

DOI:10.13979/j.1007-7235.2017.01.012

LZ91 镁-锂合金 TIG 焊接接头组织与性能的试验研究

刘 洋^{1,2}, 刘旭贺¹, 肖 阳¹, 解海涛¹, 郭晓光¹

(1. 郑州轻金属研究院(中国铝业郑州有色金属研究院有限公司)金属材料研究所, 河南 郑州 450041;

2. 燕山大学 材料科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:采用交流钨极氩弧焊(TIG)对2 mm厚 LZ91 镁-锂合金板材进行了焊接, 焊材成形性能良好。采用 OM、XRD、SEM 分析了焊材和母材的显微组织, 通过拉伸试验、硬度测试分析了焊材的力学性能。焊材由焊缝、热影响区、母材区组成。焊缝区、热影响区较宽, 分别约为 8 mm、6 mm。受焊接热效应及降温速率影响, 三个部分相组织明显不同, 焊缝区内 α 相为胞状枝晶随机地均匀分布在 β 相内; 热影响区内 β 相为粗大的等轴晶, 晶粒尺寸与到焊缝的距离呈反比, α 相呈针状或条带状, 相含量与到焊缝的距离呈正比; 母材区为典型的轧制退火态组织。硬度: 热影响区的最高, 母材的次之, 焊缝区的最低。焊材在焊缝区断裂, 抗拉强度为 169.61 N/mm², 达到母材抗拉强度的 95.6%。伸长率为 21.4%, 为母材的 77.5%。焊接后, 断裂方式由解理断裂转变为韧性断裂。

关键词: 镁-锂合金; TIG 焊接; 显微组织; 力学性能**中图分类号:** TG146.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2017)01-0061-08

Experimental research on the microstructure and mechanical properties of LZ91 Mg-Li alloy TIG welded joint

LIU Yang^{1,2}, LIU Xu-he¹, XIAO Yang¹, XIE Hai-tao¹, GUO Xiao-guang¹

(1. Department of Light Metal, Zhengzhou Non-ferrous Metals Research Institute Co. Ltd of CHALCO (Zhengzhou Light Metals Research Institute), Zhengzhou 450041, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The material with well performance used in this experiment, 2 mm thick weld material of LZ91 magnesium lithium alloy, is achieved by the alternating current tungsten arc welding (AC-TIG). The performance of welding fabrication and microscopic structure of welded joints are studied by utilizing OM, XRD and SEM. Mechanical properties of welded joints are analyzed through the tensile experiment and Vickers hardness test. Affected by AC-TIG, the weld material consists of weld-joint area (~8 mm), heat affected area (~6 mm) and base metal. Due to different heat effects and cooling rates, quite different microstructures are achieved in three areas. In the weld-joint area, cellular dendritic-like α phases are uniformly dispersing in arbitrary directions within the β phase matrix. In the heat affected area, β phases are coarse equiaxed crystals and the grain size is inversely proportional to distance to the welding joint. The content of needle-or-strip-like α phase is proportional to distance to the welding joint. In the base metal exists the typical structure of rolling plates.

收稿日期: 2016-09-20**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51371161); 国家国际科技合作专项(2015DFR0020)**第一作者简介:** 刘洋(1990-), 男, 河北保定人, 硕士, 研究方向是超轻镁锂合金制备及塑性加工。

In comparison of hardness of three areas, heat affected area ranks the first, base metal the second, and weld joint ranks the last. The weld material fractures in the weld joint during tensile experiment. the tensile strength is 169.61 N/mm^2 and the elongation is 21.4%, which respectively reach 95.6% and 77.5% of the base metal. After welding, the fracture of weld material changes from cleavage to ductile fracture.

