



## Zr添加对7A52铝合金CMT+P焊接接头组织及性能影响

刘洪旭<sup>1,2</sup>, 侯旭儒<sup>2,3</sup>, 刘峰<sup>1</sup>, 赵琳<sup>2</sup>, 彭云<sup>2</sup>, 田志凌<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学 机械学院, 抚顺 113001;

2. 钢铁研究总院, 北京 100081;

3. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

**摘要:** 采用ER5356和ER5087两种焊丝对20 mm厚7A52铝合金进行冷金属过渡+脉冲焊接(CMT+P), 从焊接缺陷、晶粒尺寸及析出相等多方面研究Zr添加对焊接接头显微组织及力学性能的影响。结果表明: 两种接头成形良好且均无明显缺陷, 焊缝组织为铸态的等轴枝晶, 并发现条状或块状的富铁杂质相AlFeMn以及黑色相Mg<sub>2</sub>Si。相比于ER5356焊丝, 采用ER5087焊丝焊缝区的晶粒尺寸减小了28.7%, 并存在圆形及椭圆形的纳米级强化相Al<sub>3</sub>Zr。两种接头均获得较高的抗拉强度, 使用ER5356焊丝的接头强度约为293 MPa, 达到母材强度的59.4%, 而使用ER5087焊丝焊接接头的强度更高, 约为316 MPa, 焊接系数达到64.1%。两种接头的拉伸断裂位置均位于焊缝处, 拉伸断口也均以韧窝为主并伴随明显的撕裂棱, 表现为韧性断裂特征。

**关键词:** 7A52铝合金; CMT+P焊接; 焊丝成分; 显微组织; 力学性能

**文章编号:** 1004-0609(2022)-11-3352-13

**中图分类号:** TG146.2

**文献标志码:** A

**引文格式:** 刘洪旭, 侯旭儒, 刘峰, 等. Zr添加对7A52铝合金CMT+P焊接接头组织及性能影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3352–3364. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42750

LIU Hong-xu, HOU Xu-ru, LIU Feng, et al. Effect of Zr addition on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy CMT+P welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3352–3364. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42750

7A52铝合金是20世纪80年代我国自主研发的可热处理强化的7系铝合金, 该合金强化机制为时效强化, 经轧制、固溶及时效处理后, 可以获得强度高达500 MPa且综合性能优良的板材, 现已广泛应用于飞机机身结构、军工车辆、铁路运输和低温压力容器等众多领域<sup>[1–3]</sup>。目前, 该合金的焊接方法主要有熔化极气体保护焊(MIG)、激光焊(LBW)、电子束焊(EBW)以及搅拌摩擦焊(FSW)等。其中, 激光焊和搅拌摩擦焊设备比较昂贵, 电子束焊要求

真空环境, 这都对其实际应用造成了一定限制。冷金属过渡焊接技术(Cold metal transfer, 简称CMT)是奥地利Fronius公司研发的一种先进的数字化焊接技术, 该技术通过在熔滴过渡过程中形成短路电流, 同时机械回抽焊丝使熔滴脱落, 实现焊接过程“热—冷—热”交替转换, 不仅减小了焊接热输入, 而且实现了无飞溅过渡。因此, CMT技术可避免传统MIG焊引起的晶粒组织粗大和元素烧损等现象, 现已被越来越多的用于焊接铝合金及其他板

**基金项目:** 国防基础科研计划资助项目(JCKY2018512B001)

**收稿日期:** 2021-12-06; **修订日期:** 2022-03-03

**通信作者:** 赵琳, 教授, 博士; 电话: 13651333681; E-mail: hhnds@aliyun.com

材<sup>[4-5]</sup>。但是 CMT 焊接技术较低的热输入也会带来熔深较小和熔覆效率偏低的问题, 因而无法满足中厚板铝合金的焊接要求。为解决这一问题, Fronius 公司于 2012 年将 CMT 的短路过渡模式和脉冲 MIG 的射滴过渡模式相结合, 提出了一种新的焊接方法, 即冷金属过渡+脉冲焊接(简称 CMT+P)方法。文献[6-8]表明可以通过调节 CMT 和 MIG 波形比例实现对焊接热输入的精确控制, 从而使焊接过程更加稳定可控。

7A52 铝合金是可热处理强化的铝合金, 但在实际生产过程中大多数情况下无法进行焊后热处理, 因此焊丝成分就成为影响焊接接头性能的关键因素之一, 许多相关文献已经证实使用含稀有金属元素的焊丝有利于提高该合金焊接接头的综合性能。HUANG 等<sup>[9]</sup>采用 Al-6.3Mg-0.35Sc-0.1Zr-0.1Cr 焊丝焊接 7A52 铝合金后, 发现 Sc 元素的加入使熔合区晶粒细化, 凝固裂纹倾向降低; 徐振等<sup>[10]</sup>使用传统 ER5183 焊丝及复合添加 Sc, Er 的 5183 焊丝分别对 7A52 铝合金进行 TIG 焊, 发现单独添加 Sc 可以使接头的强度达到 332.4 MPa, 但并没有研究 Zr 元素的添加对接头性能的影响; ZHANG 等<sup>[11]</sup>采用窄间隙激光填丝焊成功焊接了 20 mm 厚 7A52 铝合金板, 结果表明采用 ER5E06(Er+Zr)焊丝, 接头的抗拉强度、屈服强度以及断后伸长率均高于 ER5183 焊丝, 虽然 ER5E06 焊丝中含有 Zr, 但却并不能说明单独 Zr 元素对接头性能的影响。

虽然已有文献研究了添加稀有金属元素对 7A52 铝合金焊接接头组织和力学性能的影响, 但目前关于稀有金属元素 Zr 对 7A52 铝合金焊接接头组织和性能的研究还比较少, 而且利用 CMT+P 焊接工艺焊接中厚板 7A52 铝合金也鲜有报道, 故本文采用 ER5356 和 ER5087 两种焊丝并利用 CMT+P 焊接工艺对 7A52 铝合金中厚板进行对接焊, 研究焊丝成分对焊接接头组织与性能的影响规律, 为提

高 7A52 铝合金 CMT+P 焊接工艺的可靠性提供依据。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

焊接所用母材为 20 mm 厚的 7A52 铝合金轧制板材, 热处理状态为固溶处理+人工时效(T6)。焊接材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 和 ER5087 焊丝, 母材的力学性能如表 1 所示, 母材和焊丝的化学成分如表 2 所示, 其中  $R_m$  为抗拉强度;  $R_{p0.2}$  为屈服强度;  $A$  为伸长率; HV 为硬度。

表 1 7A52 铝合金母材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of 7A52 aluminum alloy base metal

Alloy	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	Hardness, HV
7A52	493	436	11.5	150

### 1.2 实验方法

本文采用 CMT+P 焊接工艺对 7A52 铝合金板进行多层多道对接焊实验, 试板长×宽×高为 250 mm×125 mm×20 mm, 焊接方向垂直于轧制方向, 焊接设备包括 ABB 六轴联动机器人以及由 Fronius 生产的 TPS4000 CMT Advanced 焊机。采用角度为 60° 的 V 形坡口, 氦氩以体积比 1:1 混合 (50%He+50%Ar) 的保护气体, 层间温度控制在 60 ℃ 左右, 其他焊接工艺参数如表 3 所示, 焊接设备及焊接道次如图 1 所示。另外为了描述方便, 本实验中所采用 ER5356 焊丝焊接的接头记为 CP-A, 采用 ER5087 焊丝焊接的接头记为 CP-B。

焊后分别对两种焊丝的焊接接头进行组织与性能的分析。试样均在接头横截面方向截取, 金相试样经过研磨抛光后采用 Keller 试剂( $V(\text{HF}):V(\text{HCl}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:1.5:2.5:95$ )进行腐蚀, 腐蚀时

表 2 7A52 铝合金与焊丝的化学成分

Table 2 Chemical compositions of 7A52 aluminum alloy and welding wires

Alloy	Mass fraction/%									
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	Fe	Si	Zr	Al
7A52	4.39	2.44	0.17	0.40	0.15	0.11	0.13	0.04	0.11	Bal
5356	0.04	4.76	0.03	0.14	0.10	0.10	0.18	0.08	—	Bal
5087	0.02	4.59	0.02	0.75	0.06	0.10	0.16	0.05	0.13	Bal

