

# AM50 镁合金孔挤压强化对其疲劳性能的影响

田峰, 杨辉

(河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

**摘要:** **目的** 研究孔挤压处理对 AM50 镁合金疲劳性能的影响。**方法** 对 AM50 镁合金进行孔挤压强化处理,使试样表面产生有益的残余压应力分布,并对残余应力的分布进行测定。对未处理镁合金及孔挤压镁合金进行疲劳性能测试,对比疲劳寿命及疲劳裂纹扩展速率,对疲劳断口进行扫描,分析孔挤压对 AM50 镁合金疲劳性能的影响。**结果** 孔挤压处理后,孔周围残余压应力深度达到 5.5 mm,且最大压应力值达-563 MPa,试样的疲劳寿命较未处理时增加了 9 倍,疲劳裂纹扩展速率大大降低,疲劳裂纹源由未处理时的孔表面转移到了挤压强化层内部。**结论** 孔挤压可以明显抑制疲劳裂纹的萌生,延长疲劳寿命。

**关键词:** AM50 镁合金; 孔挤压; 疲劳性能; 断口扫描

中图分类号: TG668

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)01-0055-04

## Effects of Hole-expansion on Fatigue Property of AM50 Magnesium Alloy

TIAN Feng, YANG Hui

(School of Mechanical and Electrical Engineering,  
Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the effects of hole-expansion on fatigue property of AM50 magnesium alloy. **Methods** AM 50 magnesium alloy was treated by hole-expansion, and beneficial compressive residual stress was introduced onto the sample surface, which was measured by X-ray diffraction technique. Meanwhile, the fatigue properties of both untreated and untreated samples were tested under sinusoidal wave load, the fatigue life and fatigue crack growth rate were analyzed, and the effects of hole-expansion on fatigue properties of AM50 magnesium alloy were studied. The fatigue fracture was analyzed by the SEM technique. **Results** The experimental results showed that the compressive residual stress layer reached 5.5 mm around the hole after hole-expansion, and the maximum value was -563 MPa. Fatigue life increased from 28 936 cycles to 300 556 cycles by 9 times, while the fatigue crack growth rate greatly decreased. **Conclusion** SEM analysis showed that the fatigue initiation transferred inside the hole-expansion layer, which indicated that hole-expansion could obviously inhibit fatigue crack initiation and effectively enhance fatigue life.

**KEY WORDS:** AM50 magnesium alloy; hole-expansion; fatigue property; fracture scanning

镁合金以其密度小、强度高、抗应力腐蚀性能好等一系列优点,被广泛应用于各工业领域<sup>[1]</sup>。近年来,随着航空航天及车辆工业的迅猛发展,对于通过减小质量来降低能耗的需求日益迫切,这就给镁合金

材料的应用带来了更加巨大的市场。但是,应用于工业领域的各类机械零部件服役环境复杂,需在高温、腐蚀及交变载荷等恶劣工况下工作,疲劳破坏现象时有发生<sup>[2]</sup>。据权威资料统计<sup>[3]</sup>,这类破坏形式占到了

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2013-10-24

Received: 2013-08-30; Revised: 2013-10-24

作者简介: 田峰(1977—),男,河南新乡人,硕士,讲师,主要研究方向为机械工程及材料加工工程。

Biography: TIAN Feng(1977—), Male, from Xinxiang, Henan, Master, Lecturer, Research focus: mechanical and material processing.

全部破坏的 80%。因此,如何提高镁合金材料在复杂工况下的疲劳强度,延长镁合金零部件的服役寿命,从而提高其服役可靠性,一直是研究的热点及难点,受到了研究人员的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

孔挤压强化处理能够在孔周围产生剧烈塑性变形层,进而形成有益残余压应力层。该残余压应力层能够抵消一部分外载荷引起的疲劳拉应力,改善受载条件,提高零部件使用寿命<sup>[6-8]</sup>。文中主要探讨孔挤压强化对镁合金材料疲劳性能的改善机理及疲劳寿命增益影响规律,拟对镁合金材料的进一步工程应用奠定良好的理论基础及实验支撑。

1 实验材料及方法

实验材料选择工程领域广泛应用的 AM50 镁合金,其化学成分见表 1。按照疲劳实验标准指导,利用线切割方式将材料加工成如图 1 所示的孔挤压试样形状,采用芯棒直接挤压方式在液压设备上对孔进行挤压强化,挤压量选择 3% ~ 5%。

表 1 AM50 镁合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of AM50 magnesium alloy