Key words: Mg-Li alloy; TIG welding; microstructure; mechanical properties

镁-锂合金作为最轻的金属功能材料,具有密度小、比强度高、比刚度及阻尼减震性电子屏蔽性好等特点,被认为是军工、航天、汽车及电子产品领域的理想结构减重材料^[1]。随着镁合金结构件的应用领域不断扩大,解决镁合金的连接问题变得迫在眉睫,受到了极大的关注和重视^[2]。

国内外的一些学者通过搅拌摩擦焊、等离子弧焊、真空电子束焊以及钨极氩弧焊(Tungsten inert gas weilding, TIG)等焊接方法对镁合金进行了大量的研究,与其他焊接方法相比,钨极氩弧焊(TIG)具有操作灵活、焊接效率高和焊接适应性强等优点而得到广泛的应用,另外,采用正确的TIG焊接工艺参数也能得到无缺陷、高质量的焊接接头^[3]。

采用TIG焊接工艺, Atkins等^[3]对铸态Mg-7.5Li以及Mg-10.2Li合金焊材的显微组织进行了对比,由于焊缝在近平衡条件下凝固生成铸态组织,不会有热影响区产生。Liu^[4]等人采用TIG工艺成功地对2mm厚Mg-10.36Li-2.7Al-0.91Zn-0.81Ce合金板材进行了焊接,未发现明显的焊接缺陷,但焊接后热影响区组织粗大,强度降低,成为断裂的敏感区。刘旭贺^[5]等人还对双相LZ91镁-锂合金板材的激光焊接成形性能进行了研究,由于焊缝熔合线两侧组织差异明显,焊材易在熔合线处发生断裂,强度仅为母材的81.2%,但焊接后退火处理能显著提高焊材的抗拉强度,改善焊接效果。吕俊霞等^[6]对Mg-9.8Li-2.9Al-Zn双相合金板材的激光焊接性能研究表明,由于焊缝区冷速较快,其组织硬度高于母材硬度,焊材在母材区断裂,焊缝塑性变形能力低于母材的。

目前,还没有双相镁-锂合金板材TIG焊接性能的相关研究,鉴于镁-锂合金潜在的巨大应用前景,本试验以双相LZ91镁-锂合金为研究对象,采用交流钨极氩弧焊的焊接方式进行焊接,对焊缝的组织力学性能进行研究。

1 试验材料及方法

本试验选择LZ91镁-锂合金轧制板材作为研究对象。焊接采用填丝、双面堆焊的方式,以同种材料作为填充材料,将尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的2块板材组成1副对接焊试板。焊接前,对焊接附近区域用砂纸打磨去除油污和氧化层,并用丙酮冲洗、吹干后,用交流钨极氩弧焊(TIG)进行焊接。焊接时选用纯度为99.99%的高纯氩气作为保护气体,气体流量为 15 L/min ,电流为 40 A ,焊接速度 14 mm/min 。

LZ91镁-锂合金母材及焊缝区化学成分见表1。由于氩弧焊热输出较大,且锂在高温下易挥发,造成焊缝区锂含量有所降低。

表1 LZ91 镁-锂合金母材及焊缝
化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of LZ91 alloy
and weld joint(wt/%)

区域	Li	Zn	Mg
母材	9.23	0.83	余量
焊缝	8.63	0.81	余量

考虑到TIG焊接热影响区较宽的特点,为了全面分析焊接造成的组织变化,在取样进行金相组织观察时,焊缝两侧各保留足够的长度。

金相组织观察前先在磨抛机上用150#~1000#砂纸粗磨,再抛光至没有划痕,抛光液选用低浓度的 Cr_2O_3 悬浊液,后用苦味酸溶液(3g苦味酸+4mL冰醋酸+100mL无水乙醇+20mL水)侵蚀,最后用LEICA DM4000金相显微镜观察显微组织;X射线物相分析采用Xpert pro PANalytical X射线衍射仪,扫描角度为 20° 到 80° ,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$,靶材为铜靶,加速电压为 60 kV ;SEM分析采用JSM-6360LV型扫描电子显微镜,拉伸断口的微观形貌进行观察分析。拉伸试验在SUN10电子试验机上进行,每组

三个平行试样,标距 25 mm,拉伸速度 5 mm/min,板状拉伸试样参见图 1;合金的维氏硬度用 HVS-5 型维氏硬度计测量,载荷为 4.9 N,保压时间 10 s。

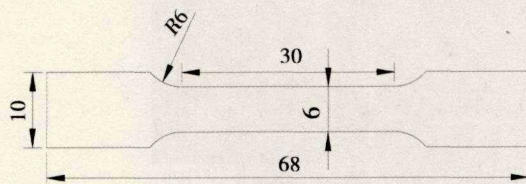


图 1 板状拉伸试样图

Fig. 1 Dimensions of a plate tensile sample

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头显微组织分析

图 2 为焊材不同区域的截面显微组织。从图 2 可以看出,焊材大致可以分为焊缝区、热影响区、母材三部分。焊材未观察到气孔和裂纹,说明 LZ91 镁-锂合金通过 TIG 工艺焊接成形性能良好。

