

时效对 7A52 铝合金激光焊接头组织性能的影响

陈 超， 陈芙蓉， 张慧婧

(内蒙古工业大学 材料与工程学院,呼和浩特 010051)

摘 要: 通过硬度试验、拉伸试验、光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)和EDS分析等手段,研究了6 mm厚7A52 铝合金光纤激光焊接头时效前后的组织及性能. 结果表明,7A52 铝合金光纤激光焊接头的焊缝中心为粗大的等轴晶,热影响区相变再结晶区域存在着细小的等轴晶,热影响区的晶粒相对母材发生明显的长大,焊缝合金强化相主要是 $T'(Al_2Mg_3Zn_3)$,焊态接头的抗拉强度为304.6 MPa;当时效工艺为一级时效温度120 ℃、一级时效时间12 h、二级时效温度160 ℃、二级时效时间14 h时,焊接接头能够获得相对更好地显微硬度分布,经此时效工艺处理后的焊接接头抗拉强度为326.2 MPa.

关键词: 7A52 铝合金; 光纤激光焊; 时效; 显微硬度; 抗拉强度

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160105004

0 序 言

在20世纪80年代初,由于铝及铝合金的热导率高,对激光的反射极大,曾被人们认为使用激光焊接是不可能实现的.但随着对激光焊接的不断研究发展,目前铝及铝合金激光焊接已经得到了迅速的推广与应用^[1].目前,焊接常用激光器主要有CO₂激光器、YAG激光器、光纤激光器.其中光纤激光器作为一种较新型的激光器,具有功率大、波长短等优点,已经成为国内外铝合金激光焊接的研究重点. Shiganov 等人^[2]研究了薄板AA7075 铝合金T6 状态下低速光纤激光焊接的疲劳断裂性能.发现当焊接速率低于临界值1 mm/s 时,导致焊缝变浅、效率低下等缺点,在循环载荷作用下极易发生疲劳失效;俄罗斯Tu 等人^[3]将光纤激光焊和CO₂激光焊进行了对比,光纤激光焊接铝合金的效率比CO₂激光焊接高出25%~30%,研究中发现,铝合金的光纤激光焊可以得到均匀分布的细晶组织,晶粒尺寸在5~15 μm,热影响区很窄,约为300~400 μm等;在国内,钱红丽等人^[4]对2024 铝合金光纤激光焊进行了研究,发现在合适的工艺下接头抗拉强度可达母材的85%左右;张国伟等人^[5]利用厚板超窄间隙激光焊方法焊接了25 mm厚的5083 铝合金厚板,获得了成形良好无明显缺陷的焊接接头.

7A52 铝合金是国内自行生产的高强铝合金,被广泛应用于军事、国防等部门,其光纤激光焊接研究

才刚刚起步.张智慧等人^[6]、钱红丽等人^[7]分别对3,4 mm的7A52 铝合金的激光焊接头组织性能进行了讨论,发现7A52 铝合金的激光焊焊缝均由狭窄的焊缝熔合区、热影响区、母材三个区域组成,且Zn, Mg元素烧损严重,拉伸断口为韧脆混合断裂.

7A52 铝合金属于Al-Zn-Mg可热处理强化铝合金,Al-Zn-Mg合金的时效沉淀过程一般按此方式进行^[8-9],α-Al过饱和固溶体→G.P.区→η'(过渡相)→η(平衡相).Al-Zn-Mg系铝合金中G.P.区、η'过渡相、η平衡相的尺寸、数量、分布及晶界无沉淀析出带的特性是合金性能的重要影响因素.中南大学黄继武等^[10-11],对7A52 铝合金板材时效工艺进行了研究,结果表明,双级时效后与单级峰值时效相比,强度并未明显降低,电导率有明显提高,从而表明合金抗应力腐蚀性能得到改善.

对铝合金激光焊接的研究已有多,但目前针对7A52 铝合金光纤激光焊的研究内容较少,有关时效对7A52 铝合金光纤激光焊焊缝组织性能的影响更是鲜有报道.因此,文中在前期光纤激光焊参数研究的基础上选取较优参数进行焊接,通过硬度试验、拉伸试验、金相试验、扫描电子显微镜、EDS能谱分析等,对时效处理前后7A52 铝合金光纤激光焊接头的组织及性能进行分析,以便为今后进一步的试验研究与应用提供一定的参考.

