

7A52 铝合金激光焊接头单级时效行为

陈 超, 陈芙蓉, 张慧婧

(内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 通过力学性能、电导率测试、EDS 分析和 TEM 分析, 对 7A52 铝合金激光焊接头单级时效行为特征进行了研究, 并确定了较为合理的单级时效工艺。结果表明, 7A52 铝合金激光焊缝和母材在不同温度下达到峰值硬度所需要的时间基本是一致的, 当时效温度由 120 上升到 160 °C 时, 接头时效硬化速度明显加快, 达到峰时效时间明显缩短。与 120 °C 时的峰时效状态相比, 经 140 °C, 16 h 时效处理后的接头抗拉强度为 351 MPa, 失重量为 0.0070 g/min, 电导率为 21.2 mS/m, 接头抗拉强度下降了 1.13%, 失重量增加了 2.94%, 电导率却提升了 12.2%, 综合考虑以 140 °C 保温 16 h 单级时效工艺为宜。焊缝和母材的析出相均是 MgZn₂ 相, 随时效时间的延长析出相逐渐增多粗化, 且峰时效状态下的起主要强化作用的是 η' 相和 GP 区。

关键词: 7A52 铝合金; 激光焊接; 单级时效; 显微组织; 性能

中图分类号: TG166.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1589-07

7A52 铝合金是中国自行研发的中高强装甲铝合金, 其作为国防工业的重要材料, 具有高比强度、高比刚度、无磁性、低温性能好等特点, 在轻型战车、战舰、航空航天器中得到广泛应用^[1]。7A52 铝合金在实际应用中常以焊接连接成形的形式存在, 在使用过程中发现 7A52 铝合金焊接接头具有失强严重、耐腐蚀性能差等缺点^[2,3], 在很大程度上限制了对 7A52 铝合金的进一步开发应用。因此, 如何改善其接头性能一直备受广大学者的重视, 在已有研究中大部分学者主要通过改变焊接工艺、焊后表面处理^[4-9]等手段来提高 7A52 铝合金焊接接头的使用性能, 但鲜有人对其接头进行系统的时效工艺研究。

7 系铝合金是一种典型的时效强化型铝合金, 已有研究表明^[10-13], 经时效处理后其性能能够得到显著提高。相关研究表明^[14,15], 7A52 铝合金母材经时效处理后起主要强化作用的析出相正是由 Mg、Zn 元素组成。但是在焊接过程中由于高能量热输入不可避免, 造成 7A52 铝合金元素烧损 (Mg、Zn), 元素烧损会使得母材与焊缝的元素含量存在明显差异, 元素含量的降低是否会影响析出相的组成以及时效工艺的制定还是未知的。因此, 非常有必要确定出 7A52 铝合金母材与焊缝在相同时效制度下的变化趋势以及峰时效工艺。在前期试验中发现, 采用激光焊接 7A52 铝合金时, 其接头性能与传统熔焊 (TIG 焊、MIG 焊) 相

比显著提高。所以本实验以 7A52 铝合金激光焊接头为研究对象, 系统分析 7A52 铝合金激光焊接接头在 120~160 °C 下的单级时效行为, 以期获得综合性能更好的焊接接头, 为 7A52 铝合金激光焊接头今后能够得到更加广泛的应用奠定理论和实验基础, 具有十分重要的意义。

1 实 验

试验采用的 7A52 铝合金板材复验元素质量分数分别为: Zn 4.2066%、Mg 2.2642%、Cu 0.1287%、Mn 0.3113%、Zr 0.12445%、Cr 0.2278%、Fe 0.2954%、Si 0.2352%、余量 Al。使用 IPG 公司生产的 WLS-6000 型光纤激光器对 100 mm×60 mm×6 mm 的 7A52 铝合金板材进行焊接。根据前期试验研究优化结果, 焊接参数为焊接功率 4.2 kW、焊接速度 40 mm/s、离焦量 -1 mm 和正背保护气体流量 15 L/min (99.99% 的工业氩气)。焊后在时效前对焊接接头进行固溶处理, 固溶温度 495 °C, 1 h 后水淬; 单级时效温度分别为 120, 140 和 160 °C, 时效时间 0~70 h。

采用 SS-4000 扫描电镜 (SEM) 对焊接接头显微组织形貌进行观察, HXD-1000TM 型维氏显微硬度计对焊接接头的焊缝中心与母材的硬度进行测量, 载荷为 300 g, 加载时间为 15 s, 使用 WDW200 微控电子万能试验机对焊接接头进行拉伸试验, 每组拉伸 3 个

