

5083 铝合金 MIG 焊接头微观组织与力学性能

王家威¹, 吴巍², 马月婷¹, 黄立兵¹, 董红刚¹

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 宝钢中央研究院, 上海 200431)

摘要: 采用熔化极惰性气体保护焊开展了 6 mm 厚 5083-H111 铝合金热轧板焊接工艺试验, 研究了接头宏观形貌和力学性能随工艺参数的变化规律, 分析了不同区域的微观组织和元素分布对接头力学性能的影响。结果表明, 采用优化后的工艺参数进行焊接, 得到的接头表面成形良好, 无明显缺陷。随着送丝速度增加, 焊缝宽度随之增加; 熔合线附近的热影响区发生完全再结晶, 形成了粗大的等轴晶; 焊缝边缘沿散热方向形成柱状晶, 焊缝中心则为细小的等轴晶组织; Fe 和 Mn 在热影响区偏聚严重, 形成 $Al_6(Fe, Mn)$ 相, 焊缝中 Mg 主要分布在晶界处, 形成 $\beta(Al_3Mg_2)$ 相。拉伸试验结果表明, 接头最大抗拉强度可达 307 MPa, 约为母材抗拉强度的 96%, 拉伸后断裂于热影响区, 呈韧性断裂; 受焊接热输入影响, 焊缝和热影响区的硬度低于母材, 随着焊接热输入增加, 焊缝和热影响区的硬度降低。

创新点: (1) 优化焊接工艺参数, 获得了表面成形良好的焊接接头。
(2) 研究了焊接工艺参数对接头宏观形貌和气孔分布的影响。
(3) 阐明了接头不同区域的微观组织和元素分布对接头力学性能的作用机理。

关键词: 5083-H111 铝合金; MIG 焊; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG442 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220112002

Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy with MIG welding

Wang Jiawei¹, Wu Wei², Ma Yueting¹, Huang Libing¹, Dong Honggang¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Baosteel Central Research Institute, Shanghai 200431, China)

Abstract: The welding experiment of 6 mm thick 5083-H111 aluminum alloy hot rolled plate was carried out by metal inert gas welding. The variation of macro morphology and mechanical properties of joints with different process parameters was studied, and the effect of microstructure and element distribution in different regions on mechanical properties of the joint was analyzed. The results showed that the surface of all joints with optimized process parameters had no obvious defects. The weld width increased with the increase of wire feeding speed. Complete recrystallization occurred in heat-affected zone near the fusion line, and coarse equiaxed crystals were formed. The edge of the weld formed columnar crystals along the heat dissipation direction, and the fine equiaxed crystals were found in the center of the weld. Fe and Mn were seriously segregated in the heat-affected zone, forming $Al_6(Fe, Mn)$ phase. Mg is mainly distributed in the grain boundary of the weld and formed $\beta(Al_3Mg_2)$ phase. The tensile test results showed that the maximum tensile strength of the joint could reach 307 MPa, which was about 96% of the base metal, and the fracture occurred in heat-affected zone with ductile fracture. Affected by the welding heat input, the hardness of the weld and heat-affected zone were lower than that of the base metal. With the increase of welding heat input, the hardness of the weld and heat-affected zone decreased.

Highlights: (1) The joints with good formation were obtained by optimizing the welding process parameters.
(2) The effect of welding parameters on the macro morphology and pore distribution of joints was studied.

收稿日期: 2022-01-12 修改日期: 2022-04-12 录用日期: 2022-05-08

(3) The effect of microstructure and element distribution in different regions on mechanical properties of the joint was clarified.

Key words: 5083-H111 aluminum alloy, MIG welding, microstructure, mechanical property

0 前言

铝合金作为一种典型的轻量化材料,因具有较高的比强度、良好的成形性和可焊性、优异的耐腐蚀性和低温韧性,被广泛应用于船舶制造、交通运输和液化天然气(LNG)运输船制造等行业^[1-2]。其中,5083 铝合金是一种不能热处理强化的 Al-Mg 系合金,Mg 在基体中的存在方式主要有 2 种,一是固溶于 Al 基体中,二是与基体中的 Al 形成 β (Al_3Mg_2) 相。此外,合金中还含有少量的 Mn,Fe,Si 等元素,能够有效增加合金的强度和耐腐蚀性,因此 5083 铝合金在所有非热处理强化型铝合金中强度最高^[3-4]。

焊接作为一种传统的连接技术,在铝合金材料的大规模应用中发挥着不可替代的作用。目前,国内外关于铝合金焊接的研究主要集中在搅拌摩擦焊(FSW)^[5-6]、钨极氩弧焊(TIG)^[7-8]、熔化极气体保护焊(MIG)^[9-11]、高能束焊^[12-13]等方面。其中,Choi 等人^[14]通过改变搅拌头的转速,在不同参数下均获得了无缺陷的 5083 铝合金搅拌摩擦焊接头,并通过焊后敏化热处理,分析了焊接工艺参数对接头中 β 相形成和分布的影响规律。Umar 等人^[15]对 5083 铝合金进行脉冲 TIG 焊后,探究了不同脉冲电流持续时间(M_cT)对接头微观组织和力学性能的影响,当 M_cT 为 40% 时,采用不同的焊接电流均会促进焊缝中的 β 相沿晶界析出;当 M_cT 为 60% 时,采用较小的焊接电流有利于促进富 Mn 的细小第二相颗粒在晶界弥散析出,接头强度得到提升。Zhu 等人^[16]采用窄间隙 MIG 焊接工艺,制备了 30 mm 厚的 5083 铝合金对接接头,发现焊后极易产生侧壁气孔,气孔的形成和分布特征与熔池形状、散热方向以及晶粒的生长方向有关;通过调整焊接工艺参数可以控制侧壁气孔的数量。Li 等人^[17]采用振荡式激光对 5083 铝合金薄板进行焊接,分析了振荡频率和直径对焊缝宽度和气孔率的影响,发现较高的振荡频

率和较大的振荡直径有利于减小焊缝宽度,降低焊缝气孔率;细化焊缝晶粒,促进 β 相均匀分布。

常用的铝合金焊接方法中,MIG 焊具有生产成本低、生产效率高、工艺适用性强等优点,因而被广泛应用于汽车和船舶关键结构件的制造。然而,铝合金 MIG 焊缝区易产生气孔,热影响区软化严重,两者均会降低接头力学性能。因此,控制接头焊缝区气孔形成及分布和热影响区软化对提升铝合金 MIG 焊接头的力学性能尤为重要。

文中拟采用 MIG 焊对 6 mm 厚 5083-H111 铝合金热轧板进行焊接试验,研究焊接工艺参数对接头成形和焊缝气孔的影响规律,进一步分析接头微观组织和元素分布对力学性能的影响机理。

1 试验材料与方法

文中所用母材为 6 mm 厚 5083 铝合金热轧板,热处理状态为 H111(退火后进行适量的加工硬化),具有良好的强韧性。母材的抗拉强度为 320 MPa,断后伸长率为 23%,显微硬度为 80 HV,金相组织如图 1 所示。待焊母材尺寸为 200 mm × 150 mm × 6 mm。焊接过程中采用 ER5183 铝合金焊丝作为焊缝填充材料,直径为 1.2 mm,铝合金母材和焊丝的化学成分见表 1。

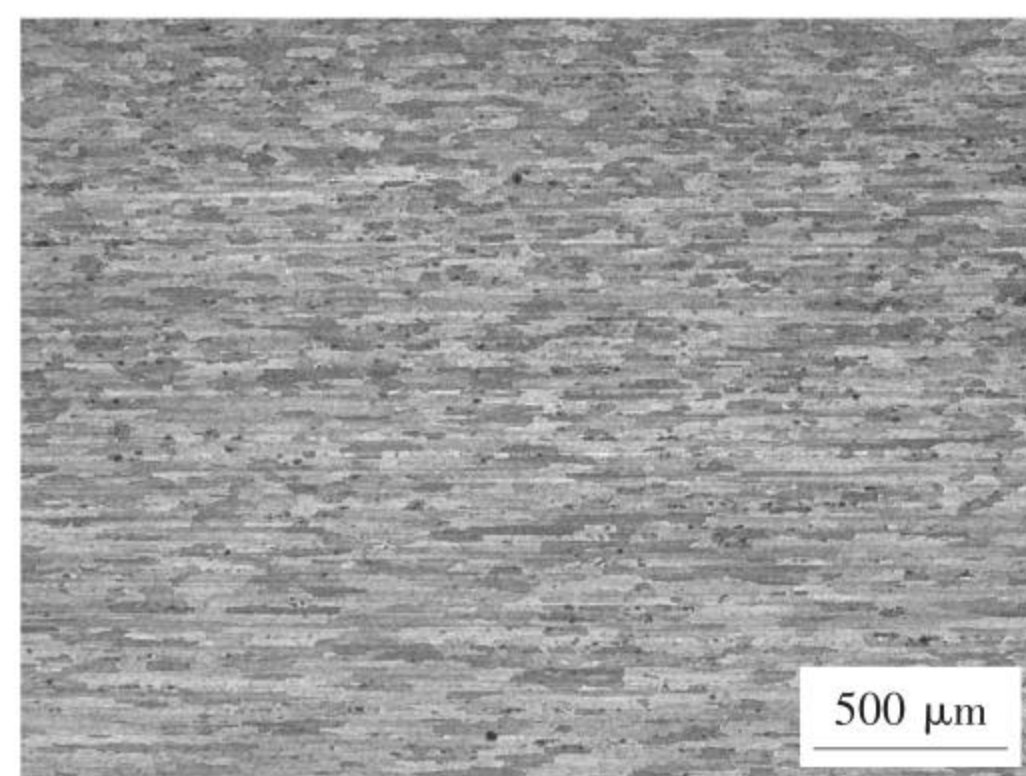


图 1 5083 铝合金热轧板金相组织

表 1 母材和焊丝化学成分(质量分数,%)

