



DOI: 10.11885/j.issn.1001-2303.2022.01.07

304&Q235 异种钢 TIG 焊接接头组织及力学性能研究

徐育琅, 钱 鹏, 李敬勇, 石铭霄, 刘嘉琦

江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003

摘 要: 为了充分发挥材料各自的优势, 异种钢材料的组合应用应运而生。本文采用 TIG 焊对 Q235 普通碳钢和 304 奥氏体不锈钢进行异种钢焊接试验, 并采用控制变量的方法优化焊接工艺, 获取符合工程实践要求的焊接接头。结合金相显微镜以及扫描电镜对焊接接头各区域微观组织演变过程进行观察, 采用 X 射线衍射仪对焊缝进行物相分析, 利用万能拉伸试验机和显微硬度计分别对焊接试样进行了拉伸性能测试及显微硬度测试。结果表明, 焊缝区域微观组织由板条马氏体组成; 在 Q235 碳钢界面明显发生了碳迁移现象; 在焊接接头完全熔透的条件下, 拉伸断裂位置发生在母材 Q235 碳钢一侧, 说明焊接接头强度高于母材, 断口呈现韧性断裂特征; 焊接接头各区域显微硬度分布规律为: 焊缝 > 304 侧热影响区 > 304 母材 > Q235 侧热影响区 > Q235 母材。

关键词: 异种钢; TIG 焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)01-0054-09

Study on Microstructure and Mechanical Properties of TIG Welded Joint of Dissimilar Steel 304&Q235

XU Yulang, QIAN Peng, LI Jingyong, SHI Mingxiao, LIU Jiaqi

College of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

Abstract: In order to give full play to their respective advantages, the combined application of dissimilar steel materials came into being, in this study, the dissimilar steel welding experiments of Q235 carbon steel and 304 austenitic stainless steel were carried out by TIG welding, and the welding process was optimized by controlling variables to obtain the qualified welding joints. The microstructure evolution of the welded joint was observed by metallographic microscope and scanning electron microscope and the analysis of phases in the weld seam were tested by X-ray diffractometer. The tensile properties and microhardness of the welded specimens were tested by universal tensile testing machine and microhardness tester respectively. The results show that the weld zone is composed of lath martensite; Carbon migration occurs obviously at Q235 interface, decarburization layer appears on one side of Q235 and carburization layer appears on one side of weld; The microstructure of 304 side fusion zone is fine and discontinuous vermicular ferrite distributed in austenite matrix. When the welded joint is fully penetrated, the tensile fracture occurs on the side of Q235 steel, which indicates that the strength of the welded joint is higher than that of the base metal, and presenting ductile fracture; The distribution rule of microhardness in each area of welded joint is as follows: weld zone > 304 heat affected zone > 304 base metal > Q235 heat affected zone > Q235 base metal.

Keywords: dissimilar steel; TIG welding; microstructure; mechanical properties

本文引用格式: 徐育琅, 钱鹏, 李敬勇, 等. 304&Q235 异种钢 TIG 焊接接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(01): 54-62.

Citation: XU Y L, QIAN P, LI J Y, et al. Study on microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of dissimilar steel 304&Q235[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(01): 54-62.

* 收稿日期: 2021-07-17 修回日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605205)

作者简介: 徐育琅(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事异种材料连接技术及先进材料连接技术研究。E-mail: Yulang_Xu@163.com。

0 前言

304 奥氏体不锈钢具有良好的塑性、韧性、耐高温、耐腐蚀等综合力学性能,广泛应用于船舶、航空、化工、医药等工业领域^[1-3]。Q235 价格相对低廉,含碳量较低且具有良好的焊接性能,是实际生产中常用的结构钢种,但相较于不锈钢耐腐蚀性能较差^[4]。因此,为了充分发挥材料各自的优势,异种钢材料的组合应用应运而生,而焊接则是实现异种钢材料组合应用的重要手段。然而,304 奥氏体不锈钢和 Q235 碳钢在焊接过程中存在着熔点差异、热导率差异、比热容差异、线膨胀系数差异、电磁性差异等诸多影响焊接接头质量的问题^[5-7]。为充分发挥上述两种材料各自的优势,在达到工程使用要求的同时降低成本,增加经济效益,国内外学者对上述类似异种金属焊接在焊接方法及工艺等方面进行了深入的研究^[8-10]。

黄健康等人^[8]发现不锈钢/碳钢异种材料 TIG 焊接时,熔池表面是从不锈钢侧流向碳钢侧,利用示踪粒子观察发现采用 304 和 316L 两种不锈钢与 Q235 碳钢焊接时,熔池表面平均流动速度分别为 25.3 mm/s 和 21.6 mm/s。陈今良等人^[9]了研究发现,Q235A/304 异种钢 TIG 焊接中,随着焊接电流、保护气体流量的增大,熔合区内碳迁移程度发生变化,焊接试样的接头断裂形式由韧性断裂转变为脆性

断裂。Denesh 等人^[10]采用氩弧焊(GTAW)焊接铁素体钢(SA508Gr.3Cl.1)和奥氏体钢(SS304LN),发现焊缝中细小夹渣的存在显著降低了焊缝的拉伸性能和冲击韧性,但是射线照相技术无法检测焊缝金属中存在的细小夹杂物,因此,应通过其他无损检测(如超声波)检查焊接试样的质量。

不同于常规的填丝焊接,本文针对 Q235 碳钢和 304 不锈钢进行异种钢 TIG 自熔焊接,通过采取控制变量的方法,优化焊接工艺参数,并分析其接头微观组织及力学性能,以获取满足工程实际应用要求的优质焊接接头,为 Q235 碳钢和 304 不锈钢异种钢焊接的实际应用建立了数据支撑并提供了理论参考。

