

退火处理对激光冲击AZ31镁合金力学性能的影响

杨根妹¹ 张凌峰^{1,2} 何换菊¹

¹河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003

²河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室, 河南 洛阳 471003

摘要 研究了激光冲击AZ31镁合金在不同退火条件下的力学性能及其断口形貌。结果表明:随着退火温度及退火时间的增长,合金的硬度逐渐降低;在相同的退火时间(30 min)条件下,抗拉强度及延伸率在200 ℃~350 ℃温度区内,随着温度的升高逐渐增加,在400 ℃退火后迅速降低;在相同的退火温度(350 ℃)条件下,随着时间的延长抗拉强度逐步降低,伸长率先略有增加然后降低;最佳的退火温度及时间为350 ℃和30 min,抗拉强度和断裂伸长率分别达到342 MPa及18%。不同的退火工艺对激光冲击后合金的断口形貌有明显影响,在350 ℃和30 min退火后断口呈现明显的韧性特征。

关键词 光学制造; AZ31镁合金; 力学性能; 激光冲击; 退火处理

中图分类号 TN249; TG156.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0206002

Effect of Annealing on Mechanical Properties of AZ31 Magnesium After Laser Shock Processing

Yang Genmei¹ Zhang Lingfeng^{1,2} He Huanju¹

¹*School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China*

²*Henan Key Laboratory of Non-Ferrous Materials Science & Processing Technology, Luoyang, Henan 471003, China*

Abstract The variation of mechanical properties and fracture morphology of AZ31 Magnesium alloy after laser shock processing (LSP) at different annealing states is investigated. The results show that the hardness of AZ31 Magnesium alloy decreases when the annealing temperature and holding time increase. When the holding time is 30 min, the tensile strength and elongation go up with the annealing temperature rises from 200 ℃ to 350 ℃ while decline quickly when the annealing temperature reaches to 400 ℃; when the annealing temperature is 350 ℃, with holding time goes on, tensile strength reduces gradually but the elongation first increases and then decreases. The best annealing state is 350 ℃ and 30 min when the tensile strength and the elongation at break are 342 MPa and 18%, respectively. Different annealing treatments have apparent effect on the fracture morphology of AZ31 Magnesium alloy after LSP, it presents remarkable toughness fracture surface morphology when the annealing state is 350 ℃ and 30 min.

Key words optical fabrication; AZ31 magnesium alloy; mechanical properties; laser shock processing; annealing

OCIS codes 140.3460; 160.3900; 180.5810

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-09-12

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目(132300413212)、亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室开放课题(201411)、河南科技大学创新能力培育基金(2014ZCX007)

作者简介: 杨根妹(1988—),女,硕士研究生,主要从事高速应变条件下镁合金的性能研究。E-mail: yang_gm123@163.com

导师简介: 张凌峰(1974—),男,副教授,博士,主要从事有色金属表面强化方面的研究。

E-mail: zh_lingfeng@163.com(通信联系人)

1 引言

镁是地壳中含量最丰富的金属元素之一,也是常用金属中最轻的结构材料,具有比强度高、比刚度高、减震性和导电导热性好、易切削、无污染及易回收等优点,被认为是 21 世纪最有前景的绿色环保型金属材料,在汽车工业、航空航天业以及通讯电子业中已得到广泛的应用^[1-3]。激光冲击强化(LSP)是一种新型的表面强化技术,可以显著地改善材料的硬度、强度、抗腐蚀性及耐磨性等机械性能,具有非接触、无热影响区、可控性强、强化效果明显等特点^[4-6]。相对于其他表面处理技术,该技术可快速、高效地对材料整体或局部区域进行表面强化,目前已经成功应用在很多金属材料上^[7-8],在镁合金上也逐步得到实践和应用^[9]。利用激光冲击强化 AZ31 镁合金可以提高其抗应力腐蚀^[10]及冲击韧性^[11]等性能,但是激光冲击后合金会发生变形且力学性能也会受到影响。退火处理可以降低合金变形后的缺陷,减小或消除激光冲击处理后合金内部的残余应力,改善和提高其综合力学性能^[12]。所以研究退火处理对激光冲击强化后 AZ31 镁合金性能的影响具有及其重要的意义。因此,通过拉伸试验研究了不同退火处理对激光冲击后 AZ31 镁合金力学性能的影响。