材料	Mg	Si	Fe	Mn	Cu	Cr	Zn	Al
5083	4.29	0.13	0.23	0.54	0.06	0.08	0.01	余量
ER5183	4.30 ~ 5.20	0.40	0.40	0.50 ~ 1.00	0.10	0.05 ~ 0.20	0.25	余量

焊接试验所用设备为 Fronius 公司生产的 TPS 4000Advance 型 CMT 焊机,采用一元化 MIG 焊接模式和自动化行走机构,实现铝合金母材的对接焊。焊接前,将母材加工成单边 35°的 V 形坡口,钝边为 1 mm。焊接前使用角磨机去除待焊区域 25 mm 宽度范围内的氧化膜,用无水乙醇清理表面油污。为抵消焊接热输入所产生的变形,对接间隙设置为 2 mm,以保证焊缝背面成形良好。焊接过程如图 2 所示,焊接时焊枪前进角约为 15°,焊丝伸出长度为 10 mm,焊缝及其附近区域采用高纯氩气(99.99%)保护,保护气流量为 20 L/min。具体焊接工艺参数见表 2。

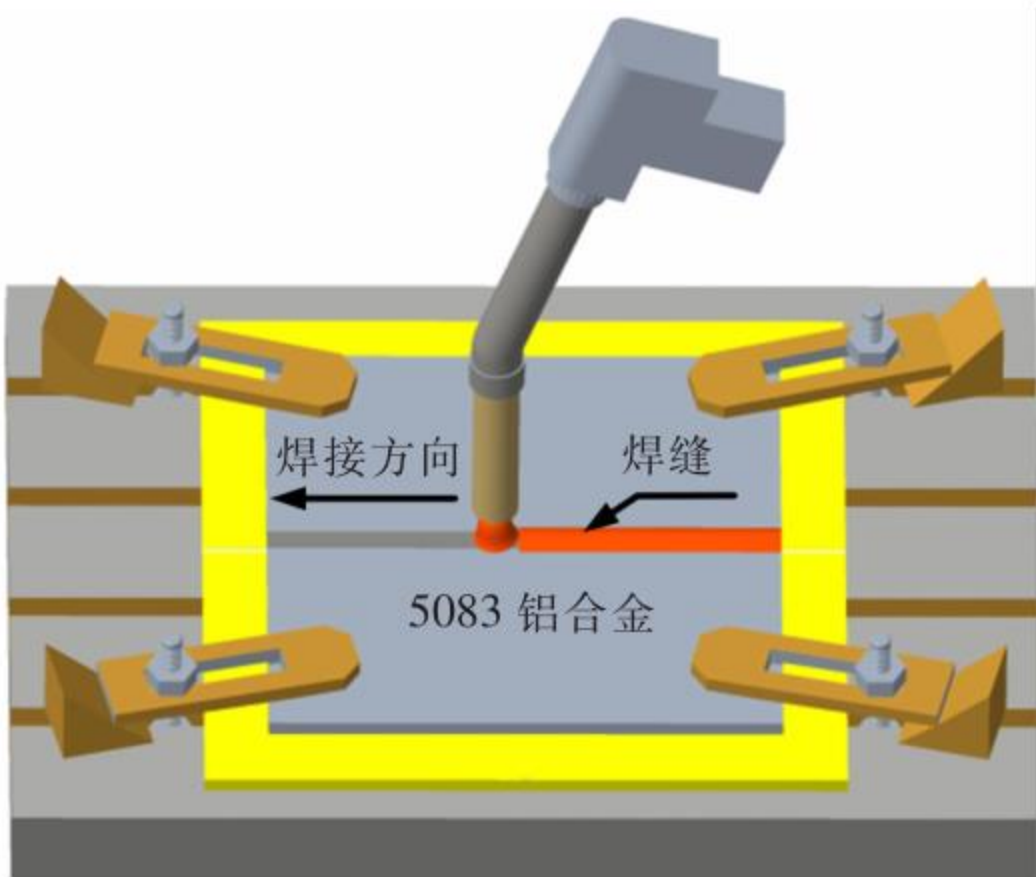


图 2 焊接过程示意图

表 2 焊接工艺参数

试样 编号	送丝速度 $v_1/(m \cdot min^{-1})$	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v_2/(mm \cdot s^{-1})$
1	10	182	18.8	6
2	11	198	20.3	6
3	12	211	21.7	6
4	13	238	23.1	6

根据 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》和 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验》标准,拉伸试样尺寸如图 3 所示。拉伸试验在 Instron-5982 型电子万能材料试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。将切取的金相试样打磨、抛光后,采用体积分数为 5% 的 HF(5 mL HF + 95 mL H₂O)进行腐蚀,腐蚀时间为 25 s。然后采用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子探针(EPMA)等设备对试样进行微观组织、断口形貌和元素分布测试分析。沿焊缝横截面进行硬度测试,每隔 0.5 mm 取一个测试点,载荷为 0.98 N,加载时间为 15 s。

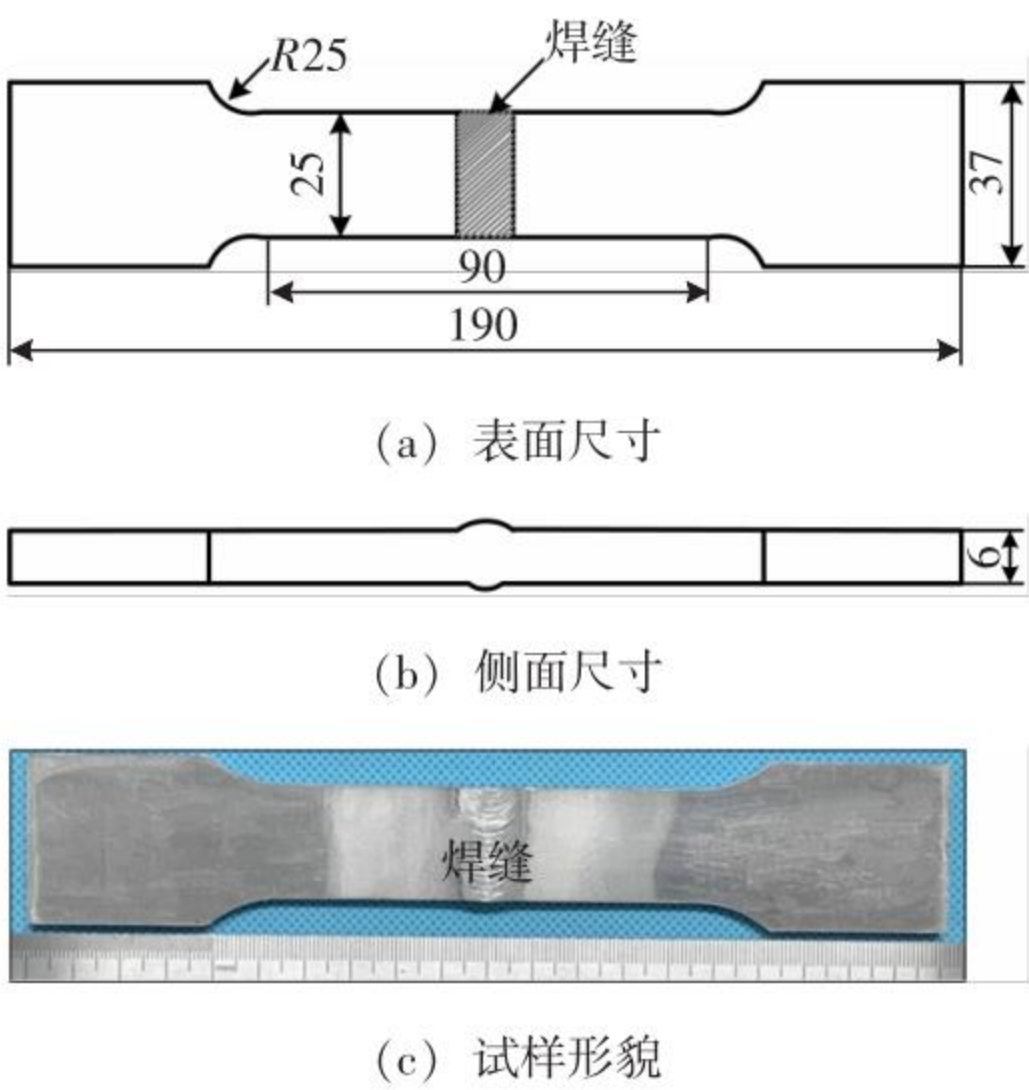


图 3 拉伸试样尺寸

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观形貌

5083 铝合金 MIG 焊对接接头的焊缝表面形貌和横截面形貌如图 4 所示。可见,不同焊接工艺参数下,母材均完全熔透,焊缝表面成形良好,鱼鳞纹均匀分布,不存在明显的咬边、未焊满、裂纹等缺陷。随着送丝速度增加,焊缝宽度逐渐增加,1 号、2 号、3 号、4 号接头的焊缝宽度分别为 12.5,14.2,14.8,15.9 mm,如图 5 所示。这是因为焊接电流随着送丝速度的增大而增大,导致焊接热输入增加,母材和焊丝的熔化量随之增加,从而导致焊缝宽度增大^[18]。在焊接过程中,5000 系铝合金容易在熔池中溶解大量的气

