来。在这种背景下,高强钢材成为一种有效的解决方案,因为其能在不降低安全性的同时减轻车辆重量,进而减少燃料消耗,提升汽车的整体效能^[1-3]。热轧高强钢 P700L 是一种低合金高强钢,适用于汽车大梁、桥梁、船舶等方面。其通过加入 V、Ti 等合金元素并采用适当的控轧控冷技术使晶粒细化,提高钢材强度^[4]。其抗拉强度与屈服强度超过 700 MPa,因此,在极端的压力下,该钢也不易发生永久变形,在车辆发生撞击时也能够吸收分散冲击力,保护驾驶员生命安全。SAPH440 热轧酸洗钢最初源于日本,主要运用于汽车横梁、纵梁等^[5]。其抗拉强度达到 440 MPa 且具有良好的强度、成形性能和合格的表面质量^[5]。

焊接是汽车制造过程中的最后一环是将汽车零件加工组装的理想手段,因此焊接技术的好坏直接影响到汽车产品的质量^[6]。由于实际生产情况和工作条件的限制,异种材料焊接由于其可使材料性能得到最大程度的利用且可以减少成本等优点被汽车产业广泛运用^[7]。但是异种钢由于化学成分、力学性能等方面存在差异,焊接接头容易出现较多的质量问题,包括焊缝成形不良、表面裂纹等^[8]。因此在异种钢焊接作业中,需要根据被焊接金属选择合适的焊材和工艺参数,从而确保焊接后的性能达到预期标准,延长焊接结构的寿命。

近年来,有不少对于异种钢焊接接头的显微组织和力学性能的研究,Cui^[9]等通过研究 DP980 和高强度低合金钢的激光焊接头,发现拉伸断裂均发生于高强度低合金钢一侧且焊接缺陷对 DP980 疲劳

强度影响小。孙海波^[10]研究了不同热输入下的 DP600 和 DP980 异种高强钢激光焊接接头组织和力学性能,发现随着热输入的增加,熔合区和焊缝中间晶粒的尺寸先减小后增加,并且焊接接头力学性能先增强后下降。王金凤^[11]等在研究焊接速度对 DP980 和 22MnB5 异种钢焊接接头的影响中发现,当焊接速度越高,焊接热影响区宽度越小,焊缝表面形貌得到改善。

P700L 与 SAPH440-B 两种钢材的力学性能存在较大差异,目前对 P700L 和 SAPH440-B 的焊接组织和力学性能的研究较少,因此本文按汽车厂商的焊接要求结合实际情况,采用 CO₂ 气体保护焊对 P700L 钢和 SAPH440-B 钢进行焊接。通过研究焊接接头显微组织和力学性能,检验其焊接性能和可行性,并为 P700L/SAPH440-B 异种钢 CO₂ 气体保护焊的实际生产提供数据参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本次试验母材为 185 mm×100 mm×6 mm 的 P700L 热轧高强钢和 SAPH440-B 汽车结构钢,焊材选用直径为 1.0 mm 的 MG69 焊丝,国际型号为 ER69-G,采用华远 NB-350IGBTPro 逆变式气体保护焊机进行焊接,母材及焊材的化学成分如表 1、表 2 所示,力学性能如表 3、表 4 所示。

1.2 试验方法

使用锯床将两种母材冷加工制成焊接试板,尺寸为 185 mm×100 mm×6 mm,单面 V 形坡口,坡口角度为 30°,根部间隙 1~1.5 mm,无钝边,焊接前清洁试板表面脏污,由于试板较薄,焊前不预热,其焊接示意图如图 1 所示,工艺参数见表 5。

表1 母材化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal (wt. %)

母材	C	Si	Mn	P	S	V	Cr	Cu	Ti	Als
P700L	0.07	0.08	1.47	0.015	0.003			适量		0.033
SAPH440-B	0.08	0.04	1.37	0.015	0.003					0.026

表2 MG69焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of welding materials (wt. %)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cu	Ti
≤0.12	1.25~2.00	0.40~0.80	≤0.025	≤0.025	0.50~1.00	0.20~0.50	≤0.35	≤0.20

表3 母材的力学性能

Table 3 Mechanical properties of base metal

母材	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	冲击功/J
P700L	706	779	21	50.28
SAPH440-B	328	473	39.5	92.78

