

文章编号:1671-6833(2020)05-0026-05

基于超声纳米表面改性的镁锂合金强化研究

邹云^{1,2}, 王起龙^{1,2}, 李阳^{1,2}, 卢政彤^{1,2}, 刘书豪^{1,2}, 张银霞^{1,2}

(1.郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001; 2.郑州大学 抗疲劳制造技术河南省工程实验室,河南 郑州 450001)

摘要: 为了得到超声纳米表面改性(UNSM)技术的工艺参数(静压力、移动速度和间距)对 LA106 镁锂合金表面性能指标(硬度、粗糙度和硬化层深度)的影响程度,采用显微硬度计和三维表面形貌测量系统分别测试 LA106 镁锂合金经 UNSM 处理后的显微硬度值和表面粗糙度;并结合显著性方法分析正交试验结果,利用多目标优化设计方法研究了不同 UNSM 工艺参数下的综合强化效果。结果表明: UNSM 工艺参数对 LA106 镁锂合金综合强化效果影响程度由大到小的顺序为静压力、间距、移动速度;经过多目标优化设计,通过直观分析得到了 UNSM 处理 LA106 镁锂合金工艺参数的最佳组合:静压力 0.3 MPa,移动速度 1 500 mm/min,间距 0.05 mm,利用 UNSM 技术强化 LA106 镁锂合金时,主要应考虑静压力的影响。

关键词: 超声纳米表面改性技术; 镁锂合金; 正交试验; 多目标优化设计

中图分类号: TH142.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.05.008

0 引言

随着机械设备轻量化要求的提高,超轻镁锂合金在航空航天、3C、医疗等领域得到了很好的应用。这得益于其比强度和比刚度高、密度小及易于回收等优异性能。但是,由于镁锂合金强度低、耐腐蚀性较差,限制了其广泛应用^[1]。因此,如何提高镁锂合金的机械性能和耐腐蚀性能亟需解决。通常改善材料机械性能和耐腐蚀性能的手段为合金化^[2]、热机械处理(如轧制、挤压)^[1]和表面涂层^[3]等,但这些方法各有不足,例如,合金化容易造成元素污染和浪费、热机械处理损害材料塑性、材料表面的涂层较脆且易脱落。近年来,表面严重塑性变形强化技术被提出以解决这些问题,通过对材料进行处理达到了提高材料的机械和耐腐蚀性能的目的。

当前在金属材料表面获得表面严重塑性变形层的技术主要包括喷丸^[4]、激光冲击强化^[5]和 UNSM 等。UNSM 是一种新兴的冷加工方法,与其他表面变形强化技术相比,能够改善材料的表面形态,具有操作简单、环保、可控性强等优点。最近,部分学者研究了 UNSM 技术对镁合金的机械性能

和耐腐蚀性能影响。Hou 等^[6]利用 UNSM 处理 AZ31B 镁合金,结果表明 UNSM 可以显著改善镁合金的力学性能而不损害其腐蚀速率。Amanov 等^[7]利用 UNSM 处理 AZ91D 镁合金,在其表面产生约 100 μm 厚的纳米晶层,UNSM 处理后的试样摩擦减少了 23%,磨损减少了 30%。

目前,利用 UNSM 技术强化镁合金的研究较少,特别是双相镁锂合金。虽然前人已经做了一些工作,但对于工艺参数的多因素影响及影响程度的研究很少,没有得到合适的镁合金处理工艺参数。因此,本文采用正交试验法,研究 UNSM 工艺参数对表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度的综合影响,并对影响因素进行显著性分析,优选出适合 LA106 镁锂合金的 UNSM 工艺参数。

1 试验方案

1.1 强化设备及方法

试验材料选用中国铝业股份有限公司提供的铸态 LA106 镁锂合金,其化学成分(以质量分数计)为:Li 含量 10.02%,Al 含量 5.69%,Er 含量 0.08%,Mg 余量。首先对镁锂合金进行均匀化处理,处理工艺为 573 K 下保温 12 h;然后对试样进

收稿日期:2020-03-25;修订日期:2020-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51705470,51801185)