1 试验方法

试验采用的7A52 铝合金板材,复验元素质量分数见表1.焊前使用钢丝刷将母材表面刷亮,然后用

丙酮溶液擦洗母材表面,以便彻底清除 7A52 铝合金表面氧化膜.

表 1 7A52 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 7A52 alloy

Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Cr	Fe	Si	Al
4.206	2.264	0.128	0.311	0.124 5	0.228	0.295	0.235	余量

使用 IPG 公司生产的 YLS-6000 光纤激光器,对尺寸为 100 mm×50 mm×6 mm 的 7A52 合金板材沿轧制方向进行对接焊接,由高能量密度的激光束熔透形成接头. 所选择的焊接工艺参数为:焊接功率 4.0 kW、焊接速度 35 mm/s、离焦量 $\Delta f=0$ mm、正背保护气体流量 15 L/min. 焊后试板分成三组,一组焊态不经任何时效处理,二组采用单级时效处理,三组采用双级时效处理. 两种单级时效参数分别为:单级 1(时效温度 120 ℃、时效时间 12 h,简称为 120 ℃+12h),单级 2(130 ℃+14 h);两种双级时效工艺分别为双级 1(一级时效温度 120 ℃、一级时效时间 12 h、二级时效温度 160 ℃、二级时效时间 14 h,简称为 120 ℃+12 h+160 ℃+14 h)和双级 2(130 ℃+14 h+170 ℃+20 h),通过硬度试验选出较优时效参数.

对较优时效工艺处理后的接头进行组织性能分析,通过德国 Axio Imager. A1m 型蔡司显微镜观察时效前后的焊接接头显微组织;使用配有能谱分析的 SS-400 扫描电镜对焊接接头焊缝中心、熔合线附近、母材、拉伸断口进行扫描,并结合金相图谱对接头微区成分进行分析. 采用上海泰明公司 HXD-1000TM 型维氏硬度计测量硬度,加载 300 g,加载时间 15 s,间隔 0.2 mm,硬度测量示意图如图 1 所示. 拉伸试验在 WDW-200 微控电子万能试验机上完成,试样制备参照 GB/T2651-2008《焊接接头拉伸试验方法》,具体试件尺寸如图 2 所示.

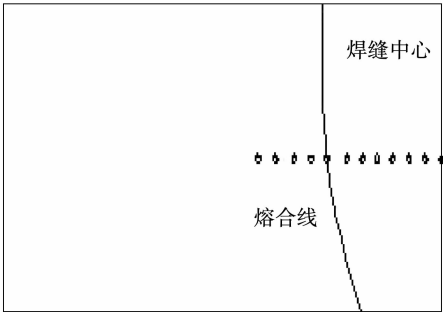


图 1 硬度测量示意图

Fig. 1 Hardness measurement schematic diagram

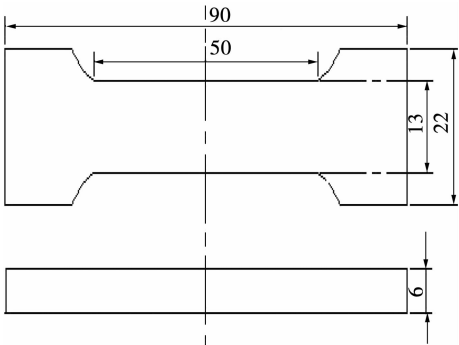


图 2 焊接接头拉伸试样 (mm)

Fig. 2 Tensile sample of welded joint

2 试验结果与讨论

2.1 显微硬度试验

图 3 为 7A52 铝合金光纤激光焊焊接接头在不同时效制度下的硬度曲线. 分别是焊态(未经时效处理的焊接接头)、单级 1、双级 1、单级 2 和双级 2 硬度曲线.