2 试验材料及过程

2.1 试验材料

试验材料为 AZ31 镁合金,其化学成分(质量分数,%)为: 3.06 Al, 0.38 Mn, 0.65 Zn, 余为 Mg。试验所用的试样用线切割机床加工成如图 1 所示的几何尺寸,然后采用 420 °C/24 h 固溶处理和 220 °C/8 h 的时效处理。热处理后试样表面要用砂纸打磨至标距尺寸为 10 mm×2 mm×1 mm。

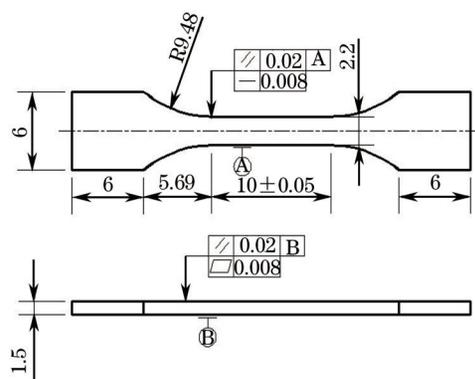


图1 微拉伸试样示意图

Fig.1 Dimension of mini-tensile sample

2.2 激光冲击试验

激光冲击强化 AZ31 镁合金试验在江苏大学进行。试验使用脉冲 Nd:YAG 激光器,激光脉冲能量为 6 J,脉冲波长为 1064 nm,激光功率密度大于 10^9 W/cm²,脉冲宽度为 10 ns,光斑直径为 3 mm。激光冲击时采用 0.1 mm 的美国 3M 公司专用铝箔(其中一面为粘贴剂,与试样表面粘贴)作为激光能量吸收层,便于涂敷和清洗,采用流水作为激光冲击时的约束层,流水厚度为 1~2 mm。冲击试验前,将试样进行抛光,然后放置到盛有乙醇的槽内,利用超声波进行清洗。采用 50% 的搭接率对试样进行冲击,光斑直径为 3 mm,冲击面积均为 36 mm²。

2.3 退火处理

激光冲击处理后,分别对试样进行不同温度相同时间(200 °C、30 min, 250 °C、30 min, 300 °C、30 min, 350 °C、30 min, 400 °C、30 min)及相同时间不同温度(350 °C、10 min, 350 °C、30 min, 350 °C、1 h, 350 °C、2 h, 350 °C、4 h)的退火处理,其中保留一个没有退火的试样做参照样。

2.4 微拉伸试验

微拉伸试验是在 INSTRON 5948R 型微力材料试验机上进行的,所用载荷范围为 1 mN~2 kN,加载频率为 10 Hz,试验的速度范围为 0.1 mm/min,位移控制分辨率为 20 nm;借助 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜(SEM)对试样的断口形貌进行观察分析,电子加速电压为 20 kV。

3 试验结果与分析

3.1 显微硬度分析

激光冲击强化后 AZ31 镁合金试样表面产生了等离子体,能量呈高斯分布,冲击中心显微硬度高达 140 HV。图 2(a)为激光冲击 AZ31 镁合金在不同温度下退火 30 min 后的显微硬度曲线,退火温度分别为 200 °C、250 °C、300 °C、350 °C、400 °C。由图可以看出,在同一退火时间下,随退火温度的升高,冲击区域的硬度迅速下降,一方面是由于退火处理减弱了激光冲击的硬化作用,此外,在 200 °C~250 °C 这一温度区间退火后开始发生静态再结晶^[12-13],随着温度的升高再结晶的速度会加快,试样的硬度值随着温度升高而变低。在 350 °C~400 °C 温度区间,硬度下降不明显,说明 350 °C 以后已基本消除了激光冲击后材料内部的残余应力。

图 2(b)为激光冲击 AZ31 镁合金在 350 °C 不同时间下退火后的显微硬度曲线,退火时间分别为 10 min、30 min、1 h、2 h、4 h。由图可以看出,在同一温度下,随退火时间的延长,冲击区域的硬度下降,当退火时间超过 1 h 时,硬度下降趋势变得很缓慢,硬度值接近基体硬度,此外,当退火温度为 350 °C 时,完成再结晶所需时间越来越短^[13],延长退火时间,硬度的变化并不敏感。