表4 MG69焊丝的力学性能

Table 4 Mechanical properties of welding wire

$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%
≥610	≥690	≥16

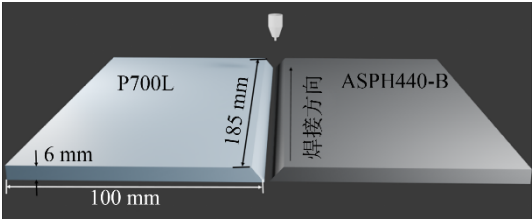


图1 焊接示意

Fig. 1 Welding diagram

表5 焊接工艺参数

Table 5 Welding process parameters

道次	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	焊接热输入 /(kJ·cm ⁻¹)
1	90	20	203	5.32
2	105	20	166	7.59
3(背面)	110	20	201	6.56

焊接结束后以焊缝为中心,沿着垂直于焊缝的方向切割横截面并确保其包含焊缝金属、两侧热影响区和两侧母材,制取一个30 mm×10 mm×6 mm的金相试样,采用砂纸、抛光机打磨至光滑后,用4%硝酸酒精溶液腐蚀6 s左右并用清水与无水乙醇先后清洗吹干,制备完成后立即用光学显微镜对焊接接头特征区域的显微组织进行观察;用TESCAN MIRA 3XMU扫描电子显微镜及能谱仪对焊缝区域进行观察和夹杂物的元素分析;根据国标 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》并采用线切

割加工出2个标准的拉伸试样在WDW-100G微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验,如图2所示,拉伸速率为5 mm/min;使用HV-1000维氏硬度仪对硬度试样(同金相试样)进行硬度测试,测试载荷为0.2 kg,持续时间10 s,以焊缝为中心向两侧母材方向每隔0.3 mm设置一个测试点,如图3所示,这样布局有助于全面评估焊接接头的力学性能;根据国标 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》将焊接接头以及两种母材各加工成3组5 mm×10 mm×55 mm的夏比V形缺口试样,焊接接头的V形缺口开在两侧HAZ和焊缝位置,在JBS-C数显式自动冲击试验机上进行0℃冲击试验。

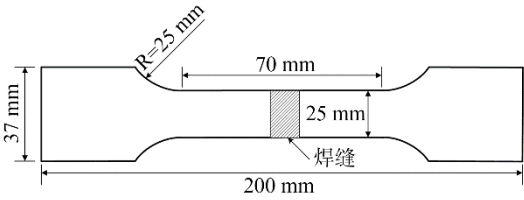


图2 焊接接头拉伸试样示意

Fig. 2 Schematic diagram of welded joint tensile specimen

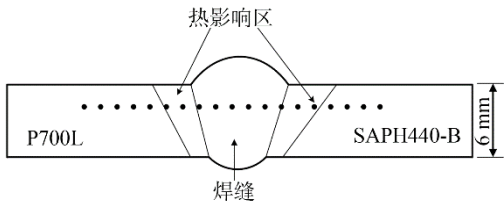


图3 焊接接头硬度测试点示意

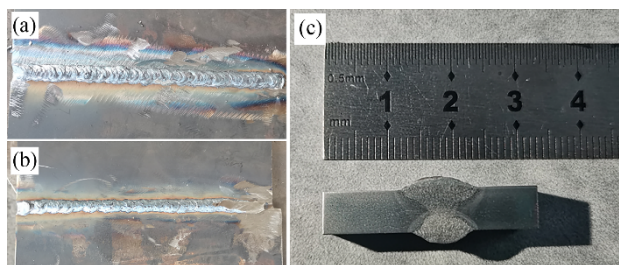
Fig. 3 Schematic diagram of hardness test points of welded joints

2 结果与讨论

2.1 焊接接头宏观形貌分析

图4为P700L/SAPH440-B异种钢CO₂气体保护焊的焊缝表面的宏观图片和焊接接头横截面的

宏观形貌。由图4a、4b可以看出,焊缝成形良好,无明显的咬边、焊瘤、弧坑、焊接变形等外观成形性缺陷,呈鱼鳞纹均匀分布,具有明显的金属光泽。图4c可以看出焊缝无气孔、夹渣、裂纹等明显瑕疵,焊缝的熔深适中,整个接头无明显形变。焊缝中热影响区最大宽度达到3.6 mm,焊缝中明显存在树枝晶垂直于熔合线,由于受到多道次的的影响,热影响区宽度和前两组的规律相同,呈现出上窄下宽分布。



(a)上表面;(b)下表面;(c)横截面

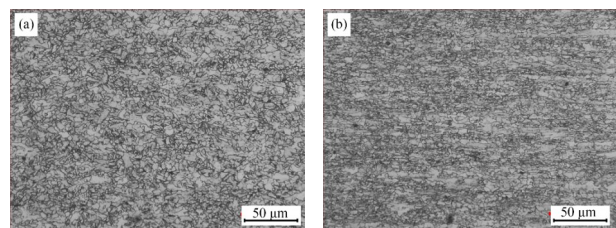
图4 焊接接头宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of welded joint