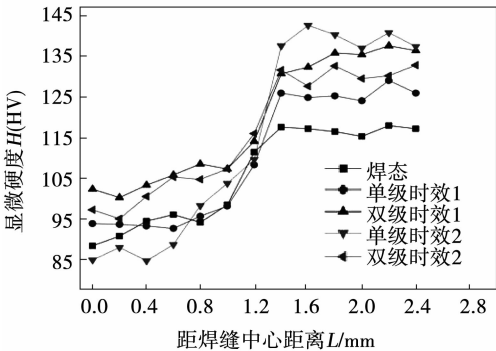


图 3 焊接接头显微硬度

Fig. 3 Microhardness of welded joint

经时效处理后的接头母材与焊态接头母材硬度进行比较时可以发现:时效处理后接头的母材区域硬度值均明显得到提高,可以说明时效处理对 7A52 铝合金板材的时效硬化作用相当明显;单级 2 处理状态后的母材平均硬度值最高,硬度最大值达到 142.7 HV,单级 1 处理后的母材硬度提高得最小. 已有研究表明单级时效处理的温度越高,合金达到峰时效所需的时间越短. 与单级 2 比较可知,单级 1 时效工艺应该属于“欠时效”工艺;对比两种双级时效工艺,双级 1 处理后的接头母材硬度值要大于双级 2 处理后的接头,且双级 2 处理的时间、温度均高于双级 1,所以双级 2 应该属于“过时效”工艺. 由于焊接过程 Mg,Zn 等低熔点元素的烧损,焊缝处的硬度随时效工艺的变化规律与母材的变化规律不同.

焊缝中心处双级时效处理后的硬度值均大于单级时效处理后的硬度,双级 1 处理后的硬度最大,单级 2 处理后的硬度最低;焊缝中心到熔合线附近的硬度逐渐变大,其中双级时效工艺处理的硬度变化较为平稳,单级时效处理后的硬度前段相对平稳、后期却又突然增大。

综合 5 组硬度曲线,从图 3 中可以看出从焊缝中心向母材硬度值均逐渐增加,硬度最高点出现在母材区域、焊缝中心硬度最低,其中双级 2 时效处理后的接头强化效果最好(焊缝硬度提高效果最好,母材硬度提高效果好);熔合线附近的斜率明显变大,属于焊缝硬度与母材硬度的一个转折点,熔合线左侧即焊缝处的硬度明显小于熔合线处的硬度值,熔合线右侧即母材区域的硬度值均明显大于熔合线处的硬度值。从图中硬度曲线的整体变化趋势,未能明显发现热影响区对焊接接头硬度的影响,从熔合

线直接过渡到母材硬度。

以上对不同状态下获得的 7A52 铝合金激光焊接接头硬度分布及变化趋势进行了描述。结合图 3 可以发现双级 1 时效工艺(120 ℃ + 12 h + 160 ℃ + 14 h)对于接头硬度强化的综合效果最好;以下将对双级 1 时效处理后的接头显微组织及力学性能进行分析。

2.2 显微组织分析

图 4 分别为 7A52 铝合金光纤激光焊接接头显微组织,图 4a 为焊态显微组织、图 4b 为双级 1 处理后的显微组织。从图 4 可以发现接头焊缝中心为粗大的等轴晶,热影响区相变重结晶区均匀分布着细小的等轴晶,热影响区靠近相变重结晶区的母材出现了明显的再结晶组织,与母材相比晶粒明显长大,由此可以说明为何熔合线附近的硬度大于焊缝中心硬度、小于母材硬度。

