

# 循环载荷作用下镁合金温度演化及高周疲劳性能预测

Temperature Evolution and Fatigue Properties Prediction  
for High Cycle Fatigue of Magnesium Alloy  
Under Alternate Loading

王 凯, 闫志峰, 王文先, 张红霞, 裴飞飞

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

WANG Kai, YAN Zhi-feng, WANG Wen-xian, ZHANG Hong-xia, PEI Fei-fei

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University  
of Technology, Taiyuan 030024, China)

**摘要:** 基于红外热像法对 AZ31B 镁合金板材室温下的高周疲劳性能进行了研究。使用红外热成像仪测量整个疲劳过程中试件表面温度变化。结果表明: 镁合金疲劳加载过程中的温度变化分为初始温度增加、温度降低、温度恒定、温度快速上升、温度最后下降 5 个部分。采用基于热传导、热弹性和非弹性效应的理论模型解释了疲劳加载过程中的温度变化。红外热像法预测的 AZ31B 镁合金疲劳极限 113MPa 与实验结果 108MPa 相对误差约为 4.8%。基于镁合金表面温度的变化, 提出了  $\Delta T_{\max}-N$  曲线预测疲劳寿命的方法, 即通过测量阶段 I 温升最大值预测镁合金的疲劳断裂, 并计算其疲劳寿命。

**关键词:** AZ31B 镁合金; 红外热像法; 温度演化; 疲劳性能

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.01.016

**中图分类号:** TG113.25; TG146.2<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)01-0085-05

**Abstract:** High-cycle fatigue damage process of AZ31B magnesium alloy at room temperature was studied based on thermographic technology. An infrared-thermography camera was used to investigate the temperature evolution on the surface of material during fatigue experiments. Results show that the temperature evolution mainly undergoes five stages under fatigue loading: an initial increase, steep reduces, steady-state, an abrupt increase and final drop (stage V). Theoretical model combining the thermoelastic, inelastic, and heat-transfer effects will be formulated to explain the temperature profiles observed during fatigue. The relative error of fatigue limits between the experimental result (108MPa) and the predicted result (113MPa) is 4.8%.  $\Delta T_{\max}-N$  curve was proposed to predict the fatigue life based on the temperature evolution during the fatigue experiments. The fatigue fracture and the fatigue life will be predicted by maximum temperature rise of first stage.

**Key words:** AZ31B magnesium alloy; thermographic technology; temperature evolution; fatigue property

基于轻质、高强、无污染、易回收等优点, 镁合金材料在交通运输装备等领域应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。而镁合金构件主要承受动态载荷作用<sup>[2]</sup>, 因此对其疲劳性能尤其是高周疲劳性能的研究具有重要意义。

金属材料在循环载荷作用下引起疲劳破坏是一个损伤累积的过程, 其中所耗的塑性功绝大部分以热量形式耗散。而红外热像法作为一种非接触的无损检测技术可以实时、全局地检测试样表面的温度变化, 结合损伤理论进一步表征疲劳过程中的能量耗散特征。利用红外热像法研究材料疲劳性能受到越来越多的

重视<sup>[3]</sup>。

基于循环载荷与材料损伤释放热量的线性关系所提出的 Ristano 法和 Luong 法可以快速确定材料的疲劳极限<sup>[4,5]</sup>。刘浩等<sup>[6]</sup>认为 Luong 图中拐点的出现是由于温升机制的转变, 只有疲劳损伤(如塑性累计)会使得温升出现转折。Yan 等<sup>[7]</sup>对镁合金疲劳过程中试样的热分布不均匀性进行了分析, 指出非线性变形是高周疲劳过程中产热的主要原因, 并对合金的剩余寿命进行了预测。Jiang 等<sup>[8]</sup>提出将塑性应变能作为疲劳损伤指标, 利用 Coffin-Manson 方程估算材料的低