元素	Al	Mn	Cu	Fe	Si	Mg
质量分数/%	4.83	0.32	0.001	0.001	0.003	余量

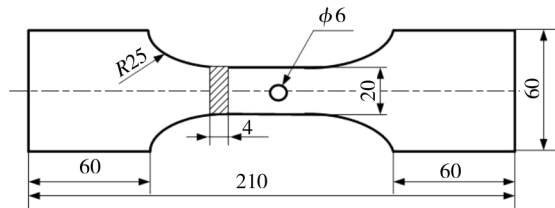


图 1 孔挤压试样形状及尺寸

Fig. 1 Shape and size of sample treated by hole-expansion

利用 X-350A 型 X 射线衍射分析仪,对孔挤压强化后孔壁表面的残余应力分布进行测定,测试条件为 Cr K $\alpha$  靶。疲劳性能测试实验在美国 MTS-810 拉扭复合材料测试系统上进行,实验条件为:室温,常压,载荷  $F=5$  kN,频率  $f=10$  Hz。对孔挤压强化镁合金试样及未处理试样进行疲劳性能测试,得到疲劳寿命曲线及疲劳裂纹扩展速率曲线。利用 QUANTA 600 型扫描电子显微镜对疲劳断口进行扫描,分析孔挤压强化前后疲劳断口的异同。

2 结果与讨论

2.1 残余应力

孔挤压强化能够在孔壁周围产生剧烈塑性变形层,导致晶粒细化,同时在孔壁周围产生高密度、均匀稳定的位错结构,高密度位错等晶体缺陷引起原子点阵受压而产生畸变,宏观上表现为较高幅值的残余压应力分布。孔壁周围残余应力分布曲线如图 2 所示。可以看出,残余压应力区域的深度大约为 5.5 mm,残余压应力最大幅值达到 -563 MPa,出现在初始测量点位置。随着距离孔壁越来越远,残余压应力幅值呈减小趋势,距离达到 5.5 mm 处时,残余应力由压应力转变为拉应力,之后应力幅值与材料基体一致。

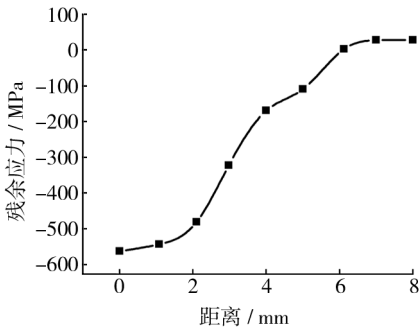


图 2 孔挤压强化后孔周围残余应力分布

Fig. 2 Residual stress distribution after hole-expansion

2.2 疲劳性能

图 3 和图 4 给出了未处理试样及孔挤压强化试样的疲劳裂纹扩展  $a-N$  曲线(裂纹长度随疲劳寿命的变化)及疲劳裂纹扩展速率( $da/dN$ )对比。从图 3 中能够发现,未处理试样的疲劳寿命为 28 936 次循环,孔挤压强化后增加到 300 556 次循环,增加了 9 倍,可见孔挤压强化有效延长了 AM50 镁合金的疲劳裂纹扩展寿命。从图 4 中可以看出,孔挤压强化试样的裂纹扩展速率明显低于未处理试样(低了近 1 个数量级),而且疲劳裂纹扩展速率的降低主要集中在孔挤压强化层以内。众所周知,裂纹扩展的驱动力与裂纹尖端的有效应力强度因子关系密切,而孔挤压强化能够在孔周围一定区域内产生剧烈塑性变形,待挤压棒卸载后,孔周围材料便会在孔径向及周向发生恢复,从而产生有益的宏观残余压应力层,该残余压应力层能够与一部分外加交变载荷产生的拉应力水平相抵消,降低裂纹尖端有效应力强度因子水平,从而使裂