1 试验材料及方法

1.1 焊接材料及设备

使用型号为 WSM-400R 的一体式热丝 TIG 焊机进行 304 不锈钢和 Q235 碳钢 TIG 自熔焊接。试样尺寸为 100 mm×100 mm×3 mm(长×宽×高),焊接接头形式为对接,不开坡口,无填充材料,要求单面焊双面成型。304 不锈钢和 Q235 碳钢两种母材元素化学成分及常温力学性能如表 1 所示。为减少焊接缺陷,焊前对待焊板材进行机械打磨,保证两侧距离焊缝中心 30 mm 范围内完全光亮,并用酒精清洗,去除表面附着油污等杂质。

表 1 304&Q235 的化学成分(质量分数,%)及力学性能

Table 1 Chemical compositions of 304&Q235(wt. %) and mechanical properties

材料	Cr	Ni	C	Mn	Si	S	N	P	Fe	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	硬度/HV
304	19.90	7.96	0.06	1.00	0.33	—	0.08	0.005	余量	207	520	40	250
Q235	—	—	0.05	0.17	0.01	0.01	—	0.003	余量	235	320	26	250

1.2 焊接工艺参数

针对焊接电流和焊接速度采用控制变量的方法进行试验,通过前期试焊试验,参数设置如表 2 所示。焊接电流变化依次为 300 A、310 A、320 A、330 A、340 A,焊接速度为 10 mm/s、13 mm/s、16 mm/s。TIG 焊接过程中,使用纯度为 99.99% 的氩气进行正面保护,气体流量为 15 L/min。钨极直径 2 mm,尖端角度 45°。

由于 Q235 碳钢和 304 不锈钢这两种板材的耐腐蚀性差异较大,同一腐蚀剂下无法侵蚀出理想效

果,因此在本研究中对焊接接头两侧进行分区腐蚀,采用 4% HNO_3 +酒精溶液腐蚀 Q235 碳钢界面侧,混合体积比例为 1:24;采用王水($\text{HCl}+\text{HNO}_3$)腐蚀 304 不锈钢界面侧,混合体积比例为 3:1。金相试样制备完成后在 Olympus SZ61 体式显微镜下观察焊接接头宏观形貌;采用 Olympus BX51M 光学显微镜观察焊接接头内焊缝中心及熔合线附近微观组织演变过程;采用 Hitachi-S3400N 电子扫描显微镜(SEM)进一步观察焊接接头内微观组织精细结构并定量分析焊缝中心元素组成;采用 XRD-6000 型

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

试样编号	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/mm \cdot s^{-1}$	气流量 $Q/L \cdot min^{-1}$	焊枪倾角/ $(^\circ)$	钨针尖端与试板距离/mm
1	300	13	15	90	4
2	330	10	15	90	4
3	330	13	15	90	4
4	330	16	15	90	4
5	310	13	15	90	4
6	320	13	15	90	4
7	330	13	15	90	4
8	340	13	15	90	4

X射线衍射分析仪对焊缝区域进行物相分析。采用 SANS 万能拉伸试验机及 HXD-1000 型显微硬度计分别测定焊接试样拉伸性能及焊接接头显微硬度。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头宏观特征

由于 304 不锈钢的导热能力远低于 Q235 碳钢, 约为 Q235 碳钢的 1/3, 因此, 热源同时作用在 304 不锈钢和 Q235 碳素钢时, Q235 碳钢散热更快, 且 Q235 碳钢一侧烧损现象更为明显。焊接过程中如果热输入不足, 则容易出现未焊透和未熔合现象, 如图 1a 所示; 反之热输入过大, 焊接试板会因为过热而发生烧穿现象, 如图 1b 所示。

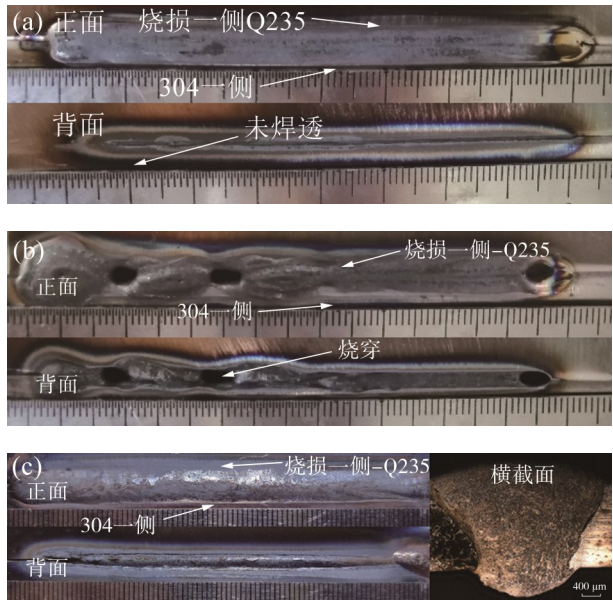


图 1 焊接接头宏观形貌

Fig. 1 Macro-morphology of welded joint

通过控制变量试验优化焊接工艺参数范围发现, 当设定其他参数不变, 调整焊接电流 $I=330\text{ A}$, 焊接速度 $v=13\text{ mm/s}$ 时, 焊接接头成形美观, 焊缝表面平滑, 焊趾处过渡圆滑, 无表面气孔、裂纹等宏观焊接缺陷, 如图 1c 所示。不同焊接工艺参数下所得 304 不锈钢与 Q235 钢 TIG 焊接接头表面宏观形貌和横截面形貌相似, 焊缝正面和背面成形良好。焊缝横截面超景深图片中焊缝均呈现为上部较宽、下部相对较窄的“碗状”结构。后续分析试验均以此参数作为研究基础。