表3 7A52 铝合金的CMT+P焊接工艺参数

Table 3 CMT+P welding parameters of 7A52 aluminum alloy

Welding current/ A	Welding voltage/ V	Welding speed/ (m·min <sup>-1</sup> )	Argon gas flow/ (L·min <sup>-1</sup> )	Diameter of welding wire/mm
220–240	21.9–22.4	0.36	18	1.2

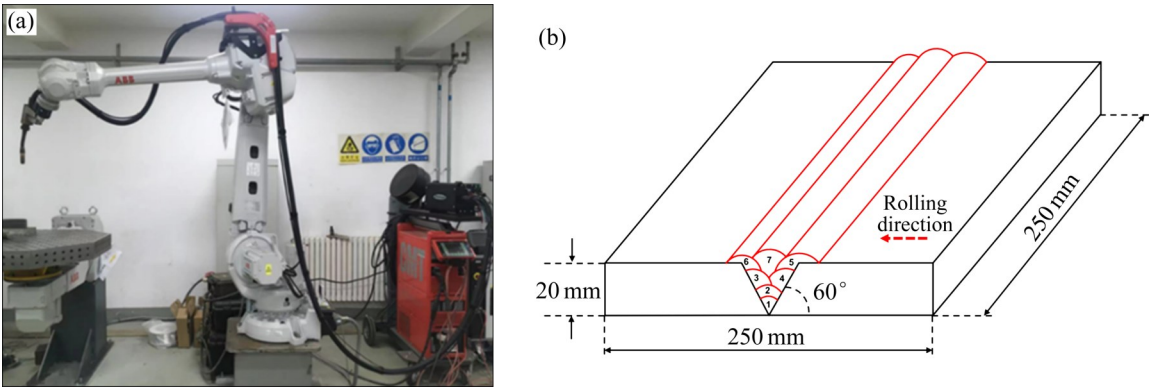


图1 焊接设备与焊接道次示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of welding equipment and welding passes: (a) Welding equipment; (b) Welding passes

间大约为 1.5 min。腐蚀后采用 Leica DMIL LED 显微镜进行显微组织观察；物相检测分析采用 XRD-6000 射线衍射仪进行，衍射靶为 Cu 靶，测量角度为 20°~100°，扫描速率为 2 (°)/min；在 Tecnai G2-F20 型透射电子显微镜上进行 TEM 测试，试样经机械减薄后，再双喷减薄，双喷腐蚀液采用体积比为 3:7 的 HNO<sub>3</sub>+CH<sub>3</sub>OH 溶液，温度为-30~-25 ℃；采用配有能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)探头的 Quanta650 场发射扫描电镜对拉伸断口形貌、断口第二相粒子成分以及焊缝析出相进行观察与分析；EBSD 样品经打磨、机械抛光后，采用 EP06 型电解抛光腐蚀仪进行电解抛光，电解液采用体积比为 1:9 的 HClO<sub>4</sub>+CH<sub>3</sub>OH 溶液。

室温拉伸力学性能测试在 Instron3369 型试验机上进行，拉伸测试标准采用 GB/T 228.1—2010，试样尺寸如图 2 所示，拉伸速度为 2 mm/min，拉伸方向垂直于焊缝轴线方向，结果取 2 组试样的平均值；显微硬度测试在 HVS-1000 型显微维氏硬度计

上完成，从焊缝中心开始向两侧母材逐点(间隔 0.5 mm)测量，其维氏硬度加载载荷为 1.96 N，加载时间为 10 s。

2 结果与分析

2.1 焊接接头的宏观形貌与显微组织

图 3 所示为两种焊接接头的宏观形貌及 X 射线探伤照片。由图 3 可见，两种接头均成型良好，表面基本无咬边或飞溅，截面和探伤照片(两虚线之间，蓝白色是焊道，深蓝色是焊道交界处)也无明显气孔、夹杂、未熔合及未焊透等焊接缺陷，说明使用 CMT+P 焊接工艺可以获得较为优良的焊接接头。值得注意的是，由于焊后 CP-A 试样接头背面余高较高且形状高低不平，所以经 X 射线探伤检测后，就呈现出如图 3(c)所示的白色链状特征。

图 4 所示为两种焊接接头的显微组织形貌。从图 4(a)和(c)可以发现，两种接头焊缝区(WZ)均为典型的铸态组织，呈等轴枝晶的组织形貌特征，弥散分布在晶内和晶界处的黑色点状物质是由于第二相经 Keller 腐蚀后形成的，CP-A 的第二相数量要略多于 CP-B。在焊接过程中，焊缝受电弧热的高温作用，填充焊缝的焊丝发生熔化形成液态熔池金属，当焊接完成后，由于铝合金散热较快，熔池中的液态金属随着温度降低快速冷却，致使凝固速率

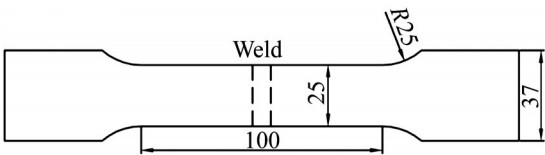


图2 拉伸试样尺寸  
Fig. 2 Tensile specimen size (Unit: mm)



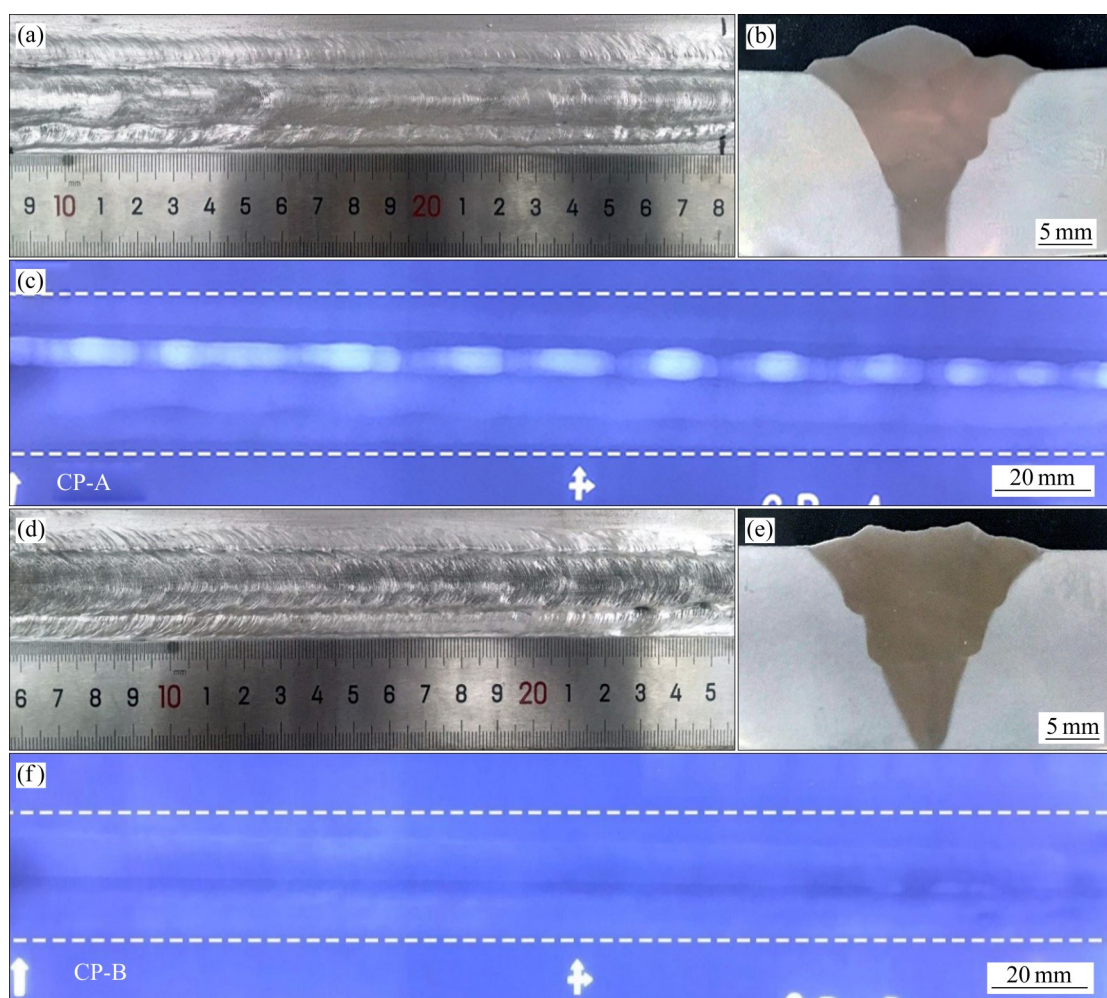


图3 不同焊丝焊接接头宏观示意图

**Fig. 3** Macro schematic diagrams of welding joints with different welding wires: (a) Macro-profile of CP-A; (b) Cross section of CP-A, (c) X-ray radiographs of CP-A; (d) Macro-profile of CP-B; (e) Cross section of CP-B, (f) X-ray radiographs of CP-B