2.2 焊接接头显微组织分析

2.2.1 母材的显微组织

P700L和SAPH440-B母材的显微组织如图5所示。SAPH440-B母材的显微组织主要由铁素体+珠光体组成,珠光体是由铁素体和渗碳体交替排列成层片状结构,增强了母材的强度^[13]。P700L母材的显微组织主要由铁素体+贝氏体组成,其中还包含了一些碳化物作为强化相分布在基体上,起到阻碍位错的作用,使母材组织具有较高的强度。



(a)SAPH440-B

(b)P700L

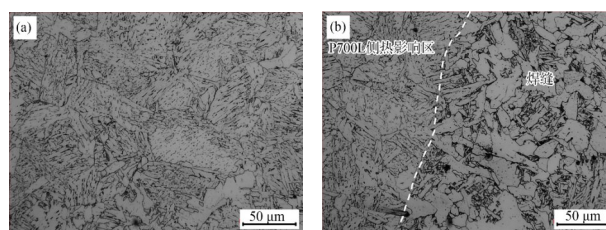
图5 母材显微组织

Fig. 5 Microstructure of base material

2.2.2 焊接接头特征区域的显微组织

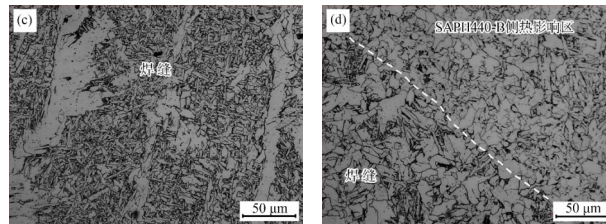
P700L/SAPH440-B异种钢焊接接头特征区域的显微组织如图6所示,可以看出焊缝组织中针状铁素体占据了大部分面积,并且存在大块的贝氏体析出。焊缝区域在焊接时经过高温加热到Ac3线以上,铁素体和珠光体逐渐奥氏体化,在焊缝区域凝

固时,先共析铁素体首先在奥氏体晶界贫C处析出,当铁素体长大焊缝中的C元素聚集在一起,形成富碳区域,冷却后构成贝氏体^[13]。由图6c可知,焊缝中存在大量针状铁素体,针状铁素体之间互相呈大角度交错互锁、放射状生长。这种密集的针状铁素体细化了焊缝组织的晶粒,当裂纹经过焊缝时针状铁素体可以有效消耗裂纹的能量,有效阻止裂纹扩展的通路,对提高焊缝金属的力学性能十分明显^[14]。针状铁素体和贝氏体在光学显微镜下形貌相似,但针状铁素体的形核大多是在奥氏体内的夹杂物上进行的,不仅如此,先形核的针状铁素体板条上还可激发针状铁素体的形核,并且晶内形核的针状铁素体在冷却过程中的形核相变竞争时可以抑制在奥氏体晶界形核的贝氏体铁素体^[15-16]。研究指出,焊缝中针状铁素体的形核温度和熔池的化学成分和焊缝的冷却速度有关,一般在600~690℃,略高于贝氏体的形核温度,进一步证明了在焊缝中,针状铁素体会优先形核抑制晶界处贝氏体的形核^[17]。P700L侧热影响区组织主要由粗大的粒状贝氏体、板条贝氏体和晶界铁素体组成。粗大的晶粒



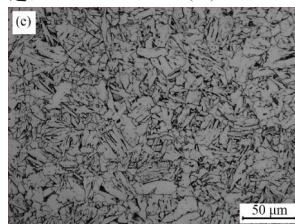
(a)P700L侧热影响区

(b)P700L侧熔合区



(c)焊缝区

(d)SAPH440-B侧熔合区



(e)SAPH440-B侧热影响区

图6 焊接接头显微组织

Fig. 6 Microstructure of welded joint

组织导致热影响区的强韧性下降,热循环条件相同时,粗晶区的韧性下降到母材的约 $1/3$ ^[18]。P700L 侧熔合区可以观察到分解明显的熔合线,熔合线将粗晶区和焊缝分离,由粗大的柱状晶和块状铁素体穿插于熔合线上,其附近的块状铁素体和粒状贝氏体粗大,而针状铁素体和板条铁素体细小,整个区域的晶粒尺寸差距明显,分布不均匀,物理和化学性质不稳定,是焊接接头的薄弱环节。SAPH440-B 侧热影响区组织和由大量长条状晶界铁素体和少量板条贝氏体、粒状贝氏体组成,晶界间伴随明显析出的碳化物。其晶粒粗化程度明显低于 P700L 侧热影响区组织,可以推断其力学性能也较强。