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 内蒙古青年科技英才领军人物项目 (103-841025)

作者简介: 陈 超, 男, 1990 年生, 硕士生, 内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特市 010051, E-mail: 929368583@qq.com

试件取平均值，磨损试验在 MM-W1 立式万能摩擦磨损试验机上进行，载荷 60 N、旋转速度 100 r/min，接触面积 6 mm×6 mm，每隔 2 min 称重一次，共计 5 次，计算单位时间内的失重量 (g/min)，采用 UT58A 数字式微欧计测量 7A52 铝合金焊接接头的电导率。利用透射电镜 (TEM) 对时效后的焊接接头显微组织进行观察。

2 结果与讨论

2.1 焊态 7A52 铝合金激光焊接头显微组织及硬度

7A52 铝合金激光焊接头显微组织形貌如图 1 所示。从图 1a 中可以明显发现，7A52 铝合金激光焊接头主要由焊缝、熔合区和热影响区组成。按晶粒大小及形状，焊缝可以分为 2 个区域，分别为 A 区域的粗大等轴晶、B 区域沿散热方向生长的柱状晶，熔合区为细小等轴晶带 (C 区域)、热影响区由 D 表示。分别对各个区域进行放大拍照，如图 1b, 1c, 1d 所示。观察图 1b 可以发现 A 区域分布着 60 μm 左右的等轴晶，B 区域分布着横向 40 μm、纵向 20 μm 左右的柱状晶，C 区域则沿熔合线分布着约 30 μm×10 μm 左右的细小等轴晶，D 区域的晶粒虽然发生了长大，但并不明显，且范围较小。

以上对晶粒形貌的描述可以发现沿焊缝中心向两侧依次分布着粗大的等轴晶、柱状晶、细小的等轴晶带、热影响区、母材。大量研究表明，铝合金激光焊

接头晶粒形貌之所以呈现出如此分布，主要因为铝合金具有热导率大、散热速度快的物理特性，致使焊缝熔池冷却速度很快，仅焊缝中心的晶粒能够获得充足的能量发生长大，沿散热方向的温度梯度逐渐变大，晶粒长大能力逐渐降低。

通过对 7A52 铝合金激光焊接头组织形貌的描述可以发现，7A52 铝合金激光焊接头不同区域的晶粒尺寸相差较大，由霍尔佩奇公式可知晶粒大小将会严重影响材料的硬度值，为了准确反映出焊接接头各区域的硬度变化趋势，对 7A52 铝合金激光焊接头进行硬度测量。7A52 铝合金激光焊接头显微硬度变化趋势如图 2 所示。从 2 图可以发现，硬度最低点出现在焊缝中心约为 900 MPa；沿焊缝中心向两侧的硬度值逐渐增加，其中柱状晶与细小等轴晶带交界处的硬度值增大速度极为显著，这是因为柱状晶晶粒尺寸 (40 μm×20 μm) 与细小等轴晶晶粒尺寸 (5 μm) 之间的差异较大而引起的；硬度最高点出现在熔合线附近的细小等轴晶带约为 1170 MPa，并且热影响区未发生明显的软化现象。

2.2 单级时效对 7A52 铝合金焊接接头性能的影响

对 7A52 铝合金激光焊接头进行固溶处理后，分别在 120, 140 和 160 °C 下进行单级时效处理。在不同时效温度中以时间作为单一变量，焊缝中心、母材的硬度随时间的变化而发生规律性变化，分别如图 3、图 4 所示。