增大, 形成类似铸态的枝晶组织; 图4(b)和(d)所示为两种接头熔合线附近区域的组织形貌, 包括焊缝区、部分熔化区以及热影响区, 其中部分熔化区(PMZ)宽度较小, 只有300  $\mu\text{m}$ 左右, 组织形貌是粗大的纤维状组织且两种接头的部分熔化区宽度基本相同, 在焊接热循环的作用下原来的形变组织发生了回复和部分再结晶, 这导致形变组织亚结构强化效应消失; 而热影响区的组织均为轧制态的纤维状组织, 所以这一区域仍然具有形变强化效果; 另外根据焊接温度场的分布特征, 焊缝熔池边缘的温度略高于母材的熔点, 由于过冷度较大晶粒来不及长大而形成细小的等轴晶。

对7A52铝合金两种焊接接头的焊缝区(WZ)进行EBSD分析, 结果如图5所示。图5所示依次为

两种焊丝焊缝区的IPF形貌图以及晶粒尺寸和取向统计柱状图, 从图5(a)和(d)中可以清晰看出晶粒结构基本为等轴状, 焊缝晶粒随机分布, 无明显的择优取向。晶粒尺寸统计结果如图5(b)和(d)所示, 其中CP-A的平均晶粒尺寸为45.04  $\mu\text{m}$ , 而CP-B的平均晶粒尺寸为32.13  $\mu\text{m}$ 。相比于前者, 添加了Zr的CP-B平均晶粒尺寸减小了28.7%, 说明Zr的加入可以在一定程度上细化焊缝晶粒。一般来说, 晶界分为取向角 $2^\circ\sim 15^\circ$ 之间的小角度晶界(Low angle grain boundaries, LAGBs)和取向角大于 $15^\circ$ 的大角度晶界(High angle grain boundaries, HAGBs)。晶粒取向统计结果如图5(c)和(f), 图中显示焊缝处的晶界以大角度晶界居多, 其中CP-A的大角度晶界比



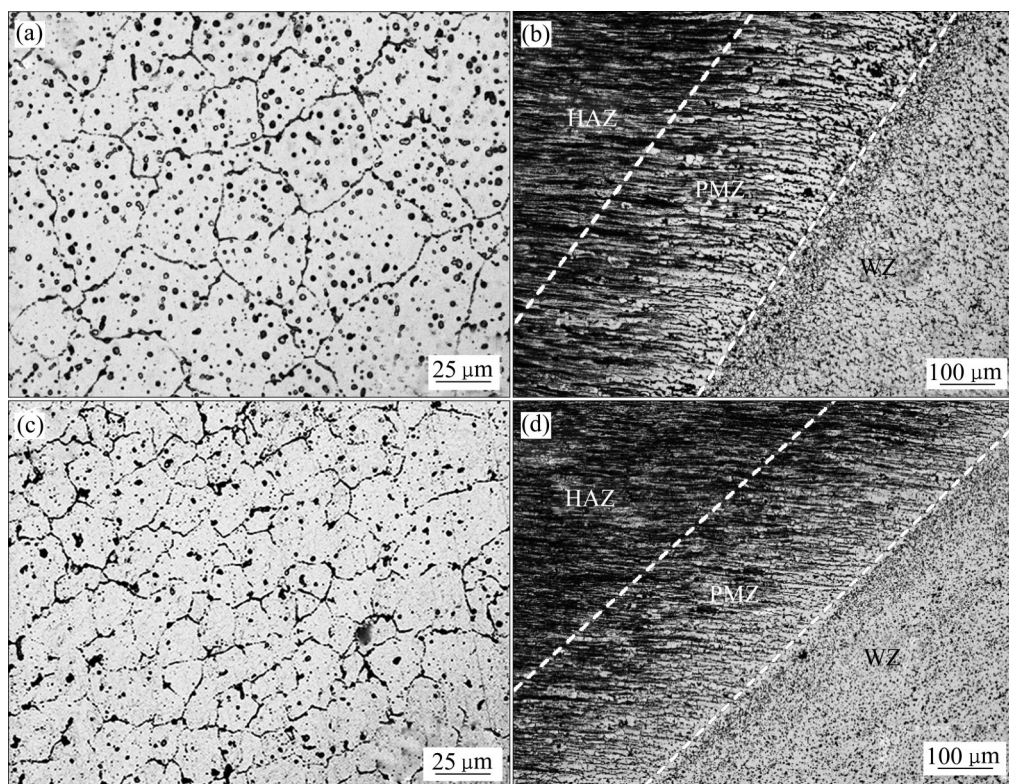


图4 7A52 铝合金焊接接头金相组织

**Fig. 4** Microstructures of welded joints of 7A52 aluminum alloy: (a) CP-A-WZ; (b) CP-A-HAZ; (c) CP-B-WZ, (d) CP-B-HAZ

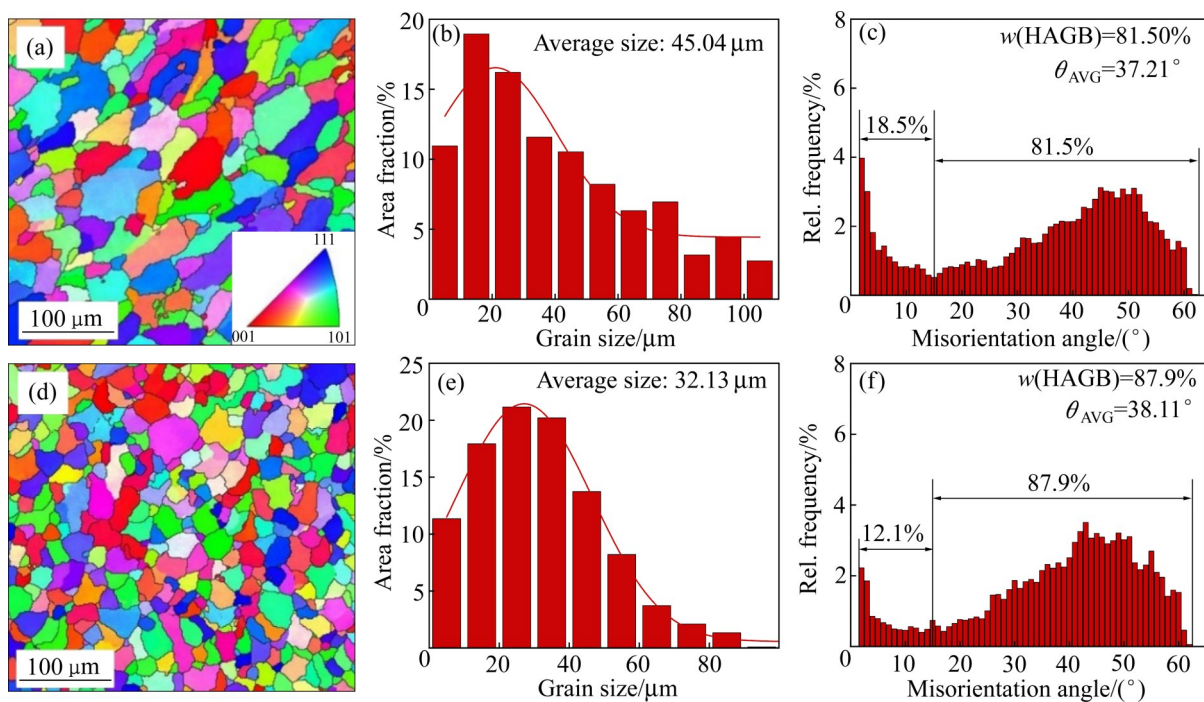


图5 7A52 铝合金焊接接头焊缝区 EBSD 测试结果

**Fig. 5** EBSD maps performed on WZ of welded joints of 7A52 aluminum alloy: (a) IPF of CP-A; (b) Grain size distribution of CP-A; (c) Grain orientation distribution of CP-A; (d) IPF of CP-B; (e) Grain size distribution of CP-B; (f) Grain orientation distribution of CP-B