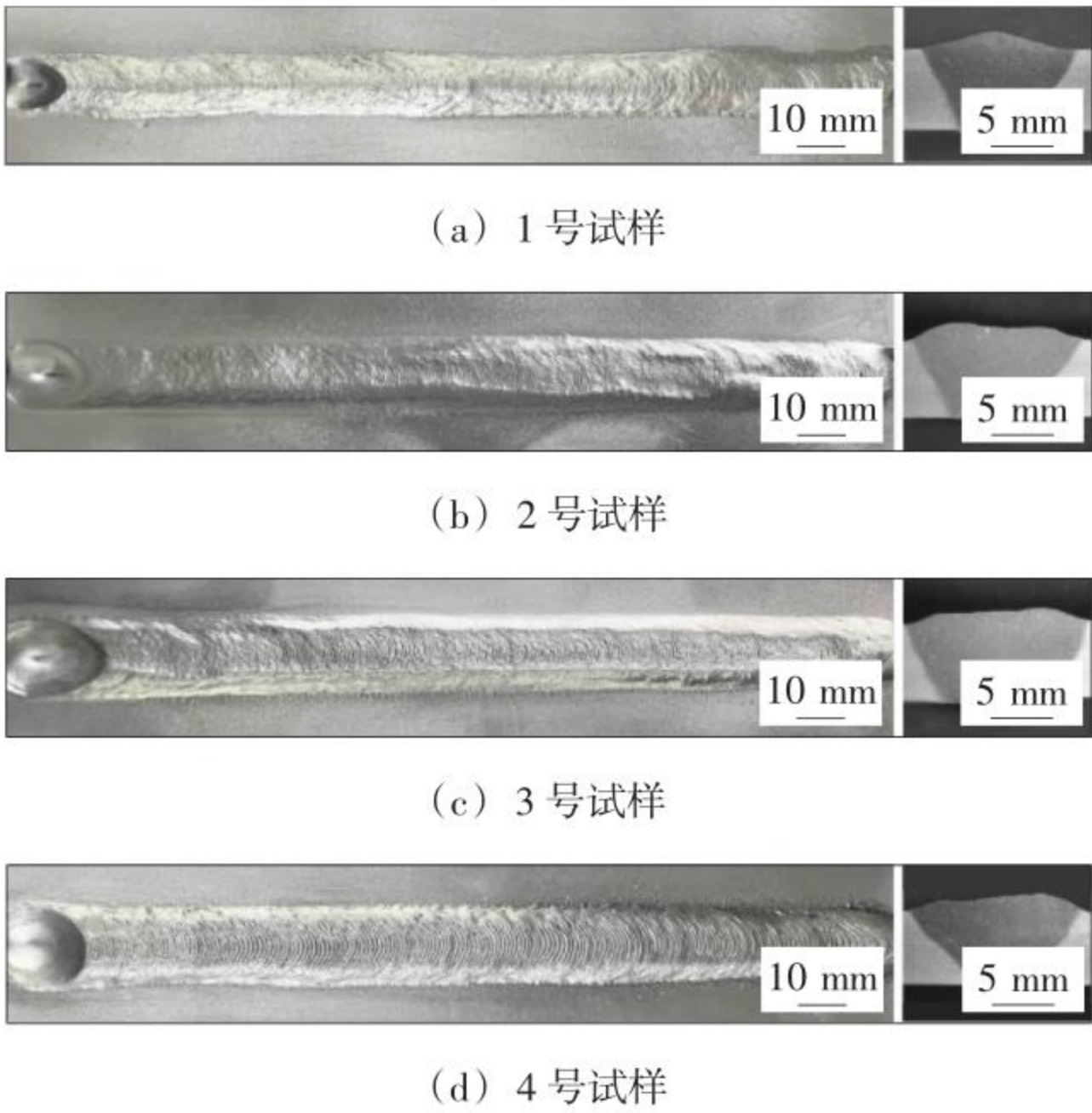


图 4 不同焊接工艺参数下的接头焊缝表面和横截面宏观形貌

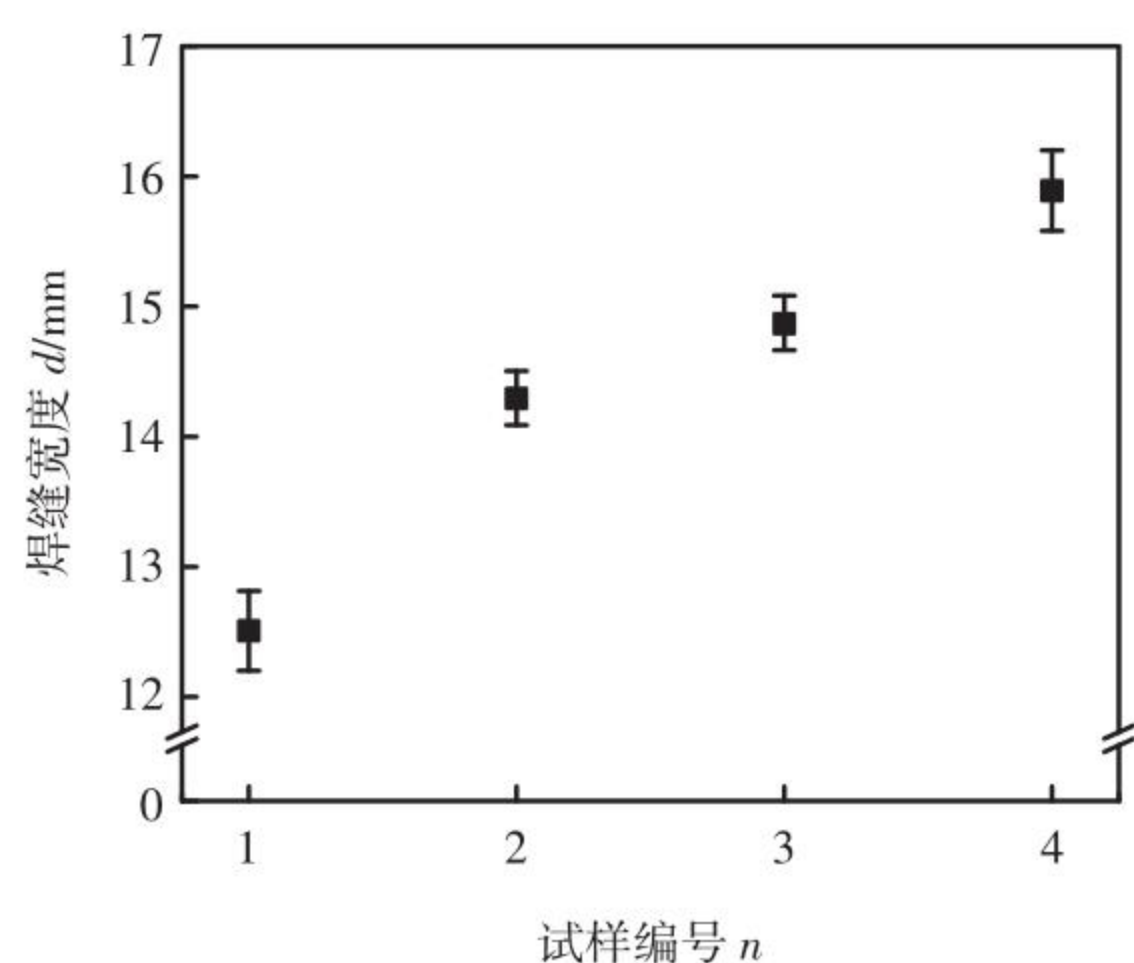
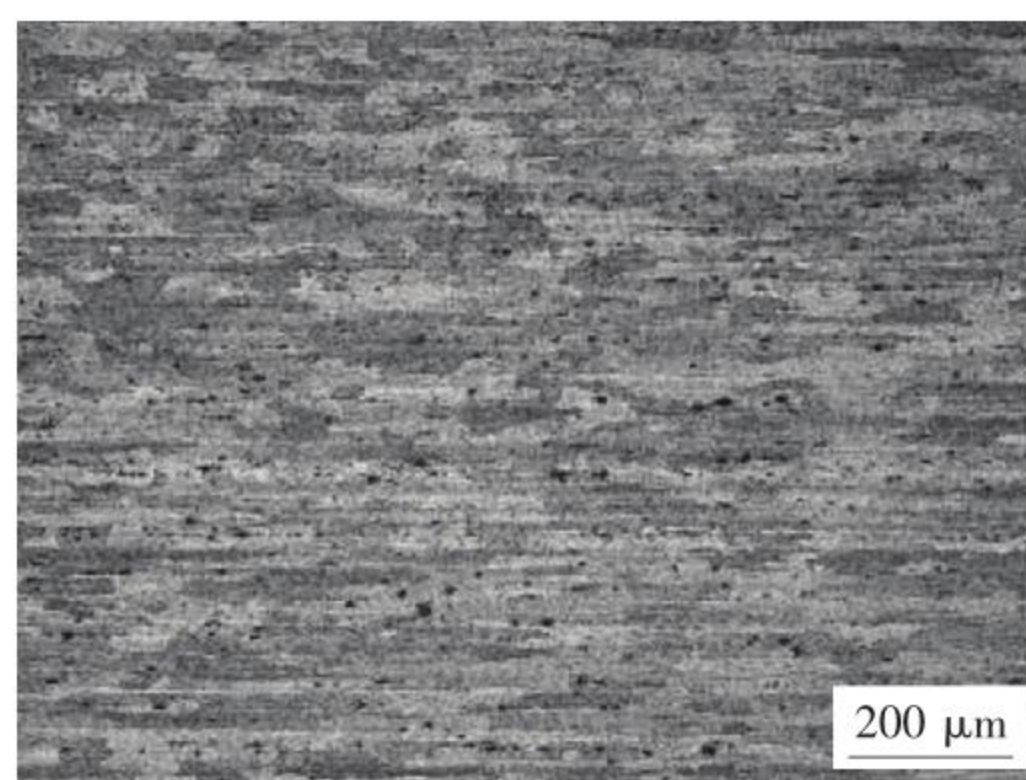