周疲劳寿命。

由于晶体结构的差异,金属材料在外载作用下其塑性变形能力不同。镁合金晶体为密排六方结构,常温下滑移系较少,塑性变形能力差,其损伤机制与其他金属相比有自身特点<sup>[9-12]</sup>,因此研究镁合金高周疲劳加载过程中的损伤和能量耗散特征具有重要意义。

本工作采用红外成像仪对镁合金试件疲劳损伤过程进行检测,得到了疲劳过程中试件表面的温度变化规律,阐述了镁合金疲劳过程的产热机制,分析导致温度变化的原因,并提出确定镁合金疲劳极限和疲劳寿命的方法。

1 实验材料与方法

实验采用厚度为 10mm 热挤压成型 AZ31B 镁合金板材。疲劳试样按照 GB/T 3075-2008《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》经机械加工直接成型,并打磨光滑,如图 1 所示。试件表面需要涂一层发射率大于 0.95 的黑色亚光漆,以避免发射光的干扰。

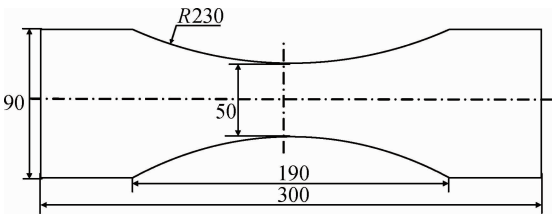


图 1 疲劳试样尺寸  
Fig.1 Fatigue sample dimension

疲劳实验所用设备为 PLG-200D 高频拉压疲劳试验机。循环特征系数为 0.1,谐振频率为 91.5~103.2Hz。采用 InfraTec VarioCAM hr 红外热像仪,384 像素×288 像素,频率 50Hz,温度恒定,热像仪灵敏度为 0.08K。

实验应力加载范围为 110~150MPa,应力加载相

隔 5MPa,同时进行热图像数据的采集。为了获取足够的低于疲劳载荷的温度数据,在加载应力低于 110MPa 时,采用逐级加载的方式(70MPa 开始,由低到高),实验在温度到达阶段Ⅲ时停止,热像数据采用 IRBIS®3 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 理论基础

根据热力学第一定律、热力学第二定律及材料的本构方程,可以推演出材料在疲劳过程中的热力耦合方程<sup>[5]</sup>:

$$\rho C_p \dot{T} = r_0 + K \nabla^2 T - (\beta; D; \dot{E}^e) T + S; \dot{E}^i \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $C_p$  为等体比热容;  $T$  为试件表面的温度;  $\dot{T}$  为试件表面的温度变化率;  $r_0$  为热源;  $K$  为热传导率;  $\beta$  为线膨胀系数矩阵;  $D$  为四阶弹性张量;  $S$  为二阶应力张量;  $\dot{E}^e$  为弹性应变张量;  $\dot{E}^i$  为非弹性应变张量。

公式(1)表明,在没有外加热源时,能量理论模型包括三部分:热传导效应、热弹性效应和非弹性效应。通过能量理论模型可以解释疲劳加载过程中的温度变化。热传导效应将改变试件表面的温度场,使其趋于均匀分布。热弹性源是由材料的弹性效应引起热噪声,从而产生的可逆热力学现象。它使每一个循环内材料温度微幅的周期性变化,引起的平均温升为零。非弹性效应会引起不可逆的热力学现象,产生的能量绝大部分以热耗散的形式释放。

2.2 疲劳断裂过程中温度演化

在循环载荷作用下,镁合金表面温度总体呈现规律性变化。由于结构变化,局部应力集中,造成试样表面温度分布不均匀<sup>[13]</sup>。频率恒定时,当加载应力超过材料的疲劳极限且低于材料的屈服极限时,疲劳过程中试件表面温度最高点随时间的变化如图 2 所示。