例为81.5%,而CP-B的大角度晶界比例为87.9%。

晶粒尺寸和大小角度晶界的比例对材料的性能有较大的影响。由Hall-Petch公式:  $\sigma = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}$  ( $\sigma_0$ 与 $K_y$ 为常数,  $d$ 为晶粒尺寸)可知,晶粒尺寸越细小,材料强度越高。因此,CP-B晶粒尺寸较小,从而CP-B焊接接头具有更高的强度,并且,CP-B的大角度晶界较多,位错极易在这种晶界处塞积,并且大角度晶界的增多不但可以改变裂纹扩展的路径,还能使界面能升高,从而有效阻止断裂过程中裂纹的扩展,提高接头的韧性,而韧性一般为接头强度和塑性的综合体现,故大角度晶界占比的增多也可以对提高接头强度起到一定帮助<sup>[12]</sup>。

## 2.2 焊接接头的物相分析

7A52铝合金焊接接头的XRD物相分析结果如图6所示。由图6可知,焊缝区除了基体相 $\alpha(\text{Al})$ 的衍射峰外并没有发现其他明显的析出相,而在母材中发现了强化相 $\text{MgZn}_2$ 。焊缝只发现基体相的主要原因在于焊缝填充焊丝为5系Al-Mg焊丝,元素Zn的含量不高,再加之焊缝区在焊接过程中受热作用影响造成元素烧损,致使焊缝的强化相含量较低,而XRD对于含量小于2%的物相基本就无法准确地检测出来;而且 $\eta'$ - $\text{MgZn}_2$ 等强化相虽高度弥散分布,但由于其晶粒尺寸较小而较难发现,上述两点共同使得采用X射线衍射方法无法观察到它们明显的衍射峰。另外还发现,两个焊缝的衍射峰位置相比母材整体向左发生小角度偏移,这主要是由于焊缝的冷却速度较快,溶质原子来不及析出,使得焊

缝区因固溶强化所产生晶格畸变效果强于母材而造成的。

图7所示为两种焊接接头扫描电镜下的二次电子及EDS能谱图。由图7(a)和(b)可知,焊缝中的析出相主要为白色或灰白色的第二相,大多呈块状或条状,尺寸差别较大且分布方向没有明显的规律。为了确定析出相的成分,对其进行能谱分析后发现这些第二相主要富含Al、Mg、Fe、Mn等元素,另外有些还含有少量的Si和Cr元素。根据这些第二相的形貌、能谱分析以及相关研究报道<sup>[13-14]</sup>,这些析出相可以定性为富铁杂质相 $\text{AlFeMn}$ ,尺寸已达到微米级,区别在于第二相中不同的Fe、Mn的元素含量,图7(c)和(d)析出相中的Mn元素含量要低于图7(e)和(f)析出相中的Mn元素含量,而Fe元素的含量却刚好相反。这是因为 $\text{AlFeMn}$ 析出相当中的元素Mn与Fe比较相似的原子结构使它们可以相互替代,而且第二相中Mn元素含量的增多可有效抑制Fe的析出,ER5087焊丝中的Mn含量明显比ER5356中的高,故第二相中的Mn元素含量占比也相应提高。杂质元素Fe含量的减少降低接头拉伸断裂的可能,对提高接头强度具有一定的作用<sup>[14]</sup>。除了灰白色析出相,还发现了一些黑色物质,经能谱分析后发现,有些含有Al、Mg、C、O等元素(如图7(g)所示),这与基体相基本相同,应该是研磨抛光时由于析出相脱落造成的,而另一些主要含有Al、Mg、Si,如图7(h)所示,虽然也含有C和O元素,但通过文献<sup>[12-13]</sup>调研以及结合Mg和Si两种元素的原子比例可以推断是 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 相,它和 $\text{AlFeMn}$ 相一样,都属于结晶相,但尺寸相对较小,并且对接头塑性产生不良影响。

Al-Zn-Mg系铝合金是时效强化型铝合金,故其性能与纳米级沉淀强化相的种类、尺寸、分布以及数量密度等密切相关。7A52铝合金经过T6处理后,其时效析出序列一般为过饱和固溶体(SSS)→GP区→ $\eta'$ ( $\text{MgZn}_2$ )→ $\eta(\text{MgZn}_2)/\text{T}(\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3)$ 。为了进一步分析焊接接头的微观组织结构转变,对焊后两种接头的不同区域进行TEM观察,其结果如图8~10所示。

图8所示为两种焊接接头焊缝区的TEM像。从图8(a)可以看出,在CP-A的焊缝中只发现了位错,并未观察到明显的沉淀强化析出相;而在图8(b)中发现了细小的圆状或椭圆状的析出相,分布在CP-