LZ91 镁-锂合金由 α 相和 β 相组成;母材区(图 2a)是典型的轧制变形组织, α 相呈纤维状,沿轧制方向均匀地分布在 β 相基体内。

根据到焊缝中心的距离不同,热影响区组织出现两种形貌。距离焊缝中心较远的区域(图 2b), β 相呈等轴晶形貌,晶粒尺度在 $50\ \mu\text{m} \sim 150\ \mu\text{m}$ 之间,椭球状的 α 相均匀地分布在 β 相晶界处。这是由于焊接时温度较高,加之轧制后残余应力的存在,使轧板发生了回复及再结晶^[8]。

随着到焊缝中心距离的减小,热影响区组织(图 2c、图 3c)变为粗大的 β 相等轴晶,晶粒尺寸在 $300\ \mu\text{m} \sim 500\ \mu\text{m}$ 之间,相组织为典型的魏氏组织,晶粒内及晶界零星分布着少量针状物质,根据含量可以判断为焊接后降温过程中析出的 α 相^[1]。

图 3a 是焊缝腐蚀后的宏观照片,可以看出焊缝区衬度与其他区域明显不同,借此可以估测焊缝区宽度约为 8 mm。

焊缝区为粗大的铸态组织^[2]。通过图 2d 焊缝区高倍显微组织可以看到, β 相晶粒内均匀分布着大量胞状 α 相枝晶^[9]; β 相晶界出现连续的 α 相析出,可据此判断 β 相的尺寸。

因 TIG 焊接热效应明显^[2],焊缝熔合线宽度在 $100\ \mu\text{m}$ 左右(图 3c),两侧组织明显不同。可以由此判断:焊缝区与热影响区在焊接后降温过程中经历了完全不同的热力学过程,才产生了如此之大的组织差异。