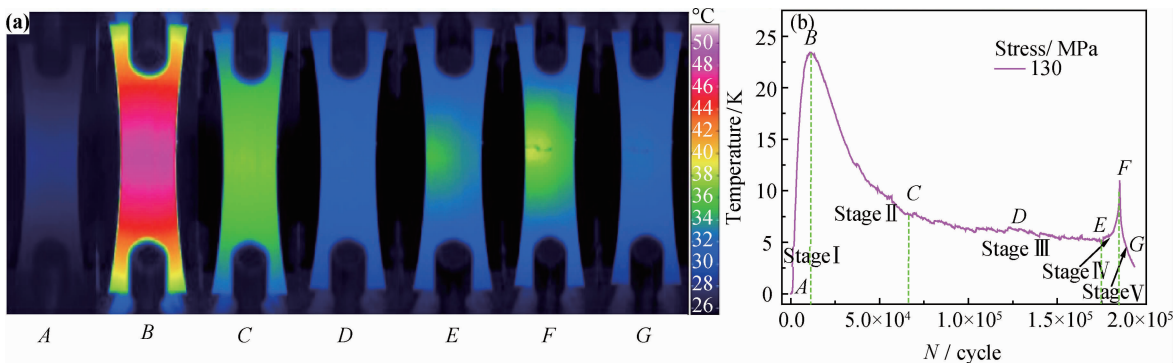


图 2 加载应力 130MPa 时试件表面热像图(a)及温度变化(b)  
Fig.2 Thermographic image on the surface of specimen (a) and temperature change curve (b) under loading of 130MPa

与钢铁材料在周期的疲劳载荷作用下呈现的三个典型温升阶段<sup>[4]</sup>不同,当加载应力大于疲劳极限,镁合金疲劳加载过程中温度变化可分为 5 个特征明显的阶段(见图 3):阶段 I (AB) 初始温升阶段,加载产生的局部塑性变形释放大量的热,试件的产热远大于热传导消耗的热量,这一阶段非弹性效应起主导作用;阶段 II (BC) 温度下降阶段,此阶段在碳钢温升曲线中不存在,主要是由于此时阶段 I 的塑性变形造成应变硬化,热量释放减少使温度迅速降低,这一阶段热传导起主导作用;阶段 III (CE) 温度恒定阶段,此时试件和环境的热交换达到平衡;阶段 IV (EF) 温度迅速上升阶段,此时试件内部裂纹萌生扩展、裂纹尖端处局部塑性变形以及内部摩擦和应力集中释放大量的热,试件在温度最高处发生断裂<sup>[14,15]</sup>;阶段 V (FG) 为温度最后下降阶段,此时实验已经停止。镁合金阶段 IV 的最高温度低于阶段 I 的最高温度,这是由于镁合金为脆性材料,断裂时塑性变形仅限于裂纹尖端,从而释放热量较少。由于热弹性效应,在前 4 个阶段,每个振动周期内都有温度的波动。

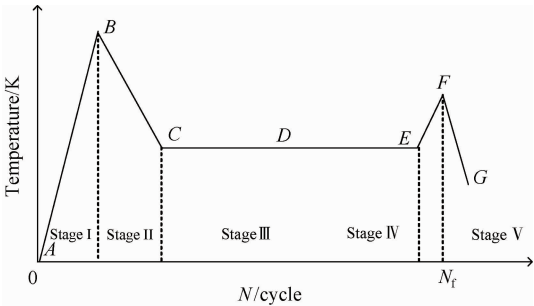


图 3 镁合金试件加载表面温度变化

Fig. 3 Temperature evolution on the surface of magnesium alloy specimen

图 4 为不同应力加载条件下断裂区试件表面最高

温度的变化,可以看出,当加载应力高于 115MPa 时,阶段 I 的温升梯度明显增加。当加载应力低于疲劳极限,非弹性效应(如黏性效应)造成少量的热耗散,引起试件表面小幅温升;在工作载荷高于疲劳极限,非弹性效应主导试件疲劳过程的热耗散,试件表面温度有较大幅度的升高。阶段 IV 的持续时间与应力相关,当应力接近材料的屈服极限时,阶段 IV 持续时间很短;当应力略高于材料的疲劳极限时,阶段 IV 持续时间几乎为整个疲劳寿命。