2.2 焊接接头显微组织分析

2.2.1 母材及焊缝中心显微组织分析

图 2a 为冷轧制而成的 304 不锈钢母材金相组织示意图, 其组织是具有孪晶结构的奥氏体, 沿着轧制方向排列着少量残留的高温铁素体 (δ 铁素体), 合理的铁素体含量可以增加奥氏体钢的稳定性。图 2b 中的灰色块状多面体组织为铁素体, 黑色多面体组织为珠光体, 珠光体较为均匀地混合分布在铁素体晶界及晶内。根据直读光谱中元素含量测试结果, 并结合舍弗勒相图中 C_{req} 、 N_{ieq} 计算公式, 得到焊缝区域 $C_{req}=10.21$, $N_{ieq}=5.92$, 由 C_{req} 、 N_{ieq} 计算结果可预测本试验焊接接头内微观组织为马氏体。经计算焊缝中碳含量约为 0.055%, 属于低碳钢范畴, 而低碳钢马氏体通常呈现板条状。

焊缝金相组织如图 2c 所示, 可以清晰地观察到不同位向板条状马氏体。原因是焊接热循环过程具有一定的特殊性, 焊接完成之后降温速度较快, 熔池金属在较快的冷却速度下发生非平衡凝固过程, 焊缝金属在非平衡凝固过程中急剧降温至马氏体转变温度 (M_s) 以下, 通过 C_{req} 、 N_{ieq} 计算公式得

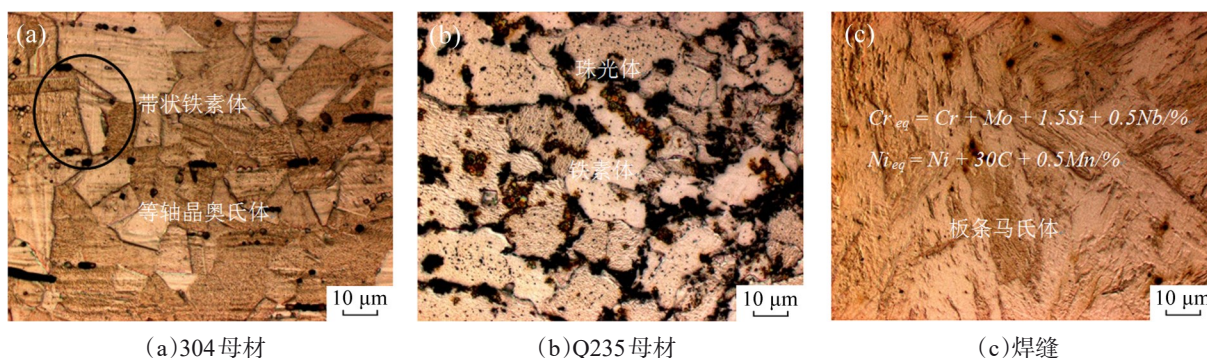


图2 母材及焊缝金相组织

Fig. 2 Metallurgical structure of base metal and weld zone

出本研究中 $[\text{Cr}/\text{Ni}]_{\text{eq}}=1.72$, 结合 Fe-Cr-Ni 三元截面相图^[11], 熔池金属高温状态属于 $\gamma+\delta+\text{L}$ 三相共存状态, 随着急剧降温冷却过程中钢在奥氏体状态下扩散型分解受到抑制而发生了无扩散相变过程, 最终室温下形成了马氏体组织。焊缝中心微观组织图验证了舍弗勒相图中 Cr_{eq} 、 Ni_{eq} 计算结果对于焊缝微观组织为板条马氏体的推论。

为进一步确认焊缝中心组织, 利用扫描电镜对

其焊缝区域组织进行面扫描分析, 合金元素含量测试结果如图 3a 所示。利用舍弗勒相图中 Cr_{eq} 、 Ni_{eq} 计算公式得出 $\text{Cr}_{\text{eq}}=6.44$, $\text{Ni}_{\text{eq}}=5.16$, 结合计算结果以及实际焊后焊缝急剧冷却发生非平衡凝固过程, 得出焊缝中心组织室温下为马氏体。因此, 从舍弗勒相图计算结果推论、金相组织分析和扫描电镜分析三个角度均可以论证 Q235 碳钢和 304 不锈钢 TIG 自熔焊焊缝室温微观组织为马氏体。