2.2.3 焊缝夹杂物分析

焊缝中的针状铁素对焊缝金属的韧性十分有利,研究表明^[19]针状铁素体在焊缝中的含量大于 65%、半径约为 $1\ \mu\text{m}$ 时,焊缝金属的性能可达到最理想的程度,因此研究针状铁素体的形成条件是十分必要的。为了进一步研究焊缝区域的针状铁素

体形成条件。利用 SEM 观察和能谱分析对焊缝中诱导针状铁素体形核的夹杂物进行研究。图 7 为焊缝中针状铁素体组织 SEM 形貌及夹杂物 EDS 分析。从扫描电镜照片可以观察到,焊缝中存在密集的针状铁素体且大多贴合夹杂物生长,视域内的夹杂物尺寸均小于 $1\ \mu\text{m}$,且观察到针状铁素体的长宽比为 3:1 左右。针状铁素体板条的尺寸越细小,其硬度越大,屈服强度越大,可以更显著地提高焊缝的韧性^[20]。在直径约 $1\ \mu\text{m}$ 的夹杂物上,针状铁素体的形成方式是垂直于夹杂物表面向外生长,且互相之间呈一定角度。尺寸更小,小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的夹杂物诱导针状铁素体的生长方式与其不同,针状铁素体将夹杂物完全包住生长。对诱导针状铁素体生长的夹杂物进行扫描电镜观察,其能谱分析结果显示(见图 7b),夹杂物主要由 Ti、Si、Al、Mn 和较多的 O 元素构成,可以看出主要是 Ti、Al、Si 的氧化物, Mn 元素的分布相对集中,可见夹杂物周围产生了一定的贫 Mn 区。许多研究发现^[21-23],晶内夹杂物的周

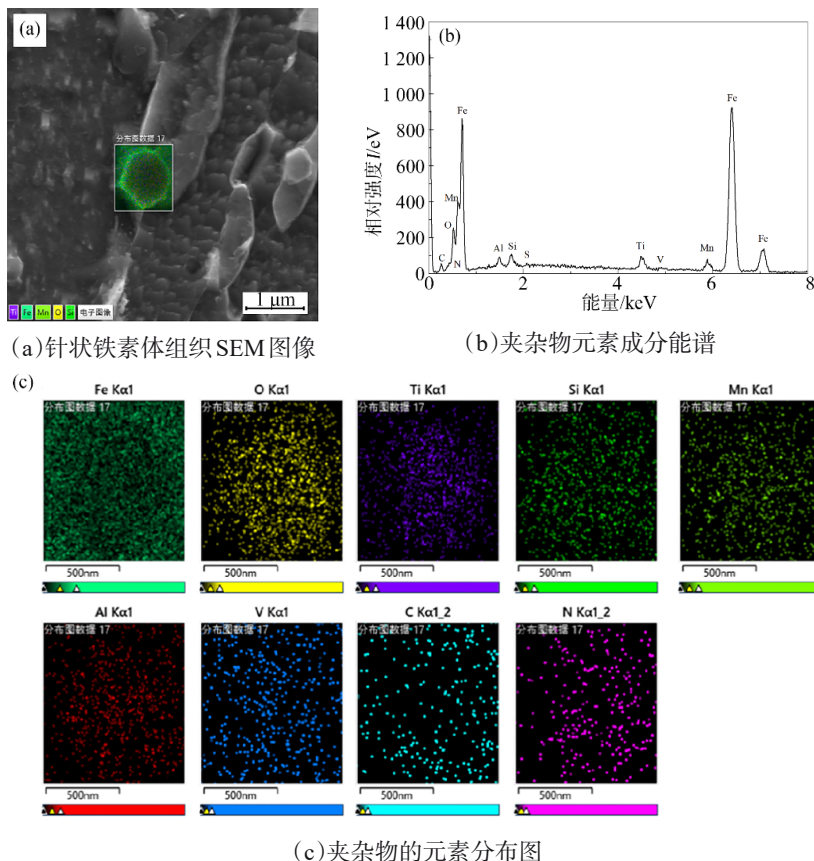


图 7 焊缝中针状铁素体组织 SEM 形貌及夹杂物 EDS 分析

Fig. 7 SEM morphology of acicular ferrite and EDS analysis of inclusions in weld

围更容易出现针状铁素体的形核, 夹杂物诱导晶内针状铁素体形核的关键原因是其周围形成了溶质贫困区, 并且夹杂物周围的贫 Mn 区的出现是其促进针状铁素体形核的重要因素。郭皓^[24]的试验也证明 TiN-MnS 复合夹杂物对于针状铁素体的形核十分有利。Lee^[25]使用透射电镜对低合金钢焊缝中诱导针状铁素体的夹杂物进行观察后发现, 直径在 0.2~1 μm 之间的夹杂物可以有效地作为针状铁素体形核核心, 与图 7 观察到的现象一致。