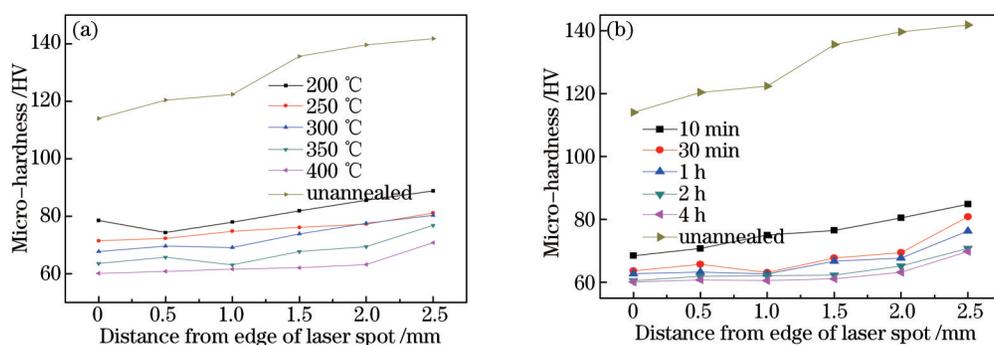


图 2 激光冲击 AZ31 镁合金在不同退火状态下的显微硬度。(a) 不同温度退火 30 min; (b) 在 350 °C 保持不同退火时间
Fig.2 Micro-hardness of magnesium alloys after LSP at different annealing states. (a) After annealing at different temperatures for 30 min; (b) after annealing at 350 °C for different time

3.2 抗拉结果(强度等)分析

图 3 为激光冲击 AZ31 镁合金及其经不同温度和时间退火后的应力-应变曲线。如图 3(a)所示,激光冲击处理后试样的抗拉强度为 305 MPa,伸长率约为 10.2%。而经过 200 °C、30 min 退火后抗拉强度和伸长率都有所提高,分别为 318 MPa 和 10.8%。经 250 °C、30 min 和 300 °C、30 min 退火后抗拉强度增强不明显,伸长率略有增加。经 350 °C、30 min 退火处理后,试样的抗拉强度及断裂伸长率达到最高值,分别为 342 MPa 和 18%,但是经 400 °C 退火后,试样的抗拉强度及伸长率都明显降低,分别降至 260 MPa 和 6.4%。由此,对激光冲击处理后的试样进行适当温度的退火可以逐渐消除激光冲击后的残余应力和加工硬化,且退火后晶粒细化不利于裂纹的传播和发展^[14-15],从而提高了合金的塑性和强度。图 3(b)为激光冲击强化镁合金经 350 °C 不同时间退火处理后的抗拉强度,由图可见,随着退火时间的延长晶粒开始长大,对裂纹和位错运动的阻碍能

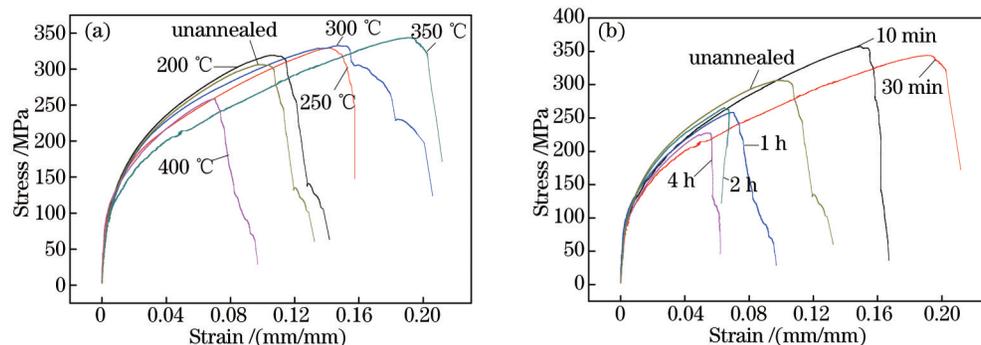


图 3 激光冲击 AZ31 镁合金在不同退火状态下的拉伸应力-应变曲线。(a) 不同温度退火 30 min; (b) 在 350 °C 保持不同退火时间
Fig.3 Tensile stress-strain curves of AZ31 magnesium alloy after LSP at different annealing states. (a) After annealing at different temperatures for 30 min; (b) after annealing at 350 °C for different time

