

在强热冲击下铝合金材料内部的微观损伤特征

Characterization of Microscopic Damage in Aluminum

Alloy Materials Under Intense Thermal Shock

尚新春^{1,2}, 张志彪¹

(1 北京科技大学 应用科学学院, 北京 100083;

2 国家材料服役安全科学中心, 北京 100083)

SHANG Xin-chun^{1,2}, ZHANG Zhi-biao¹

(1 School of Applied Science, University of Science and

Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 National

Center for Materials Service Safety, Beijing 100083, China)

摘要: 分析了在强热冲击下 2A12 铝合金材料内部的微观损伤特征。采用激光在圆片试样中心打孔方式, 来实施对铝合金强热冲击实验。应用扫描电子显微镜, 观察了激光穿孔附近纵、横截面上的金相组织, 并得到了热影响区内材料损伤的显微照片。这些电镜图片显示出穿孔周围有微孔洞群、沿晶开裂的微裂纹、三叉晶界处萌生的微孔、破碎状裂隙带和白色亮条等微观损伤的复杂形态。分析指出激光穿孔强热冲击所形成的热波对材料作用是产生这些微观损伤的主要原因。

关键词: 微观损伤; 热冲击; 金相分析; 激光打孔; 铝合金

中图分类号: TG115.2; O347.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2011)02-0001-04

Abstract: The characterization of microdamage in 2A12 aluminum alloy materials after intense thermal shock was analyzed. The intense thermal shock for the aluminum alloy was experimentized by using laser drilling on the center of circle plate specimens. The metallurgical structure on the cross and longitudinal sections near the laser drilling hole of specimens was observed, and the micrographs of the material damage in heat affected zone was obtained by means of SEM. These micrographs reveal more complex conformation of microdamage around the drilling hole, such as microvoid group, extending intergranular microcrack along grain boundary, growing cavity at trifurcate grain boundary, fragmentized fissure zone, whitely shiny strip. The analysis indicated that a dominant cause to bring such microdamage is thermal wave effect on aluminum alloy material which generates from intense thermal shock when laser drilling.

Key words: microdamage; thermal shock; fractography analysis; laser drilling; aluminum alloy

铝合金材料密度低, 耐腐蚀性能好, 抗疲劳性能较高, 且具有较高的比强度、比刚度, 如 2A12 (原标号为 LY12) 或 2024 铝合金是可热处理的强化铝合金, 具有良好的塑性成形能力和机械加工性能, 是航空航天领域中使用较广泛的铝合金之一^[1]。强热冲击是该铝合金材料和结构常见的环境载荷。金属材料在强热冲击下的破坏行为主要表现为断裂和层裂等。从微观上看, 这些宏观破坏现象是始于材料组织中的微缺陷, 是由于微观损伤的演化所导致的。因此, 有必要通过金相学的电镜实验观察方法, 来研究强热冲击后铝合金材料内部的微观损伤特征。这对于深入认识铝合金材料在强热冲击下其内部损伤和破坏机理具有重要意

义, 可为航空航天工程设计部门提供实验参考。

有关 2A12 铝合金在热环境下的宏观力学性能, 已有一些实验研究报道^[2-4]。例如, 实验研究了热冲击升温率对预应力杆失效温度的影响, 并且分析了断口的微观形貌^[4]。另外, 已观察到在焊接热循环作用下铝合金焊缝周围也存在着微孔损伤^[5]。还有, 研究了强激光辐照下铝合金材料表面高温熔化所引起的材料损伤情况^[6]。已有研究指出激光对金属材料辐照所引起的动态力学行为具有复杂的热-力耦合作用机制, 必须同时考虑材料和力学两方面^[7]。特别是由激光瞬间加热所引起的“热波”在金属材料内部传播, 产生热-力耦合的强热冲击效应, 有可能使材料内部产生较为

复杂的损伤形态。为了探讨强热冲击下的金属材料内部损伤和破坏的机理, 本文重点在于观察强热冲击对 2A12 铝合金材料内部显微组织形貌的变化, 从而分析出微观损伤的主要特征。采用强激光光束对片状试件打孔的方法, 来实施材料的强热冲击实验。激光打孔会使孔口周围的材料产生瞬态高温和很高的温度梯度, 这可能会导致孔口周围材料的显微组织发生较大变化, 引起诸如微孔形核、沿晶断裂、微裂纹扩展等复杂形式的微观损伤, 它们会对材料的力学性能和寿命产生很大影响。观察和分析这些微观损伤的特征有助于解释热冲击下铝合金材料内部损伤和破坏的机理。