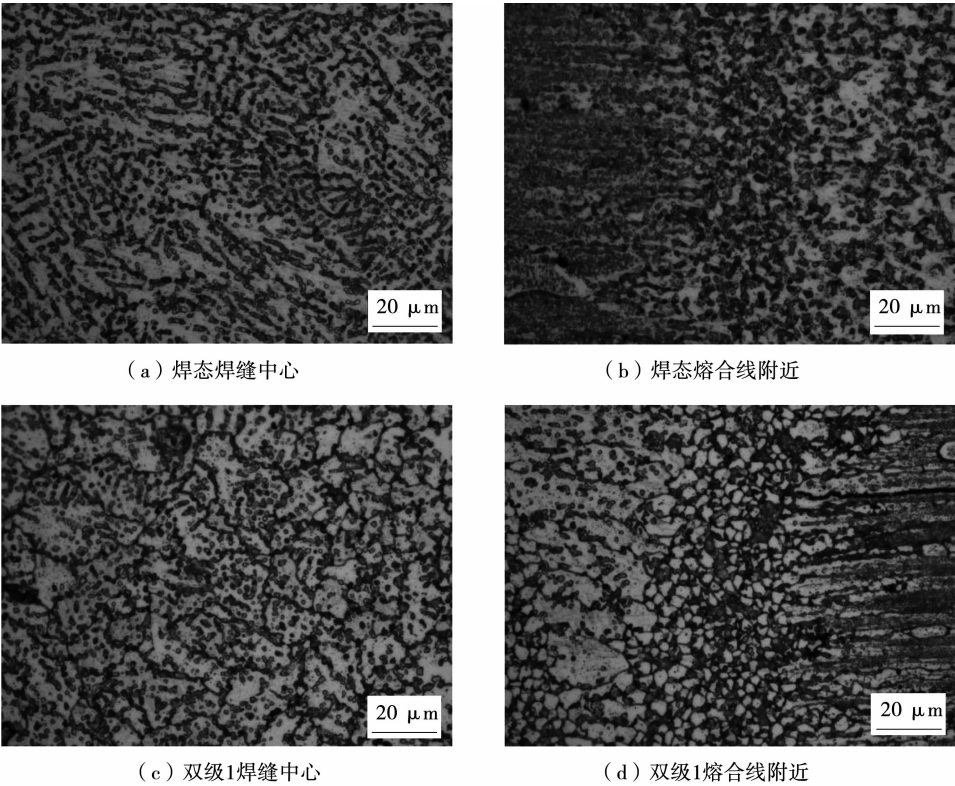


图 4 焊接接头组织形貌
Fig. 4 Microstructure of welded joint

由文献[8-9]可知 Al-Zn-Mg 合金的时效沉淀过程为 α -Al 过饱和固溶体 $\rightarrow$ G. P. 区 $\rightarrow \eta'$ (过渡相) $\rightarrow \eta$ (平衡相)。在 7A52 铝合金光纤激光焊接过程中,焊缝处能量相对集中,会产生大量的热量,所以会导致 Mg, Zn 等低熔点元素烧损,因此焊缝处的 Zn, Mg 元素含量会发生很大改变。Al-Zn-Mg 合金时

效沉淀过程相的变化和 Zn 原子、Mg 原子含量有关,根据 Zn, Mg 原子比的不同,强化相可分为两种情况:①当 Zn:Mg > 2.2 时,合金的强化相主要是 η' ($MgZn_2$);②Zn:Mg $\leq$ 2.2 时,合金的强化相主要是 T' ($Al_2Mg_3Zn_3$),因为当 Zn:Mg $\leq$ 2.2 时合金中不存在 η' ($MgZn_2$)。

对 7A52 铝合金光纤激光焊焊缝进行 EDS 分析,可以发现 Zn 元素含量为 2.43 %,Mg 元素含量为 2.78 %, $Zn:Mg = 0.87 \leq 2.2$,据此可以推断,7A52 铝合金光纤激光焊焊缝合金强化相主要是 $T'(Al_2Mg_3Zn_3)$,具体结果如图 5 及表 2 所示。

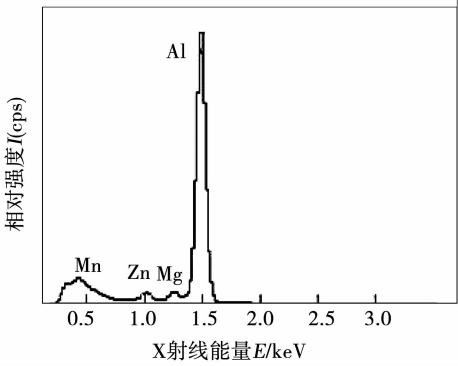


图 5 焊缝 EDS 分析
Fig. 5 Weld EDS analysis

表 2 焊缝元素含量
Table 2 Element content of welded

元素	质量分数 $w(\%)$	原子分数 $a(\%)$
Mg K	2.43	2.78
Al K	91.55	94.63
Mn K	0.32	0.16
Zn K	5.70	2.43
合计	100.00	100.00