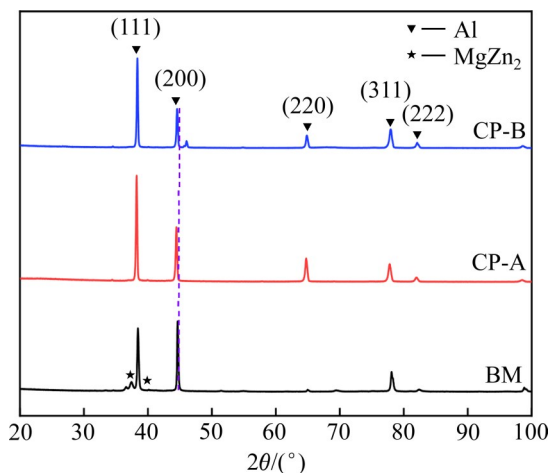


图6 7A52铝合金的XRD光谱分析

Fig. 6 XRD spectra analysis of 7A52 aluminum alloy



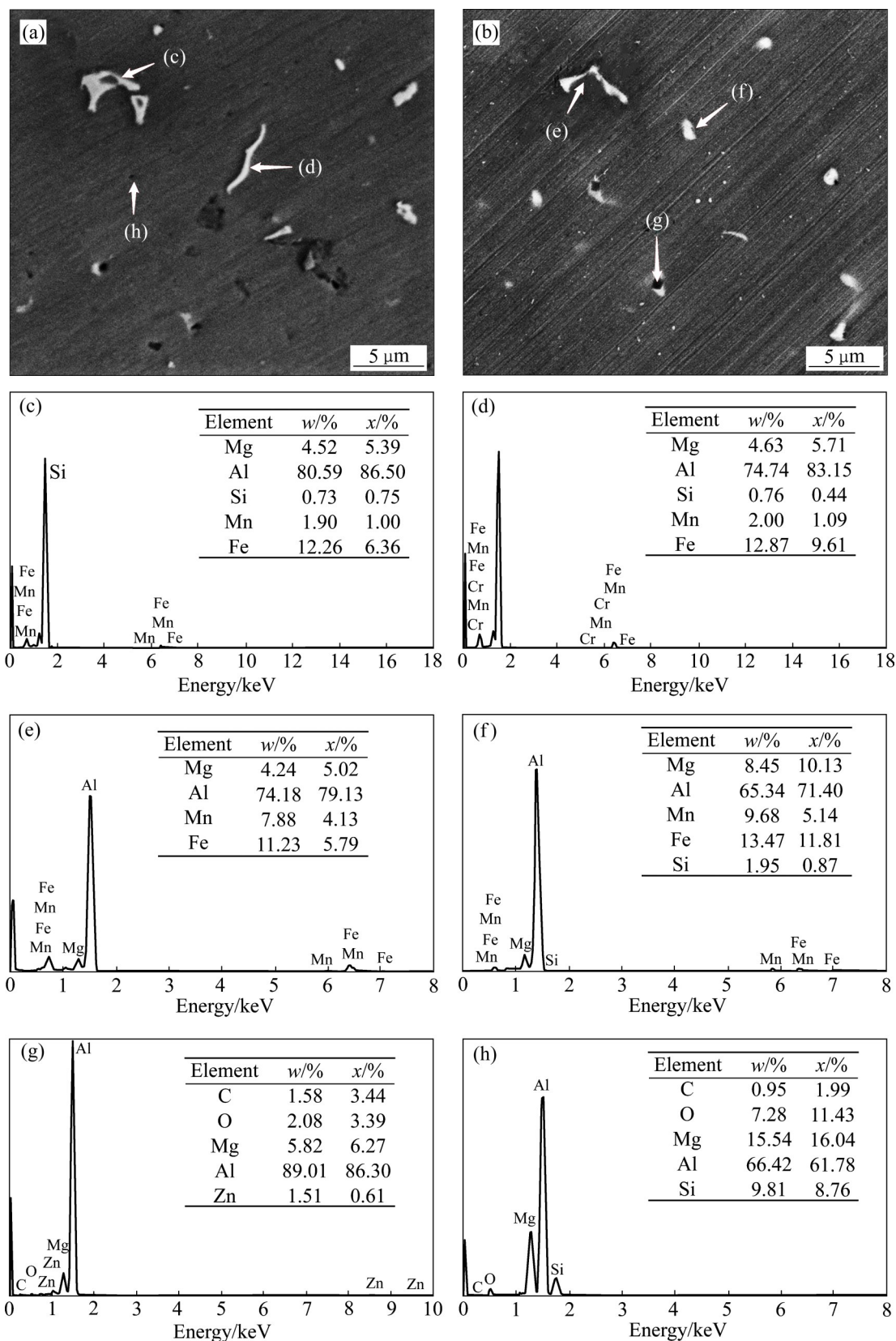


图7 7A52铝合金焊接接头焊缝区第二相粒子及EDS成分分析

**Fig. 7** Second-phase particles on WZ of welded joints of 7A52 aluminum alloy and EDS composition analysis: (a) CP-A; (b) CP-B; (c), (d) EDS composition analysis of CP-A; (e), (f) EDS composition analysis of CP-B; (g), (h) EDS composition analysis of black phase

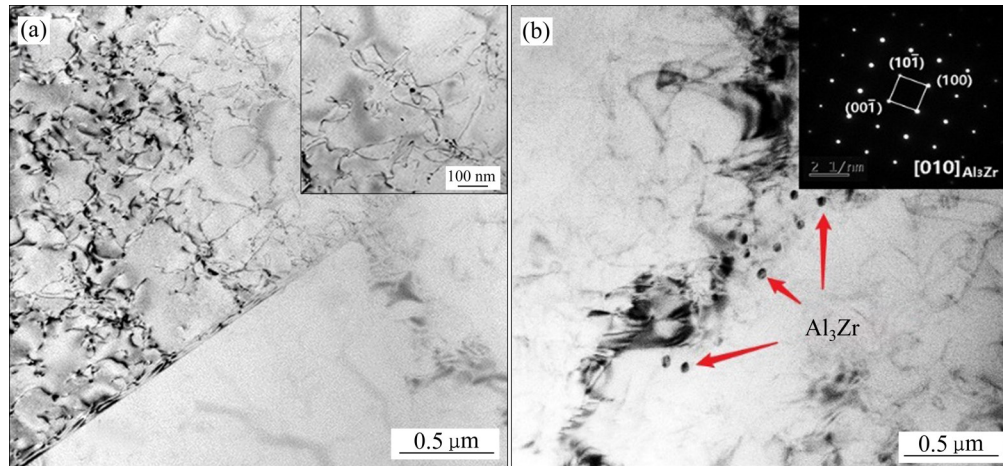


图8 两种接头焊缝区 TEM 的明场形貌及衍射斑图像

Fig. 8 Open field morphologies and diffraction pattern images of TEM in weld area of two kinds of joints: (a) CP-A; (b) CP-B

B 的焊缝晶界附近, 尺寸为 30~50 nm, 经衍射斑点和能谱点扫分析确定为四方结构的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  强化相。纳米级强化相  $\text{Al}_3\text{Zr}$  的析出对接头的力学性能有很大的影响。相关文献<sup>[15-18]</sup>均已表明, 在凝固过程中 Zr 能够同 Al 发生一系列包晶反应生成难溶的初生相  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , 该相具有良好的热稳定性以及与铝基体极高的晶格常数匹配度, 因此可以成为  $\alpha(\text{Al})$  的有效异质形核核心, 促进非均匀形核, 起到细化晶粒的效果, 晶粒尺寸的减小还会使晶界增多, 对位错的阻碍作用明显。除了初生相  $\text{Al}_3\text{Zr}$  外, 还有尺寸更为细小的次生相  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , 这种析出强化相对位错及晶界具有更强的钉扎作用, 有效阻碍其运动, 从而提高接头强度。

图 9 所示为母材和两种接头的热影响区 TEM 像、析出相的衍射斑以及能谱图。从图 9(a)~(c) 中的 TEM 像可以看出, 母材和热影响区的析出相种类基本一致, 均含有细小椭圆状、尺寸稍大的规则或不规则块状以及粗棒状等结构。与母材不同的是, 热影响区的析出相均发生明显的粗化, 而且原来弥散分布在母材当中尺寸只有几纳米的细小析出相以及晶界处的无沉淀析出带(PFZ), 在热影响区中大部分已消失。这主要由于该区域在焊接过程中所经历的焊接热循环温度较高, 虽然依旧为形变组织, 但析出相发生了部分回溶以及粗化的现象, 这在一定程度上使热影响区的强度和硬度降低。通过对能谱点扫成分分析、衍射花样标定以及结合 7 系铝合金的析出序列, 如图 9(d)~(i) 所示, 对这几类

析出相分别进行分析, 最终判断细小的椭圆状为具有密排六方结构的  $\eta$  相- $\text{MgZn}_2$ , 尺寸稍大的规则或不规则的块状为  $T$  相- $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ , 这两种析出相均为 7 系铝合金主要的强化相, 另外母材还弥散分布着尺寸只有 10 nm 左右具有密排六方结构的亚稳定强化相  $\eta'$  ( $\text{MgZn}_2$ ), 由于  $\eta'$  与基体呈半共格关系且弥散分布, 因而其强化效果最强; 棒状析出相为四方结构的  $\text{Al}_6\text{Mn}$ , 虽然与基体呈非共格关系, 但可以有效阻止位错及晶界的运动, 提高再结晶温度并阻止晶粒的长大, 从而细化晶粒。

为了更加直观地观察不同纳米级第二相的元素分布情况, 使用 HADDF-STEM 对 CP-B 的热影响区进行元素面扫分析, 结果如图 10 所示。图 10(a) 和(b)表明, 棒状、椭球状和点状等第二相弥散分布在基体中。TEM-SAD 面扫如图 10(c)~(f) 所示, 结果表明这些第二相主要包括 Al、Mg、Zn、Mn 等合金元素, 与上述分析的结果相吻合。

### 2.3 焊接接头的力学性能

图 11 所示为焊接接头显微硬度分布图。从图 11 可以发现, 两种焊接接头硬度曲线的变化趋势基本一致, 均以焊缝(WZ)中心为对称轴呈近似对称分布。两种接头最低硬度均在焊缝区, 维氏硬度分别约为 73 HV 和 81 HV, 显然 CP-B 试样的硬度明显大于 CP-A 试样; 到熔合线附近时硬度值迅速升高, 这种硬度值的变化仅出现在不足 1 mm 的狭窄范围内, 到达热影响区(HAZ)后, 靠近焊缝这部分