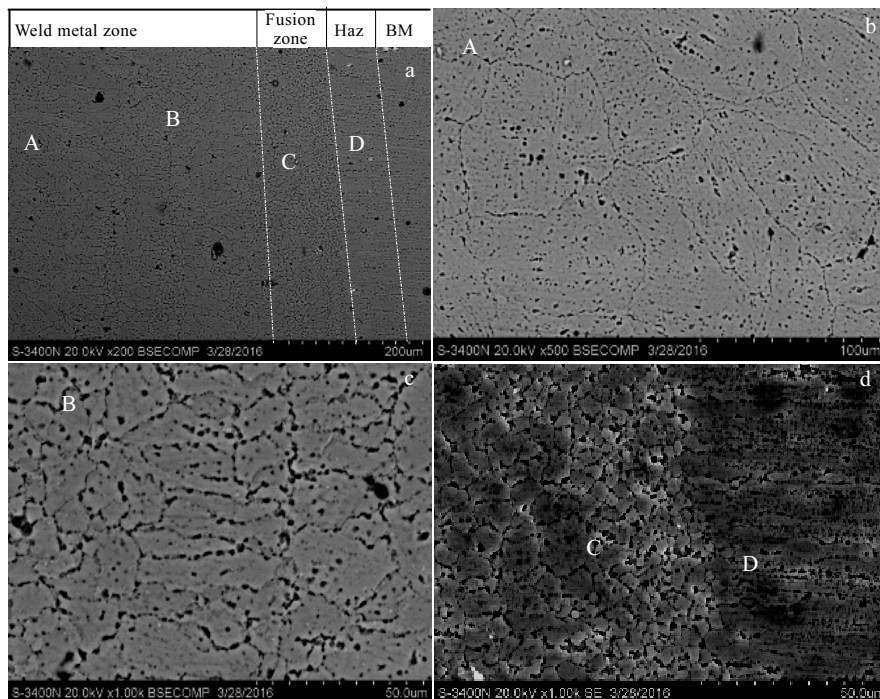


图 1 7A52 铝合金激光焊接头组织形貌

Fig.1 Microstructure of 7A52 aluminum alloy laser welded joint

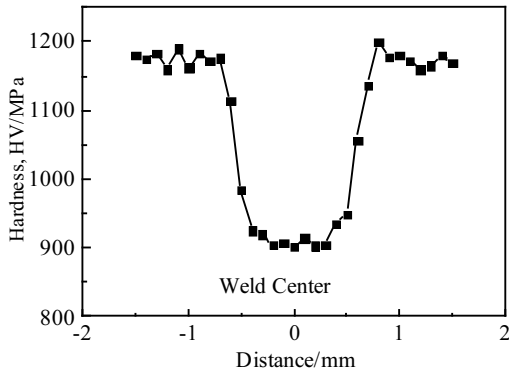


图 2 7A52 铝合金激光焊接接头显微硬度

Fig.2 Microhardness of 7A52 aluminum alloy laser welded joint

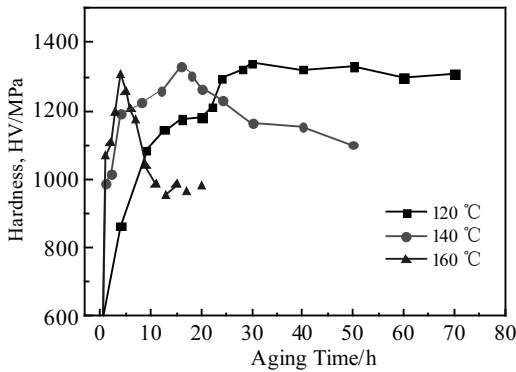


图 3 焊缝在不同温度下单级时效硬度随时间的变化

Fig.3 Weld hardness changes with aging time of the weld at different aging temperatures

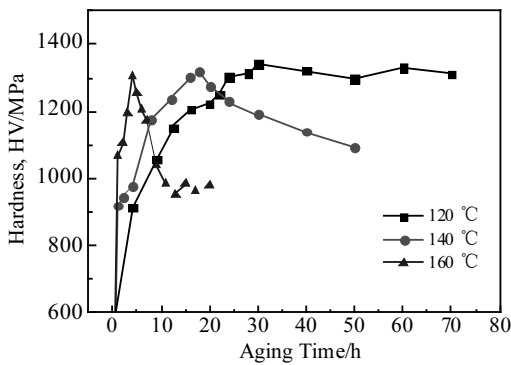


图 4 母材在不同温度下单级时效硬度随时间的变化

Fig.4 Hardness change with aging time of the base metal at different aging temperatures

从图 3 可以发现, 在时效初始阶段, 焊缝的硬度随时间的变化非常明显, 且较高温度下焊缝硬度变化更加明显。当时效温度为 160 °C 时, 经过 3 h 后焊缝硬度接近峰值硬度。在时效前期, 焊缝的强化相大量

析出, 使得焊缝的硬度显著上升提高, 这主要是由于在此阶段焊缝强化相的析出速度要远大于其长大的速度。在相同时间下, 温度越高焊缝强化相的析出速度越快, 硬度变化越明显, 同时也加快了焊缝达到峰值硬度的速度。焊缝在 120, 140 和 160 °C 下进行单级时效达到峰值时效硬度的时间分别是 22~24, 14~18 和 4~5 h。由此可以明显发现, 时效温度将显著影响焊缝达到峰值硬度的速度。从图 3 中还可以看出焊缝在 120, 140 °C 时效获得的峰值时效硬度略大于 160 °C 时效获得的峰时效硬度。