从焊态显微组织可以发现,焊缝晶内存在较多的溶质原子富集区(GP 区),未发现析出相 T' 。从图 4b 可以发现,经双级时效处理后的 7A52 铝合金光纤激光焊接头焊缝晶界明显,晶内弥散分布着均匀的析出相 T' ,而且沿着晶界也析出了粗大的 T 相和明显的无沉淀析出带。通过图 3 可知,经双级时效处理后的焊缝硬度均大于焊态的焊缝硬度,与母材硬度变化趋势相近,这主要是由于双级时效工艺中,低温时效相当于成核阶段,高温时效为稳定化阶段,双级时效处理后合金内的相关相及组织达到了一个相对稳定的状态,所以由于合金元素含量不同造成的时效沉淀状态差异基本消除。

2.3 拉伸试验

对 6 mm 厚 7A52 铝合金光纤激光焊焊态接头、双级 1 时效处理后的接头、母材进行拉伸试验,均在焊缝处断裂,拉伸试验结果见表 3。从表 3 可知,母材平均抗拉强度为 478.4 MPa。焊态接头的平均抗拉强度为 304.6 MPa,接头强度系数为 63.7%;经双级 1 时效处理后的接头平均抗拉强度为 326.22

MPa,接头强度系数为 68.2%,与焊态接头的强度度系数相比提高了 4.5%。对接头拉伸断口进行扫描、EDS 分析。

表 3 拉伸试验结果
Table 3 Tensile test result

状态	抗拉强度 R_m /MPa		平均抗拉强度 R'_m /MPa
	1	2	
母材	481.8	475.0	478.4
接头	303.5	305.6	304.1
双级 1	328.7	323.7	326.4

图 6 为焊态和双级 1 时效处理后的拉伸断口形貌,从图 6 中可以发现,二者拉伸断口均分布着深浅不一的韧窝,有较明显的撕裂棱,属于典型的韧脆混合断裂。

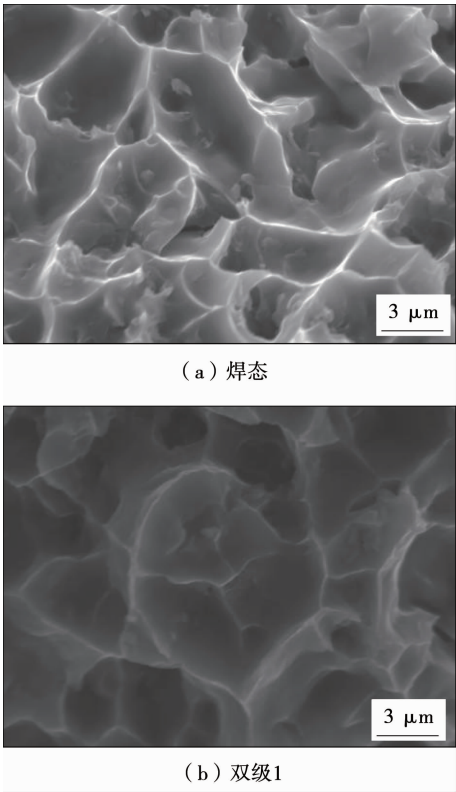


图 6 拉伸断口扫描形貌
Fig. 6 Tensile fracture scanning photos

焊态断口的韧窝上分布着较大的第二相粒子,对这些第二相粒子进行 EDS 分析,可知第二相粒子主要是 $(AlMgZnCu)_n$ 相,与时效处理后的接头拉伸断口进行对比,发现经时效处理后韧窝上的第二相粒子基本消失,具体结果如图 7 及表 4 所示。

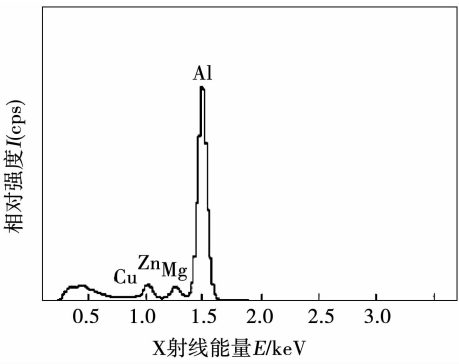


图 7 第二相粒子 EDS 分析
Fig. 7 EDS of second phase particle

表 4 第二相元素含量
Table 4 Element content

元素	质量分数 $w(\%)$	原子分数 $a(\%)$
Mg K	4.89	5.74
Al K	85.00	89.84
Cu K	0.51	0.23
Zn K	9.60	4.19
合计	100.00	100.00

