

文章编号:1671-6833(2009)01-0001-05

## 喷丸对高强度变形镁合金 ZK60-T5 高周疲劳性能的影响

刘文才<sup>1,2</sup>, 董杰<sup>1</sup>, 翟春泉<sup>1,2</sup>, 丁文江<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240; 2. 上海交通大学 金属基复合材料国家研究中心, 上海 200240)

**摘 要:** 为了研究高强度变形镁合金 ZK60 经喷丸处理后的表面变形层微观组织结构的变化及其对高周疲劳性能的影响, 首先对用半连续铸造的方法浇注的圆棒进行热挤压, 挤压比为 14, 并对挤压棒进行 T5 热处理后加工成漏斗型疲劳试样, 标记为 ZK60-T5。然后对一部分疲劳试样进行喷丸处理, 观察喷丸后试样表面变形层的微观组织变化规律, 并研究喷丸处理后表面粗糙度、变形层的显微硬度和残余压应力对 ZK60-T5 镁合金高周疲劳性能的影响。结果表明: 高强度变形镁合金 ZK60-T5 的最佳喷丸工艺为 0.05 mmN, 且经喷丸强化后, ZK60-T5 镁合金表面变形层的微观组织发生了变化, 疲劳强度由 150 MPa 提高到 195 MPa, 提高了 30%, 疲劳寿命得到显著提高, 而在表面变形层残余压应力场的作用下疲劳裂纹源由表面被“驱赶”到表面强化层下。

**关键词:** 镁合金; ZK60; T5; 喷丸; 高周疲劳

**中图分类号:** TG 146.2\*2

**文献标识码:** A

### 0 引言

在现有用量较大的工程金属中, 镁合金密度最小(为  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ), 并且具有高的比强度和比刚度, 导热、导电性较好同时兼有良好的阻尼减震和电磁屏蔽性能, 易于加工成型, 镁的资源丰富、废料容易回收。镁合金成为现代汽车、航空航天、电子、通信、计算机、家电、医疗、轻工等行业的首选材料, 被称为“21 世纪的绿色工程材料”<sup>[1]</sup>。

由于采用镁合金能减轻汽车重量, 因此, 大量采用镁合金将是未来汽车制造业发展的重要方向<sup>[2]</sup>。但是这些汽车零部件在工作中承受交变载荷和腐蚀环境的共同作用, 其失效通常由疲劳破坏而引起, 故镁合金在腐蚀环境和高温环境等有害条件下的疲劳性能越来越受到材料研究人员的重视。

众所周知, 镁合金的疲劳断裂往往从表面、表面层或表面下层开始, 尤其是在应力集中部位开始, 因此, 通过表面强化提高镁合金表面的强度和硬度是提高疲劳性能的有效方法之一。工程上已有了多种表面强化工艺<sup>[3]</sup>, 其中应用最广泛的是

表面喷丸强化, 它具有设备简单、操作方便、节省时间、成本低廉和效果显著适应面广等优点。因此, 作者将热挤压且经 T5 热处理的 ZK60(标记为 ZK60-T5)镁合金进行表面喷丸强化处理, 并对喷丸处理后表面变形层微观组织的变化及其对高周疲劳性能的影响进行了研究。

### 1 试验材料与方法

采用挤压态 ZK60 镁合金, 其化学成分(质量分数, %)为  $\text{Mg}-5.54\text{Zn}-0.56\text{Zr}$ , 制备工艺为: 首先用半连续铸造的方法浇注尺寸为  $\Phi 100 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$  的圆棒, 并在  $400^\circ\text{C}$  下进行 14 h 的均匀化处理, 然后在  $390^\circ\text{C}$  下热挤压成  $\Phi 26.8 \text{ mm}$  的挤压棒, 挤压比为 14, 并对挤压棒进行 T5 ( $150^\circ\text{C}/24 \text{ h}$ ) 热处理后加工成漏斗型疲劳试样, 标记为 ZK60-T5。

用片状拉伸试样(标距为  $15 \text{ mm} \times 3.6 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ) 在 Zwick/Roell Z020 万能材料实验机上测试 ZK60-T5 的室温力学性能, 应变速率为  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , 结果如表 1 所示。疲劳性能采用漏斗型疲劳试样测试; 另外, 在机械加工之后要对所有的