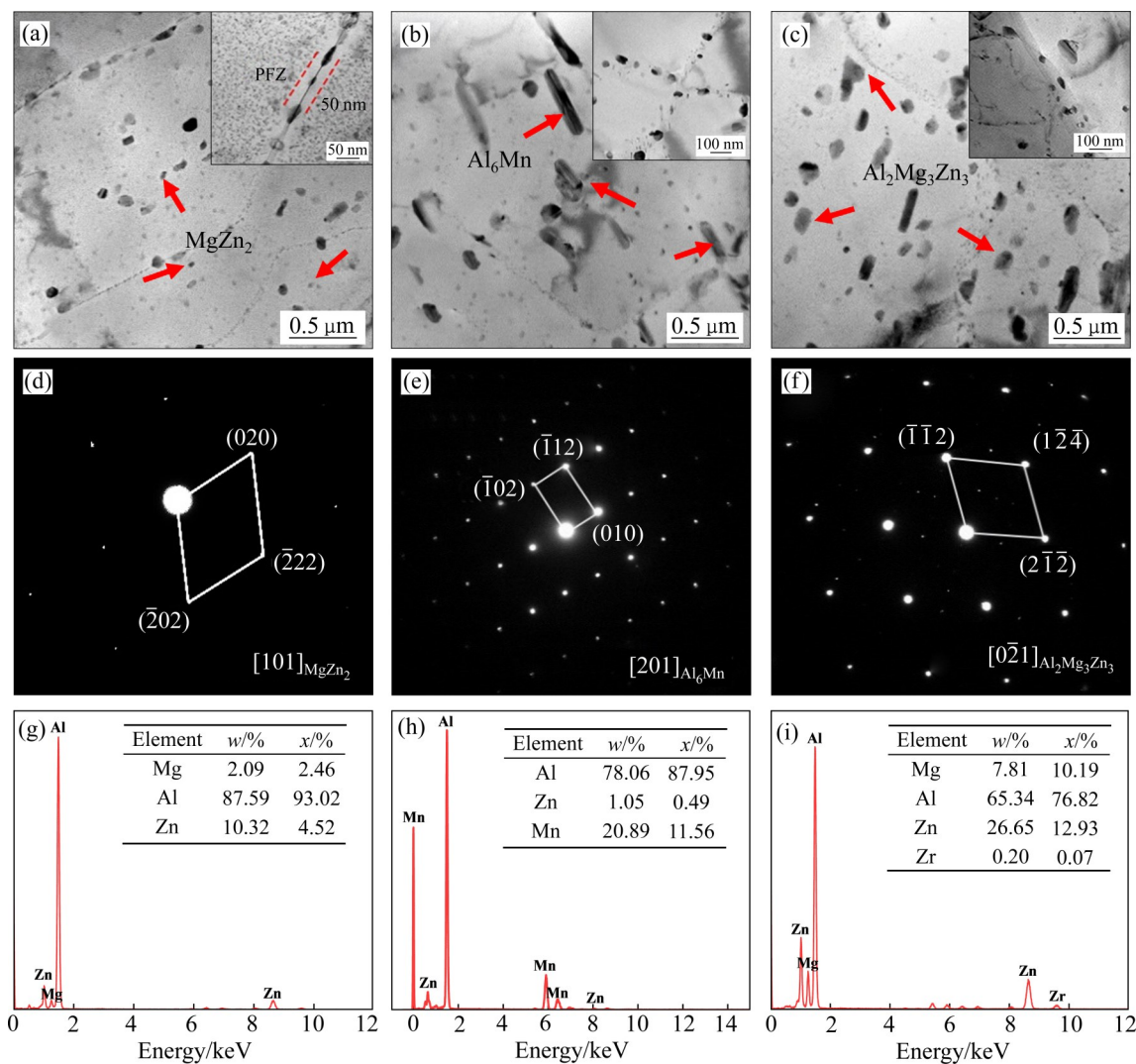


图9 两种接头热影响区与母材的TEM明场像以及析出相的TEM-SAED与TEM-EDS

Fig. 9 TEM open field morphologies of heat affected zone and base metal of two kinds of joints, TEM-SAED and TEM-EDS of precipitates: (a) BM; (b) CP-A; (c) CP-B; (d), (g)  $\text{MgZn}_2$ ; (e), (h)  $\text{Al}_6\text{Mn}$ ; (f), (i)  $\text{Mg}_{32}(\text{Al},\text{Zn})_{49}$

硬度值变化较为稳定,此时CP-B的硬度略高于CP-A,分别约为119 HV、121 HV。随着离焊缝中心距离的增大,硬度值也不断增大,在距离焊缝中心约27 mm处到达母材区(BM),硬度值稳定在约150 HV。

晶粒尺寸和析出相分布是决定硬度的重要因素,整个接头焊缝处的硬度最低有以下几方面原因:1)焊缝在高温电弧热的影响下发生晶粒粗化,原来轧制态的纤维状晶粒转变为铸态的粗大树枝晶,细晶强化和形变强化作用减弱;2)焊缝中的Mg和Zn等强化元素同样受热作用的影响导致烧损严重,使焊缝的主要强化相 $\text{MgZn}_2$ 十分稀少,导致第二相沉淀强化作用减弱;3)焊丝与母材的低强匹

配也会造成焊缝区的硬度较低。由前面TEM物相分析可知,CP-B的焊缝区硬度较高主要由于焊丝当中稀有金属Zr的添加,使得细晶强化和沉淀强化在一定程度上发挥作用。值得注意的是,同一种焊丝焊缝处硬度变化较小,主要原因可能在于:即使先凝固焊道会受到后续焊道的热循环作用,但后续焊道液态熔池流动性变差,导致异质形核数量减少<sup>[9]</sup>,加之对层间温度进行控制,因此焊缝处晶粒组织整体比较均匀。

热影响区出现了两个阶段的变化趋势主要是由于受焊接热循环影响的程度不同,虽然依旧保持着形变组织,但靠近熔合线处的热影响区,析出相发生了明显回溶以及粗化等现象,致使其硬度值相比

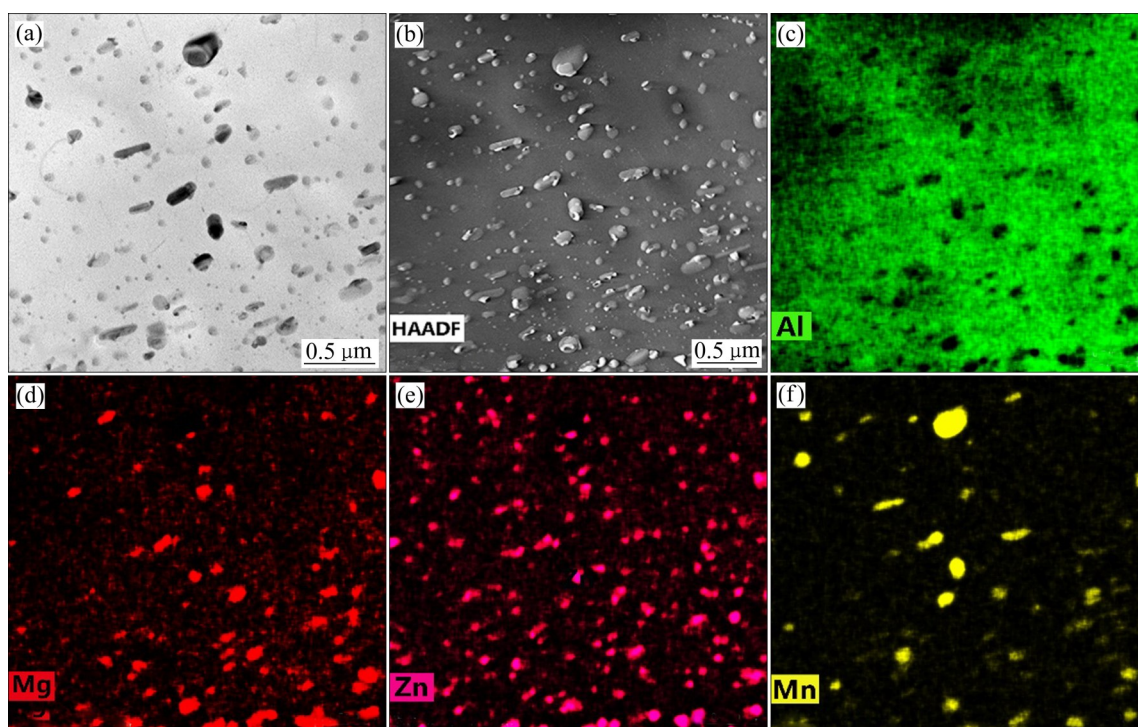


图 10 CP-B 接头 HAZ 中的沉淀相

Fig. 10 Precipitates in HAZ of CP-B joint: (a) Bright field image; (b) HAADF-STEM image; (c)–(f) Element distribution mappings