由文献[11]可知由于时效处理对 7A52 铝合金组织的影响,能够提高其抗拉强度;又由于焊态断口上存在较大的第二相粒子,能够促进裂纹扩展降低了接头抗拉强度,所以经双级 1 处理后的接头抗拉强度得到了明显提高。

3 结 论

(1) 当时效工艺为 120 ℃ + 12 h + 160 ℃ + 14 h 时,对 7A52 铝合金焊接接头焊缝、母材硬度的综合改善效果最好。

(2) 7A52 铝合金光纤激光焊焊缝合金强化相主要是 $T'(Al_2Mg_3Zn_3)$;焊态接头的接头强度系数为 63.7%,经双级 1 时效处理后的接头强度系数为 68.2%,与焊态接头的强度系数相比提高了 4.5%。

参考文献:

[1] 周万盛,姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[2] Shiganov L N, Kholopov A A, Oda E I. Special features of laser welding of aluminium alloys[J]. Welding International, 2012, 26(3): 231 – 235.

[3] Tu J F, Paleocrassas A G. Fatigue crack fusion in thin-sheet aluminium alloys AA7075-T6 using low-speed fiber laser welding[J].

Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(1): 95 – 102.

[4] 钱红丽,周琦,陈俐,等. 2024 铝合金光纤激光焊接接头力学性能研究[J]. 焊接, 2013(3): 31 – 33.

Qian Hongli, Zhou Qi, Chen Li, *et al.* Mechanical properties of fiber laser welded 2024 Al alloy joints[J]. Welding & Joining, 2013(3): 31 – 33.

[5] 张国伟,肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 102 – 108.

Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavysection by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 102 – 108.

[6] 张智慧,董世运,王玉江,等. 7A52 铝合金光纤激光焊接接头组织与性能研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 567 – 571.

Zhang Zhihui, Dong Shiyun, Wang Yujang, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser welded 7A52 Al alloy joints[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 567 – 571.

[7] 钱红丽,周琦,陈俐,等. 7A52 铝合金光纤激光焊接接头组织性能分析[J]. 焊接, 2014(9): 49 – 52.

Qian Hongli, Zhou Qi, Chen Li, *et al.* Microstructure and properties of fiber laser welded 7A52 Al alloy joints[J]. Welding & Joining, 2014(9): 49 – 52.

[8] Macchi C E, Somoza A, Dupasquier A, *et al.* Secondary precipitation in Al-Zn-Mg-(Ag) alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(17): 5151 – 5158.

[9] 张坤,刘志义,郑青春,等. 高 Zn 超高强铝合金的回归再时效处理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 188 – 192.

Zhang Kun, Liu Zhiyi, Zheng Qingchun, *et al.* Effects of different retrogression and reaging heattreatment on high-zinc super-high aluminum alloy[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 2005, 36(2): 188 – 192.

[10] 尹志民,方家芳,黄继武,等. 时效工艺对 7A52 铝合金晶间腐蚀和剥蚀行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007(4): 617 – 622.

Yin Zhimin, Fang Jiafang, Huang Jiwu, *et al.* Effects of aging treatment on intercrystalline corrosion and exfoliation corrosion behavior of 7A52 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 2007(4): 617 – 622.

[11] 黄继武,尹志民,聂波,等. 双级时效对 7A52 铝合金组织与性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007(6): 1045 – 1049.

Huang Jiwu, Yin Zhimin, Nie Bo, *et al.* Effects of duplex ageing conditions on microstructures and properties of 7A52 alloy[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2007(6): 1045 – 1049.

作者简介: 陈超,男,1990 年出生,硕士. 主要从事铝合金激光焊工艺及性能的研究. 已发表论文 10 余篇. Email: 929368583@qq.com

通讯作者: 陈芙蓉,女,博士,教授. Email: cfr7075@163.com