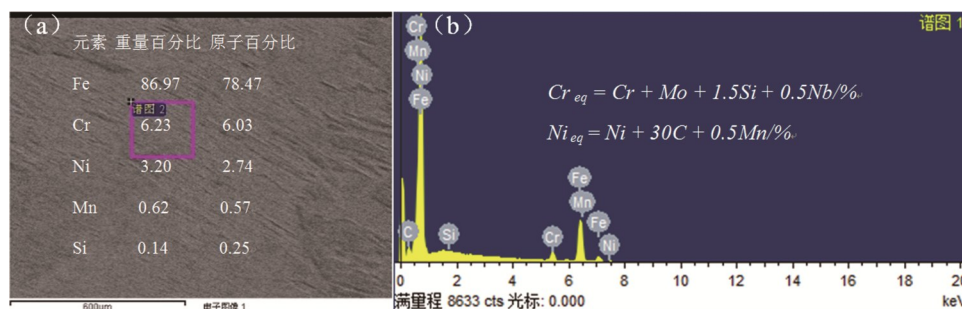


图3 焊缝能谱分析

Fig. 3 Energy spectrum analysis of weld zone

2.2.2 熔合线附近微观组织

图 4a 为异种钢焊接接头的横截面形貌, 左侧熔合线微观组织区域包括焊缝与 Q235 碳钢侧, 右侧熔合线微观组织区域包括焊缝与 304 不锈钢侧。

图 4b 为 Q235 一侧熔合线附近区域微观组织形貌。靠近熔合线附近左侧过热区由于热输入大, 温度长时间停留在 A_{c3} (完全奥氏体化温度) 以上, 高温状态下碳化物在奥氏体晶内沿一定方向析出并呈针状生长, 最终形成网格状、羽毛状的粗大魏氏组织。Q235 侧热影响区金相组织由铁素体和珠光体组成, 并且越靠近熔合线处, 珠光体数量越少。熔池边缘靠近母材处, 相比于焊缝中心, 熔池金属液

态停留时间短, 且受到机械搅拌作用偏弱, 因此, 越靠近母材的焊缝区域母材成分所占的比例越大, 且微观组织形态越接近过热区, 使得焊缝边缘位置与焊缝中心化学成分有较大的差别, 最终呈现出焊缝不同区域显微组织存在明显的差异性。

在焊缝与 304 不锈钢交界处形成了与焊缝、热影响区组织均不相同的熔合区, 如图 4c 所示, 熔合区沿着奥氏体晶界分布着细小且不连续分布的蠕虫状铁素体, 其宽度约为 $25\ \mu\text{m}$, 热影响区附近组织基体为奥氏体等轴晶上分布着带状铁素体, 晶粒大小相对于母材晶粒未发生显著变化, 且相较于母材热影响区内带状铁素体数量显著增加。

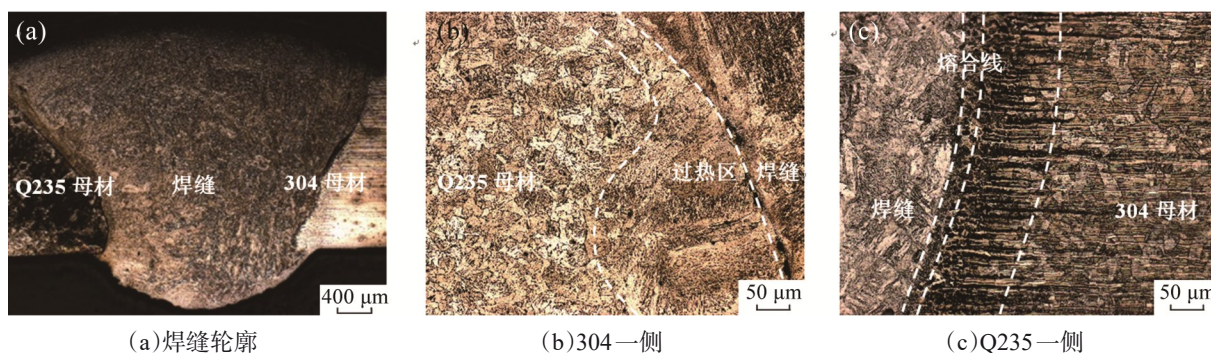


图 4 焊接接头焊缝与母材交界处金相组织

Fig. 4 Metallurgical structure of the junction between weld zone and base metal

2.3 焊接接头碳迁移过程

为了更清晰地观察 Q235 一侧碳迁移过程,对其进行 SEM 观察,结果如图 5a 所示,碳元素由 235 碳钢熔合区一侧向焊缝中迁移,在 Q235 碳钢一侧形成脱碳层,在焊缝金属中形成黑色条带状区域为增碳层,即碳迁移过渡层。从图 4c 中可以看出,脱碳过程也是珠光体不断分解为铁素体的过程。这是因为在焊接过程中,焊接接头存在碳原子扩散迁移,在焊缝一侧出现了增碳层。碳迁移现象原因如下:首先,碳原子属于间隙型原子,间隙原子的扩散系数比置换型原子要大 $10^5 \sim 10^6$ 倍;其次,由于对 304 不锈钢的稀释作用,焊缝中存在大量 Cr 元素,而碳

化物形成元素 Cr 会降低碳的活度系数,因此,碳在焊缝中活度系数较小,Q235 碳钢侧的碳原子将会向焊缝一侧扩散;最后,碳在 α -Fe 中的活度系数大于碳在 γ -Fe 中的活度系数,因此在冷却过程中,Q235 碳钢珠光体中的碳原子就会向奥氏体中扩散^[12-13]。为更加清晰地分析焊缝与 304 交界处微观组织,同样使用 SEM 观察,结果如图 5b 所示,熔合线附近清晰可见的是奥氏体基体上分布的铁素体组织。铁素体的存在可有效清除单相奥氏体组织的方向性从而达到细化奥氏体晶粒的目的,可显著减少晶间偏析,进而提高焊接接头抗裂性能及耐晶间腐蚀性能。