不同温度下焊缝达到峰时效硬度之后, 过时效阶段的硬度变化趋势存在明显差异, 其中 120 °C 过时效阶段的焊缝硬度呈现出一个较为平稳的阶段, 140 °C 过时效阶段焊缝硬度逐渐下降, 160 °C 过时效阶段的焊缝硬度急剧下降, 直至达到与未时效时的硬度相当, 并逐渐趋于平稳。这主要是因为过时效阶段强化相基本析出完毕, 在时效温度较低下, 强化相并未发生明显长大, 所以焊缝的硬度变化并不明显; 当时效温度较高时强化相发生明显长大, 随着时间的延长焊缝硬度会逐渐减小; 当温度过高时强化相长大速度极快, 严重影响了焊缝强化效果, 短时间内将会基本消除原有时效强化效果。

对图 4 进行观察可以发现, 母材在 120, 140 和 160 °C 下进行单级时效达到峰值时效硬度的时间分别是 24~26, 16~18 和 4 h 左右, 即母材在不同温度下单级时效, 达到峰值硬度需要的时间与焊缝的峰时效时间基本一致。由此可以得出, 对 7A52 铝合金激光焊接接头制定时效工艺时, 以母材或者焊缝任意一个作为研究对象, 就可以获得同时适合于二者的时效工艺。

为了进一步优选出综合性能更好的单级峰值时效工艺, 分别对 3 组峰时效工艺下的焊接接头进行了拉伸试验、摩擦磨损试验和电阻率测试, 具体结果如表 1 所示。

从表 1 中可以发现, 7A52 铝合金激光焊接接头的抗拉强度在不同峰时效温度下, 随着时效温度的升高而逐渐减小; 失重量随着时效温度的增大而逐渐增大;

表 1 单级峰时效处理后的焊接接头性能

Table 1 Properties of the welded joint after one-step peak aging treatment

Aging temperature/°C	Tensile strength/MPa	Mass loss/g·min ⁻¹	Conductivity /mS·m ⁻¹
120	355	0.0068	18.8
140	351	0.0070	21.1
160	344	0.0082	22.2

电导率的变化则与后者相同,在 120 °C 时效 24 h 后,焊接接头的电导率最小;与 120 °C 时的峰时效状态相比,在 140 °C 时效 16 h 后焊接接头的抗拉强度下降了 1.13%,失重量增加了 2.94%,电导率却提升了 12.2%;在 160 °C 时效 16 h 后焊接接头的电导率提升了 18.1%,但是其他性能明显降低,接头抗拉强度下降了 3.1%,失重量增加了 20.59%。电阻率在一定程度上能够反映出焊接接头耐腐蚀能力,因此从焊接接头的力学性能、耐腐蚀能力以及时效时间长短的角度考虑,7A52 铝合金焊接接头的单级峰时效工艺应该选择 140 °C,16 h 为宜。

2.3 时效对 7A52 铝合金激光焊接头显微组织的影响

图 5 和图 6 分别给出了 7A52 铝合金光纤激光焊接头(母材、焊缝中心)在 140 °C 时效处理过程中不同阶段的 TEM 照片。从图 5,6 可以看出,在一定的温度下,随着时效时间的延长,母材和焊缝中心晶内的析出相逐渐增多并长大粗化,晶界逐渐变宽且晶界析出相分布不连续,表现出明显的晶间无沉淀析出带。从图 5a,图 5b 中可以看出,焊缝经 140 °C,1 h 时效处理后晶内的析出相数量相当稀少且细小,尺寸为 1~2 nm,晶界很窄;从图 5c,5d 中可以看出,焊缝时效 16 h 以后晶内析出相尺寸大为 4~6 nm、晶界析出