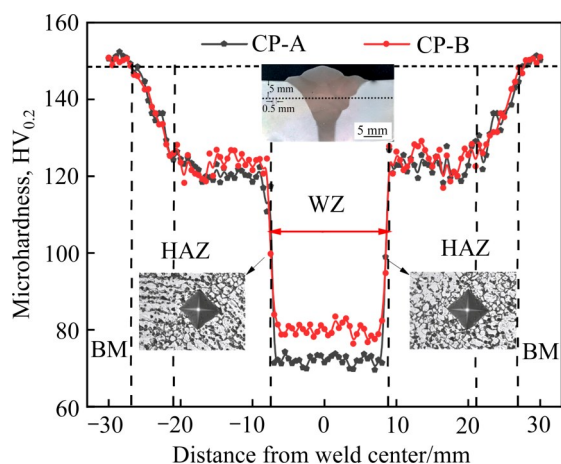


图 11 焊接接头显微硬度分布图

Fig. 11 Microhardness distribution of welded joints

于母材下降明显, 但元素溶解所产生的固溶强化以及析出相的沉淀强化仍然在一定程度上对其性能的提升起到帮助; 而越靠近母材的这一区域则受热循环的影响越小, 析出相数量不断增加、粗化程度也逐渐减弱, 导致硬度逐渐升高, 直到达到母材区。

图 12 所示为两种焊接接头的拉伸强度及应力-应变曲线。从图 12(a)和(b)可以看出, CP-A 的抗拉强度、屈服强度分别为 293 MPa、171 MPa, 伸长

率为 2.5%; CP-B 的抗拉强度、屈服强度分别为 316 MPa、183 MPa, 伸长率为 3.8%。从图 12 可以看出无论是屈服强度、抗拉强度还是伸长率, 两种接头均小于母材, 同时 CP-B 试样的各项数值均高于 CP-A 试样, CP-B 试样的抗拉强度达到母材的 64.1%。另外从应力应变曲线中也可以看出, 两种接头经拉伸达到最大应力后, CP-A 没有发生明显的缩颈就立即断裂, 侧面反映其延展性不如 CP-B。

图 13 所示为两种焊接接头拉伸断口宏观与微观形貌。由图 13(a)和(d)可知, 两种接头均呈与拉伸轴呈 45°夹角断裂于焊缝, 这与前面焊缝的硬度值最低相对应, 焊接接头焊缝区粗大的铸造枝晶组织使合金形变强化作用减弱, 再加上元素烧损等因素, 使得焊缝成为整个焊接接头最薄弱的地方。Mg 元素的固溶强化成为 CP-A 焊缝的主要强化手段, 而 CP-B 焊缝由于 Zr 元素的添加, 不但可以细化焊缝组织而且抑制热影响区再结晶行为, 使接头强韧性得到改善, 因而 CP-B 的缩颈更加明显。从图 13(b)和(e)低倍断口形貌可以看出, 两种焊接接头断口均显示出明显的韧窝形貌, 韧窝周围存在明显的撕裂棱, 说明接头塑性变形充分, 属于典型的



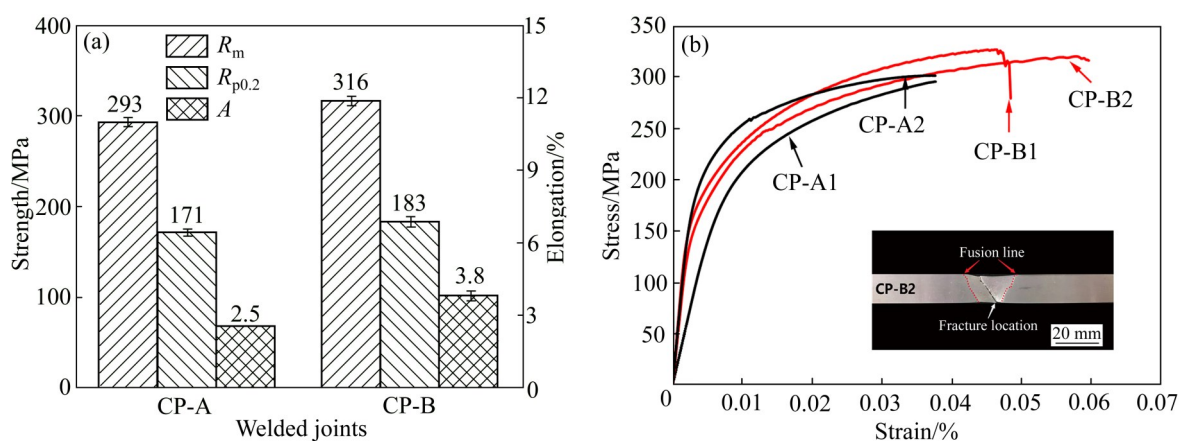


图 12 两种焊接接头的拉伸强度及应力-应变曲线

Fig. 12 Tensile strength and stress-strain curves of two welded joints: (a) Tensile strength; (b) Stress-strain curve

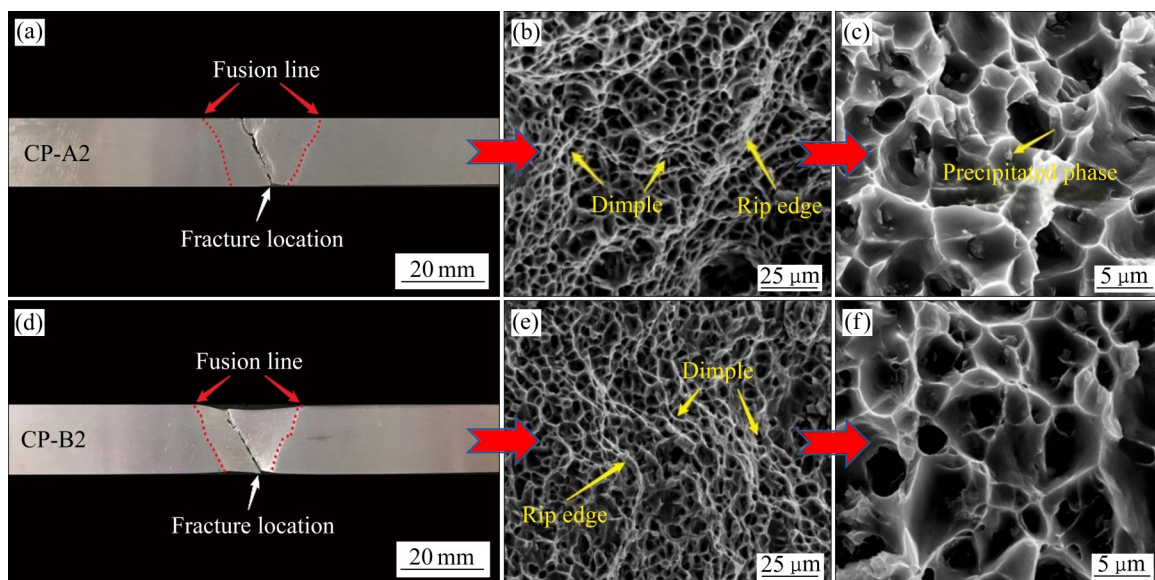


图 13 焊接接头拉伸断口宏观与微观形貌

Fig. 13 Macro and micro features of tensile fracture of welded joints: (a), (b), (c) CP-A; (d), (e), (f) CP-B

韧性断裂。从图 13(c)和(f)的断口形貌可以看出 CP-B 试样的韧窝更深，结合宏观断口形貌，证明强度和塑性较 CP-A 试样更好，CP-A 试样的韧窝进一步放大后还可以看到底部含有尚未脱落的颗粒，由 EDS 分析可知，这些粒子为富含 Al、Mg、Fe、Mn 等元素的杂质第二相。焊接接头在拉伸变形的过程中，这些杂质颗粒与基体结合强度不一致，应力集中首先会出现在这些颗粒附近，当应力集中达到二者的结合强度时，导致其优先发生断裂并沿基体界面分离形成空洞，最后形成含有夹杂颗粒的韧窝<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