图5 不同焊接工艺参数下的焊缝宽度

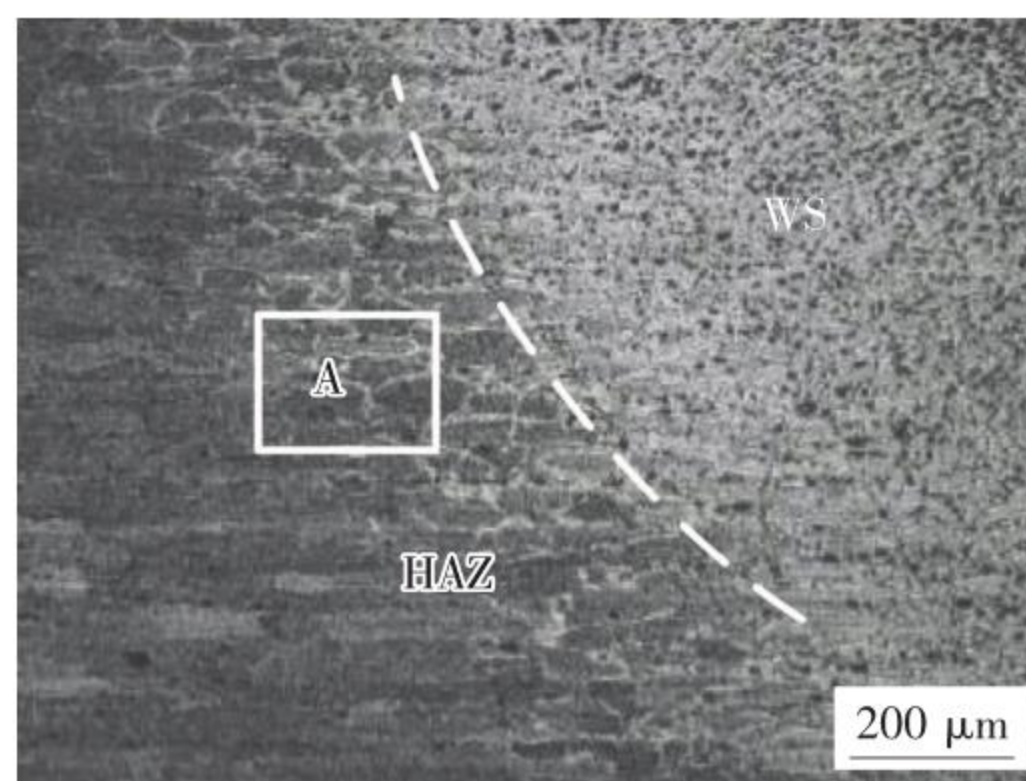
体,导致在焊缝中形成气孔。焊缝中的气孔率取决于凝固动力学,主要受焊接热输入的影响。当焊接热输入较大时,铝基体中的Mg元素蒸发严重,加剧了气孔的产生;但较高的热输入导致焊缝金属冷却缓慢,焊缝区高温停留时间延长,液态金属中的气泡有足够的时间上浮、合并、逸出,从而降低了焊缝中的气孔率^[19]。由此可见,热输入过大和过小均会增加接头中的气孔率,结合横截面形貌,可以观察到低热输入的1号接头和高热输入的4号接头中气孔数量相对较多,而中等热输入的2号和3号接头气孔数量较少,并且随着热输入增大,气孔趋向于分布在焊缝边缘处。

2.2 接头微观组织

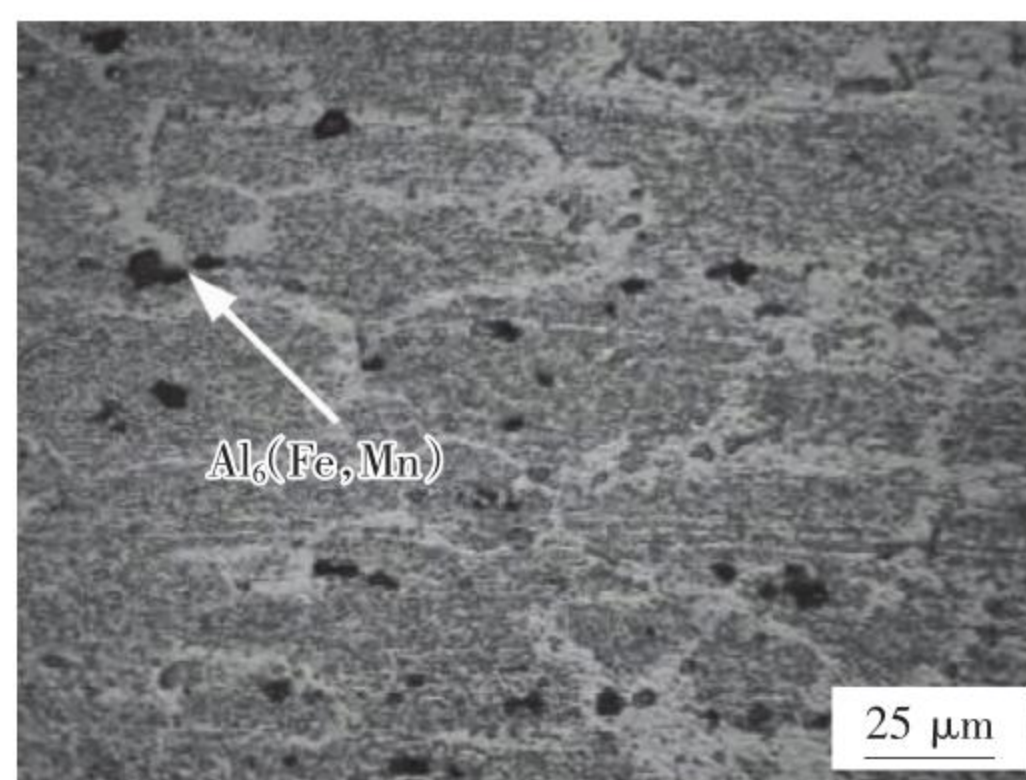
5083 铝合金对接接头不同区域的金相组织形貌如图6所示。由于焊接过程中的局部热循环作用,典型的焊接接头由母材(Base metal, BM)、热影响区(Heat-affected zone, HAZ)和焊缝(Weld seam, WS)3个不同的区域组成。由于5083-H111铝合金母材经历了轧制和退火工艺,因此母材中可以观察到沿轧制方向拉长的晶粒和少部分再结晶晶粒,如图6a所示。接头熔合线附近的组织如图6b所示。在焊接过程中,熔合线外侧的HAZ峰值温度高于母材的退火温度(300 °C),晶粒发生完全再结晶,并进一步长大,形成粗大的等轴晶;HAZ的晶界和晶粒内分布有黑色的第二相,这些第二相在焊接过程中受热长大,形成粗大的片状和颗粒状组织(图6c)。由文献[20]可知,这些第二相主要为 $Al_6(Fe, Mn)$ 和 Mg_2Si 相。熔合线附近的焊缝边缘处,晶粒垂直于熔合线形成柱状晶,这是因为在凝固过程中垂直于熔合线方向上具有最大的温度梯度;而焊缝中心区域的温度梯度相对较小,凝固过程中形成细



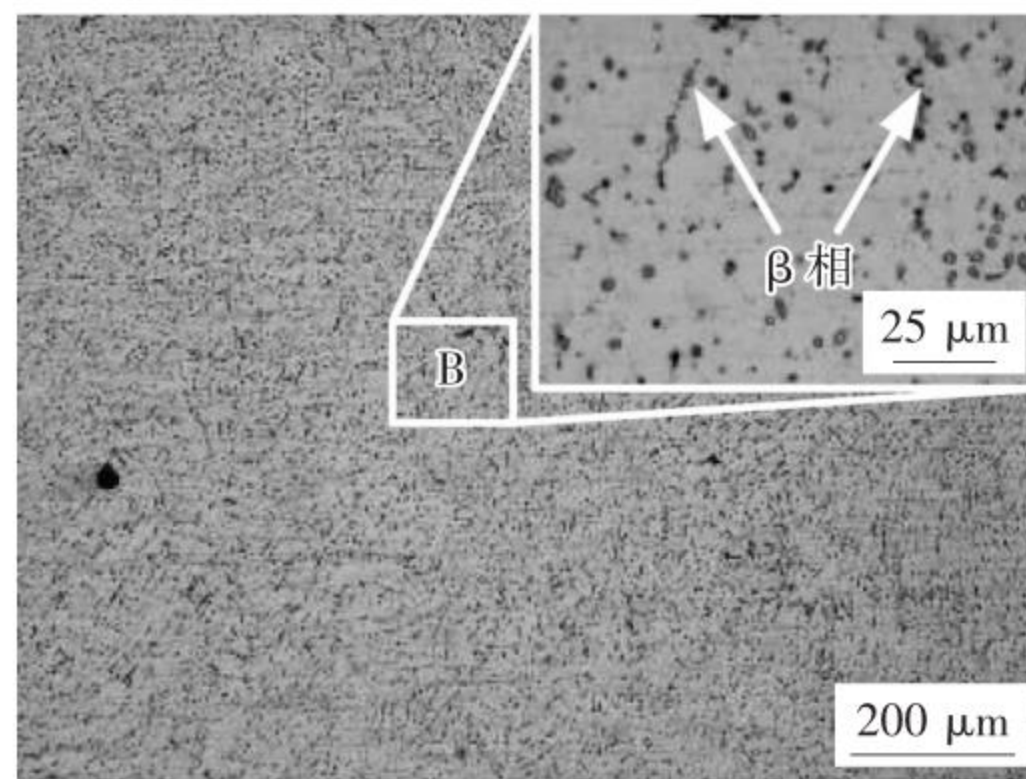
(a) 母材



(b) 熔合线附近



(c) A区放大图



(d) 焊缝中心

图6 典型接头的金相组织

小的等轴晶(图6d)。在焊缝中心处,基体中有大量 β 相(Al_3Mg_2)析出^[21],形状多为细小的椭球型,这些第

二相弥散分布于焊缝中(如图 6d 中的 B 区放大图),对焊缝起强化作用。

2.3 接头不同区域元素分布

采用电子探针(EPMA)对 5083 铝合金接头进行微区成分分析,不同区域的背散射电子像(BSE)和元素分布情况如图 7 ~ 图 9 所示。图 7 为 5083 铝合金母材的背散射电子像和元素分布图,可见 α -Al 基体呈深灰色,在基体中分布有沿母材轧制方向排列的白色和黑色第二相。由合金元素面扫描结果可知, α -Al 基体中白色片状和针状颗粒是 Fe 和 Mn 富集区,易与 Al 结合,形成 Al-Fe-Mn 型第二相颗粒。对不同形态的第二相进行元素定量分析(表3),根据原子比可以