1 实验方法

试件材料取拉拔成型的 2A12 铝合金棒材, 直径为 3cm。首先将棒材切割成 5.5mm 厚的薄圆片, 切割过程采用电火花线切割, 因为线切割时保持有冷却液冲洗, 因此试件不会过热。然后, 用比较粗的砂纸, 将线切割时试件两面的熔化区域打磨掉, 保留至 5mm 厚, 以去除线切割的影响, 同时保证对激光的吸收率。试件的几何形状与尺寸如图 1 所示。在图 1 中, $h=5\text{mm}$, $d=3\text{cm}$, D 为激光穿孔后的孔直径, P 为激光辐照的功率密度($\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$)。

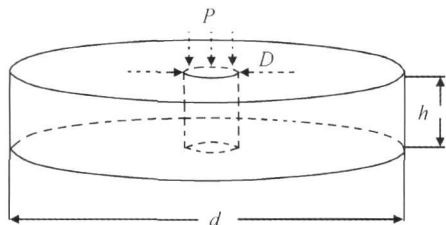


图 1 试件几何形状与尺寸
Fig. 1 Specimen geometry and size

强热冲击实验通过激光打孔的方式, 在铝圆片试件中心穿孔, 其周围的热影响区组织中会瞬间受到很强的热冲击, 从而产生某种微观损伤缺陷。本实验采用的设备是 CO_2 气体激光打孔机。采用连续工作方式, 功率为 2kW, 辐照时间 0.5s, 光斑直径为 0.5mm。在辐照的同时, 会有一束气流通过镜头周围吹响穿孔部位, 这样能够将激光辐照产生的等离子体吹出, 并保护镜头。试件在穿孔结束之后空冷至室温。

用光学显微镜观察穿孔后的试件, 辐照面上的孔口近似为椭圆形, 其长轴和短轴分别为 2.5, 1.8mm, 背面的孔口近似为圆形, 直径约 0.6mm。采用线切割的方法将试件纵向截取至距孔边 1~2mm 处, 用砂纸打磨至孔中心部位并抛光, 用扫描电子显微镜观察穿

孔周围热影响区的微观损伤, 获取纵截面电镜照片。然后, 对试件横截面从上表面向下磨至一半厚度处, 抛光后在电子显微镜上观察, 获取横截面电镜照片。

2 实验结果及分析

2.1 热影响区内的微孔洞群和微孔内壁韧窝

由穿孔的纵截面全貌拍摄显微照片(见图 2)可以看到: 穿孔的内壁有烧蚀的痕迹, 孔的形状是近似圆锥形。在距穿孔边缘 20~30 μm 的热影响区内观察到有微孔洞群产生。图 3 显示了微孔洞群中两个微孔洞的局部放大图像。在微孔内有脱落的碎片, 从图 3 中右面较大的微孔内壁下方清晰可见有韧窝形成。通过对微孔内脱落碎片的能谱分析, 未发现第二相颗粒存在, 微孔洞内脱落碎片的主要元素仍然是铝。图 4 给出图 3 中右孔内中心部位的碎块的能谱图。

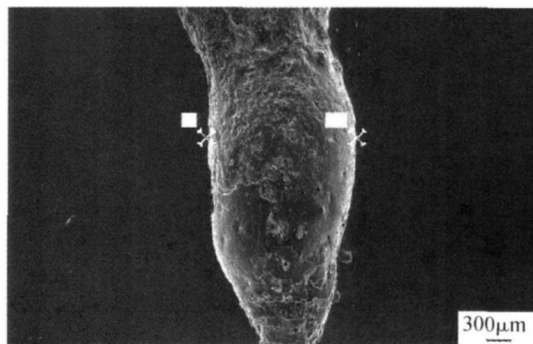


图 2 试件穿孔部位纵截面图像
Fig. 2 The longitudinal section image in perforated part of the specimen