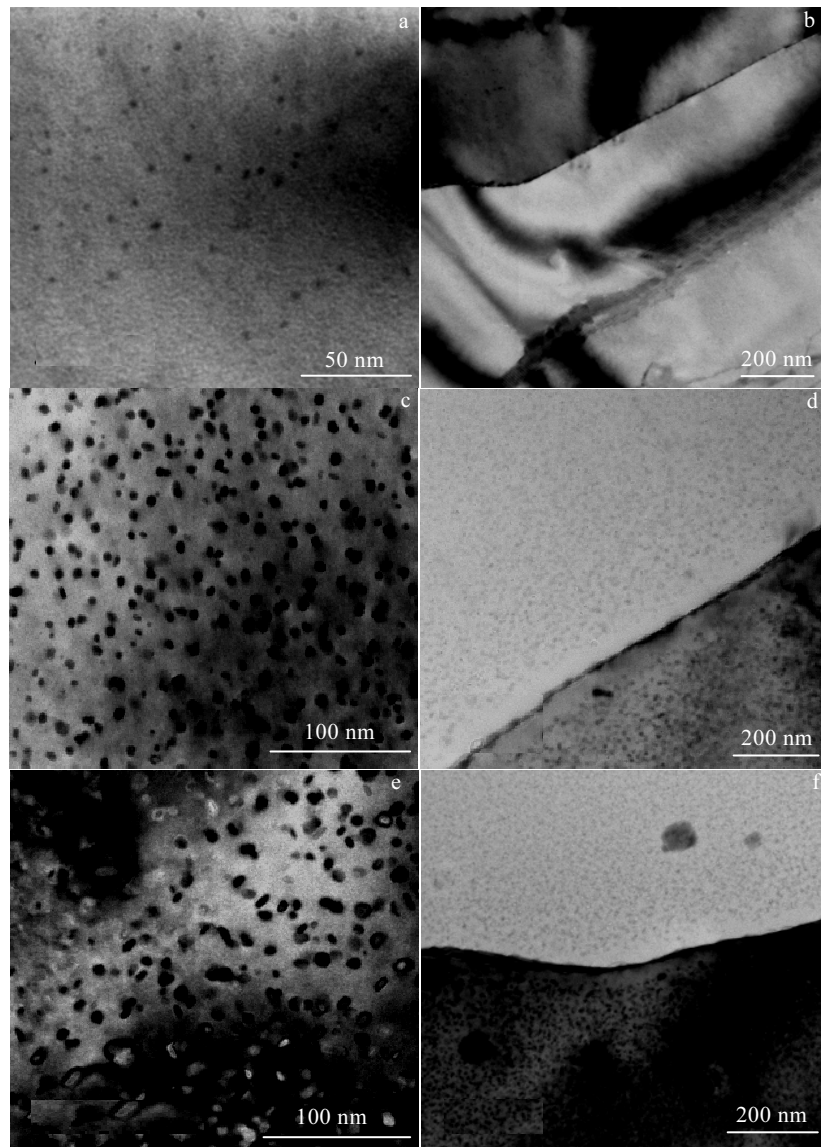


图 5 7A52 铝合金焊缝在 140 °C 时效不同阶段的 TEM 照片

Fig.5 TEM images of 7A52 aluminum alloy weld aged at 140 °C for different time: (a, b) 1 h, (c, d) 16 h, and (e, f) 40 h