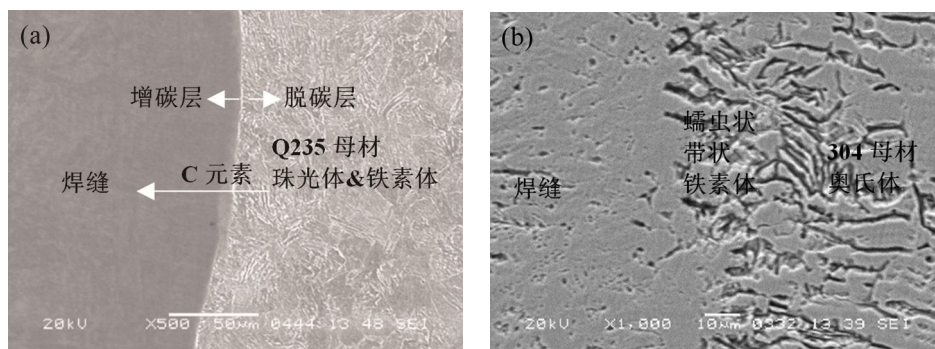


图 5 焊接接头两侧界面处 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of welded joint interface

2.4 焊缝物相分析

焊接接头界面 Fe、Cr、Ni、C 合金元素通过 SEM 线扫描测试后含量分布如图 6 所示。图 6a 扫描方向为 Q235 碳钢至焊缝中心,可以看出,随着箭头方向逐渐移至焊缝中心,Cr、Ni 合金元素显著增加,其中 Cr 元素含量在靠近熔合线处突变;Ni 元素变化程度次之,原因是 304 不锈钢中的 Cr、Ni 元素被稀释至

焊缝中。Fe 元素略有下降,原因是 Cr、Ni 元素含量的提高。C 元素降低则是因为焊接过程中存在碳迁移过程。图 6b 中扫描方向为焊缝中心至 304 不锈钢一侧,沿着箭头方向 Cr、Ni 合金元素含量逐渐升高,Fe 元素略有下降,反映了异种钢焊接过程中 304 不锈钢中 Cr、Ni 合金元素含量被 Q235 碳钢稀释。上述测试范围内,远离熔合区合金元素分布均匀,

未发生合金元素偏聚的现象。

图 7a 为焊缝碳化物($M_{23}C_6$)及 σ 相生成的演变过程, 右图 7b 为焊缝剖面 X 射线衍射测试结果。在焊接过程中, 不锈钢焊接接头内容易出现 σ 相和 $M_{23}C_6$ 等有害二次析出相, 因为铬镍奥氏体不锈钢在

427~800 °C 温度范围内加热时, 在晶界处容易出现碳化铬沉淀, 发生敏化现象。在敏化过程中铬原子在晶界处与碳原子容易形成碳化铬如 $M_{23}C_6$, 该析出相会使奥氏体晶界附近产生贫铬现象, 引起焊接接头的晶间腐蚀, 导致焊接接头该区域的耐蚀性能

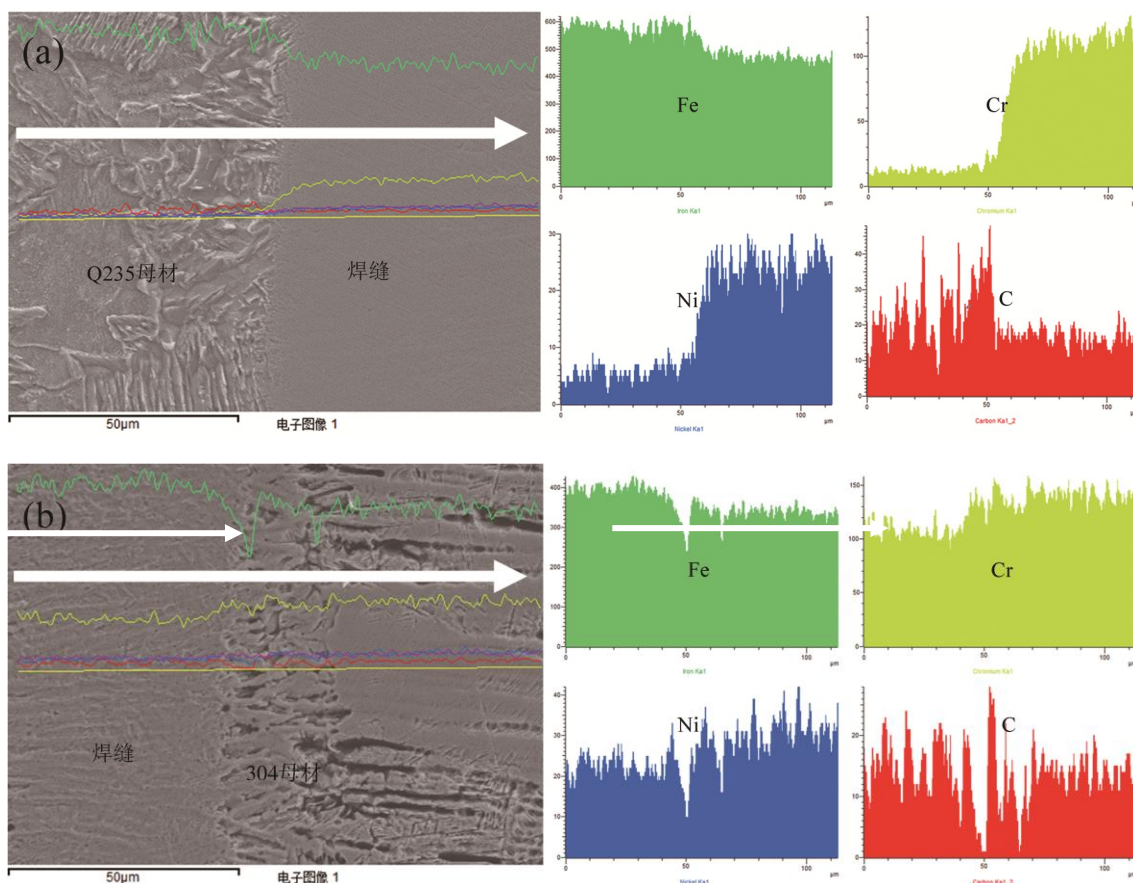
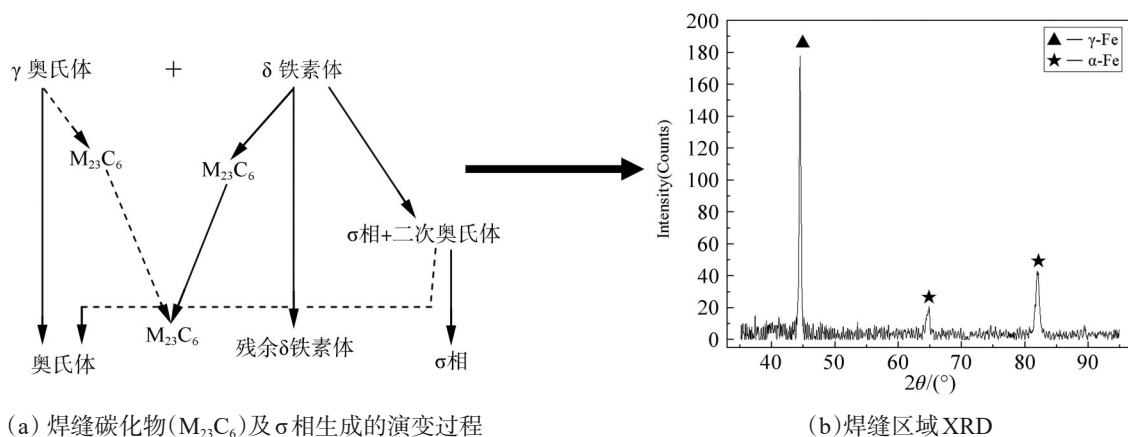