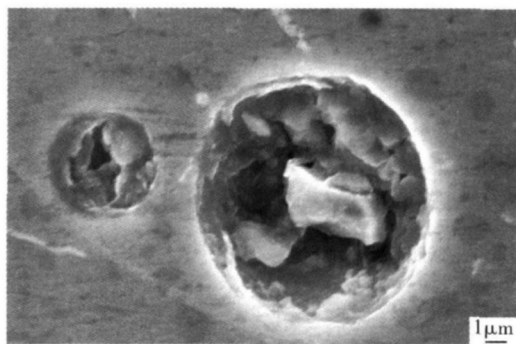


图 3 纵截面上穿孔边缘附近微孔洞群中的两个微孔
Fig. 3 Two microvoids among microvoid group near edge of perforated hole in longitudinal section

从这些观察结果分析可知: 微孔形核后伴随着材料热膨胀变形而产生微孔边应力集中, 这会使得微孔边附近形成塑性层, 塑性层脱落成碎片, 并在微孔内壁留下韧窝。同样, 在横截面上的穿孔边缘附近也观察

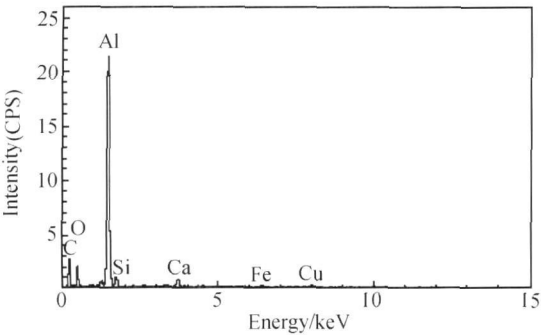


图 4 微孔内壁处脱落碎片的能谱图

Fig. 4 Energy spectrum of exfoliative fragment from internal wall of microvoid

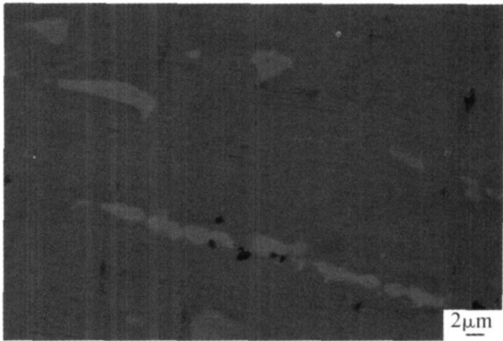


图 6 原始材料图像

Fig. 6 Raw material image

到微孔洞群见图 5。图 5 左边为穿孔边缘,微孔洞群沿穿孔边缘周向分布,微孔形状基本上为球形。在横截面和纵截面均会出现微孔洞群,这表明在穿孔周围微孔洞群是普遍存在的。

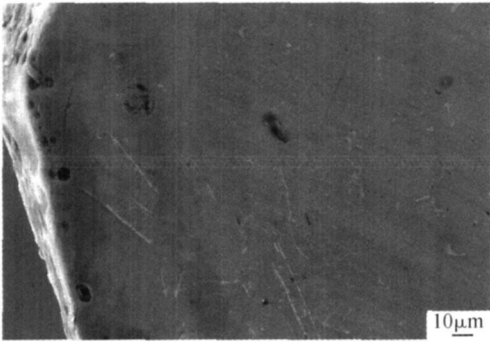


图 5 横截面上穿孔边缘附近的微孔洞群

Fig. 5 Microvoid group near edge of perforated hole in the cross section

2.2 沿晶断裂和径向微裂纹

为了对比激光打孔强热冲击前后 2A12 铝合金材料内部微观组织的变化,首先,对未经过激光穿孔处理的原始试件的纵截面心部获取显微图片(见图 6)。在原始试件材料中并没有发现明显的微孔洞和微裂纹等初始损伤。图 6 中的白色块状物为铝铜化合物偏析,它是材料在熔炼时形成的,属于初始缺陷^[8]。然后,以图 2 为参考,对激光穿孔后试件纵截面进行观察,在穿孔边缘右侧中部附近,拍摄到了微裂纹及很多白色块状物,如图 7 所示。在图 7 中心框内可以明显地看到沿晶扩展的微裂纹,即沿晶断裂现象。图 7 中白色块状物是原始材料中初始存在的缺陷,并不是激光穿孔后由热冲击所形成的,它们的存在对微裂纹的扩展未造成明显影响。