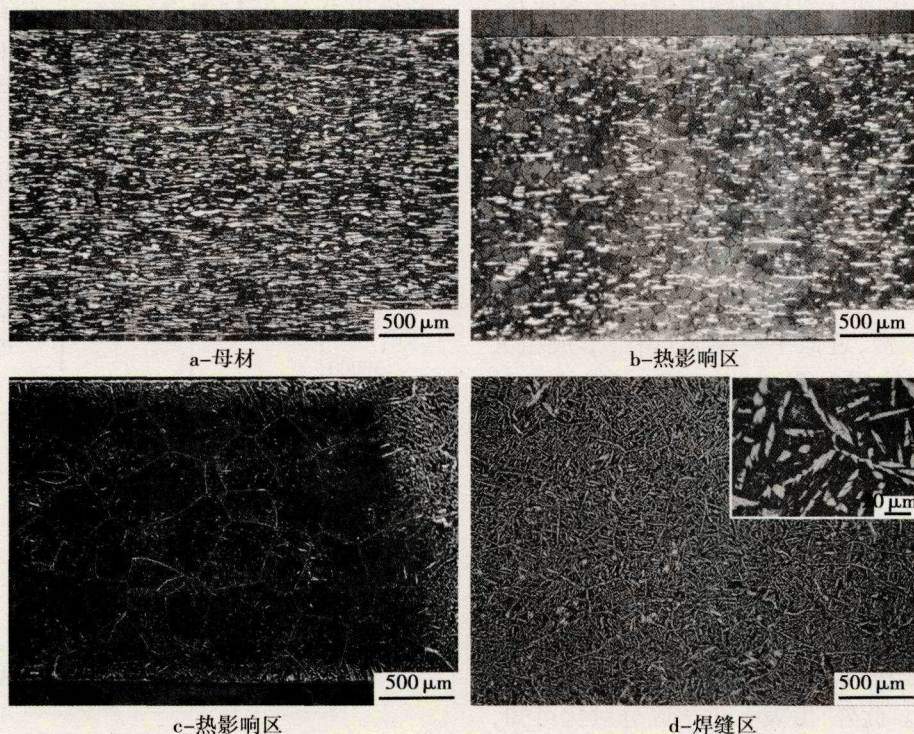


图 2 焊材不同区域截面显微组织

Fig. 2 Transverse microstructure in different zones of the weld material

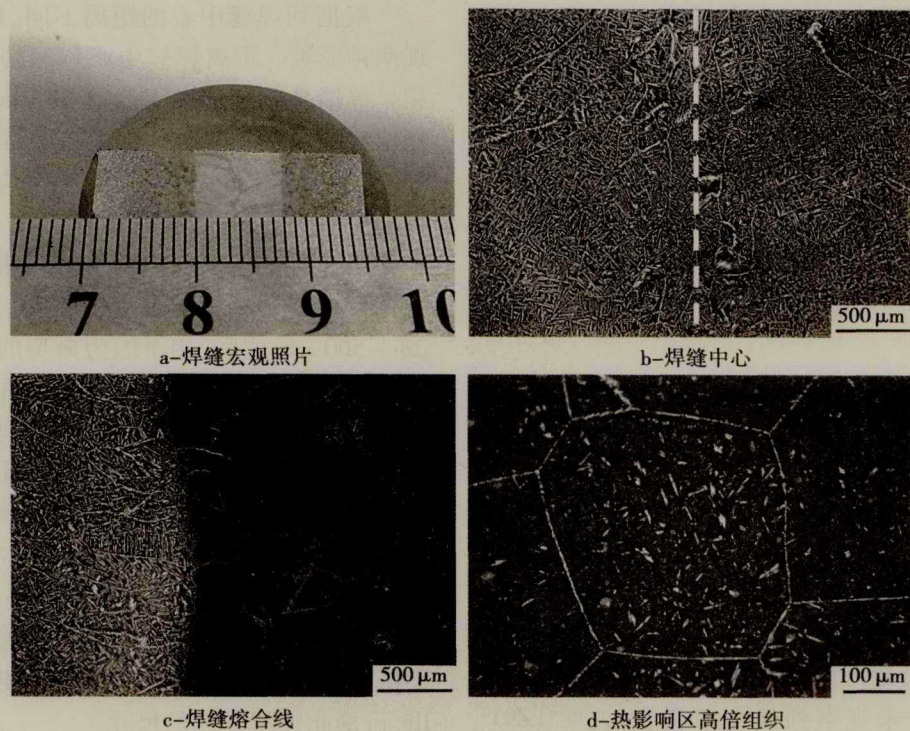


图3 焊缝轧制平面宏观照片及金相显微组织
Fig.3 Weld joint photo and microstructure in rolling plane

由镁-锂合金二元相图可知,镁在锂中的固溶度比锂在镁中的固溶度大很多。结合焊接过程中产生的热效应进行分析,焊接时,焊缝区组织完全熔化,温度最高;热影响区温度受焊缝温度影响, β 相出现晶粒长大同时达到相变点, α 相被完全吸收,使 β 相处于过饱和固溶态;母材区温度最低,温度传导方向为由焊缝中心指向母材区。

焊接完成降温过程中,以焊缝熔合线为起点,至焊缝中心处,温度梯度为正值,结晶潜热只能通过固相而散出^[10],而热影响区范围较宽,导致焊缝区过冷度较小,冷速较慢,近似平衡凝固过程,形成粗大的铸态组织。焊缝区越靠近中心部位,过冷度越小^[5]。受热扩散速率影响,焊缝中心处晶粒沿焊接方向长大,焊缝区组织以焊缝中心为轴左右对称(图3b),沿热扩散方向呈长条状。 α 相沿热扩散方向优先在 β 相晶界析出;随着温度降低,冷速进一步降低, α 相开始沿不同方向析出,形成树枝状形貌。熔合线指向热影响区方向,温度梯度为负值,因母材导热率较高,冷却较快,仅少量针状 α 相析出, β 相仍处于过饱和状态。此外,由表1化学成分对比可知,焊缝锂含量比母材的低,导致焊缝 α 相含量较母材的要高。

2.2 XRD 物相分析

通过XRD物相分析(图4)可以看出,材料焊接前后均由 α 、 β 、 Li_2MgZn 相组成,谱峰的强度变化可知,合金和焊缝中 Li_2MgZn 含量较低。根据化学分析结果(表1)可知,这是因为锌含量较低时易均匀地固溶在 α 、 β 中^[11-12],只在高含量下才会出现明显的析出强化相^[13],因此不会产生明显的强化效果^[14],也未在金相组织中观察到除 α 、 β 相以外的其他相。