1) 两种接头成型良好且均无明显的气孔裂纹等焊接缺陷，说明采用 CMT+P 焊接中厚板 7A52 铝合金可以获得优良的焊接接头。两种接头的焊缝组织均为等轴枝晶，相比于 ER5356 焊丝，采用 ER5087 焊丝焊缝区晶粒尺寸减小了 28.7%。

2) 两种接头的焊缝区均出现了 AlFeMn 和  $Mg_2Si$  等杂质第二相，采用 ER5356 焊丝的焊缝处几乎无强化相，而采用 ER5087 焊丝的焊缝存在四方结构的纳米级强化相  $Al_3Zr$ 。热影响区与

母材的析出相基本相同,包括 $\eta$ 相-MgZn<sub>2</sub>、 $T$ 相-Al<sub>2</sub>Mg<sub>3</sub>Zn<sub>3</sub>以及Al<sub>6</sub>Mn等强化相,但热影响区受焊接热循环影响导致析出相发生了部分回溶以及长大的现象。

3) ER5356焊丝焊接接头抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为293 MPa、171 MPa和2.5%,焊接系数为59.4%,而采用ER5087焊丝时,焊接接头的抗拉强度、屈服强度分别提升至316 MPa、183 MPa,焊接系数达到64.1%。

## REFERENCES

- [1] NAKAI M, ETO T. New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 285(1/2): 62-68.
- [2] HUANG J W, YIN Z M, LEI X F. Microstructure and properties of 7A52 Al alloy welded joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(4): 804-808.
- [3] FENG Y H, CHEN J H, QIANG W, et al. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy 7A52 thick plates welded by robotic double-sided coaxial GTAW process[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 673: 8-15.
- [4] 杨修荣. 超薄板的 MIG/MAG 焊——CMT 冷金属过渡技术[J]. 电焊机, 2006, 36(6): 5-7.  
YANG Xiu-rong. MIG/MAG welding of ultra-thin plate: CMT cold metal transition technology[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(6): 5-7.
- [5] PICKIN C G, WILLIAMS S W, LUNT M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 496-502.
- [6] PANG J, HU S, SHEN J, et al. Arc characteristics and metal transfer behavior of CMT+P welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 212-217.
- [7] LI J J, SHEN J Q, HU S S, et al. Microstructure and mechanical properties of 6061/7N01 CMT+P joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 134-144.
- [8] 李俊杰. 6061 铝合金变极性 CMT 及 CMT+P 熔滴过渡行为及其焊接成形研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
LI Jun-jie. Study on droplet transfer behavior and welding forming of variable polarity CMT and CMT+P of 6061 aluminum alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [9] HUANG J W, YIN Z M, LEI X F. Microstructure and properties of 7A52 Al alloy welded joint[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(4): 804-808.
- [10] 徐振, 赵志浩, 李莹, 等. 钪铈微合金化对 7A52 合金焊缝组织与性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 854-859.  
XU Zhen, ZHAO Zhi-hao, LI Ying, et al. Effects of scandium and erbium microalloying on microstructures and properties of weld joint of 7A52 alloys[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(6): 854-859.
- [11] ZHANG Z H, DONG S Y, WANG Y J, et al. Study on microstructures and mechanical properties of super narrow gap joints of thick and high strength aluminum alloy plates welded by fiber laser[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1/2/3/4): 99-109.
- [12] 张智慧. 7A52 铝合金厚板窄间隙激光填丝焊接特性及组织性能调控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
ZHANG Zhi-hui. Research on characteristics and control of microstructure and properties of narrow-gap laser welding with filler wires for thick 7A52 aluminum alloy plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [13] 张平, 李奇, 赵军军, 等. 7A52 铝合金中第二相分析及微区电位测试[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1252-1257.  
ZHANG Ping, LI Qi, ZHAO Jun-jun, et al. Analysis of secondary phases and measurement of Volta potential of 7A52 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1252-1257.
- [14] 王洪斌, 张新宇, 李胜利, 等. Mn 添加对双辊铸轧 6061 铝合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(1): 129-137.  
WANG Hong-bin, ZHANG Xin-yu, LI Sheng-li, et al. Effect of Mn on microstructure and properties of twin-roll casted 6061 aluminum alloy plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(1): 129-137.
- [15] DENG Y, YIN Z M, ZHAO K, et al. Effects of Sc and Zr microalloying additions on the microstructure and mechanical properties of new Al-Zn-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 530: 71-80.
- [16] DUTRA J C, SILVA R H G, SAVI B M, et al. Metallurgical characterization of the 5083H116 aluminum alloy welded with the cold metal transfer process and two different wire-electrodes (5183 and 5087)[J]. Welding in the World, 2015, 59(6): 797-807.
- [17] 靳佳霖, 徐国富, 李耀, 等. 焊丝成分对 6082-T6 铝合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 1-8.  
JIN Jia-lin, XU Guo-fu, LI Yao, et al. Effect of welding wire composition on microstructure and properties of 6082-T6



- aluminum alloy welded joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 1–8.
- [18] 吴浩, 郑志凯, 任思蒙, 等. 微量 Er 和 Zr 对 Al-Mg 合金再结晶行为和焊接性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 289–297.
- WU Hao, ZHENG Zhi-kai, REN Si-meng, et al. Effects of Er and Zr micro-additions on recrystallization behavior and welding properties of Al-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 289–297.
- [19] 余亚东, 刁广运, 汪殿龙, 等. 7N01 铝合金多层多道 MIG 焊接头的组织和成分研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(9): 184–187.
- SHE Ya-dong, DIAO Guang-yun, WANG Dian-long, et al. Study on microstructure and composition of multi-layer multi-pass MIG welded joint of 7N01 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(9): 184–187.
- [20] 朱高杰, 邹龙江, 任晓磊, 等. 6082-T6 铝合金的微观组织与拉伸断裂的关系[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 47–54.
- ZHU Gao-jie, ZOU Long-jiang, REN Xiao-lei, et al. Relationship between microstructure and tensile fracture of 6082-T6 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(5): 47–54.

## Effect of Zr addition on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy CMT+P welded joint

LIU Hong-xu<sup>1,2</sup>, HOU Xu-ru<sup>2,3</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>, ZHAO Lin<sup>2</sup>, PENG Yun<sup>2</sup>, TIAN Zhi-ling<sup>2</sup>

(1. School of Machinery, Liaoning University of Petrochemical Technology, Fushun 113001, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China;

3. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Cold metal transfer+pulse welding(CMT+P) of 20 mm thick 7A52 aluminum alloy was carried out with ER5356 and ER5087 welding wires. The effects of Zr addition on the microstructure and mechanical properties of welded joints were studied from the aspects of welding defects, grain size and precipitation. The results show that the two joints are well formed and have no obvious defects. The weld microstructure is as cast equiaxed dendrite, and strip or block iron rich impurity phase AlFeMn and black phase Mg<sub>2</sub>Si are found. Compared with ER5356 welding wire, the grain size of weld zone with ER5087 welding wire is reduced by 28.7%, and there are round and oval nano-sized strengthening phase Al<sub>3</sub>Zr. Both kinds of joints obtain high tensile strength. The joint strength using ER5356 welding wire is about 293 MPa, reaching 59.4% of the base metal strength, while the joint strength using ER5087 welding wire is higher, about 316 MPa, and the welding coefficient is 64.1%. The tensile fracture position of both joints is located at the weld, and the hardness here is also the lowest, indicating that the weld is the weakest area of the whole joint. The tensile fracture is mainly dimple with obvious tearing edge, which is characterized by ductile fracture.

**Key words:** 7A52 aluminum alloy; CMT+P welding; welding wire composition; microstructure; mechanical property

**Foundation item:** Project(JCKY2018512B001) supported by the Defense Industrial Technology Development Program of China

**Received date:** 2021-12-06; **Accepted date:** 2022-03-03

**Corresponding author:** ZHAO Lin; Tel: +86-13651333681; E-mail: hhnds@aliyun.com

(编辑 刘锦伟)