图 8 为横截面穿孔边缘显微图片,可见从孔边沿径向蜿蜒扩展的裂纹,其长度约为 300μm。激光穿孔

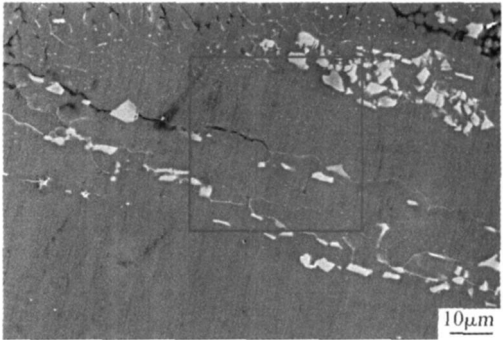


图 7 微裂纹图像

Fig. 7 Image of microcracks

时孔边的瞬时高温会引起孔边较高的环向热应力,使得微小裂纹贯穿而形成较长的径向裂纹。

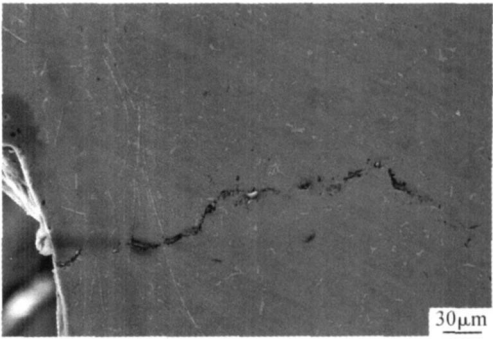


图 8 横截面上的孔边沿径向微裂纹

Fig. 8 Cross-sectional images of radial cracks

2.3 破碎状裂隙带

在距穿孔边界 200μm 处,发现有一条平行于穿孔边界的破碎状裂隙带,即图 9 中黑色的联通裂隙带。图 10 是图 9 中破碎带左端的局部放大图。由图 10 可见破碎状裂隙带是由晶粒周围的晶界逐步开裂发展而来。从图 10 中还可以看到在一些晶界的交叉处有呈黑色三角状的微孔洞形成。这种破碎状裂隙带其裂隙较宽,是由一系列沿晶扩展的微裂纹和晶界交叉处的

微孔洞彼此贯通而形成的。当然, 完成这样的损伤演化过程是在极短的时间内进行的, 并且需要很高的变形能。大功率激光穿孔时, 穿孔孔口周围的温度梯度非常大, 温度变化也非常快, 高热量是以“热波”形式沿径向传导的, 属非傅里叶热传导形式传输^[9]。可以认为“热波”和应力波的耦合作用, 使得能量在某一平行于穿孔边界的狭窄区域内聚集, 形成破碎状裂隙带。