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 上海市浦江人才计划资助项目(06PJ14062)

作者简介: 刘文才(1980-), 男, 河南人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事表面处理对镁合金疲劳性能的影响研究, E-mail: liuwc@sjtu.edu.cn

疲劳试样进行抛光以消除加工缺陷对试验结果的影响。

表 1 ZK60-T5 镁合金的室温力学性能

Tab.1 Tensile properties of magnesium alloy ZK60-T5

合金	试验方向	YS/MPa		UTS/MPa		EL/%	
		$\bar{v}$	s	$\bar{v}$	s	$\bar{v}$	s
ZK60-T5	平行于挤压方向	273	4.4	329	3.2	16.5	0.9

喷丸试验所用弹丸为玻璃丸,相关参数如表 2 所示.喷丸试验中,喷嘴与疲劳试样之间的距离为 100 mm,为了获得最佳喷丸工艺,选用喷丸强

度范围为 0.02~0.40 mmN 进行喷丸工艺优化。

疲劳试验在旋转弯曲疲劳试验机上进行,应力比为  $R=-1$ ,试验频率为 100 Hz,试验应力范围为 140~300 MPa。

金相观察采用 Leica MEF-4M 型显微镜;合金相、宏观织构以及残余应力的测试均采用 D/MAS-III A 型 X 射线衍射仪,其中,残余应力随变形层深度的变化规律是采用逐层电解抛光并在 X 射线衍射仪上测试的;喷丸形貌和疲劳断口采用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜观察。

表 2 玻璃丸参数

Tab.2 Parameters of the peening medium

Class beads composition/%					Diameter / $\mu\text{m}$	Hardness (HV)	Density / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
73	8	4	13	2	250~400	49	2.4~2.6

2 试验结果与分析

2.1 表面变形层微观组织

图 1 为 ZK60-T5 镁合金喷丸前后的微观组织,两者都为平行于挤压方向的截面,可以发现,ZK60-T5 喷丸前的微观组织(图 1(a))有不甚

明显的挤压流带,晶粒分布不均匀但较圆整,而经喷丸处理后,其带状微观组织(图 1(b))相对于喷丸前发生了扭曲变形,晶粒明显细化,这与图 2 的观察结果是一致的,从图 2 可以看出,ZK60-T5 镁合金表面变形层的厚度随喷丸强度的增大而显著增大,且变形层的晶粒明显细化。