2.3 力学性能分析

2.3.1 拉伸

拉伸试样断裂位置如图 8 所示, 可以观察到断裂都发生在 SAPH440-B 母材部位, 这说明焊接接头抗拉强度良好, 断口处存在明显的缩颈现象, 呈典型的韧性断裂。

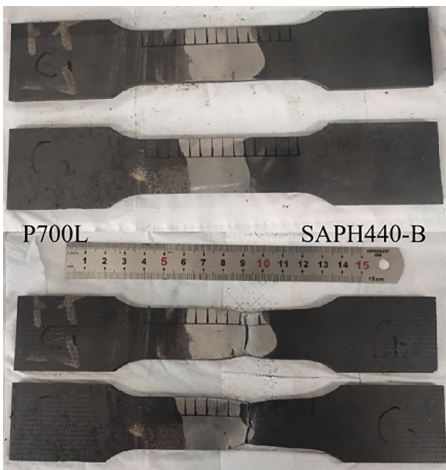


图 8 焊接接头拉伸样断裂位置

Fig. 8 Tensile fracture position of welded joint

拉伸试验的应力-应变曲线如图 9 所示, 两组应力-应变曲线都较为平滑, 没有明显的屈服变形过程, 但存在一定误差。焊接接头拉伸参数见表 6, 两组试验样品的抗拉强度为 524 MPa、549 MPa, 均高于母材 SAPH440-B, 可以看出焊缝的力学性能合格, 不是接头的薄弱部位。对拉伸断口进行 SEM 形貌观察如图 10 所示, 主要为大量细小、深浅不同的韧窝, 存在个别尺寸差距较大的韧窝, 直径最大达到 10 μm, 也存在许多直径不足 1 μm 的韧窝分布密集; 另外断口处存在少量部位表现为解理或准解理状, 这可能是由于夹杂物或脆硬相导致的, 断裂过程中孔洞的形核与生长可以吸收大量能量^[26]。

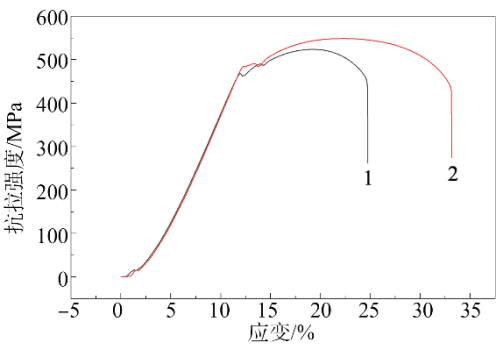


图 9 焊接接头拉伸应力-应变曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curve of welded joint

表 6 焊接接头的拉伸力学性能参数

Table 6 Tensile mechanical properties of welded joints

编号	断裂位置	抗拉强度	抗拉强度	断后伸长率/%
		R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	
1	SAPH440-B	524	465	15
2	SAPH440-B	549	484	17

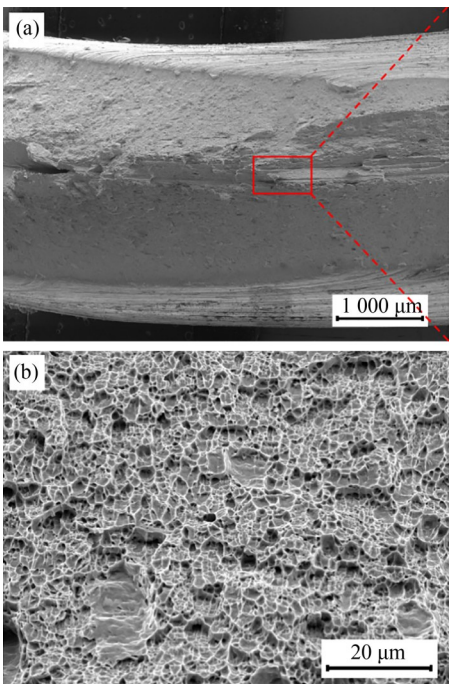


图 10 拉伸接头断口 SEM 形貌

Fig. 10 SEM morphology of tensile joint fracture

2.3.2 硬度

利用显微硬度测试可以直观的观察到焊接接头的硬度变化, 结合焊接接头显微组织可以发现焊接接头薄弱部位并找出其软化因素测试打点从左侧母材 P700L 开始穿过左侧热影响区焊缝右侧热影响区再到右侧母材 SAPH440-B, 每间隔 0.3 mm 测量一个显微硬度点。试验结果如图 11 所示, 可以看