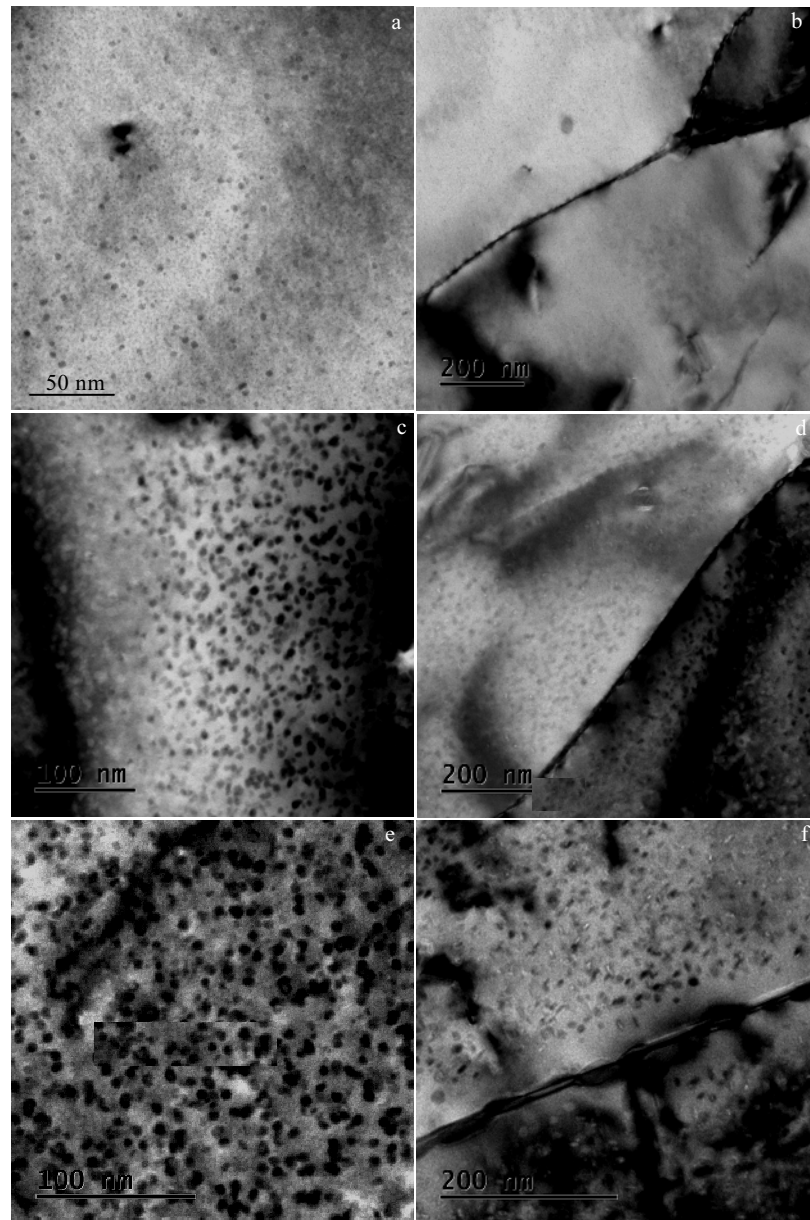


图6 7A52 铝合金母材在 140 °C 时效不同阶段的 TEM 照片

Fig.6 TEM images of 7A52 aluminum alloy base metal aged at 140 °C for different time: (a, b)1 h, (c, d)16 h, and (e, f) 40 h

相明显;从图 5e, 5f 中可以看出,焊缝时效 40 h 晶内的析出相长大到 10 nm 左右且数量明显减少,晶界析出相断续分布,并存在一个宽度为 15~30 nm 的无沉淀析出带。观察图 6 可以发现,母材析出相行为与焊缝的析出相行为基本一致,均随着时效时间的延长晶内析出相逐渐长大、增多,这也导致了前面所述的接头硬化曲线在达到峰值之后又逐渐降低。对比相同阶段母材与焊缝的析出相行为可以发现,母材的析出相数量要明显多于焊缝的析出相,这主要是由于焊接过程中,焊缝的低沸点元素(Mg、Zn 元素)烧损,造

成元素含量降低所引起的,此处,仅从析出相含量的角度也可以说明为何母材的硬度要大于焊缝硬度。

图 7 为 7A52 铝合金激光焊接接头焊缝与母材的 TEM 高分辨图像以及 EDS 分析。对焊缝的高分辨图像进行傅里叶变换后,求出晶面间距 d 值,查 PDF 标准卡片发现 d 值与 $MgZn_2$ 相的标准卡片的 d 值极为接近,并结合能谱分析发现 Mg:Zn 近似为 1:2,由此可以确定焊缝中的析出相为 $MgZn_2$ 相;同理,可以得出母材的析出相仍为 $MgZn_2$ 相。