图 6 两侧熔合线附近线扫描

Fig. 6 Line scan near fusion line on both sides



(a) 焊缝碳化物($M_{23}C_6$)及 σ 相生成的演变过程

(b) 焊缝区域 XRD

图 7 焊缝物相分析

Fig. 7 Phase analysis of weld zone

降低。 σ 相是四角形晶体结构的Fe-Cr化合物,会沿着孪晶界或者晶界析出,以块状或者片状的魏氏体组织存在。所以焊接过程中要合理控制焊接热输入,防止 $M_{23}C_6$ 和 σ 相的析出。结合X射线衍射仪测试结果,通过与标准PDF卡片比对,确定焊缝由 α -Fe、 γ -Fe两相组成,未发现 $M_{23}C_6$ 和 σ 相等有害析出相生成。这表明焊接工艺比较合理,焊接接头质量优异,满足实际工程使用要求。

2.5 显微硬度测试结果分析

最佳焊接工艺参数下焊缝横截面显微硬度测试点位置示意及焊接接头显微硬度分布规律图如图8所示。三条测试平行线位置分别位于距上表面0.5 mm、下表面0.5 mm及试板厚度中心,测试点间隔0.09 mm。图8中左侧区域为304奥氏体不锈钢的显微硬度值,右侧为Q235碳钢母材的显微硬度值。对比发现不同层的304奥氏体不锈钢母材的显微硬度均大于Q235碳钢母材的显微硬度,其平均显微硬度分别为250 HV和150 HV,且不同层之间硬度差别非常小,反映了焊接接头厚度方向上的组织均匀性。

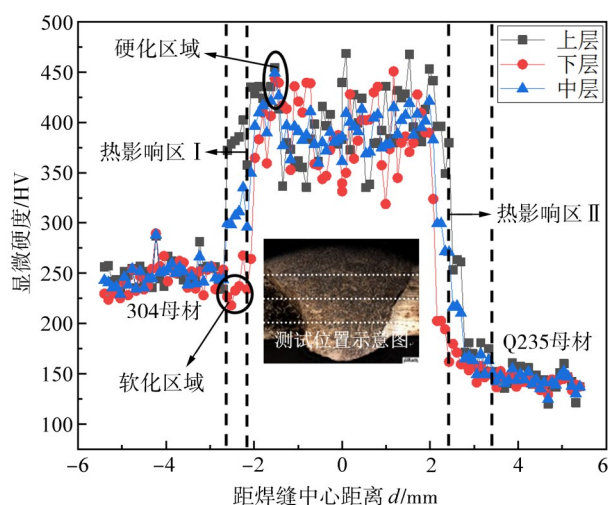


图8 焊缝横截面显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution of weld cross section

从图8可以看出,每一层的显微硬度值均呈现一个凸起的形状,凸起部分即为焊缝金属的显微硬度值。焊缝区的显微硬度明显高于两侧的母材硬度,这是由于焊缝组织为高硬度的马氏体组织,焊缝区域内显微硬度差值不大,其平均显微硬度值约为400 HV,说明焊缝区域成分均匀且组织相似。焊

缝两侧热影响区的显微硬度均介于各自母材和焊缝之间。焊接过程中,由于碳原子的扩散迁移,Q235钢靠近熔合线形成一层脱碳层使得焊接接头发生明显的软化,形成一个软化区域,其显微硬度平均值略低于母材。而在靠近Q235一侧焊缝内形成了高硬度的增碳层,使得该区域内显微硬度平均值高于焊缝其他区域。焊接接头内显微硬度分布规律为:焊缝>304侧热影响区>304母材>Q235热影响区>Q235母材。对比焊接接头内304不锈钢侧热影响区I和Q235碳钢侧热影响区II发现,后者明显宽于前者,且宽度约为前者的2倍,原因是Q235碳钢的热传导系数约为304不锈钢的3倍,因此焊接过程中Q235碳钢一侧热扩散效率更高,热影响区更宽。