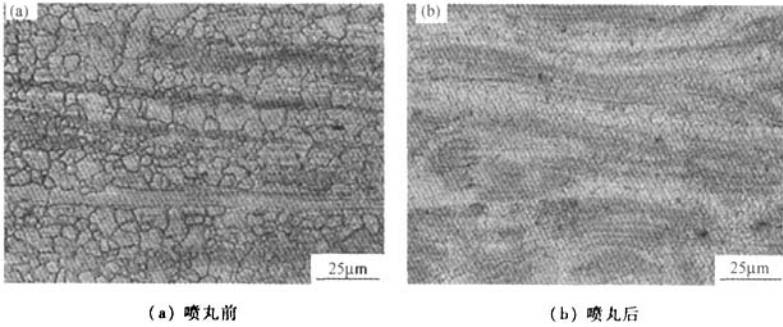


图 1 ZK60-T5 镁合金喷丸前后的微观组织

Fig.1 Microstructure of ZK60-T5 before and after shot peening

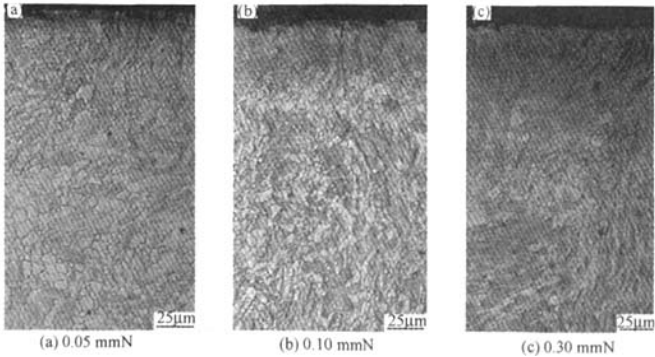


图 2 ZK60-T5 镁合金表面变形层随喷丸强度的变化规律

Fig.2 Section topographies of peened ZK60-T5 at different Almen intensities

## 2.2 高周疲劳

图3给出了ZK60-T5镁合金的喷丸工艺优化曲线,即疲劳寿命随喷丸强度的变化曲线,为了更好地选取最佳喷丸工艺参数,作者选择了两组应力,分别为185 MPa和200 MPa。从图3可看出,对比同应力条件下未喷丸试样的疲劳寿命,喷丸处理可显著提高ZK60-T5镁合金的疲劳寿命,且在低应力水平下,疲劳寿命提高的幅度更大。另外,在同一个应力水平下,疲劳寿命随喷丸强度的增大先大幅度提高,而后又急剧降低,喷丸强度在0.02~0.10 mmN之间时,疲劳寿命的提高更加明显;同时,在两个应力水平下,喷丸强度为0.05 mmN时对应的疲劳寿命都为最大,即ZK60-T5镁合金的最佳喷丸强度为0.05 mmN。

图4为ZK60-T5镁合金在最佳喷丸强度条件下的 $S-N$ 曲线,与未喷丸试样的 $S-N$ 曲线相比,在最佳喷丸强度条件下各个应力对应的疲劳寿命都有了明显的提高,且在低应力水平疲劳寿命提高的幅度更大,可提高大约两个数量级;而ZK60-T5镁合金喷丸前后对应于疲劳寿命为 $10^7$ 次的条件疲劳强度分别为150 MPa和195 MPa,即经最佳喷丸处理后ZK60-T5镁合金的疲劳强度提高了45 MPa,增幅达30%。

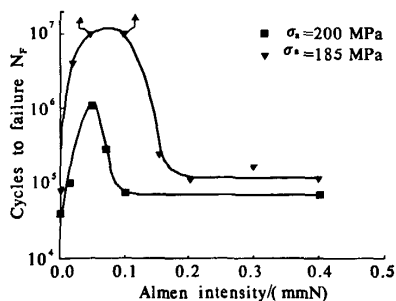


图3 ZK60-T5镁合金的喷丸优化工艺曲线

Fig.3 Fatigue life vs. Almen intensity of peened ZK60-T5 at stress amplitudes of  $\sigma_a = 185$  and 200 MPa

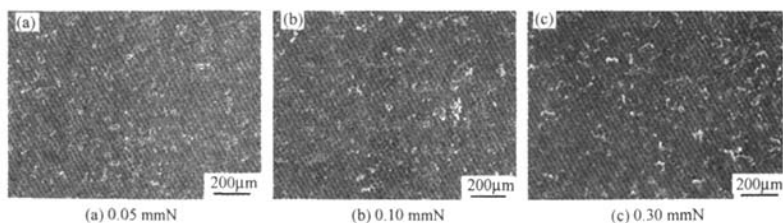


图5 ZK60-T5镁合金经不同喷丸强度处理后的表面形貌

Fig.5 Surface topographies of peened ZK60-T5 at different Almen intensities

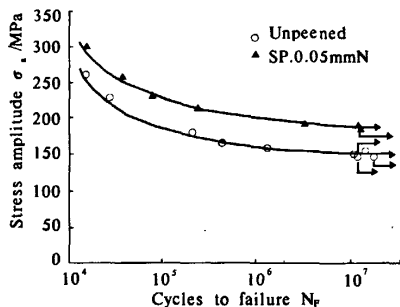


图4 ZK60-T5镁合金喷丸前后的 $S-N$ 曲线

Fig.4  $S-N$  curves of ZK60-T5 magnesium alloy after optimum shot peening

图5为ZK60-T5镁合金经不同喷丸强度处理后的典型表面形貌,从图中可以看出,ZK60-T5镁合金经喷丸处理后表面产生了明显的缺陷,随着喷丸强度的增加表面缺陷更大,甚至有微裂纹产生(图5(c)).ZK60-T5镁合金喷丸后表面粗糙度随喷丸强度的变化曲线如图6所示,试样的表面粗糙度随喷丸强度的增大而增加,这也可从图2中看到相似的结果。