力降低^[15],因此随着退火时间的延长,试样的抗拉强度降低,在1 h,2 h和4 h的退火后抗拉强度和伸长率下降明显,在350 ℃、10 min退火后抗拉强度达到最大值353 MPa,但是伸长率较低,约为13.8%,经350 ℃、30 min退火后,试样的抗拉强度为342 MPa,但伸长率达到最大值18%,由此可见,经350 ℃、30 min退火后的试样综合性能最好。

3.3 断口形貌

图4为AZ31镁合金经激光冲击强化及退火后的拉伸断口SEM形貌,由图4(a)可以看出激光冲击强化后断口分布着少量不均匀的韧窝且韧窝深处有夹杂物,说明微孔是通过夹杂物本身破碎,或是经夹杂物与基体界面脱离而成核。这是由于激光冲击强化致使位错运动而导致了应力集中,或是高应变条件下合金整体变形不协调而产生的^[16]。由图4(b)可以看出经250 ℃、30 min退火后韧窝逐渐均匀,但仍存在明显的解理面,说明退火缓解了激光冲击处理导致的应力集中。图4(c)经350 ℃、10 min退火后的断口,可以看出韧窝变的小而浅,且解理面上也开始有韧窝出现,说明退火处理消减了合金内部的残余应力,提高了材料的塑韧性。观察图4(d)可以看出,经300 ℃、30 min退火后断口分布着大量且均匀的韧窝,断口呈现出韧性特征。图4(e)、(f)分别为350 ℃、2 h及400 ℃、30 min退火后的断口,可以看出韧性明显变差。经350 ℃、2 h退火后,拉伸断口表面相对平整,含有少量大小不等的韧窝,断口表现为准解理断裂;经400 ℃×30 min退火后,断口齐平,表现为解理断裂。将图4(a)、(b)、(d)、(f)对比可以看出,在250 ℃~350 ℃温度区间,随着退火温度的升高,试样的韧性越来越好,但是退火400 ℃、30 min后韧性迅速下降。观察图4(c)、(d)、(e)可以看出,在退火温度为350 ℃时,保温10 min~30 min后的断口韧性增强,但是随着保温时间延长至2 h,韧性明显变差。

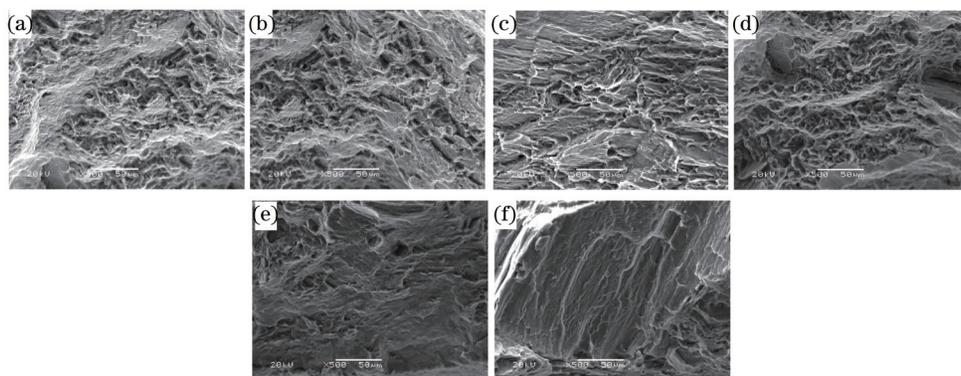


图4 不同退火处理条件下激光冲击AZ31镁合金的断口形貌。(a)激光冲击处理未退火;(b)250 ℃、30 min;(c)350 ℃、10 min;(d)350 ℃、30 min;(e)350 ℃、2 h;(f)400 ℃、30 min

Fig.4 SEM fractographs of AZ31 magnesium alloy after LSP by different annealing treatments. (a) Un-annealed; (b) 250 ℃, 30 min; (c) 350 ℃, 10 min; (d) 350 ℃, 30 min; (e) 350 ℃, 2 h; (f) 400 ℃, 30 min

4 结 论

1) 经激光冲击处理的AZ31镁合金在不同状态退火处理后硬度值发生明显变化,随着退火时间和时间的延长,合金的硬度值呈下降趋势。

2) 退火处理对激光冲击强化后镁合金的拉伸性能影响明显,在退火时间为30 min时,随着退火温度的升高,合金的抗拉强度和延伸率都呈增长趋势,当温度为350 ℃时,拉伸综合力学性能最好,但是当退火温度升至400 ℃时,抗拉强度和延伸率都急剧下降。在退火温度为350 ℃时,随着时间的延长抗拉强度降低,延伸率先略有增加然后降低。