2.6 拉伸性能测试结果分析

依据GB/T-2651标准制备焊接接头拉伸试样,并在电子万能试验机上进行拉伸试验。各组焊接工艺参数下拉伸试样性能测试结果如图9所示,焊接试样1参数为焊接电流300 A、焊接速度13 mm/s,此时焊接热输入不足,焊接接头未完全熔透,该工艺参数下焊接接头断裂于焊缝位置,抗拉强度仅为218 MPa,断后延伸率仅为5%。由图9可知,采用合适的焊接工艺参数,可以使焊接接头的抗拉强度超过异种金属中强度较低的母材,除了试样1因热输入不足而存在未熔合缺陷以外的剩余试样均断裂于Q235碳钢母材侧,从断裂位置方面分析,焊接接头中焊缝的组织性能均合格,焊缝不是整个焊接接头薄弱区域,满足工程实践中对于焊接接头抗拉强度的要求。焊接试样断裂于Q235碳钢母材原因主要如下:首先焊缝中的马氏体组织提高了焊缝的强度;其次,焊缝中Cr、Ni等合金元素含量高于Q235母材,在高温重熔时置换金属晶格中的Fe原子,扰乱了原来的晶格排列顺序,能够起到置换或者间隙强化的作用,在拉伸过程中能够钉扎位错,起到阻碍位错运动的作用,从而使焊缝区域具有更高的抗拉强度。在一定范围的工艺窗口内,断裂于Q235碳钢母材试样的焊接接头均有较大的延伸率,且差值不大,约为11.0%,相比于断裂于焊缝的焊接接头试样,这些理想参数范围内的焊接试样断面存在一

定的断面收缩,而断在焊缝中心位置的试样几乎没有断面收缩。此外,控制焊接电流不变时,焊接速度过慢,热输入过大会严重降低焊接接头的断后延伸率,如试样2;同理,控制焊接速度不变,焊接电流过小,热输入不足也会严重降低焊接接头的断后延伸率,如试样6。

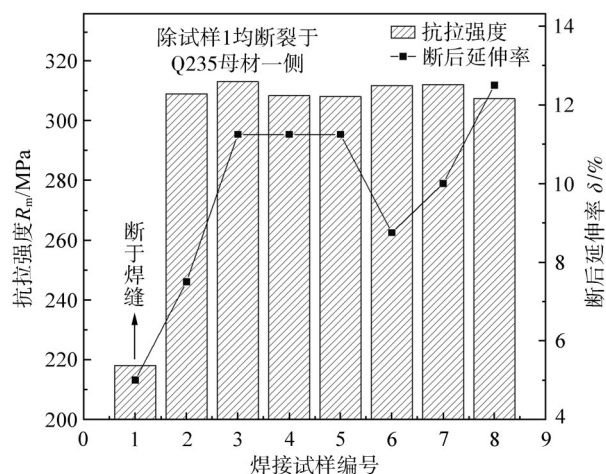


图9 焊接接头拉伸性能

Fig. 9 Tensile properties of welded joints

2.7 断口形貌分析

最优TIG焊接工艺参数下焊接接头断口在扫描电子显微镜下的微观形貌如图10所示,由于该接头断裂位置在碳钢母材一侧,符合低碳钢自身的断裂机理及断口形状特征。在高倍放大条件下,断口被大量的韧窝覆盖,分布密集且数量较多,这是典型的韧性断裂特征。主要原因是在拉伸应力的作用下,滑移面大量的位错堆积,因而产生许多微小孔洞;其次由于材料内部析出物、夹杂物在亚晶界或晶界处形成位错堆积而产生微小孔洞,随后这些小

孔不断形成与长大,在外界载荷的持续作用下,不断聚集、连接并生成新的孔洞。随着外界应力的逐步增大,材料局部位置发生“内缩颈”。当缩颈尺寸达到一定大小之后被撕裂,最终导致整个焊接接头的断裂,在断口表面呈现出大小、形状或深浅不一的韧窝状结构。

3 结论

(1)Q235碳素钢/304不锈钢异种钢TIG焊接过程中,采用控制变量方法,通过调整焊接参数,可以得到成形美观,满足工程实践要求的焊接接头,在本次试验范围中的最佳参数为:焊接电流330 A,焊接速度13 mm/s。

(2)Q235碳素钢/304不锈钢异种钢TIG焊接接头中焊缝组织为板条马氏体,Q235一侧出现脱碳层,焊缝一侧出现增碳层;304一侧熔合区组织为奥氏体基体上分布细小且不连续的蠕虫状铁素体组织。

(3)若无明显焊接缺陷,焊接接头的抗拉强度大于Q235碳钢母材的抗拉强度,拉伸断裂位置为Q235母材一侧,呈现韧性断裂特征。焊接接头各区域显微硬度分布规律为:焊缝>304侧热影响区>304母材>Q235热影响区>Q235母材。

异种钢焊接过程中,由于不同钢材之间的热导率和热膨胀系数存在明显的差异性,局部集中的热源会导致焊件呈现非均匀的温度场特征,这一特点必然会导致焊接接头存在残余应力及变形,进而影响接头乃至整个焊接构件的静载强度、精度、尺寸