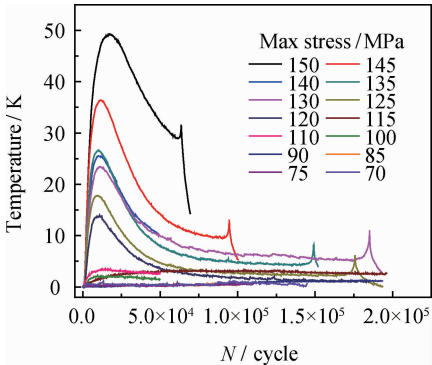


图 4 不同加载应力下的试件表面温度变化

Fig. 4 Temperature change curves on the surface of specimen at different stresses

2.3 疲劳实验 S-N 曲线

S-N 曲线关系式采用回归曲线法得到,工程上常用的是指数型的经验关系式:

$$\Delta\sigma^m N_f = C \tag{2}$$

式中: C 和 m 为材料常数;  $\Delta\sigma$  为应力幅值 ( $\Delta\sigma = 0.9 \sigma_{\max}$ );  $N_f$  为断裂时的循环次数。

镁合金疲劳实验结果如表 1 所示,拟合 S-N 曲线见图 5。由 S-N 曲线可以得到,AZ31B 镁合金在循环次数为  $10^7$  时,疲劳极限为 108MPa。

表 1 AZ31B 镁合金疲劳实验结果

Table 1 Fatigue test results of AZ31B magnesium alloy

Loading stress higher than fatigue limit				Loading stress lower than fatigue limit			
Maximum temperature rise				Maximum temperature rise			
$\sigma_{\max}$ /MPa	of phase I $\Delta T_{\max}$ /K	N/cycle	Fault position	$\sigma_{\max}$ /MPa	of phase I $\Delta T_{\max}$ /K	N/cycle	Fault position
150	49.33	58761	In gauge	115	3.68	$10^7$	Unbroken
145	36.39	90641	In gauge	110	3.50	$10^7$	Unbroken
140	28.55	85760	In gauge	100	2.20		
135	26.65	143828	In gauge	90	1.31		
130	23.44	179939	In gauge	85	1.14		
125	17.80	170159	In gauge	75	0.80		
120	13.94	993516	In gauge	70	0.70		

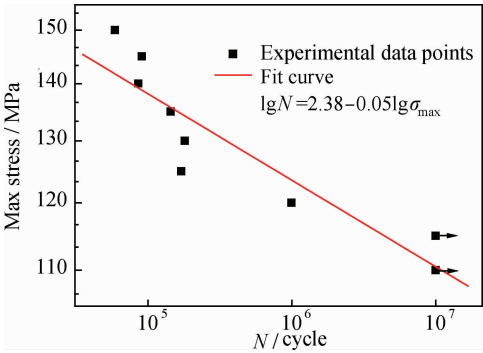


图 5 AZ31B 镁合金 S-N 曲线

Fig. 5 S-N curve of AZ31B magnesium alloy

2.4 基于红外热像法的镁合金疲劳极限拟合

材料表面温度变化与内部损伤有直接关系,利用循环载荷下温升极限可以分析判断其疲劳性能<sup>[16]</sup>。记录每个应力水平下试样表面的最大升温值,即阶段 I 的温升最大值(表 1),采用 Luong 法拟合得出疲劳极限,如图 6 所示。