推断 A 处为 $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相;B 处为 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相,两者均为 5000 系铝合金中常见的第二相^[22]。5083 铝合金中的 Mg 含量相对较高,Mg 会抑制 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相但促进 $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相的生成,因此在 5083 铝合金中多数 Al-Fe-Mn 型颗粒为 $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相,其尺寸较大,形态多为片状;而 $\text{Al}_3(\text{Fe}, \text{Mn})$ 相含量较少,呈针状;C 处为 Mg 和 Si 富集区,结合文献[23]可知,该处应为 Mg_2Si 颗粒,其尺寸较小,不易进行定量分析。 Mg_2Si 在 5000 系铝合金中的形成方式有 2 种,一种是沿富 Fe 相形核,如 $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$ 为 Mg_2Si 提供形核点位;另一种是在 α -Al 基体中独立形核并长大。

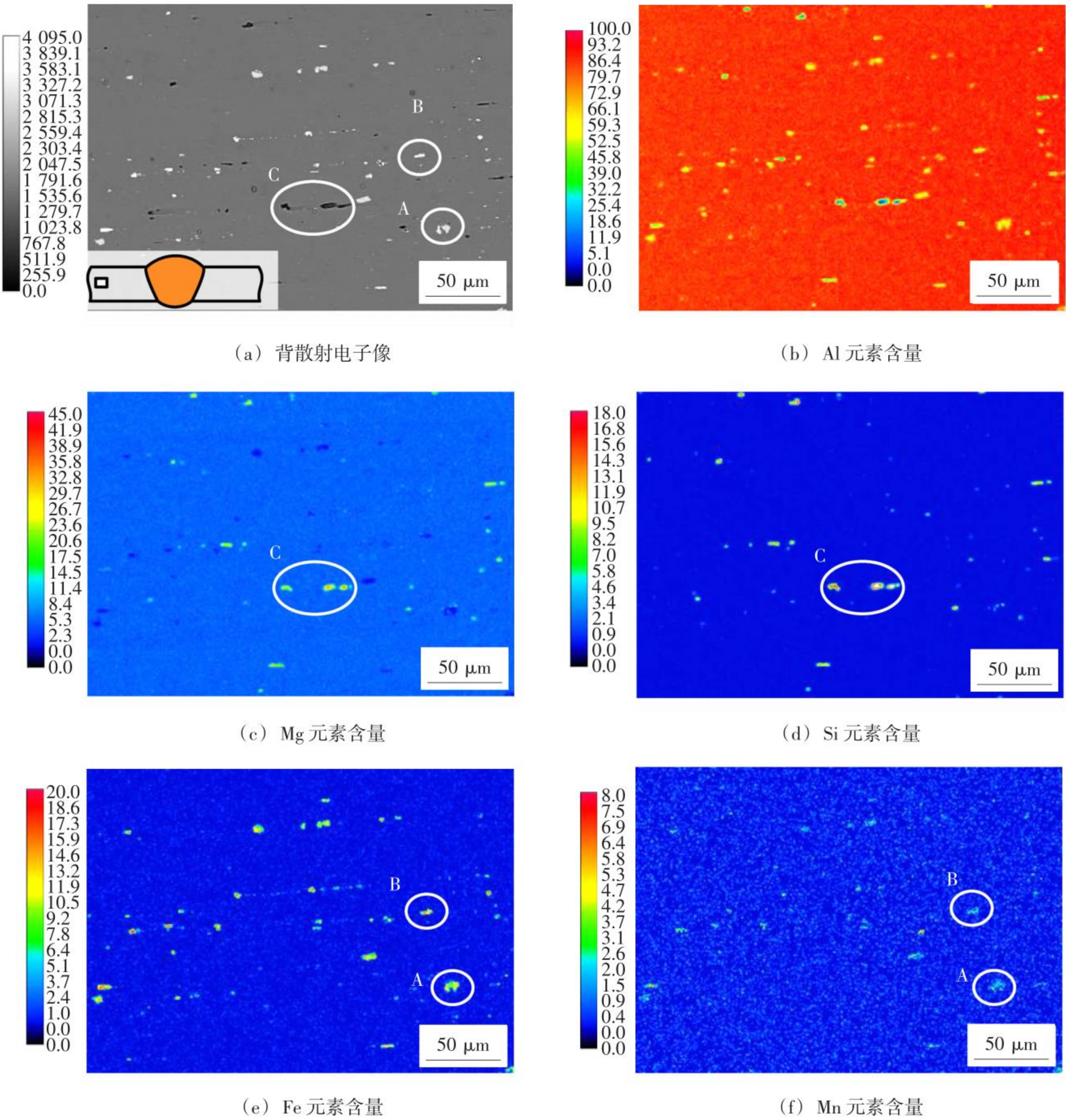


图 7 母材合金元素面扫描结果

5083 铝合金接头熔合线附近的背散射电子像和主要合金元素的分布如图 8 所示。从背散射相中可以看出,熔合线两侧的微观组织基本相同,在 α -Al 基体中都分布有黑色和白色的第二相。不同的是,熔合线附近的热影响区第二相尺寸较大,而靠近熔合线的焊缝区析出相尺寸较小,且呈弥散分布。从合金元素面扫描结果可知,热影响区的第二相长大较为严重,主要是因为焊接热输入促进了合金元素偏聚形成第二相;焊

缝边缘的晶粒垂直于熔合线方向生长,形成柱状晶。热影响区中的 Mg 和 Si 主要偏聚在同一位置,形成 Mg_2Si 相;焊缝中的 Mg 主要分布在晶界,而 Si 分布较为均匀。Fe 和 Mn 主要分布在热影响区,形成 $Al_6(Fe, Mn)$ 相,而焊缝中的 Fe 和 Mn 含量较低。受焊接热输入的影响,熔合线附近的热影响区中 $Al_6(Fe, Mn)$ 相呈粗大的片状颗粒,拉伸过程中易引起应力集中,成为整个接头的薄弱区域。