纹扩展速率大幅下降,延长疲劳裂纹扩展寿命。

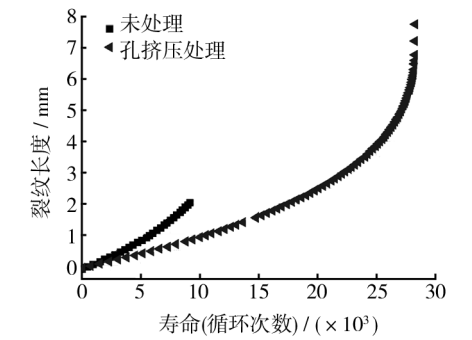


图 3 孔挤压强化前后疲劳寿命曲线  
Fig. 3 Fatigue life before and after treatment

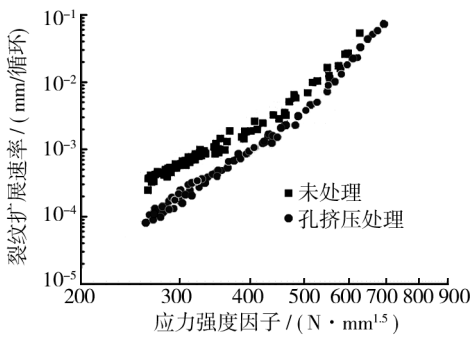
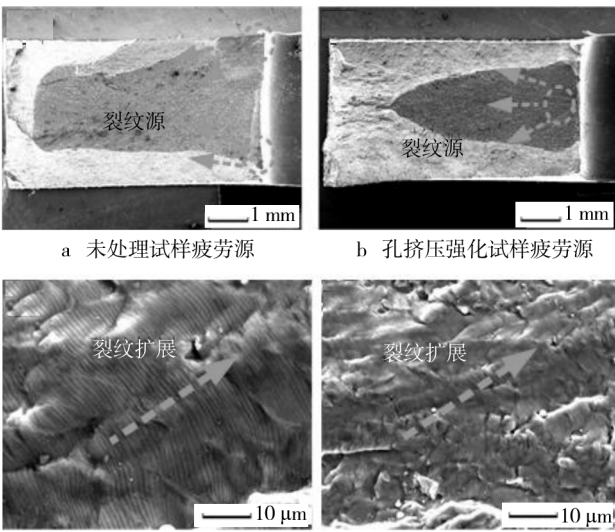


图 4 孔挤压强化前后裂纹扩展速率曲线  
Fig. 4 Crack rate before and after treatment

2.3 断口分析

由图 5a 和 b 可见,未处理试样和孔挤压强化试样的断口呈现出了不同的形貌特征。对比疲劳源区的形貌特征发现,未处理试样的疲劳源萌生于孔边机加工应力集中部位,在距离孔边 0.05 mm 的范围之内;经过孔挤压强化后,疲劳源位置转移到了挤压强化层以内,另外,挤压强化试样断口可见金属组织的塑性变形。疲劳源转移到强化层内部说明孔挤压强化能有效抑制疲劳裂纹的萌生,增加裂纹源继续扩展成裂纹的难度,从而明显延长疲劳寿命。

由图 5c 和 d 可见,两种试样都存在典型的疲劳辉纹特征,但裂纹扩展机制不同。未处理试样的疲劳辉纹距离裂纹源较近,且整个疲劳裂纹扩展区域短,裂纹扩展路径较弯曲,起伏多;而孔挤压强化试样的疲劳辉纹距离疲劳源较远,且疲劳裂纹扩展区长,裂纹扩展路径平直,起伏小。此外,孔挤压强化试样的疲劳辉纹间距相对未处理试样较小。疲劳辉纹间距是裂纹扩展速率的微观度量,辉纹间距的变化充分说明了孔挤压强化可以降低镁合金材料的疲劳裂纹扩展速率,从而有效延长疲劳寿命。



c 未处理试样疲劳裂纹扩展区 d 孔挤压强化试样疲劳裂纹扩展区

图 5 孔挤压强化前后试样断口形貌  
Fig. 5 SEM of fracture before and after hole-expansion

3 结论

- 1) 孔挤压强化能够在 AM50 镁合金孔周围产生有益残余压应力,残余压应力层厚度可达 5.5 mm,且最大压应力幅值达-563 MPa。该压应力能抵消一部分外加载荷引起的拉应力,有效抑制疲劳裂纹的萌生。
- 2) 孔挤压强化后,试样的疲劳寿命明显改善,比强化前增加了 9 倍,且疲劳裂纹扩展速率明显降低,约降低了 1 个数量级。
- 3) 孔挤压强化后,镁合金材料的疲劳裂纹源转移到了挤压强化层内部,表明孔挤压强化有效抑制了裂纹萌生。裂纹扩展区疲劳辉纹间距的减小,从微观上验证了孔挤压强化可降低镁合金材料的裂纹扩展速率。

参考文献

[1] 陈先华,耿玉晓,刘娟. 镁及镁合金功能材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2013,31(1):148—152.  
CHEN Xian-hua, GENG Yu-xiao, LIU Juan. Research Status of Magnesium Alloys as Functional Materials[J]. Journal of Materials & Engineering, 2013, 31(1):148—152.