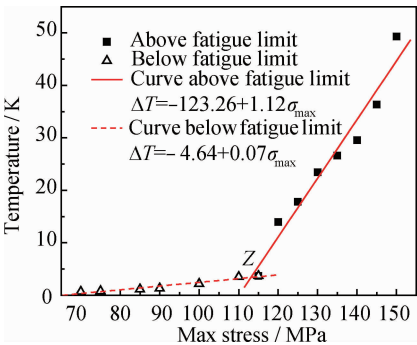


图 6 Luong 法拟合疲劳极限

Fig. 6 The fatigue limit determined by Luong method

图 6 分别将疲劳极限上下数据点进行线性拟合,两直线交点 Z 对应横坐标为镁合金疲劳极限 113MPa,与 S-N 曲线得到的结果 108MPa 的相对误差为 4.8%。

2.5 基于红外热像法的  $\Delta T_{\max}$ -N 曲线拟合

基于镁合金加载条件下试件表面特殊的温度变化,进行高周疲劳性能预测时,塑性材料的简化模型不再适用。

高周循环初期(阶段 I),试件内部显微结构快速变化,连续发生不可逆变形,造成试件内部累积变形,产生大量诸如空穴增长、位错增减等不可逆的畸变并释放热能<sup>[9]</sup>,表现为试件表面温度迅速上升。但是由于镁合金室温时滑移系较少,循环初期累积一定变形之后,发生应变硬化,应变硬化达到极限时进入稳定阶段(阶段 II),此时材料具有相对稳定的内部显

微机构,热耗散与环境热交换达到平衡,温度趋于恒定<sup>[17]</sup>。

镁合金的高周疲劳寿命与显微结构有直接联系<sup>[18]</sup>。循环初期微观变形导致内部应力增加并伴随热能的释放。随着变形量逐渐减小到达应变硬化期,此时局部应力增加并趋于稳定,热能释放速率达到极限(最大升温值)。当应力水平高于疲劳极限时,微观缺陷处应力集中促使裂纹的萌生,因此,阶段 I 温升值与疲劳寿命之间有着必然的联系。而当应力低于疲劳极限时,显微结构变化较少,无明显温升。

在热力学第一定律的基础上,根据理论推导平衡温升值和应力幅值之间可建立如下关系<sup>[9]</sup>:

$$\Delta T = A\sigma^n \tag{3}$$

式中:指数  $n$  是常数; $\Delta T$  为平衡温升值;该公式适用于塑性材料。由图 3 可知,塑性材料平衡温升值  $\Delta T$  即为阶段 I 温升最大值  $\Delta T_{\max}$ 。对于镁合金,由于阶段 II 温度下降,因此,在此处采用阶段 I 温升最大值  $\Delta T_{\max}$  表示。

结合公式(2),(3)可得到, $\Delta T_{\max}$  与  $N_f$  之间的关系:

$$\lg \Delta T_{\max} = -a \lg N_f + b \tag{4}$$

图 7 为 AZ31B 镁合金  $\Delta T_{\max}$ -N 曲线,由图 7 可知,AZ31B 镁合金在循环次数为  $10^7$  时, $\Delta T_{\max}$  为 3.89K。当初始温升  $\Delta T_{\max}$  超过 3.89K 时,即会发生疲劳断裂。 $10^7$  次循环时实测值为 3.68K,其相对误差为 5.7%。

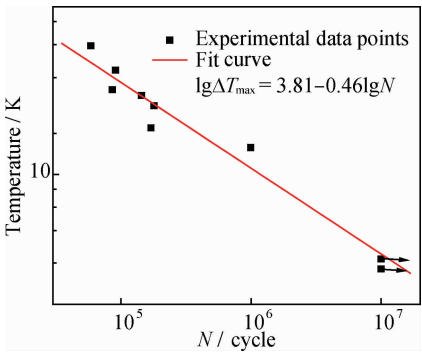


图 7 AZ31B 镁合金  $\Delta T_{\max}$ -N 曲线

Fig. 7 The  $\Delta T_{\max}$ -N curve of AZ31B magnesium alloy

$\Delta T_{\max}$ -N 曲线和 S-N 曲线的线性相关性对比见表 2, $\Delta T_{\max}$ -N 拟合曲线的相关系数  $R$  大于 S-N 曲线。在实际的工程应用中,只需测量阶段 I 的温升最大值即可预测镁合金的疲劳断裂,并根据公式(4)可以计算得到疲劳寿命,相比于传统疲劳测试方法,该方法具有快速测量的特点。