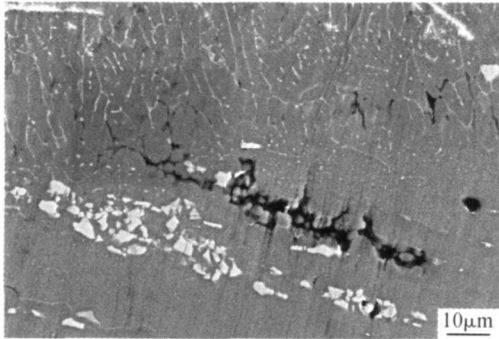


图 9 破碎状裂隙带

Fig. 9 Fragmentized fissure zone

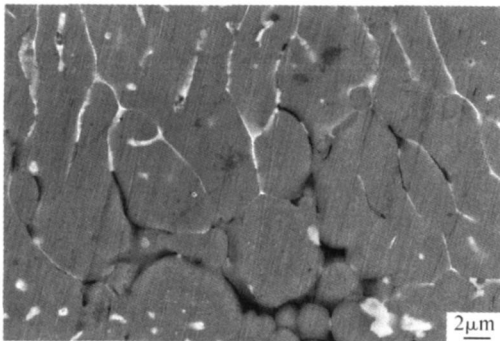


图 10 破碎状裂隙带的局部

Fig. 10 Part of fragmentized fissure zone

2.4 白色亮条

由扫描电镜观察发现, 在纵截面距离穿孔边约 20~150 μm 的区域内分布着很多长短不等白色亮条, 而这些白色亮条大多数平行于穿孔边, 并且呈直线条状。图 11 显示了一个典型的白色亮条的局部放大图片, 其中右边为扫描电镜图像, 可见约 2 μm 宽白色亮条; 左边为该白色亮条的背散射图像, 它显示白色亮条的图像灰度与周围组织的基本一致, 表明白色亮条与周围组织的物质元素基本一致, 即均为铝。对图 11 中背散射图像的进一步观察, 可知白色亮条周围组织的晶界较为明显且晶粒较大, 而白色亮条中的晶界细微, 有晶粒细化的迹象。已有一些文献报道过在金属微观组织中观察到白色亮条, 例如, 在 8090 铝锂合金中发现了呈白色线状亮条, 经分析属于剪切带^[10]。经过图像的对比, 图 11 中的白色条状区域与文献[10]

中的白色亮条剪切带在形态差别较大, 因此二者的形成机理有所不同。文献[11]对带有裂纹的各种钢材试件进行了瞬间脉冲放电实验, 在裂纹尖端的弹性区域也观察到有白亮层产生, 它由碳化物和氮化物组织构成, 呈环形状包绕在裂尖周围, 而且组织明显细化。分析认为是由于放电能量在时间和空间上高度集中所致。本研究所观察的白色亮条与文献[11]白亮层在形态上有相似之处, 都有组织细化的特征。激光穿孔引起的瞬间高温热波, 使某些狭窄的条形区域具有较高的特定温度梯度和应变率, 能量高度聚集, 从而引起内狭窄区域组织细化, 导致白色亮条的形成。

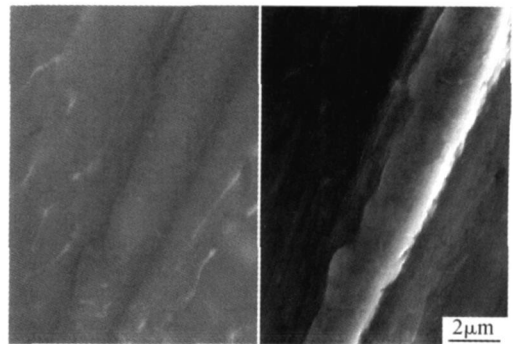


图 11 白色亮条的 SEM 与背散射图像

Fig. 11 SEM and back scattering electron images of white shiny strip

2.5 不同区域上微观组织的变化特征

经过对激光穿孔后的试样纵截面多个扫描电镜图观察和分析, 可以按微观组织的变化特征将纵截面大致分为 3 个区域: (1) 从穿孔边到距离穿孔边 20 μm 的范围内。这一区域合金组织的晶界较细, 晶粒较小, 而微孔洞群主要分布在这一区域, 如图 3, 5 所示。(2) 距穿孔边约 20~250 μm 的范围内, 在这一区域上晶粒粗大, 晶界较宽, 存在有微裂纹和晶界交叉处的微孔洞, 并且分布有很多线状白色亮条和破碎状裂隙带。如图 7, 9~11 所示。可以判断该区域中的组织在高温热冲击下发生了较严重的过烧; (3) 距穿孔边约 250 μm 以外的区域, 在这一区域中的铝合金组织受到热冲击的影响较小, 基本处于原始状态。

3 结论

(1) 在激光穿孔的强热冲击作用下, 穿孔周围的热影响区内出现了诸如微孔洞群及微裂纹、破碎状裂隙带等形态的微观损伤。

(下转第 30 页)

(2) 超声频率下试样的共振状态使超声疲劳试样表面由机械加工引入的残余应力产生明显松弛, 表层残余应力的降低使 S06 钢超声疲劳试样裂纹全部从表面萌生。在用超声疲劳试验方法对材料的疲劳裂纹萌生机制进行研究时, 必须对试样表面的残余应力松弛效应进行考虑。

参考文献

- [1] BATHIAS C. Piezoelectric fatigue testing machines and devices [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1438–1445.
- [2] 闫桂玲, 王弘, 高庆. 超声疲劳试验方法及其应用[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 25–29.
- [3] MAYER H, PAPAKYRIACOU M, PIPPAN R, et al. Influence of loading frequency on the high cycle fatigue properties of AlZn–MgCu1.5 aluminium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, A314: 48–54.
- [4] 王弘, 高庆. 超声疲劳试验中载荷频率对材料疲劳性能的影响 [J]. 理化检验-物理分册, 2005, 41(9): 433–435.
- [5] AKINIWA Y, MIYAMOTO N, TSURU H, et al. Notch effect on fatigue strength reduction of bearing steel in the very high cycle regime [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1555–1565.
- [6] GAO Y K, YAO M, SHAO P G, et al. Another mechanism for fatigue strength improvement of metallic parts by shot peening

[J]. J Mater Eng Perform, 2003, 12, 507–511.