作者简介:邹云(1989—),女,贵州遵义人,郑州大学副教授,博士,主要从事镁锂合金研究,E-mail:yunzou@zzu.edu.cn。

行轧制处理,轧制总变形量约为 30%,道次下压量约为 5%;最后对轧板进行 UNSM 处理。UNSM 处理试验设备的主要性能指标:移动速度为 1 000~3 500 mm/min,间距为 0.05~0.3 mm,静压力为 0.05~0.35 MPa,工具头直径为 14 mm,振幅为 10 μm 。试验处理示意图如图 1 所示,其工作原理为:在静压力的作用下,超声波引起工具头产生超声频振动连续冲击工件表面,从而进行加工。为了得到合适的工艺参数,采用正交试验方法对影响强化效果的因素进行科学地分析^[8]。对 UNSM 处理强化效果起主要作用的 3 个因素为静压力、移动速度和间距,其中各试验因素均安排 3 个水平量,因素和水平表如表 1 所示。

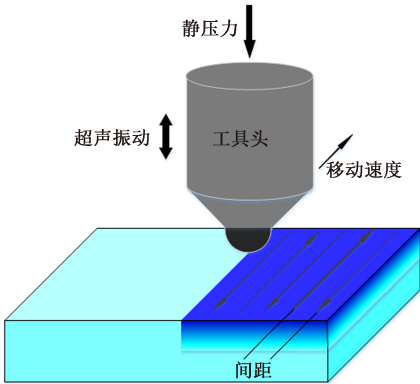


图 1 UNSM 处理示意图

Figure 1 Schematic of the UNSM process

表 1 因素和水平

Table 1 Factors and levels

水平	静压力/MPa	间距/mm	移动速度/(mm·min ⁻¹)
1	0.1	0.05	1 500
2	0.2	0.1	2 000
3	0.3	0.15	2 500

基于 3 因素 3 水平,选用 $L_9(3^4)$ 正交表。试样经 UNSM 技术强化处理后,其硬度和粗糙度都发生了不同程度的改变,硬度和硬化层深度在一定程度上影响着材料的力学性能,表面粗糙度对材料的疲劳性能和耐腐蚀性能具有明显影响^[9-10]。因此,试验性能指标为材料的表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度。

1.2 表征设备及方法

利用 Bruker Nano Inc 公司的 NPFLE 型三维表面形貌测量系统测定试样的表面粗糙度 (R_a),测试面积为 472 μm ×629 μm 。试样的三维形貌如图 2 所示。为确保试验结果的可靠性,每个试样均测试 5 次。

使用 HV-1000 型维氏显微硬度计测定经过

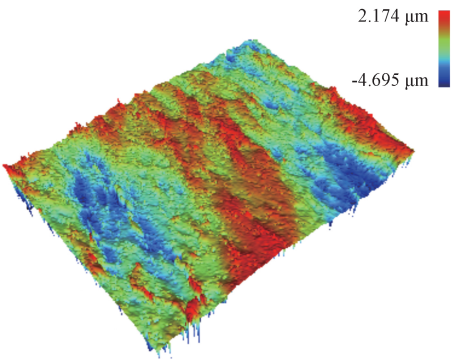


图 2 7 号试样的三维形貌

Figure 2 3D topography of sample No. 7

UNSM 处理的试样表面硬度和截面梯度硬度。为了确定硬化层深度,在合金截面上沿背离处理表面垂直方向按照 50 μm 间隔测试梯度硬度。试验力为 0.5 N,载荷保持 10 s。每个试样均测试 5 次,试样截面的梯度硬度压痕照片如图 3 所示。



图 3 7 号试样截面的梯度硬度压痕照片

Figure 3 The indentation image of cross-sectional microhardness with depth of sample No. 7

1.3 数据分析方法

表面硬度值和硬化层深度越大,材料的强度越高;表面粗糙度值越小,应力集中系数越小,材料的疲劳裂纹越难产生,从而提高疲劳性能。为了更好地表征 UNSM 技术的综合强化效果,采用多指标公式评分法对试样的表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度进行评估^[11]。该方法的具体步骤如下:对于各项指标的最优结果,赋 10 分;最差结果赋 1 分;其余试样各项指标的分数,根据插值法给定分数。本文认为表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度对材料综合性能的影响程度相当,3 项指标权重都为 1,因此其评分公式为:评分=表面硬度分值+表面粗糙度分值+硬化层深度分值。