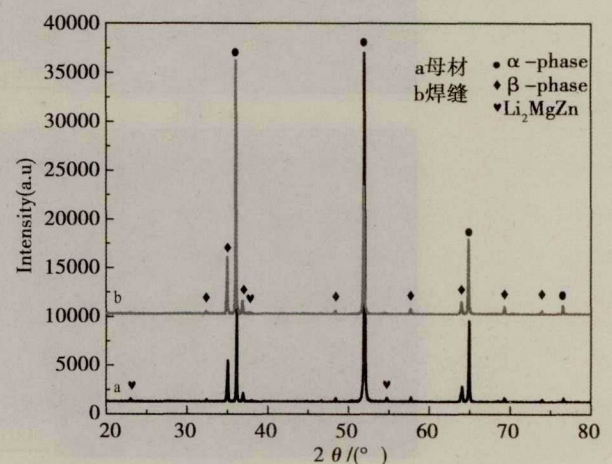


图4 母材及焊缝的XRD谱图
Fig.4 XRD pattern of base metal and weld joint

2.3 焊材的力学性能

2.3.1 焊材的显微硬度变化

图5为焊材显微硬度变化曲线,结合焊材腐蚀后的低倍组织照片(图3a),估测焊缝区及热影响区宽度为8 mm和6 mm。

根据焊材的显微硬度变化曲线可知,热影响区粗晶部分硬度最高为58.02 HV,高于母材的54.63 HV,这是由于热影响区组织处于过饱和状态,产生固溶强化效果使得组织硬度升高。焊缝区硬度值变动很小,且硬度值最低,仅为50.14 HV,这是因为双相组织在接近平衡凝固条件下生成,为铸态组织,成分均匀性良好。而母材处于轧制变形态,有大量残余应力存在,使得母材硬度高于焊缝区硬度。