- [7] 高玉魁. 超高强度钢喷丸表面残余应力在疲劳过程中的松弛规律 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28: 102–105.
- [8] 韩冬. 振动时效技术的研究及发展 [J]. 机床与液压, 2007, 35(7): 225–228.
- [9] ZETTL B, MAYER H, EDE C, et al. Very high cycle fatigue of normalized carbon steels [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1583–1589.
- [10] EBARA R. The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28: 1465–1470.
- [11] MORRISSEY R J, NICHOLAS T. Fatigue strength of T₆ 6Al–4V at very long lives [J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27: 1608–1612.
- [12] MAYER H, PAPAKYRIACOU M, ZETTL B, et al. Influence of porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminum alloys [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25: 245–256.

收稿日期: 2009-03-27; 修订日期: 2010-04-05

作者简介: 胡燕慧(1979—), 女, 博士, 研究方向为金属材料的疲劳与断裂及冷轧带钢表面质量控制, 联系地址: 北京市石景山区杨庄大街 69 号首钢技术研究院薄板所(100043), E-mail: orangehyh@126.com

(上接第 4 页)

(2) 观察到沿晶扩展的微裂纹和交叉晶界处萌生的微孔洞, 以及由此发展而来的破碎状裂隙带。特别是在距穿孔边约 20~250 μm 范围的区域内, 损伤形态较为复杂, 存在有晶粒粗大, 晶界明显的过烧组织。同时存在有大量的白色亮条, 其组织与周围组织相比晶粒较小, 晶界较细。由于激光穿孔强热冲击的特殊性, 这些复杂的损伤形态, 可以认为是由热波与应力波耦合作用的结果。

参考文献

- [1] 吴大方, 宋昊, 高镇同, 等. 铝合金 2A12 在热冲击条件下的力学性能 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(5): 531–534.
- [2] 谢若泽, 张方举, 邓志方, 等. 高温、高应变率 LY12 铝压缩动力学性能实验 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 799–803.
- [3] 彭向和, 杨运民, 陈裕泽, 等. 高升温率下 LY12 铝合金拉伸破坏及其机理的研究 [J]. 固体力学学报, 2005, 26(1): 72–76.
- [4] PENG X, FAN J, YAN Y et al. Investigations to the effect of heating rate on the mechanical properties of aluminum alloy LY12 [J]. Int J Solids Struct, 2003, 40(22): 7385–7397.
- [5] JIN Cheng, HE Shi-yu, ZHOU Guang-tao, et al. Experimental and numerical investigations of void damage in aluminum alloy welds under thermal cycling condition [J]. Materials Science and Engineering, A 2009, 499(1–2): 171–176.

- [6] BASS M. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd: gas laser irradiation induced material removal [J]. J Appl Phys, 1987, 61(3): 1137–1143.
- [7] XIE Hui-min, WANG Guo-tao, DAI Fei-long, et al. The dynamic deformation measurement of the high speed heated LY12 aluminum plate with moiré interferometry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1–3): 159–163.
- [8] 丁惠麟, 辛智华. 实用铝、铜及其合金金相热处理和失效分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. 292–361.
- [9] 周益春. 材料固体力学(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 579–697.
- [10] XU Y B, ZHONG W L, CHEN Y J, et al. Shear localization and recrystallization in dynamic deformation of 8090 Al–Li alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 299(1–2): 287–295.
- [11] 白象忠, 田振国, 郑坚. 断裂力学中的电热效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. 216–241.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772024)

收稿日期: 2010-07-05; 修订日期: 2010-11-10

作者简介: 尚新春(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为金属材料空化损伤的理论与实验研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号, 北京科技大学数学力学系固体力学学科组(100083), E-mail: shangxc@ustb.edu.cn