2 结果与分析

依据试验测定结果并利用上述方法进行分析,可得到正交试验结果及评分如表 2 所示。通常正交试验结果的统计分析方法分为直观分析法和方差分析法。直观分析法可以获得试验工艺参

数的最佳组合,而通过方差分析法进行显著性分析,可以更严谨精确地得到各试验因素对结果的影响程度^[8]。因此,为了准确地对试验结果进行分析,利用直观分析法获得 UNSM 技术处理镁锂合金工艺参数的最佳组合;采用方差分析法分析各因素对表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度的影响程度。根据式(1)和式(2)计算均方比^[8],可得到方差分析结果如表 3~6 所示。

$$F_j = \frac{MS_j}{MS_e} = \frac{SS_j/f_j}{SS_e/f_e}; \tag{1}$$

表 2 UNSM 处理后的正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results after UNSM treatments

组号	静压力/ MPa	间距/ mm	移动速度/ (mm·min ⁻¹)	表面硬 度/HV _{0.05}	表面粗 糙度/μm	硬化层 深度/μm	评分
1	0.1	0.05	1 500	86.1	0.337	250	18.5
2	0.1	0.10	2 000	85.7	0.495	200	7.4
3	0.1	0.15	2 500	83.3	0.522	200	4.6
4	0.2	0.05	2 000	90.6	0.535	250	13.7
5	0.2	0.10	2 500	89.3	0.368	250	19.5
6	0.2	0.15	1 500	92.3	0.474	250	17.3
7	0.3	0.05	2 500	95.0	0.417	300	26.0
8	0.3	0.10	1 500	95.3	0.563	300	20.4
9	0.3	0.15	2 000	96.1	0.505	300	23.3

参考 F 分布表可计算得到临界值 $F_{\alpha}(n_1, n_2)$,其中 $n_1=f_j, n_2=2$ (离差平方和自由度), α 取 0.05,有 $F_{0.05}(2,2)=19.0$ 。当 $F \geq F_{0.05}$ 时,有 95%的把握认为其对结果有显著影响。

2.1 各因素对表面硬度的影响

由表 2 可知经过 UNSM 处理后,LA106 镁锂合金的表面硬度明显增加,这可能归因于材料的加工硬化和表层晶粒细化^[12]。结合表 3 的方差分析结果可以得出结论:静压力对 LA106 镁锂合金的表面硬度具有显著影响,随着静压力的增加,表面硬度逐渐增加;而移动速度和间距对表面硬度的影响程度较小;按照影响程度由强到弱的顺序依次为静压力、移动速度和间距。

表 3 表面硬度的方差分析结果

Table 3 Variance analysis results of surface hardness

因素	SS	f	MS	F
静压力	163.75	2	81.88	67.06
间距	0.44	2	0.22	0.18
移动速度	6.88	2	3.44	2.82
误差 e	2.44	2	—	—

2.2 各因素对表面粗糙度的影响

根据表 2 可知 UNSM 技术可以改变 LA106

$$SS_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}, j = 1, 2, 3, \tag{2}$$

式中: F_j 为均方比; MS_j 为平均离差平方和; MS_e 为平均误差离差平方和; SS_j 为每个因素的离差平方和; f_j 为每个因素的自由度; SS_e 为误差离差平方和; f_e 为误差 e 的自由度; r 为因素数; n 为试验总次数; m 为水平数; K_{ij} 为各因素每个水平对应的试验结果之和; x_i 为每组试验的结果值。

镁锂合金的表面粗糙度。与喷丸或水射流等表面强化技术相比,UNSM 处理后试样的表面粗糙度未发生明显恶化^[13~14]。由表 4 的方差分析结果可以看出:静压力、移动速度和间距的变化对 LA106 镁锂合金的表面粗糙度影响很小。Ye 等^[15]使用不同的静压力对 AZ31B 镁合金进行强化处理,结果表明,表面粗糙度基本没有发生明显变化,这与本次试验结果基本一致。

表 4 表面粗糙度的方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of surface roughness

因素	SS	f	MS	F
静压力	0.003	2	0.002	0.107
间距	0.008	2	0.004	0.286
移动速度	0.009	2	0.005	0.321
误差 e	0.030	2	—	—