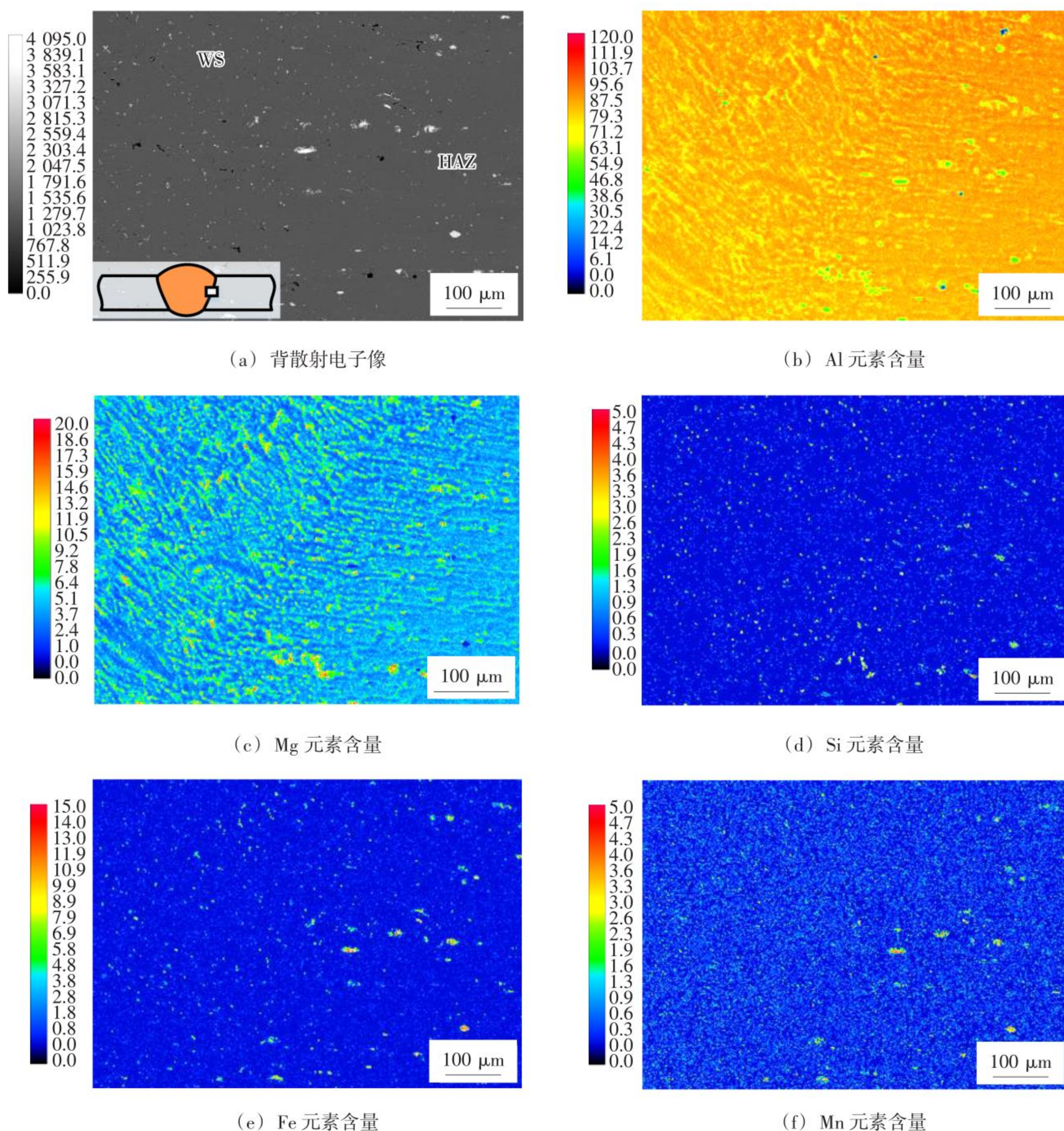


图 8 熔合线附近合金元素面扫描结果

焊缝中心区域的高倍背散射电子像和主要合金元素的分布如图 9 所示。由于焊缝区冷却速度较快,第二相来不及长大,因此可以从背散射电子像中看到焊

缝中心区域的析出相尺寸较小,形态多为针状和细小颗粒状。从合金元素分布可以看出, Mg 主要分布在焊缝区的枝晶晶界处,还有少量的 Mg 和 Si 偏聚形成细

小的 Mg_2Si 强化相。 Mg 在 Al 基体中的溶解度在 $996^{\circ}C$ 时可达 17.4% ，而在室温下 ($25^{\circ}C$) 仅有 1.9% 。在 $Al-Mg$ 系合金中， Mg 含量约为 5% ，高于室温下 Mg 的固溶度，焊后冷却过程中，过量的 Mg 倾向于沿晶界分布，导致 β 相 (Al_3Mg_2) 在枝晶间析出^[24-25]。 β 相是焊缝区的主要析出相，形状多为细小的椭球型，在焊缝中均匀分布，对焊缝起强化作用。焊缝区的 Fe 和 Mn

也有少量偏聚，形成 $Al-Fe-Mn$ 型第二相，但与母材和热影响区相比尺寸较小，形态多为针状。此外，由于焊缝区为铸态组织，凝固过程中熔池冷却速度较快，气体无法充分逸出，凝固后容易形成气孔，在背散射电子像中呈黑色规则椭圆形。当气孔尺寸较大时容易引起应力集中，同时也会降低接头的有效承载面积，恶化接头性能。

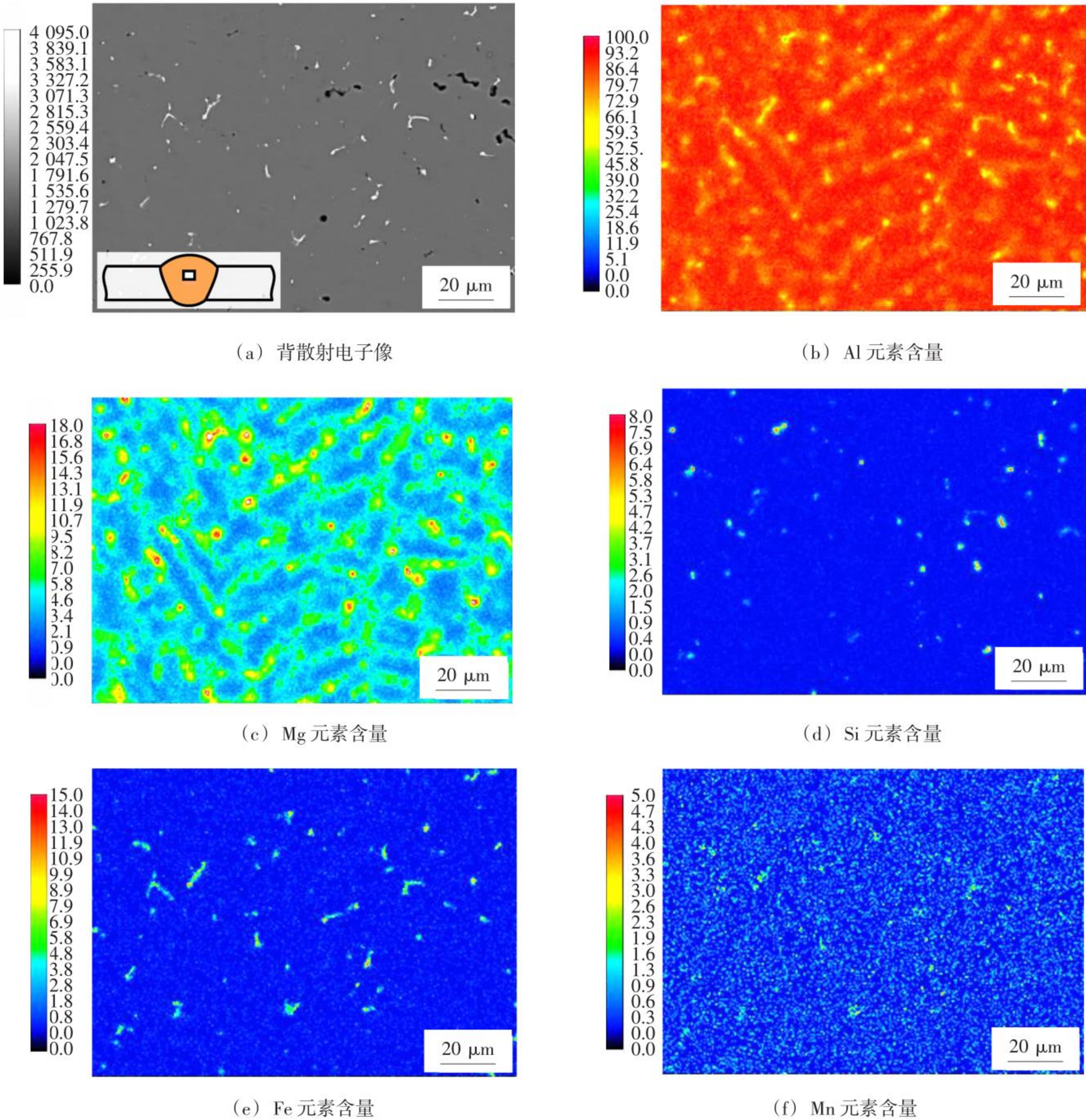


图9 焊缝中心区域合金元素面扫描结果

表3 元素定量分析结果(原子分数, %)			
位置	Al	Fe	Mn
A	84.83	8.24	5.38
B	72.91	15.17	8.93

2.4 力学性能与断裂分析

不同焊接工艺参数下接头的室温拉伸性能如图 10 所示。当送丝速度为 10 m/min 时，1 号接头的抗拉强度为 275 MPa ，断后伸长率为 10.1% 。随着送丝速度增加，接头强度也随之增加，2 号、3 号、4 号接头的强度