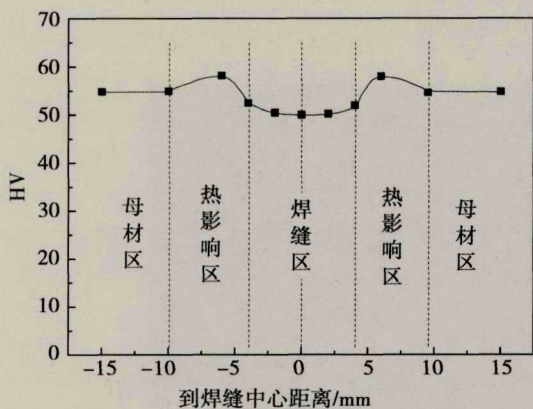


图5 焊材显微硬度变化曲线

Fig. 5 A curve of hardness range of the weld material

2.3.2 焊材的拉伸强度

图6是焊材断后的宏观照片,可以清晰地看到试样在焊缝区断裂,断口附近出现明显的缩颈和滑移带,且焊缝区在拉伸过程中明显伸长(约13 mm)。

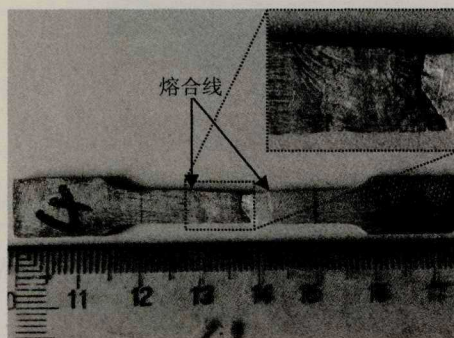


图6 焊材断口宏观照片

Fig. 6 Fracture photo of the weld material

对比焊材与母材的拉伸数据(图7和表2),焊材屈服强度、抗拉强度较母材略有下降,分别为母材的95.8%、95.6%;塑性明显降低,为母材的77.5%。

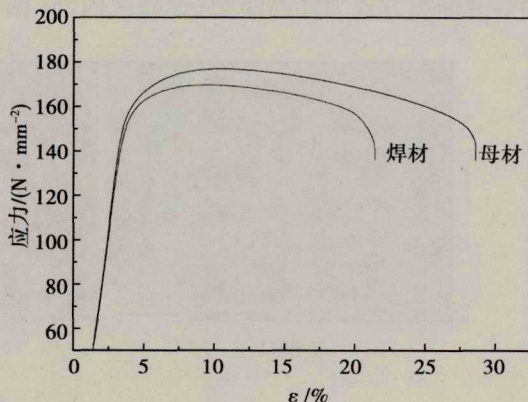


图7 母材及焊材的拉伸曲线

Fig. 7 Tensile strain-stress curves of LZ91 alloy and the weld material

表2 LZ91 镁-锂合金母材与焊材力学性能

Table 2 Mechanical properties of LZ91 Mg-Li alloy and the weld material

区域	$R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$	$R_m/(N \cdot mm^{-2})$	$A/\%$
母材	150.64	177.48	27.60
焊缝	144.36	169.61	21.4

由图6可知,焊缝塑性变形明显,这是因为焊缝区为铸态组织,相对于母材无加工硬化,相对于热影响区无固溶强化,基体内部滑移系更容易开启,优先出现塑性变形,表现为焊材屈服强度低于母材的屈服强度。此外,焊缝区组织兼有高强的 α 相以及塑性良好的 β 相^[9],在变形过程中相界成为位错及滑移系难以越过的障碍,位错与弹性应变场的交互作用加重,加工硬化程度增大,焊材表现出理想的抗拉强度。综上所述,焊缝屈服强度较低,造成母材区及热影响区塑性变形滞后;焊缝抗拉强度较低,母材区在塑性变形过程中优先达到焊缝的极限强度,焊缝发生断裂,造成塑性明显降低。

2.4 断口分析

图8是母材断口处的金相照片(箭头沿拉伸轴指向断口),看出母材断口(图8a、8b)比较平整,未出现缩颈;与拉伸前母材金相照片(图8c)对比,断口附近相组织未发现明显变化,说明母材变形比较均匀。

图9为焊材拉伸后各区域微观组织,焊材因缩

颈而出现明显塑性变形(图9a),与断口处宏观照片(图6)对应,出现明显的滑移变形痕迹,晶界处 α 相由随机分布变为沿拉伸方向平行排布(图9b);断口很不平整,并有撕裂痕出现;断裂发生在 β 相内部,说明焊缝断裂方式为穿晶断裂;焊缝区内部(图9c)

也在变形过程中出现不同程度的变形痕迹。热影响区晶粒未出现明显变化,仍呈等轴晶形貌;熔合线因拉伸凹向断口方向。结合焊缝拉伸前后宽度对比(8 mm/13 mm),可知焊材塑性变形主要发生在焊缝区内。