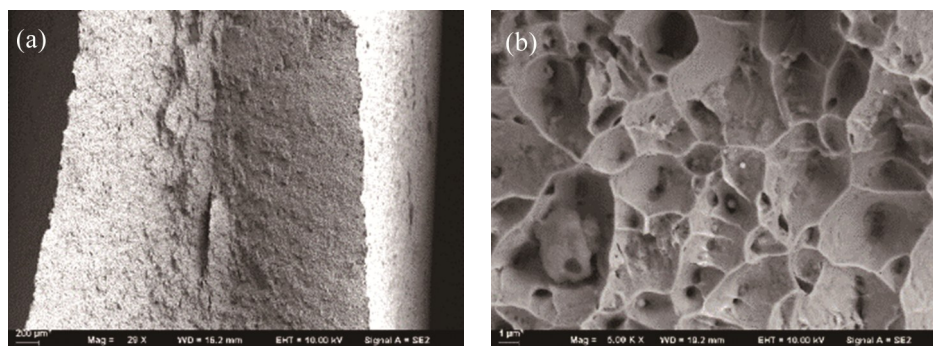


图10 焊接试样断口分析

Fig. 10 Fracture analysis of welding sample

稳定性以及应力腐蚀开裂等性能,最终降低焊接结构的承载能力和服役寿命。后续将针对这一问题展开对异种钢焊接接头残余应力及变形的探索,在实际应力测试试验的基础上利用数值模拟手段形成一个较为系统的研究体系。

参考文献:

- [1] 黄本生,卢东华,杨逸莎,等. Q345/316L 钢焊接接头的腐蚀性能[J]. 材料保护, 2014, 47(9): 22-25+7.
Huang B S, Lu D H, Yang Y S, et al Corrosion behavior of Q345/316L steel welded joints[J]. Material protection, 2014, 47(9): 22-25 + 7.
- [2] 李克俭,李晓刚,张宇,等. 异种金属焊接接头微观组织演化及高温失效机理综述[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 17-43.
Li K J, Li X G, Zhang Y, et al. Review on microstructure evolution and high temperature failure mechanism of dissimilar metal welded joints[J]. Electric welding machine, 2020, 50(9): 17-43.
- [3] 王晓军,杨健,周栋,等. Q345/316L 异种钢 K-TIG 焊接接头的组织及性能[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 66-72, 121.
Wang X J, Yang J, Zhou D, et al. Microstructure and properties of k-tig welded joint of Q345/316L dissimilar steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 66-72, 121.
- [4] 赵勇桃,李波波,鲁海涛,等. Q235 钢与 316 不锈钢异种钢焊接接头组织及力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(11): 35-38.
Zhao Y T, Li B B, Lu H T, et al. Study on Microstructure and mechanical properties of welded joints between Q235 steel and 316 stainless steel[J]. Hot Working Process, 2019, 48(11): 35-38.
- [5] 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. Research status of dissimilar steel welding[J]. Precision Forming Engineering, 2017, 9(5): 83-89.
- [6] 黄本生,杨江,卢东华,等. Q345/316L 异种钢焊接接头显微组织结构与力学性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 45-51.
Huang B S, Yang J, Lu D H, et al Microstructure and mechanical properties of Q345/316L dissimilar steel welded joints[J]. Journal of material heat treatment, 2016, 37(5): 45-51.
- [7] 刘东宇,李东,李凯斌,等. E36 与 304 异种金属光纤激光焊接接头的组织分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015(4): 101-107.
Liu D Y, Li D, Li K B, et al. Microstructure analysis of E36 and 304 dissimilar metal fiber laser welded joints [J]. Progress in laser and optoelectronics, 2015(4): 101-107.
- [8] 黄健康,潘伟,孙天亮,等. 不锈钢/碳钢 TIG 焊熔池表面流动行为[J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 18-25, 161-162.
Huang J k, Pan Wei, Sun T L, et al. Surface flow behavior of stainless steel/Carbon Steel TIG welding pool[J]. Journal of welding, 2019, 40(8): 18-25, 161-162.
- [9] 陈今良,王尧. 电流与保护气体对 Q235A 与 304 不锈钢异种 TIG 焊接接头的影响[J]. 中国重型装备, 2018 (3): 51-54.
Chen J L, Wang Y. Effects of current and shielding gas on dissimilar TIG welded joints of Q235A and 304 stainless steel[J]. China heavy equipment, 2018(3): 51-54.
- [10] Dinesh W. Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: Ferritic to austenitic stainless steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 639.
- [11] 卢东华. 316L 不锈钢/Q345 钢焊接接头组织与性能研究[D]. 四川: 西南石油大学, 2015.
Lu D H. Study on Microstructure and properties of 316L stainless steel/Q345 steel welded joint[D]. Southwest Petroleum University, 2015.
- [12] 卢金斌,王志新,陈建泰. 1Cr17Mn6Ni5N 与 Q235 异种钢焊接接头组织分析[J]. 焊接技术, 2008(2): 15-17.
Lu J B, Wang Z X, Chen J T. Microstructure analysis of welded joint between 1Cr17Mn6Ni5N and Q235 dissimilar steel[J]. Welding technology, 2008(2): 15-17.
- [13] 马丽,闫亚杰. 1Cr17Mn6Ni5N 与 Q235 异种钢焊接接头组织分析[J]. 热加工工艺, 2011, 40(3): 168-169, 172.
Ma L, Yan Y J. Microstructure analysis of welded joint between 1Cr17Mn6Ni5N and Q235 dissimilar steel [J] Hot working process, 2011, 40 (3): 168-169, 172.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>