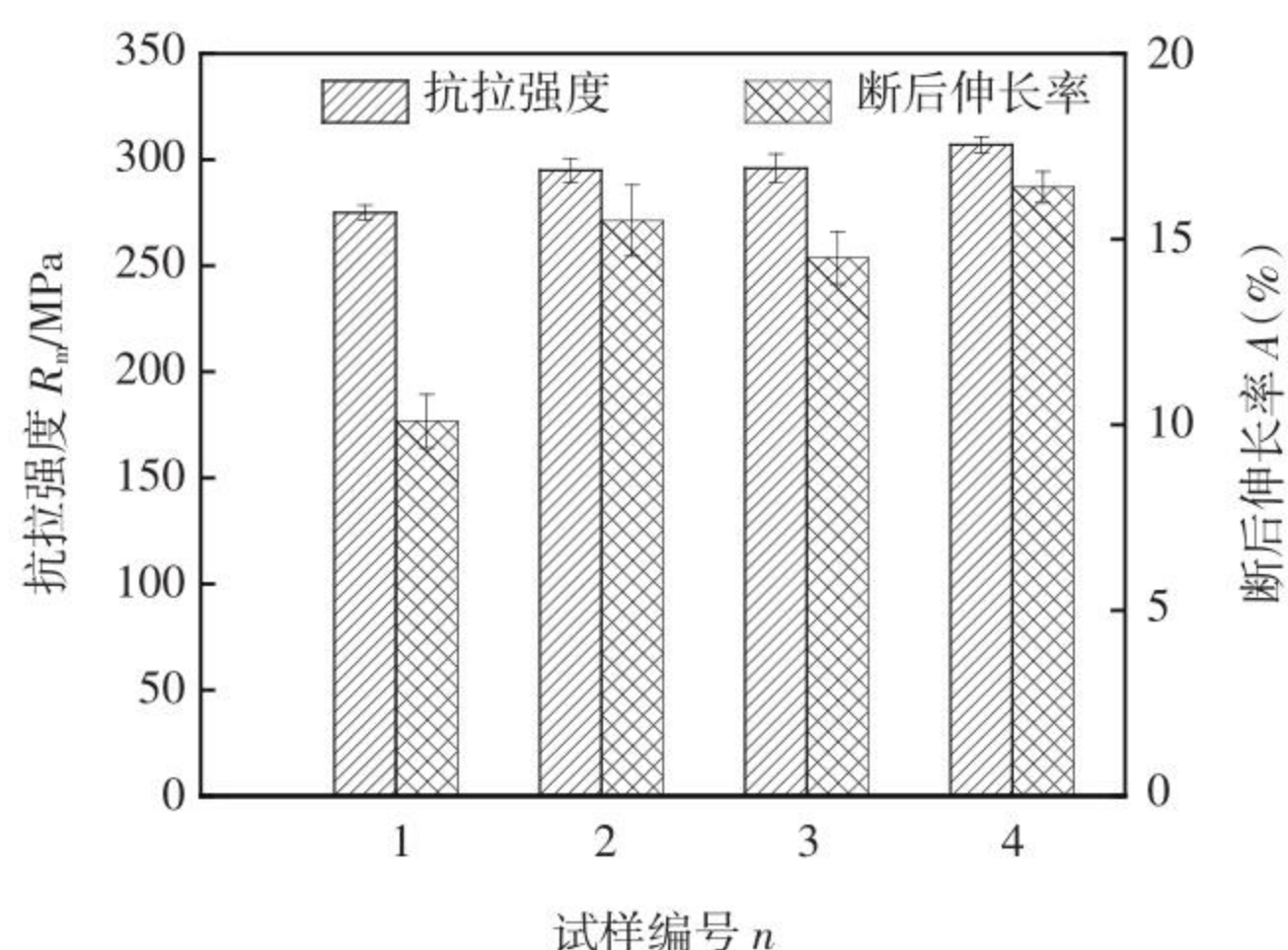


图10 不同参数下焊接接头的拉伸性能

分别为 295, 296, 307 MPa, 断后伸长率分别 15.5%, 14.5% 和 16.4%; 其中, 接头的最大抗拉强度达到了母材的 96%。接头的断裂位置如图 11 所示。当送丝速度较小时, 焊缝区大尺寸气孔数量较多, 容易成为裂纹源, 因此 1 号和 2 号接头主要断裂于焊缝区; 随着送丝速度增大, 焊接热输入逐渐增加, 焊缝中气孔数量减少, 但热影响区软化严重, 所以 3 号和 4 号接头断裂于熔合线附近的热影响区。

典型接头的断口形貌如图 12 所示。1 号和 4 号试样断口表面均由大量微孔结合形成的韧窝组成, 表明断裂模式是韧性断裂。1 号试样断裂于焊缝区, 由于焊缝区是铸态组织, 且气孔较多, 因此塑性较差, 断口中

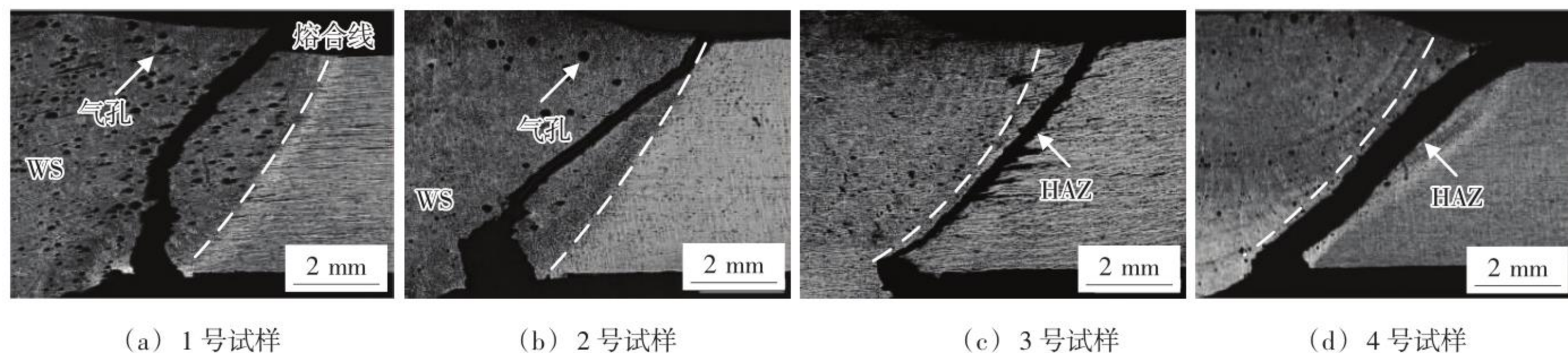


图11 不同参数下接头断裂位置

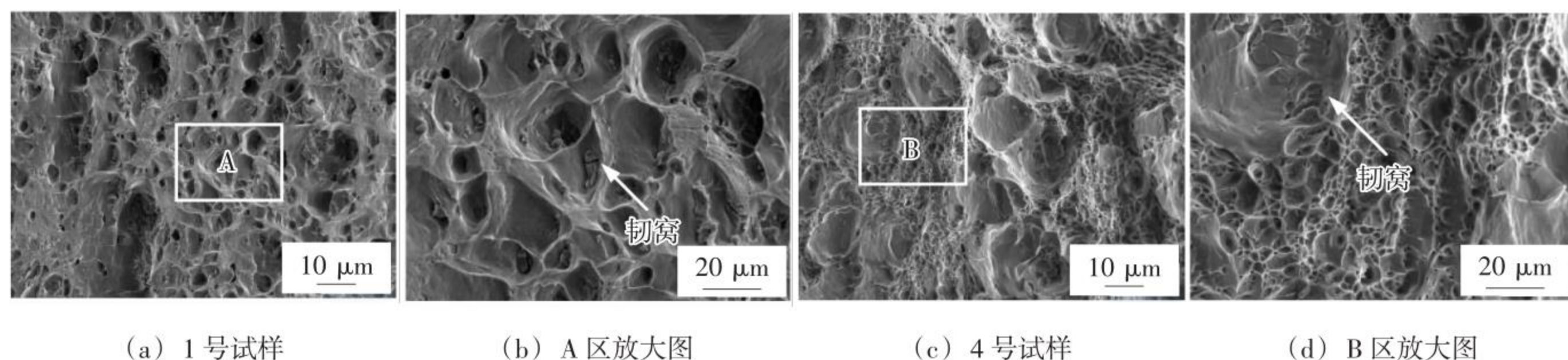


图12 接头断口形貌

的韧窝尺寸较小(图 12a)。从图 12c 可以观察到, 4 号试样断口中存在许多大尺寸韧窝, 表明在拉伸过程中 4 号试样变形更为充分, 塑性较好。观察 A 和 B 两个区域的放大图可知, 2 种接头的韧窝内部都存在大量的第二相颗粒, 1 号试样断裂在焊缝区, 第二相尺寸较小; 4 号试样断裂于热影响区, 第二相尺寸较大, 多呈片状。这些第二相在拉伸过程中会阻碍位错的运动, 有利于提高接头抗拉强度。

对送丝速度最大和最小的 2 种 MIG 焊接头分别进行硬度测试, 结果如图 13 所示。整个接头的硬度沿焊缝两侧呈对称分布, 1 号接头焊缝区的平均硬度为 72.8 HV, 4 号接头焊缝区的平均硬度为 70.6 HV。热影响区与焊缝区硬度值差别不大, 均低于母材硬度(80 HV), 这