图8 母材拉伸前后微观组织

Fig. 8 Alloy and fracture microstructure

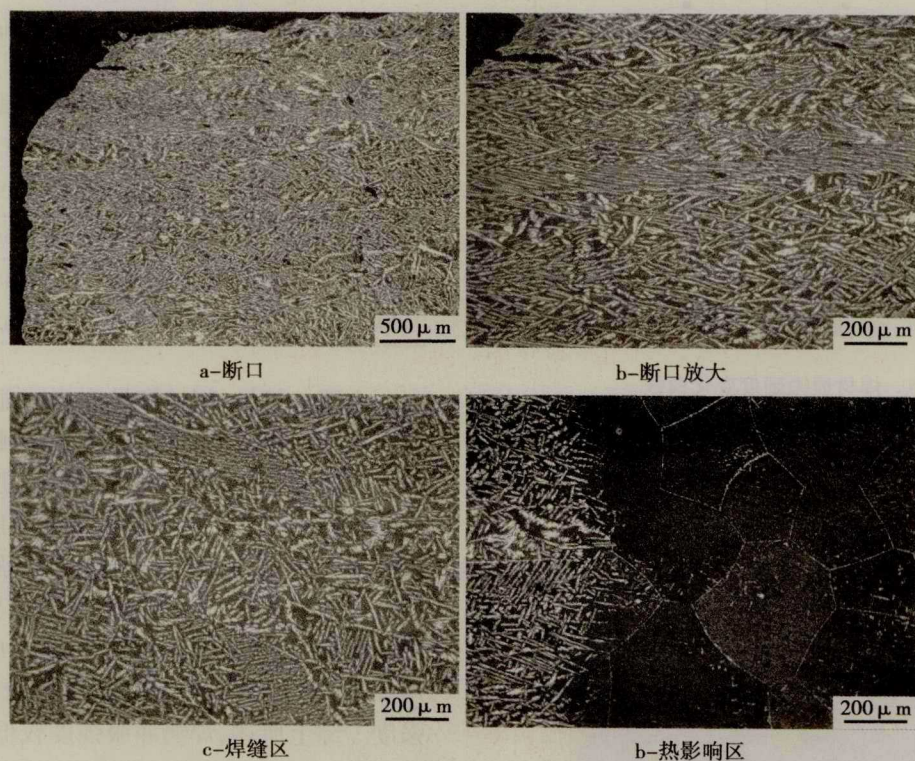


图9 焊材拉伸后各区域微观组织

Fig. 9 Fracture microstructure of the base metal

焊材各区域在拉伸中的表现差异明显,这是由于:热影响区处于过饱和状态,存在很大的晶格畸变,固溶原子在拉伸时对位错产生钉扎作用,阻碍位错的运动增殖;而母材区为典型的轧制态组织,组织内部存在大量的位错、滑移变形,造成大量交互作用的形变能、应力场,使得位错增殖困难^[9];相比之下,

焊缝区具有成分均匀、无弹性应变场存在、晶粒取向与拉伸方向相同等特点,且有 α 、 β 两相协同变形^[14],滑移系更易开动,更易产生塑性变形,因此,焊缝屈服强度低于热影响区和母材的强度,优先发生塑性变形。然而,与 β 相高度塑性变形能力相反, α 相以基面滑移为主,非基面滑移及柱面滑移只能

在高度变形时才能开启^[12],使得焊缝区变形以 β 相为主。随着变形量增大,因 α 、 β 两相强度及滑移系

等方面的明显差异,易造成位错在相界处堆积,随着形变能的增加,最后试样断口穿过 α 相断裂。

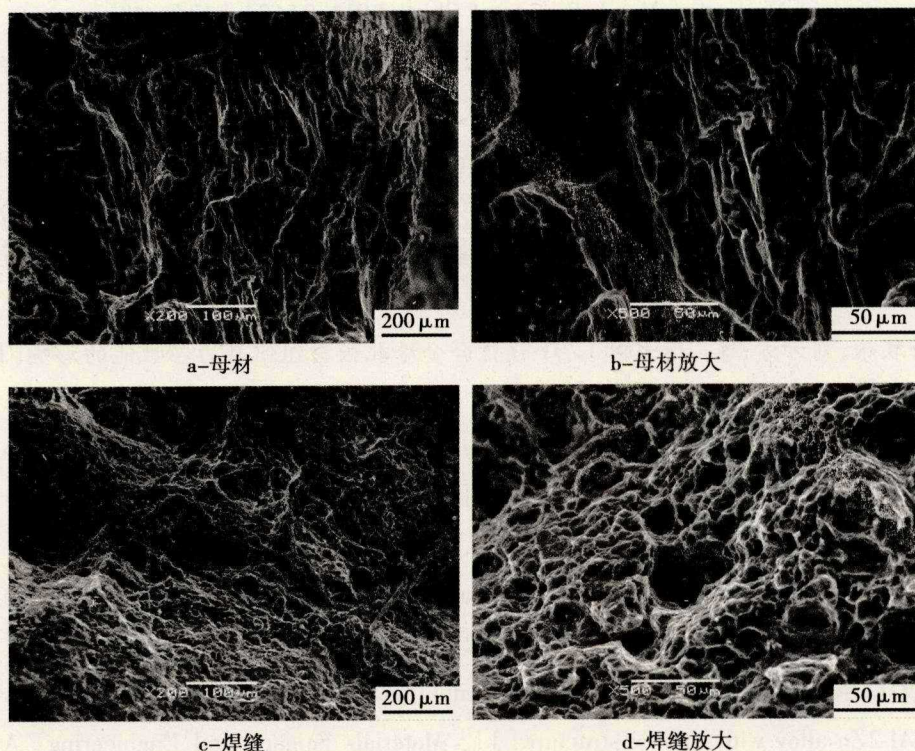


图 10 拉伸断口扫面

Fig. 10 Alloy and weld joint fracture scanning

图 10 是母材与焊材断口不同放大倍数下的扫描图。借助 SEM 形貌分析发现,母材断口主要以水流花样及解理台阶为主,在高倍下可以观察到有裂纹存在,并可观察到少量韧窝存在,属于韧性-解理混合断裂。焊材断口以韧窝为主,呈现典型的韧性断裂特征。母材与焊材断裂方式与金相观察的断口断裂位置是相符的。