ZK60-T5镁合金喷丸后的表面变形层显微硬度变化曲线如图7所示。在同一深度,试样表面的显微硬度随喷丸强度的增大而提高;在同一个喷丸强度下,试样表面的显微硬度随变形层深度的增大而降低,但降低的幅度逐渐减小。ZK60-T5镁合金经强度为0.02~0.40 mmN的喷丸处理后的变形层深度大约在80~250  $\mu\text{m}$ ,与图2观察中的塑性变形层结果是一致的。

试样喷丸后的残余应力如图8所示。从图中可以看出,喷丸处理可以在试样表面层产生残余压应力,在不同的喷丸强度下,变形层中的残余压应力随喷丸强度的增大而增加,位于试样表面下55~85  $\mu\text{m}$ 处的最大残余压应力大约为56~112 MPa;而在同一个喷丸强度下,残余压应力随变形层深度的增大先急剧增加而后逐渐减小。

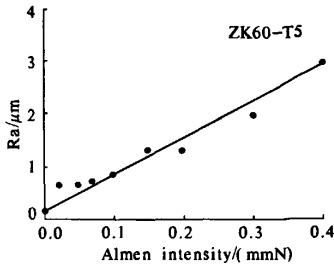


图6 ZK60-T5 镁合金喷丸后表面粗糙度随喷丸强度的变化曲线

Fig. 6 Surface roughness profile of peened ZK60-T5

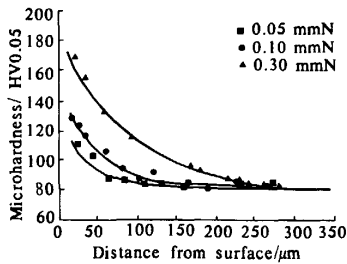


图7 ZK60-T5 镁合金喷丸后的表面变形层显微硬度变化曲线

Fig. 7 Microhardness-depth profile of peened ZK60-T5

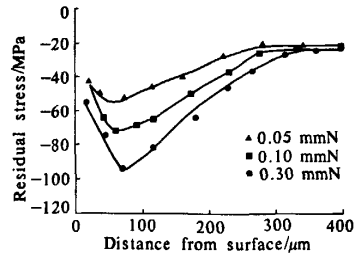


图8 ZK60-T5 镁合金喷丸后的表面变形层残余压应力变化曲线

Fig. 8 Residual stress-depth profile of peened ZK60-T5

喷丸和未喷丸处理试样疲劳断裂断口形貌示于图9。可以看出,未喷丸处理试样的疲劳裂纹源多位于试样表面(图9(a)),而经低喷丸强度处

理后的试样疲劳裂纹源位于次表面层(图9(b)),随着喷丸强度的增大,疲劳裂纹源呈多源化的趋势(图9(c))。

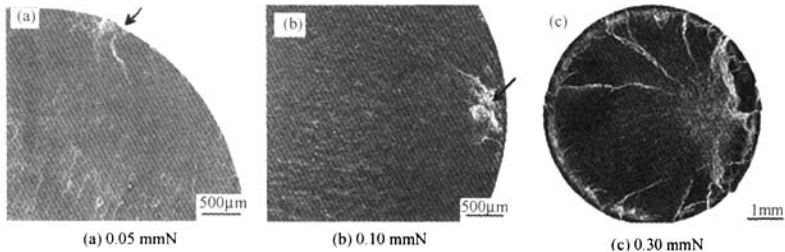


图9 ZK60-T5 镁合金疲劳裂纹源 SEM 观察(箭头所指为裂纹萌生位置)

Fig. 9 Fatigue crack nucleation sites of ZK60-T5 (SEM)

已有研究表明<sup>[4-5]</sup>,喷丸强化原理是利用机械能使试样表面产生塑性变形,引起加工硬化,使试样表层获得很高的硬度,并引入较大的残余压应力,从而使裂纹扩展的动力—外加拉应力与残余压应力合成的最大“有效拉应力”降低,进而可提高疲劳裂纹萌生的临界应力水平(即疲劳极限)。另外,由于最大“有效拉应力”不在表面而在次表面层的残余拉应力区,疲劳裂纹源要在最大“有效应力”处的次表面层萌生其临界应力比在表面萌生时要大,因为表面晶粒内位错受约束小,容易滑移和开动,而在次表面层位错受周围晶粒约束和需要周围晶粒的协调所以不易开动,故临界应力高,因此,喷丸强化所产生的残余压应力迫使裂纹萌生于次表层;而次表层裂纹萌生期、扩展期较长,从而提高了疲劳强度,延长了疲劳寿命<sup>[5-7]</sup>。喷丸强化引入的表面层残余压应力对改善疲劳性能来说非常有利,属于强化因素;但喷丸强化时造成的表面粗糙度增加却是不利的,是弱化因素。表面粗糙度的增加相当于增加了缺口的敏感度,加剧了材料局部的应力集中,这会大大降低材料的疲劳性能。