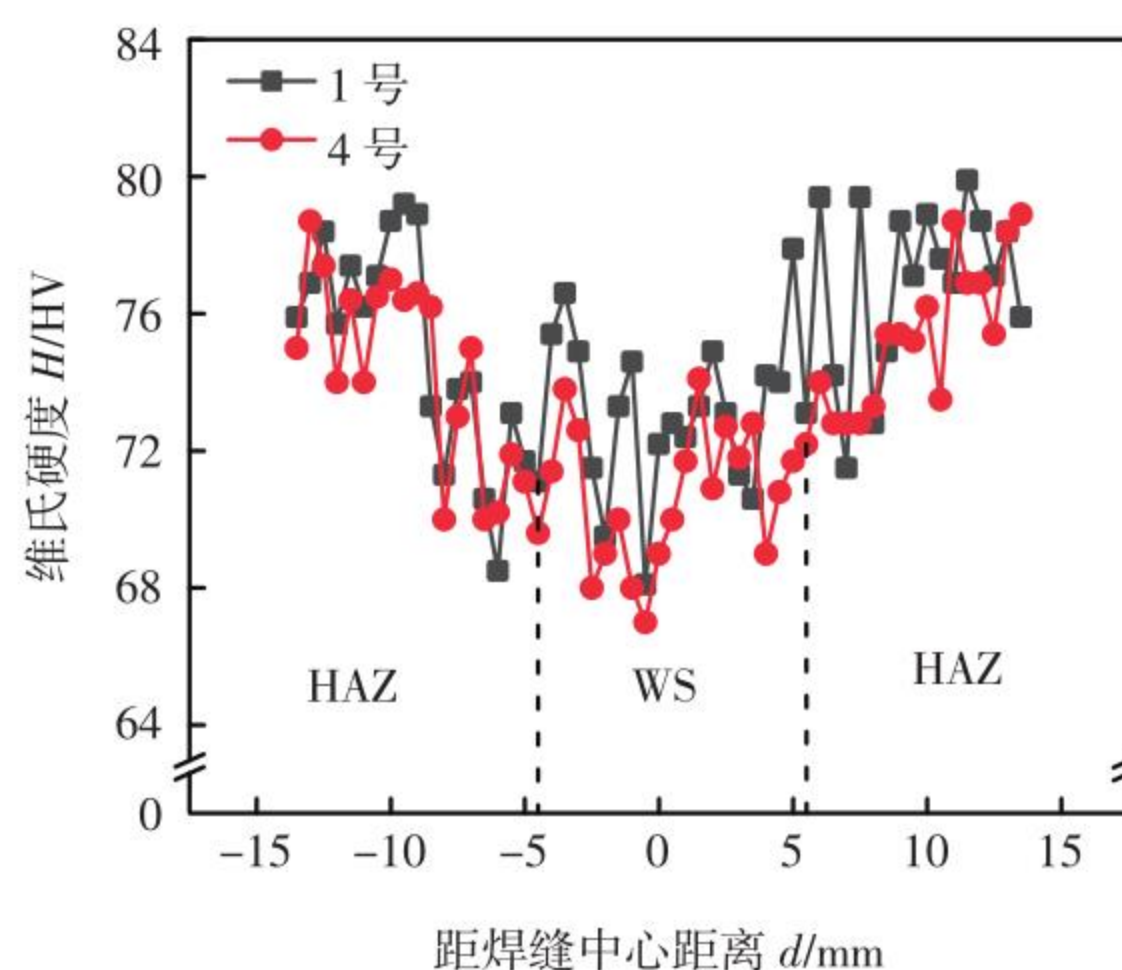


图13 接头显微硬度分布

是由于焊接时靠近焊缝的热影响区温度较高, 远高于

析出相的时效温度,产生了过时效,使得热影响区内大量析出相长大,同时较大的热输入也会使晶粒粗化,从而导致硬度值降低。远离焊缝的热影响区受焊接热输入的影响较小,硬度值逐渐增大,直至母材硬度值。随着送丝速度增加,接头热影响区软化加剧,因此4号接头的硬度整体略低于1号接头。

3 结论

(1)不同焊接工艺参数下得到的5083-H111铝合金MIG焊对接接头表面成形良好,无明显缺陷;随着送丝速度增加,焊缝宽度随之增大;接头热影响区受焊接热输入影响,发生完全再结晶,形成了粗大等轴晶,而焊缝区为细小等轴晶。接头最大抗拉强度达到307 MPa,约为母材抗拉强度的96%,接头断裂于热影响区,呈韧性断裂。

(2)熔合线附近的热影响区中,Fe和Mn大量偏聚形成尺寸较大的片状 $Al_6(Fe, Mn)$ 相,Mg和Si偏聚形成不规则的 Mg_2Si 相;焊缝中的Mg主要分布在晶界,与Al形成 β 相(Al_3Mg_2), β 相在焊缝中弥散分布,有利于强化焊缝。

(3)不同焊接工艺参数下5083-H111铝合金MIG焊对接接头的硬度整体呈对称分布;受焊接热输入影响,焊缝和热影响区的硬度低于母材,随着焊接热输入增加,焊缝和热影响区的硬度降低。

参考文献

- [1] Huang L J, Hua X M, Wu D S, et al. Microstructural characterization of 5083 aluminum alloy thick plates welded with GMAW and twin wire GMAW processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 1809-1817.
- [2] Yan J F, Hodge A M. Study of β precipitation and layer structure formation in Al 5083: The role of dispersoids and grain boundaries[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 703: 242-250.
- [3] Yi G S, Sun B H, Poplawsky J D, et al. Investigation of pre-existing particles in Al 5083 alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 461-469.
- [4] Samiuddin M, Li J L, Taimoor M, et al. Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization[J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1234-1248.
- [5] Al-Roubaiy A O, Nabat S M, Batako A D. An investigation into friction stir welding of aluminium alloy 5083-H116 simi-

- lar joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22(4): 2140-2152.
- [6] Gungor B, Kaluc E, Taban E, et al. Mechanical, fatigue and microstructural properties of friction stir welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys[J]. Materials and Design, 2013, 56: 84-90.
- [7] Vasu K, Chelladurai H, Ramaswamy A, et al. Effect of fusion welding processes on tensile properties of armor grade, high thickness, non-heat treatable aluminium alloy joints[J]. Defence Technology, 2019, 15(3): 353-362.
- [8] Cunha T V D, Voigt A L, Bohórquez C E N. Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 449-455.
- [9] Qing G B, Dong H G, Yang J, et al. Texture and mechanical properties of metal inert gas welded 6082-T651 aluminum alloy joints[J]. China Welding, 2021, 30(1): 1-12.
- [10] Mercan E, Ayan Y, Kahraman N. Investigation on joint properties of AA5754 and AA6013 dissimilar aluminum alloys welded using automatic GMAW[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020, 23(4): 723-731.
- [11] Ma M Y, Lai R L, Wang B, et al. Effect of weld reinforcement on tensile and fatigue properties of 5083 aluminum metal inert gas (MIG) welded joint: Experiments and numerical simulations[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 144: 106046.
- [12] Jia Z Y, Zhang P L, Yu Z H, et al. Effect of pulse shaping on solidification process and crack in 5083 aluminum alloy by pulsed laser welding[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134: 106608.
- [13] Huang Y, Shen C, Hua X M, et al. Effects of Mg content on keyhole behaviour during deep penetration laser welding of Al-Mg alloys[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 125: 106056.
- [14] Choi D H, Ahn B W, Jung S B, et al. Behavior of β phase (Al_3Mg_2) in AA 5083 during friction stir welding[J]. Intermetallics, 2013, 35: 120-127.
- [15] Umar M, Sathiya P. Influence of melting current pulse duration on microstructural features and mechanical properties of AA5083 alloy weldments[J]. Materials Science & Engineering A, 2019, 746: 167-178.
- [16] Zhu C X, Tang X H, He Y, et al. Characteristics and formation mechanism of sidewall pores in NG-GMAW of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 274-283.

[下转第53页]

化物,同时其中部分又与 NaCl 发生反应,形成 FeCl_3 等物质。

参考文献

- [1] 李晓迪. 加热温度对银基钎料/钎剂及其钎焊接头组织和性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2019.
- [2] 王博, 龙伟民, 钟素娟, 等. 钎料钎剂复合型绿色钎料研究进展[J]. 电焊机, 2021, 51(2): 1-9.
- [3] 董博文, 龙伟民, 钟素娟, 等. 药芯钎料的研究进展[J]. 机械工程材料, 2019, 43(10): 1-5.
- [4] 张雷, 吴铭方, 浦娟, 等. Ag30CuZnSn 药芯钎料润湿性及钎缝性能研究[J]. 热加工工艺, 2022(1): 39-41.
- [5] Yu Hua, Zhang Liangliang, Li Shuai, et al. Phase analysis and corrosion behavior of brazing Cu/Al dissimilar metal joint with BA188Si filler metal[J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10(1): 1318-1328.
- [6] 吕登峰, 陈宝玉, 钟素娟, 等. 新型环保药皮钎料环的研制及应用[J]. 焊接, 2017(4): 17-20.
- [7] 张冠星, 钟素娟, 程亚芳, 等. 基于紫铜/黄铜钎焊的新型无银铜磷锡复合钎料[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 33-36.
- [8] 黄俊兰, 龙伟民, 董显. 铜磷锡药皮钎料的润湿性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(3): 141-144.
- [9] 戴常青, 胡德安, 程东海, 等. Zn-Al 钎料在紫铜板上的润湿性行为及界面研究[J]. 稀有金属, 2020, 44(9): 905-911.
- [10] 黄森. 药芯钎料对铜/铝接头组织与性能的调控研究[D]. 北京: 机械科学研究总院硕士学位论文, 2019.
- [11] 李齐龙. 不同环境压力下 X65 钢焊接接头在模拟海水中的腐蚀行为研究[D]. 西安: 西安理工大学硕士学位论文, 2017.
- [12] Ansari T Q, Huang H, Shi S Q. Phase field modeling for the morphological and microstructural evolution of metallic materials under environmental attack[J]. Computational Materials, 2021(1): 1299-1319.
- 第一作者: 张冠星, 博士, 高级工程师; 主要从事新型钎焊材料与成形工艺方面的研究工作; 15225151538@163.com。
- (编辑: 曲畅)
-
- [上接第 28 页]
- [17] Li S R, Mi G Y, Wang C M. A study on laser beam oscillating welding characteristics for the 5083 aluminum alloy: Morphology, Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 12-20.
- [18] Nie F H, Dong H G, Chen S, et al. Microstructure and mechanical properties of pulse mig welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(3): 551-560.
- [19] Ling Y, Shen J Q, Hu S S, et al. Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6 aluminium alloy joints by TIG-CMT hybrid welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 161-174.
- [20] Huang L J, Wu D S, Hua X M, et al. Effect of the welding direction on the microstructural characterization in fiber laser-GMAW hybrid welding of 5083 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 514-522.
- [21] Zhu C X, Tang X H, He Y, et al. Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 214-224.
- [22] Engler O, Kuhnke K, Hasenclever J. Development of intermetallic particles during solidification and homogenization of two AA 5xxx series Al-Mg alloys with different Mg contents[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 669-681.
- [23] She X W, Jiang X Q, Zhang R H, et al. Study on microstructure and fracture characteristics of 5083 aluminum alloy thick plate[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 825: 153960.
- [24] Engler O, Miller-Jupp S. Control of second-phase particles in the Al-Mg-Mn alloy AA 5083[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 689: 998-1010.
- [25] Liu Y, Wang W J, Wei Y J, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminum 5083 weldments by gas tungsten arc and gas metal arc welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 549: 7-13.
- 第一作者: 王家威, 硕士; 主要研究方向为铝合金焊接工艺; wangjiawei184@163.com。
- 通信作者: 董红刚, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为异种材料连接工艺与冶金机理、焊接材料成分设计、焊接热过程数值计算; 已发表学术论文 150 余篇; donghg@dlut.edu.cn。
- (编辑: 曲畅)