2.3 各因素对硬化层深度的影响

材料经过表面强化手段处理后,表层会形成一定深度的硬度梯度场,这有益于改善材料的疲劳和耐摩擦磨损性能^[7,16]。在 UNSM 处理后的试样截面上,沿处理表面垂直方向进行显微硬度测试,结果如图 4 所示。结果表明经过 UNSM 处理后,LA106 镁锂合金表层形成了硬度梯度场。由

图4可近似估计出经过 UNSM 处理后 LA106 镁锂合金的硬化层深度。由于 UNSM 是一种表面强化工艺,仅能对材料表层产生影响,因此硬度值随深度的增加逐渐趋于稳定。结合表5硬化层深度的方差分析结果可以得出结论:静压力对 LA106 镁锂合金的硬化层深度影响最大,随着静压力增大,硬化层深度变大;移动速度和间距对硬化层深度基本没有影响。

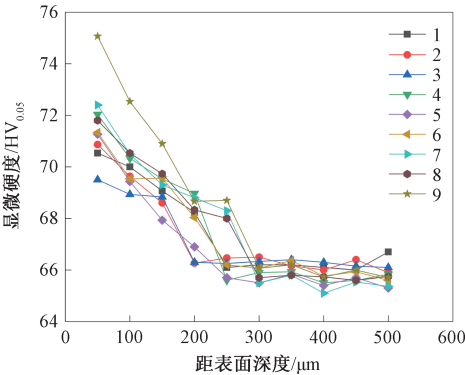


图4 UNSM 处理后 LA106 镁锂合金的截面
显微硬度随深度的变化
Figure 4 Cross-sectional microhardness of LA106
Mg-Li alloy with depth after UNSM treatments

表5 硬化层深度的方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of depth of
hardening layer

因素	SS	f	MS	F
静压力	10 555.56	2	5 277.78	19
间距	555.56	2	277.78	1
移动速度	555.56	2	277.78	1
误差 e	555.56	2	—	—

2.4 各因素对综合强化效果的影响

为更好地反映出工艺参数对试验结果的影响,采用直观分析法分析综合强化效果,即 UNSM 处理对表面硬度、表面粗糙度和硬化层深度的综合影响。根据表2中各个因素每一水平对应的评分的均值可得到各因素对综合强化效果影响的曲线效应图,如图5所示。由图5可获得最好强化效果的最优水平组合:静压力为 0.3 MPa,间距为 0.05 mm,移动速度为 1 500 mm/min。通过方差分析得到各因素对 LA106 镁锂合金综合强化效果影响程度,如表6所示。可得出初步结论:静压力对 UNSM 技术的综合强化效果影响较大,间距次之,移动速度最小。

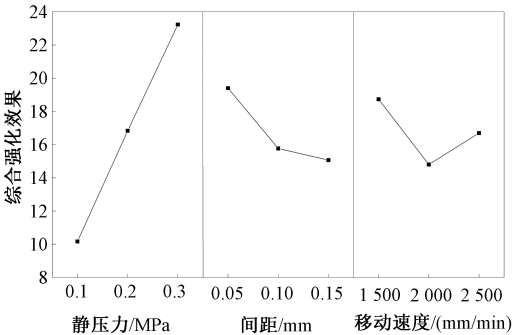


图5 各因素的综合强化效果图
Figure 5 Comprehensive enhancement effect plot of
UNSM of every factors

表6 综合强化效果的方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of comprehensive
enhancement effect

因素	SS	f	MS	F
静压力	256.14	2	128.07	3.01
间距	32.47	2	16.24	0.38
移动速度	23.21	2	11.61	0.27
误差 e	85.24	2	—	—

3 结论

- (1)UNSM 工艺参数对表面硬度和硬化层深度影响程度的显著性由大到小依次为静压力、移动速度和间距。随着静压力的增加,表面硬度和硬化层深度逐渐增大。静压力、间距和移动速度对表面粗糙度基本没有影响。
- (2)UNSM 工艺参数对 LA106 镁锂合金综合强化效果影响程度由大到小的顺序为静压力、间距、移动速度。
- (3)在本次试验所研究的工艺参数范围内,获得的最优工艺参数组合:静压力为 0.3 MPa,间距为 0.05 mm,移动速度为 1 500 mm/min。

参考文献:

[1] 李瑞红,高占勇,徐浩杰,等.变形工艺对 LA91 镁锂合金显微组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48 (14): 27-29,37.