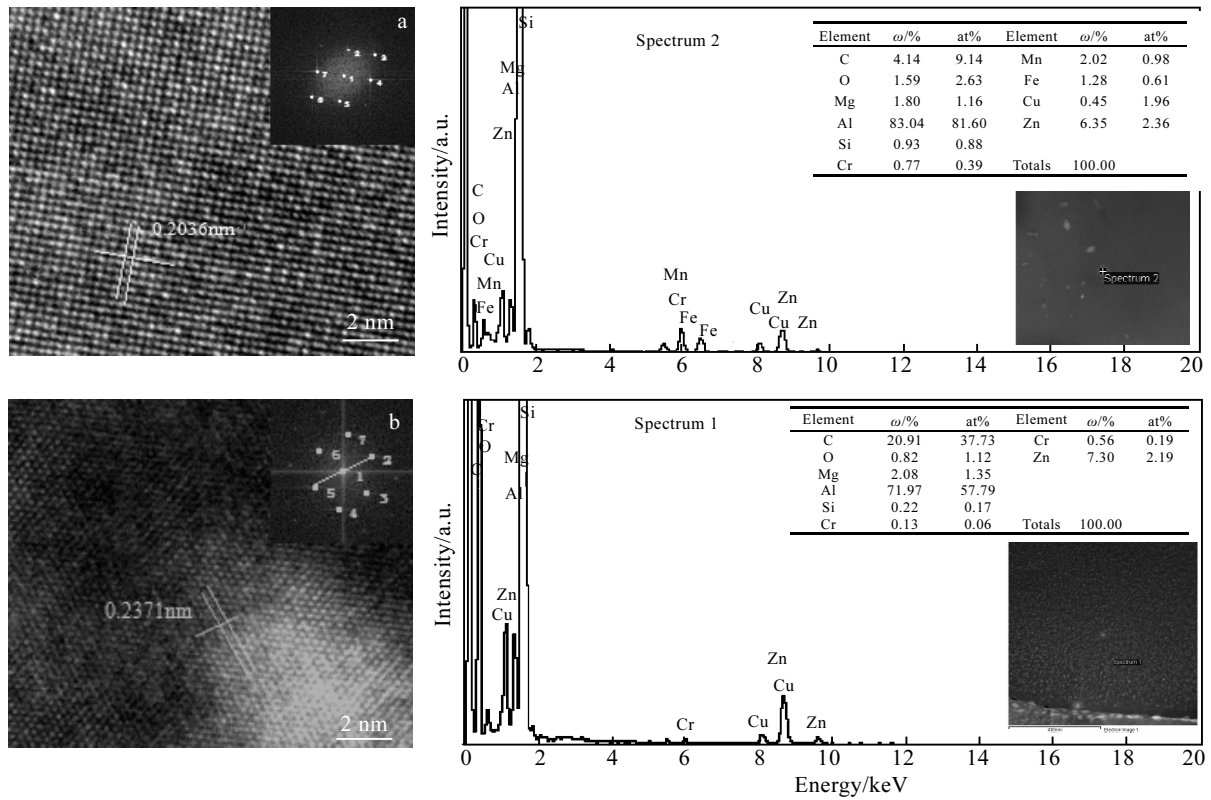


图 7 7A52 铝合金激光焊接接头高分辨图像及 EDS 分析

Fig.7 High-resolution images and EDS analysis of 7A52 aluminum alloy laser welded joint: (a) weld and (b) base metal

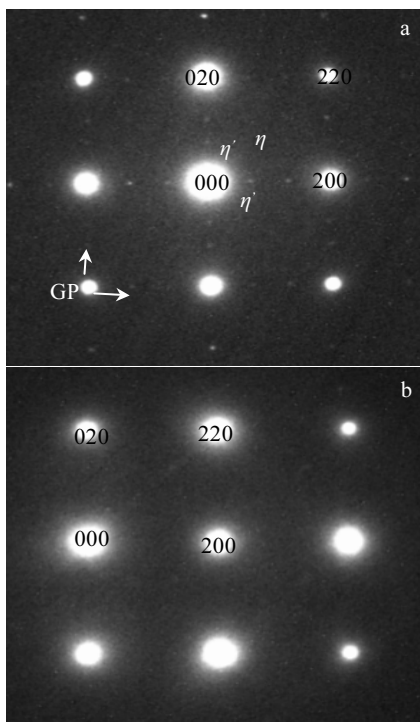


图 8 7A52 铝合金激光焊接接头选区电子衍射花样

Fig.8 Selected area electron diffraction patterns of 7A52 aluminum alloy laser welded joint: (a) weld and (b) base metal

由此可以发现，本试验中的 7A52 铝合金经激光焊接成形之后焊缝的析出相种类与母材的析出相一致，并没有因为焊接过程中的 Mg、Zn 元素烧损而发生变化。

图 8 为 7A52 铝合金激光焊接接头，140 °C 时效处理 16 h 后在 <100> 晶带轴方向焊缝和母材的选区电子衍射花样。从图 8a 焊缝的衍射花样中可以清楚地看到 MgZn₂ 相的衍射斑点，在 2/3{020} 和 2/3{200} 位置；在 {2, 4/3, 0} 位置还存在一些弱斑点，表明存在少量的 GP 区；在 1/3{020} 和 1/3{200} 位置，明显存在着 η' 相的衍射斑点；在 1/3{020} 附近出现了较弱的离散斑点，表明有少量的 η 相生成。母材与焊缝经 140 °C，16 h 时效后的衍射花样基本一致，只是强弱程度存在一定差异，这主要是因为此时母材的析出相要多于焊缝。