3 结 论

1) LZ91 镁-锂合金经交流钨极氩弧焊焊接,得到的焊材成形性能优异。焊缝区与热影响区组织熔合良好,解决了熔合线处结合力差、易断裂的问题;

2) 焊材屈服强度、抗拉强度较母材略有下降,分别为母材的 95.8%, 95.6%; 塑性明显降低,为母材的 77.5%, 但伸长率仍保持在 21% 以上;

3) 焊材热影响区较宽,散热缓慢,有助于焊缝以接近平衡凝固的条件凝固,得到的焊缝组织成分均匀、无弹性应变场,晶粒细长,晶粒取向与散热方向相同;

4) 焊材各部分散热速率不同,冷却后热影响区产生固溶强化效果,粗晶组织硬度最高,为 58.02 HV; 焊缝区硬度最低,仅为 50.14 HV;

5) 焊材的断裂方式为韧性断裂,母材的为韧性-解理混合断裂。

参考文献:

- [1] 刘旭贺,肖 阳,王军武,等. 退火对 LA141 镁-锂合金板材显微组织与力学性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(5): 30-35.
- [2] 初雅杰,陈 坚,李晓泉,等. 镁合金 AZ31B 钨极氩弧焊焊接过程热效率研究[J]. 材料工程, 2013(12): 29-32.
- [3] ATKINS G, MARYA M, OISON D, et al. Magnesium-lithium alloy weldability: A microstructural characteriza-

- tion [J]. Magnesium Technology, In Proceedings of TMS, 2004(1): 37 - 41.
- [4] LIU X H, GU S H, WU R Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloy after TIG welding [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 477 - 481.
- [5] 刘旭贺, 姚 玮, 刘 洋, 等. LZ91 镁锂合金激光焊接接头组织与性能研究[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(8): 58 - 64.
- [6] 吕俊霞, 杨武雄, 吴世凯, 等. Mg-9.8Li-2.9Al-Zn 合金激光焊接接头组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2014(3): 54 - 58.
- [7] 宋 刚, 刘黎明, 王继锋, 等. 激光-TIG 复合焊接镁合金 AZ31B 焊接工艺[J]. 焊接学报, 2004(3): 30 - 35.
- [8] 姜炳春, 唐联耀, 刘方方, 等. 退火对 LZ91 镁锂合金冷轧板材组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(1): 171 - 174.
- [9] ZOU Y, ZHANG L, WANG H, et al. Texture evolution and their effects on the mechanical properties of duplex Mg-Li alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 669: 72 - 78.
- [10] 胡赓祥, 蔡 珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版, 2000.
- [11] CHANG T C, WANG J Y, CHU C L, et al. Mechanical properties and microstructures of various Mg-Li alloys [J]. Materials Letters, 2006, 60(27): 3272 - 3276.
- [12] ZHAO J, ZHANG J, LIU W, et al. Effect of Y content on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn alloy with duplex structure [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 650: 240 - 247.
- [13] YAMAMOTO A, ASHIDA T, KOUTA Y, et al. Precipitation in Mg-(4 - 13)% Li - (4 - 5)% Zn ternary alloys [J]. Materials transactions, 2003, 44(4): 619 - 624.
- [14] WU H, LIN J, GAO Z, et al. Effects of age heat treatment and thermomechanical processing on microstructure and mechanical behavior of LAZ1010 Mg alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 523(1): 7 - 12.

日本制成全球首款可反复充电的镁电池

日本本田(Honda)汽车公司研发可反复充电的镁电池已于2016年9月正式面世,这在全世界是首次,不但延长了电子设备的续航能力,而且生产成本仅相当于传统锂电池的4%。据称,这种镁电池可于2018年进行商业生产。本田公司将与埼玉县产业技术中心合作建设生产工厂。

镁电池比传统锂电池小得多,可应用于智能手机等电子设备上。镁电池在使用寿命与安全性方面均不亚于锂电池。镁的价格比锂的低得多,镁电池容量也比锂电池的大,如果进一步提高镁电池的容量及其耐热性能,就可以作为动力电池,作为电动汽车电源。这个时期会很快到来。

(王祝堂)