### 3 结论

(1) ZK60-T5 镁合金的最佳喷丸强度为 0.05 mmN,经喷丸强化后,其表面的带状微观组织相对于喷丸前发生了扭曲变形,晶粒明显细化。

(2) 喷丸强化后,ZK60-T5 镁合金的疲劳寿命得到显著提高,在最佳喷丸工艺下,其疲劳强度由喷丸前的 150 MPa 提高到 195 MPa,提高了 30%。

(3) 喷丸处理后试样表面的粗糙度明显增加,其对改善疲劳性能来说是不利的;同时,喷丸强化可显著提高试样表面变形层的显微硬度,并引入较高的残余压应力,将疲劳裂纹源由表面“驱赶”到表面强化层下,从而提高了 ZK60-T5 镁合金的疲劳强度,延长了疲劳寿命。

### 参考文献:

- [1] GRAY J E, LUAN B. Protective coatings on magnesium and its alloys - A critical review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 336(1-2): 88-113.
- [2] VIEHWEGER B, LEYENS C. Hydromechanisches

- tiefziehen und hochdruckblech – umformung als verfahren zur herstellung komplexer bauteile aus magnesium – feiblechen des typs AZ31B-0[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2004, 35: 440 – 446.
- [3] 朱荆璞. 金属表面强化技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] NOBRE J P, DIAS A M, KORNMEIER M, An empirical methodology to estimate a local yield stress in work – hardened surface layers[J]. Society for Experimental Mechanics, 2004, 44(1): 76 – 84.
- [5] SRIDHAR B R, RAMACHANDRA K, PADMANABHAN K A. Effect of shot peening on the fatigue and fracture behaviour of two titanium alloys[J]. Journal of materials science, 1996, 31(22): 5953 – 5960.
- [6] HILPERT M, WAGNER L. Response of light alloys to mechanical surface treatments: comparison of magnesium and aluminium alloys[J]. Magnesium Alloys and Their Applications, Kainer, K. U. (ed.), Wiley – VCH, Weinheim, 2000, 525: 463 – 468.
- [7] HATAMLEH O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints[J]. International journal of fatigue (2008), doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.03.029.

### Influence of Shot Peening on High Cycle Fatigue Properties of High – strength Wrought Magnesium Alloy ZK60 – T5

LIU Wen – cai<sup>1,2</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>, ZHAI Cun – quan<sup>1,2</sup>, DING Wen – jiang<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Key State Laboratory of Metal Matrix Composite, Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to study the influence of shot peening on high cycle fatigue properties of high – strength wrought magnesium alloy ZK60, firstly, as – cast cylindrical bars were produced by semi – continuous casting, and which were hot extruded to as – extruded cylindrical bars of 26.8 mm in diameter, with an extrusion ratio of 14, T5 treatment was applied to the as – extruded cylindrical bars, hour – glass shaped round specimens were produced and named after ZK60 – T5. Some specimens were shot peened to full coverage by using Almen intensities in the range of 0.02 – 0.40 mmN. This paper studies the influence of surface roughness, microhardness and compressive residual stress of surface layer on the high cycle fatigue properties of high – strength wrought magnesium alloy ZK60 – T5, meanwhile, observes the change of microstructure of plastic deformation layer. The results show that shot peening effectively improve the fatigue properties: great changes have taken place in surface microstructure of ZK60 – T5 after shot peening. The fatigue limit increases from 150 to 195 MPa after shot peening with the optimum Almen intensity of 0.05 mmN, i. e. the improvement of 30% in fatigue limit has been achieved, and the fatigue crack sources are pushed to the region beneath the hardened layer, and fatigue life is significantly increased.

**Key words:** magnesium alloy; ZK60; T5; shot peening; high cycle fatigue (HCF)