3) 合金断口形貌有明显变化。退火处理后材料内部的残余应力逐渐消除,经350 ℃、30 min退火后,合金韧性增强,断口呈现出明显的韧性特征。

参 考 文 献

- 1 Xu Hongxing, Liu Changhai, Dai Ning. Research and development of magnesium alloy[J]. Heat Treatment, 2006, 21(4): 17-20.
徐宏兴,刘长海,戴宁.镁合金材料的发展与研究[J].热处理,2006,21(4): 17-20.

- 2 Chen Zhenhua. Wrought Magnesium Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 1-20.
陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 1-20.
- 3 Liu Zheng, Zhang Kui, Zeng Xiaoqin. Theoretical Basis and Application of Mg-Based Light Alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
刘 正, 张 奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- 4 Zhang Qinglai, Wang Rong, Hong Yanxin, *et al.*. Study on laser shock forming and fracture behavior of metal sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403010.
张青来, 王 荣, 洪妍鑫, 等. 金属板料激光冲击成形及其破裂行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403010.
- 5 Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu, *et al.*. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503004.
李少哲, 张凌峰, 邢清蒲, 等. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503004.
- 6 Li Yuqin, Li Yinghong, He Weifeng, *et al.*. Wear resistance of 12CrNi3A steel after carburization and laser shock[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0903004.
李玉琴, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击渗碳 12CrNi3A 钢的磨损性能[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0903004.
- 7 Xiao Hongjun, Peng Yun, Ma Chengyong, *et al.*. Surface modification of laser[J]. Surface Technology, 2005, 34(5): 10-12.
肖红军, 彭 云, 马成勇, 等. 激光表面改性[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 10-12.
- 8 Xia Weiguang, Wu Xianqian, Wei Yanpeng, *et al.*. Mechanical properties of NiTi shape memory alloy processed by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103002.
夏伟光, 吴先前, 魏延鹏, 等. 激光冲击强化对 NiTi 形状记忆合金力学性质的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103002.
- 9 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, (9): 54-59.
葛茂忠, 项建云, 张永康, 等. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013, (9): 54-59.
- 10 Li Xingcheng, Zhang Yongkang, Lu Yalin, *et al.*. Research of corrosion resistance for AZ31 magnesium alloy by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403002.
李兴成, 张永康, 卢雅琳, 等. 激光冲击 AZ31 镁合金抗腐蚀性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403002.
- 11 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang, *et al.*. Effect of laser shock processing on impact toughness of AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0303002.
葛茂忠, 项建云, 张永康, 等. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金冲击韧性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0303002.
- 12 Zhan Meiyuan, Li Yuanyuan, Chen Weiping, *et al.*. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy rolled sheets during annealing[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(7): 8-12.
詹美燕, 李元元, 陈维平, 等. AZ31 镁合金轧制板材在退火处理中的组织性能演变[J]. 金属热处理, 2007, 32(7): 8-12.
- 13 Jiang Yongfeng, Bao Huafeng, Yu Zhongtai, *et al.*. Analysis on micro-hardness of AZ31 Mg alloy under different conditions of annealing[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(4): 9-11.
蒋永峰, 包晔峰, 郁中太, 等. 不同退火条件下 AZ31 镁合金的组织 and 硬度分析[J]. 热加工工艺, 2009, 38(4): 9-11.
- 14 Zhang Donghong, Li Saiyi. Effects of annealing on tension and compression properties of AZ31 Mg sheet and their differences[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(10): 170-172.
张冬洪, 李赛毅. 退火对 AZ31 镁板拉伸和压缩性能及其差异的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(10): 170-172.
- 15 X D Ren, L Ruan, S Q Yuan, *et al.*. Metallographic structure evolution of 6061-T651 aluminum alloy processed by laser shock peening: Effect of tempering at the elevated temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 221(25): 111-117.
- 16 Shu Delin. Metal Mechanical Properties[M]. Beijing: Machine Industry Press, 1999. 1-169.
束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 1-169.

栏目编辑: 张浩佳