出 P700L 侧 HAZ 发生了明显的软化, 软化主要出现在粗晶区, 这也符合粗晶区的组织因为离焊缝距离最近, 在热循环中受到的影响最大, 晶粒组织粗大且不均匀, 粗大的晶界铁素体和侧板条铁素体使该区域的显微硬度严重恶化。焊缝的显微硬度平均值为 $195.6 \text{ HV}_{0.2}$, 从上文焊缝组织形貌可知, 焊缝中的针状铁素体含量较多且尺寸细小, 细小的针状铁素体可提高焊缝组织、提高焊缝韧性与强度^[27]。两侧热影响区的平均硬度为 $197.5 \text{ HV}_{0.2}$ 、 $176.8 \text{ HV}_{0.2}$, 可以看出 SAPH440-B 侧热影响区的软化现象不明显, 由其显微组织形貌判断是由于较多碳化物的析出从而提高了显微硬度。

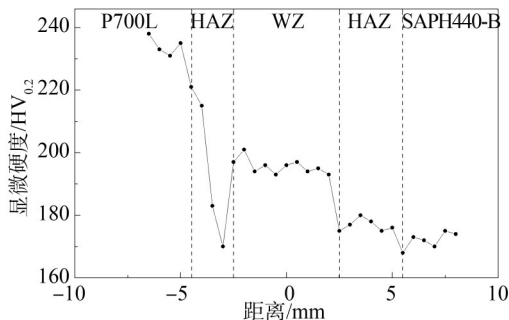


图 11 焊接接头显微硬度分布

Fig. 11 Microhardness distribution of welded joints

2.3.3 冲击

为了检测焊接接头各区域的冲击韧性情况, 进一步判断焊接接头力学性能, 对两侧母材、焊缝和两侧热影响区进行夏比系列冲击试验, 试验温度为 0°C , 焊缝和两侧热影响区的冲击功如图 12 所示。可以看出焊接接头的平均冲击功大小为 SAPH440-B 母材 > P700L 侧热影响区 > SAPH440-B 侧热影响区 > 焊缝 > P700L 母材。整个焊接接头的平均冲击功低于 SAPH440-B 母材 92.78 J 并高于 P700L 母材 50.28 J 。焊缝区域的平均冲击功为 79.94 J , 满足 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》的标准。这是由于焊缝区域存在大量细小的针状铁素体, 相互交错的针状铁素体阻碍了裂纹的通路, 使裂纹的长大需要更多能量。研究表明^[28-29]针状铁素体的含量增加 3~4 倍, 冲击韧性也将提高 3 倍左右, 并且针状铁素体含量的提高也将导致侧板条铁素体含量的减少, 间接对韧性的提高起到作用。

2.3.4 弯曲

焊接接头弯曲试验是一种重要的测试方法, 在

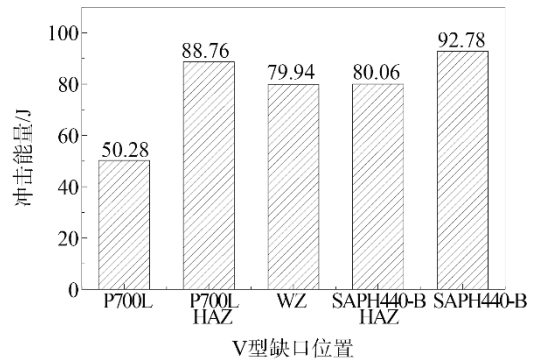


图 12 焊接接头各部位低温冲击吸收功

Fig. 12 Low temperature impact absorption work at various parts of the welded joint

进行弯曲试验时通过在规定的心直径和预设的弯曲角度条件下施加力, 来检测焊接接头在受到外部力量作用时的形变, 评估其弯曲变形能力, 判断该接头是否能够在受力时有效吸收能量, 以防止裂纹或其他缺陷的产生。鉴于这些重要功能, 弯曲试验结果在众多焊接材料的强度等级标准中, 通常被作为评定材料性能的关键技术指标之一。本研究, 为了验证焊接试样是否满足质量标准要求, 特别进行了面弯和背弯两种弯曲试验。采用了工艺参数为 $D=2a$, 即弯心直径 D 设置为试板厚度 $2a$ 的两倍。弯曲试验结果如图 13、表 7 所示。



图 13 焊接接头弯曲试样

Fig. 13 Welded joint bending specimen

表 7 弯曲试验结果

Table 7 Bending test results

弯曲类型	弯曲角度	弯曲结果
面弯	180°	无裂纹
背弯	180°	无裂纹

3 结论

本文对 P700L/SAPH440-B 异种高强钢焊接,

采用CO₂气体保护焊方式与ER69-G焊丝作为焊材进行焊接研究。对焊接接头的焊缝区、两侧热影响区进行显微组织观察;对焊接接头进行硬度、拉伸、低温冲击、弯曲性能测试及分析,得出结论如下:

(1)采用CO₂气体保护焊方式与ER69-G焊丝焊接的P700L/SAPH440-B异种高强钢焊接接头良好,无缺陷。焊缝区域显微组织为大量针状铁素体和先共析铁素体,P700L侧热影响区组织为大量粒状贝氏体、板条贝氏体和少量晶界铁素体,SAPH440-B侧热影响区组织为大量晶界铁素体和少量板条贝氏体、粒状贝氏体。

(2)焊缝中针状铁素体形核的夹杂物主要是Ti、Al、Si的氧化物且其周围存在贫Mn区,不同尺寸的夹杂物上的针状铁素体生长方式不同。

(3)焊接接头拉伸试样断裂位置均在SAPH440-B母材侧,抗拉强度为524 MPa和549 MPa,拉伸断口存在大量韧窝,是典型的韧性断裂。焊接接头两侧热影响区均存在软化现象,P700L侧热影响区软化现象较为明显。焊缝区域及P700L侧热影响区、SAPH440-B侧热影响区的平均冲击功分别为79.94 J、88.76 J、80.06 J均在母材冲击功的70%以上,可知采用ER69-G焊丝作为焊材的焊接接头有良好的冲击韧性。焊接接头面弯和背弯试验均无裂纹,接头塑性良好。

参考文献:

- [1] 朱慧. 新时代中国汽车产业发展的挑战, 机遇和战略[J]. 内燃机与配件, 2020(23): 179-181.
ZHU H. Challenges, Opportunities, and Strategies for the Development of China's Automotive Industry in the New Era[J]. Internal Combustion Engines and Accessories, 2020(23): 179-181.
- [2] 王成环. 汽车金属材料发展趋势探讨[J]. 汽车维修技师, 2024(08): 125-128.
WANG C H. Discussion on the Development Trend of Automotive Metal Materials [J]. Automotive Maintenance Technician, 2024(08): 125-128.
- [3] 高攀. 中国电动汽车轻量化水平发展趋势研究[J]. 内燃机与配件, 2024(06): 140-142.
GAO P. Research on the Development Trend of Light-weight Electric Vehicles in China[J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2024(06): 140-142.
- [4] 李永亮. 700 MPa级高强度汽车大梁钢成分设计与组织控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
LI Y L. Study on Composition Design and Microstructure Control about 700 MPa Grade High Strength Beam Steel for Vehicles [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [5] 杨得草, 周宏伟. 汽车用SAPH440热轧酸洗钢板组织和性能的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(15): 95-98+101.
YANG D C, ZHOU H W. Research on Microstructure and Performance of Hot-rolled Pickled Sheet SAPH440 for Automobile [J]. Hot Working Technology, 2019, 51(15): 95-98+101.
- [6] 陈道齐. 汽车车身焊接技术的研究进展[J]. 汽车实用技术, 2020(4): 179-181.
CHEN D Q. Research progress of automobile body welding technology [J]. Automotive Practical Technology, 2020(4): 179-181.
- [7] Rathod D W, Pandey S, Singh P K, et al. Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: Ferritic to austenitic stainless steel [J]. Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2015, 639: 259-268.
- [8] 高杰, 王娟, 李亚江. 异种钢的焊接研究现状[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 83-89.
GAO J, WANG J, LI Y J. Study on the Welding of Dissimilar Steel [J]. Precision Forming Engineering, 2017, 9(5): 83-89.
- [9] Cui Q L, Parkes D, Westerbaan D, et al. Tensile and Fatigue Properties of Single and Multiple Dissimilar Welded Joints of DP980 and HSLA [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26(2): 1-9.
- [10] 孙海波. 激光功率对不等厚异种汽车高强钢板激光焊接接头性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 69-72.
SUN H B. Effects of Laser Power on Performance of Dissimilar Automotive High Strength Steel Laser Welded Joints with Different Thickness [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 69-72.
- [11] 王金凤, 袁耀, 李聪. 激光拼焊异种超高强度钢组织和力学性能[J]. 钢铁, 2022, 57(09): 138-147.
WANG J F, YUAN Y, LI C. Microstructures and mechanical properties of laser tailor-welded dissimilar super-high strength steel sheets [J]. Iron and Steel, 2022, 57(09): 138-147.
- [12] 李育霖. 热轧高强钢板酸洗后表面黄斑成因及腐蚀