3 结 论

1) 相同的时效处理制度下，7A52 铝合金激光焊接接头母材与焊缝的硬化曲线变化基本一致。温度对接头时效过程的影响显著，当时效温度从 120 °C 升高至 160 °C 时，接头硬度变化明显加快，达到峰值硬度的时间明显缩短。

2) 经 140 °C，16 h 时效处理后，接头的抗拉强

度为 351 MPa, 失重量为 0.0070 g/min, 电导率为 21.1 mS/m; 与 120 °C 时的峰时效状态相比, 其接头的抗拉强度下降了 1.13%, 失重量增加了 2.94%, 电导率却提升了 12.2%;

3) 7A52 铝合金激光焊接接头峰时效状态下的主要强化相是细小的 η' (MgZn₂)相和 GP 区。140 °C 时效时, 随着时效时间的延长, 母材、焊缝晶内和晶界的析出相逐渐析出长大, 在相同时效阶段母材的析出相数量要多于焊缝, 并且母材、焊缝晶界处均存在明显的无沉淀析出带。

参考文献 References

- [1] Tian Fuquan(田福泉), Li Niankui(李念奎), Cui Jianzhong(崔建忠). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2005, 133(12): 1
- [2] Cai Zhihai(蔡志海), Li Qi(李奇), Wang Xiancheng(王宪成) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S2): 541
- [3] Huang Lanping(黄兰萍), Chen Kanghua(陈康华), Li Song(李松) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(12): 1943
- [4] Fu Zhihong(傅志红), He Diqu(贺地求), Zhou Pengzhan(周鹏展) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2006, 27(5): 65
- [5] Huang Jiwu, Yin Zhimin, Lei Xuefeng. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 18(4): 804
- [6] Zhai Xiwei, Chen Furong, Bi Liangyan et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2011, 40(S3): 068
- [7] Suo Xiangbo(索相波), Qiu Ji(邱骥), Zhang Jianhui(张建辉). *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2009, 22(4): 61
- [8] Xie R J, Lu Y, Chen F R et al. *Advanced Materials Research*[J], 2012, 602-604: 2078
- [9] Xie Ruijun(解瑞军), Qiu Xiaoming(邱小明), Chen Furong(陈芙蓉) et al. *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2014, 35(12): 40
- [10] Li Hai(李海), Zheng Ziqiao(郑子樵), Wang Xiuzhi(王芝秀). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(7): 1029
- [11] Li Zhihui(李志辉), Xiong Baiqing(熊柏青), Zhang Yong'an(张永安) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(3): 521
- [12] Yao Xiaohong(姚晓红), Zhang Lin(张林), Gao Wenli(高文理) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(12): 2581
- [13] Li Guoai(李国爱), Zhang Kun(张坤), Lu Zheng(陆政) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(4): 1040
- [14] Huang J W, Yin Z M, Fang J F et al. *Materials Science Forum*[J], 2007, 546-549(S1-3): 867
- [15] Huang Jiwu(黄继武), Yin Zhimin(尹志民), Nie Bo(聂波) et al. *Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2007, 38(6): 1045

One-Step Aging Behavior of 7A52 Aluminum Alloy Laser Welded Joint

Chen Chao, Chen Furong, Zhang Huijing

(Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: One-step aging behavior of the 7A52 aluminum alloy laser welded joint was characterized by mechanical property test, electrical conductivity test, EDS and TEM. Results show that the base metal and the weld joint of the 7A52 aluminum alloy need almost the same time to reach peak hardness at different temperatures. When the aging temperature increases from 120 °C to 160 °C, the age hardening speed of the joint is obviously accelerated and the time to peak hardness is significantly reduced. After aging at 140 °C for 16 h, the tensile strength, mass loss and electrical conductivity of the joint are 351 MPa, 0.0070 g/min and 21.1 mS/m, respectively. Compared with the data after aging at 120 °C for 24 h, the tensile strength of the joint decreases by 1.13%, the mass loss increases by 2.94% while the conductivity increases by 12.2%. Thus aging at 140 °C for 16 h is considered as a reasonable one-step aging process. The precipitate phases of both the welded joint and the base metal are MgZn₂. At 140 °C, the precipitate phase increases and coarsens with increasing aging time, and the main strengthening phases are η' phase (MgZn₂) and GP zone at the peak aging state.

Key words: 7A52 aluminum alloy; laser welding; one-step aging; microstructure; properties