[2] 李智峰,李贞明,付彭怀,等. 重力铸造 Mg-3Nd-0.2Zn-Zr 镁合金高周疲劳行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9):1592—1596.  
LI Zhi-feng, LI Zhen-ming, FU Peng-huai, et al. Study on High Cycle Fatigue Behavior of Gravity Cast Mg-3Nd-0.2Zn-Zr Magnesium Alloy [J]. Rare Materials and Engineering,

- 2012,41(9):1592—1596.
- [3] 周传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002:170—172.
- ZHOU Chuan-yao. Fatigue and Fracture[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Engineering Press, 2002: 170—172.
- [4] 王亚鹏, 孙凯. AZ91D 镁合金表面改性层组织分析及其对耐蚀性影响的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 60—62.
- WANG Ya-peng, SUN Kai. Organization Analysis of Modified Layer on AZ91D Magnesium Alloy Surface and Effect Research on Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 60—62.
- [5] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 86—91.
- MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Application and Surface Treatment Research Progress of Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 86—91.
- [6] 丁传富, 赵振业, 宋德玉. 孔挤压强化对两种超高强度钢疲劳裂纹起始与扩展寿命的影响[J]. 航空学报, 1994, 15(8): 960—967.
- DING Chuan-fu, ZHAO Zhen-ye, SONG De-yu. Effects of Cold Worked Holes on Initiation Life and Propagation Life of Cracks in Two Ultra-high Strength Steels[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15(8): 960—967.
- [7] 高玉魁. 孔挤压强化对 23Co14Ni12Cr3MoE 钢疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(11): 34—36.
- GAO Yu-kui. Influence of Cold Hole Expansion on Fatigue Property of 23Co14Ni12Cr3MoE Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(11): 34—36.
- [8] 范娟, 李付国, 李江, 等. 7050 高强铝合金孔板的挤压强化与拉伸试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(6): 978—982.
- FAN Juan, LI Fu-guo, LI Jiang, et al. Study of Local Cold Working and Tensile Test for 7050 High Strength Aluminum Alloy Hole Plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(6): 978—982.
- ~~~~~
- (上接第 10 页)
- HUANG Yan-bin, SHAO Xin-hai, SONG Gao-wei, et al. Research of Influencing Factors on Performance and Process Optimization of Ceramic Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 90—93.
- [6] 张存满, 徐政. 弥散 SiC 颗粒增韧氧化铝陶瓷内部残余应力分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(11): 1326—1330.
- ZHANG Cun-man, XU Zheng. Analysis of Residual Stress field N SiC(M)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic of Sub Micrometer SiC Particle Toughing Alumina[J]. Journal of Tongji University (Nature Science), 2002, 30(11): 1326—1330.
- [7] WATT D F, XU X Q. Effects of Particle Morphology and Spacing on the Strain Fields in a Plastically Deforming Matrix[J]. Acta Materialia, 1996, 44(2): 789—799.
- [8] HO S, LAVERNIA E J. Thermal Residual Stress in Functionally Graded and Layered 6061 Al/SiC Materials[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(10): 3241—3249.
- [9] ELY J L, EMKEN M R, ACCUNTIUS J A, et al. Pure Pyrolytic Carbon: Preparation and Properties of a New Material, on-X Carbon for Mechanical Heart Valve Prostheses[J]. The Journal of Heart Valve Disease, 1988, 7(6): 626—632.
- [10] 梅芳, 弓满锋. 电镀硬质氧化铝薄膜热残余应力测量[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 108—111.
- MEI Fang, GONG Man-feng. Measurement of Thermal Residual Stress of Electroplate Hard Alumina Films[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 108—111.
- [11] 王庆明, 孙渊. 残余应力测试技术的进展与动向[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 11—16.
- WANG Qing-ming, SUN Yuan. Research Development on the Test Methods of Residual Stress[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2011, 28(1): 11—16.
- [12] 刘毓舒. 薄膜 X 射线应力分析的实验方法[J]. 理化检验——物理分册, 2005, 41(9): 447—450.
- LIU Yu-shu. An Experimental Method for X-Ray Stress Analysis in Thin Films[J]. Physical Testing and Chemical Analysis—Part A Physical Testing, 2005, 41(9): 447—450.
- [13] 吴珺仪, 李忠盛, 吴护林, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷膜表面复合化学镀 Ni-P-SiC 的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 52—55.
- WU Jun-yi, LI Zhong-sheng, WU Hu-lin, et al. Investigation on Electroless Ni-P-SiC Composite Plating on Microarc Oxidation Film of Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 52—55.
- [14] 骆军, 朱航天, 梁敬魁. 晶粒尺寸和应变的 X 射线粉末衍射法测定[J]. 物理, 2009, 38(4): 267—275.
- LUO Jun, ZHU Hang-tian, LIANG Jing-kui. Determination of Crystallite Size and Strain by X-ray Powder[J]. Physics, 2009, 38(4): 267—275.
- [15] 刘阳, 曾令可. 非氧化物陶瓷及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 6—34.
- LIU Yang, ZENG Ling-ke. Non-oxide Ceramic and Its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 6—34.