- 行为研究[J]. 宝钢技术, 2023(04):46-51+59.
- LI Y L. Study on the cause of macula and corrosive behavior of high-strength pickling steel [J]. Baosteel Technology, 2023(04): 46-51+59.
- [13] Qi H, Pang Q, Li W, et al. The Influence of the Second Phase on the Microstructure Evolution of the Welding Heat-Affected Zone of Q690 Steel with High Heat Input[J]. Materials, 2024, 17(3):613.
- [14] 曾道平, 郑韶先, 安同邦, 等. 440 MPa 级高强钢焊条熔敷金属组织与低温冲击韧性研究[J]. 焊接学报, 2024, 45(03):120-128+136.
- ZENG D P, ZHENG S X, AN T B, et al. Study on microstructure and low temperature impact toughness of deposited metal in 440 MPa high strength steel electrode [J]. Journal of Welding Technology, 2018, 45(03):120-128+136.
- [15] 芦文钊, 胡学文, 袁晓敏, 等. 热模拟 Q890 高强钢焊接过程中组织转变的原位观察[J]. 热处理, 2022, 37(01):18-23.
- LU W Z, HU X W, YUAN X M, et al. In-situ Observation of Structural Transformation in Q890 High-strength Steel During Thermally Simulated Welding [J]. Heat Treatment, 2022, 37(01):18-23.
- [16] Hassan A. Material and residual stress improvement in S355 welded structural steel using mechanical and thermal post-weld treatment methods [J]. Steel Construction, 2021, 15(1):51-54.
- [17] Dj T G J. Dynamics of austenite to ferrite phase transformation in ferrous weld metals [J]. Materials Science and Technology: MST: A publication of the Institute of Metals, 1997, 13(3).
- [18] 周文浩. 高强韧耐候桥梁钢 Q690qNH 的不预热焊接试验[J]. 金属材料与冶金工程, 2022, 50(02):59-64.
- ZHOU W H. Non-preheated Welding Test of Q690qNH High Strength and Toughness Atmospheric Corrosion Resisting Steel for Bridge [J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering, 2022, 50(02):59-64.
- [19] 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(自然科学版), 2003, (04):141-145+155.
- ZHANG D Q, LEI Y, LIU Z Y. Acicular ferrite in weld metal of Microalloyed steel [J]. Journal of the University of Petroleum (Natural Science Edition), 2003, (04):141-145+155.
- [20] Li J, Yu P, Saini N, et al. Crack-Tip Opening Displacement of Girth Welds in a Lean X70 Pipeline Steel [J]. Materials, 2024, 17(2):391.
- [21] Xiao J, Hengkun L, Yulong Y, et al. Evolution of Complex Oxide Inclusions During the Smelting Process of Oxide Metallurgical Steel and Their Effect on Acicular Ferrite Nucleation [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2024, 55(3):724-735.
- [22] Fangce L, Min L, Yue B, et al. Acicular ferrite formation and Mn depletion behavior around the inclusions in Ti-Mg oxide metallurgy steel with different holding times [J]. Materials Today Communications, 2023, 37:107210.
- [23] Xiao J, Yinping C, Hengkun L, et al. Study on the mechanism of AF nucleation induced by complex oxide inclusions after LF refining in oxide metallurgical steel [J]. Materials Characterization, 2023, 204:none.
- [24] 郭皓, 樊晨康, 孙旭兵, 等. 35MnVS 非调质钢针状铁素体形核原位观察[J]. 重型机械, 2023, (04):78-83.
- GUO H, FAN C K, SUN X B, et al. In situ observation of acicular ferrite nucleation in 35MnVS non-quenched and tempered steel [J]. Heavy Machinery, 2023, (04):78-83.
- [25] Lee T K, Kim H J, Kang B Y, et al. Effect of Inclusion Size on the Nucleation of Acicular Ferrite in Welds [J]. ISIJ International, 2000, 40(12):1260-1268.
- [26] LU P, LIU Y, WU H, et al. Fatigue Performance of Microalloyed High-strength Rebar and Analysis of Fracture Mechanism [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(12):1149-1155.
- [27] P. H, P. S, V. B, et al. Evaluation of high cycle fatigue behavior of flux cored arc welded naval grade DMR249 A grade steel joints for ship hull structures [J]. Forces in Mechanics, 2023, 11:none.
- [28] 曾道平, 郑韶先, 安同邦, 等. 440 MPa 级 HSLA 钢焊缝低温韧性分析[J]. 焊接, 2024, (01):33-39.
- ZENG D P, ZHENG S X, AN T B, et al. Analysis of weld low temperature toughness of 440 MPa grade HSLA steel [J]. Welding, 2024, (01):33-39.
- [29] Venkateshkannan M, Arivazhagan N, Reddy G, et al. Characterization of weld joints produced by continuous wave and double pulse gas metal arc welding in naval grade high-strength low-alloy steel [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2023, 237(5):1808-1818.