[2] 赵红亮,段晓辉,于洋,等. Al-5Ti-0.25C-8Sr 对 AM60B 镁合金铸态显微组织及性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(5): 49-51.

[3] 高晓辉,景晓燕,李玉峰,等. 镁锂合金表面水性 SiO₂@PANI/VTMS 涂层的防腐性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(1): 42-50.

[4] 何声馨,刘坤坤,王锐,等. 喷丸表面的最佳粗糙度参数与材料硬度的关系[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(1): 83-86.

[5] INAMKE G V, PELLONE L, NING J, et al. Enhancement of weld strength of laser-welded joints of AA6061-T6 and TZM alloys via novel dual-laser warm laser shock peening [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 104(1/2/3/4): 907-919.

[6] HOU X N, QIN H F, GAO H Y, et al. A systematic study of mechanical properties, corrosion behavior and biocompatibility of AZ31B Mg alloy after ultrasonic nanocrystal surface modification[J]. Materials science and engineering C: materials for biological applications, 2017, 78: 1061-1071.

[7] AMANOV A, PENKOV O V, PYUN Y S, et al. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification on the tribological properties of AZ91D magnesium alloy [J]. Tribology international, 2012, 54: 106-113.

[8] 洪伟.试验设计与统计分析[M].北京: 中国农业出版社, 2009.

[9] 徐汝锋,周永鑫,杨慎亮,等. 机械加工表面完整性影响试件疲劳性能的研究现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 96-102.

[10] 陈光军,侯帅,韩松鑫. 加工表面质量对耐腐蚀性能影响的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 25-33.

[11] 邹云,桑振宽,李大磊,等. 304 不锈钢水射流强化工艺的多目标优化设计[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 25-29.

[12] 曹小建,冯磊磊,张宗培,等. 304 不锈钢超声表面纳米化后的表征[J]. 南通大学学报(自然科学版), 2014, 13(3): 49-53.

[13] 盖鹏涛,陈福龙,尚建勤,等. 喷丸强化对表面完整性影响的研究现状与发展[J]. 航空制造技术, 2016,59(20): 16-21.

[14] 叶峰,武美萍,缪小进,等. 基于高压纯水射流的 45 钢表面强化研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 147-153.

[15] YE H, SUN X, LIU Y, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on mechanical properties and corrosion resistance of AZ31B Mg alloy [J]. Surface and coatings technology, 2019, 372: 288-298.

[16] AMANOV A, KARIMBAEV R, MALEKI E, et al. Effect of combined shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification processes on the fatigue performance of AISI 304 [J]. Surface and coatings technology, 2019, 358: 695-705.

Strengthening Research of Mg-Li Alloy Based on Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification

ZOU Yun^{1,2}, WANG Qilong^{1,2}, LI Yang^{1,2}, LU Zhengtong^{1,2}, LIU Shuhao^{1,2}, ZHANG Yinxia^{1,2}

(1.School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2.Henan Province Engineering Laboratory of Anti-Fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To obtain the influence of process parameters (static pressure, scanning speed and feed) of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technology on the surface performance indexes (microhardness, surface roughness and depth of hardening layer) of LA106 magnesium-lithium (Mg-Li) alloy, the microhardness tester and the three-dimensional surface topography measurement system were utilized to test the microhardness and surface roughness of LA106 Mg-Li alloy after UNSM treatments. Combined with the saliency method, the orthogonal experimental results were analyzed, and the multi-objective optimization design method was used to study the comprehensive enhancement effect under the different UNSM process parameters. The results showed that the order of UNSM process on the comprehensive enhancement effect of LA106 Mg-Li alloy was as follows: static pressure, feed, and scanning speed. After multi-objective optimization design, the optimal combination of UNSM process parameters of LA106 Mg-Li alloy was obtained through intuitive analysis: static pressure of 0.3 MPa, scanning speed of 1 500 mm/min and feed of 0.05 mm. Therefore, the effect of static pressure should be mainly considered when UNSM technology was utilized to strengthen LA106 Mg-Li alloy.

Key words: ultrasonic nanocrystal surface modification technology; Mg-Li alloy; orthogonal experiment; multi-objective optimization design