表 2 拟合曲线的线性相关性

Table 2 The linear correlation of fitting curves

Type of curve	<i>n</i>	<i>R</i>	Standard deviation	<i>P</i>
$\Delta T_{\max}\text{-}N$	9	0.98	0.08	$1.0\times10^{-4}$
<i>S-N</i>	9	0.92	0.02	$4.9\times10^{-4}$

3 结论

(1)采用 Luong 法得到镁合金高周疲劳极限 113MPa,与 *S-N* 曲线得到的疲劳极限 108MPa 的相对误差约为 4.8%。

(2)基于镁合金加载过程中表面温度的特殊变化,提出的  $\Delta T_{\max}\text{-}N$  曲线表明,镁合金的疲劳断裂极限温度增量为 3.89K,与实测值相对误差为 5.7%。在工程设备在线监测中,只需测量阶段 I 的温升最大值即可预测镁合金的疲劳断裂,并可以计算得到疲劳寿命。

参考文献

[1] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 1—3.

[2] 熊纛, 程利霞. 挤压 AZ31B 镁合金多轴疲劳寿命预测[J]. 金属学报, 2012, 48(12): 1446—1452.

XIONG Y, CHENG L X. Multial fatigue life prediction for extruded AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(12): 1446—1452.

[3] 郭杏林, 王晓钢. 疲劳热像法研究综述[J]. 力学进展, 2009, 39(2): 217—227.

GUO X L, WANG X G. Overview on the thermographic method for fatigue research[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(2): 217—227.

[4] ROSA G LA, RISITANO A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(1): 65—73.

[5] LUONG M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals[J]. Nuclear Engineering Design, 1995, 158(223): 363—368.

[6] 刘浩, 赵军, 丁桦. 疲劳过程中生热机理的实验探讨[J]. 实验力学, 2008, 23(1): 1—8.

LIU H, ZHAO J, DING H. Experimental study on heat production mechanism during fatigue process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(1): 1—8.

[7] YAN Z F, ZHANG H X, WANG W X, et al. Temperature evolution and fatigue life evaluation of AZ31B magnesium alloy based on infrared thermography[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1942—1948.

[8] JIANG L, WANG H, LIAW P K, et al. Temperature evolution

and life prediction in fatigue of superalloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(3): 839—848.

[9] 李娜. 基于能量耗散理论的疲劳试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

[10] 王晓钢. 基于热像法的寿命预测与疲劳分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[11] RISITANO A, RISITANO G. Cumulative damage evaluation of steel using infrared thermography[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 54(2): 82—90.

[12] FAN J L, GUO X L, WU C W, et al. Research on fatigue behavior evaluation and fatigue fracture mechanisms of cruciform welded joints[J]. Materials Science and Engineering :A, 2011, 528(29—30): 8417—8427.

[13] 同志峰, 张红霞, 王文先, 等. 红外热成像法预测镁合金的疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2012, 36(2): 72—75.

YAN Z F, ZHANG H X, WANG W X, et al. Infrared thermography technology predicting fatigue property of AZ31B magnesium alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(2): 72—75.

[14] RANC N, WAGNER D, PARIS P C. Study of thermal effects associated with crack propagation during very high cycle fatigue tests[J]. Acta Materialia, 2008, 56(15): 4012—4021.

[15] UMMENHOFER T, MEDGENBERG J. On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 130—137.

[16] CURÀ F, CURTI G, SESANA R. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(4): 453—459.

[17] YANG B, LIAW P K, MORRISON M, et al. Temperature evolution during fatigue damage[J]. Intermetallics, 2005, 13(3—4): 419—428.

[18] PASTOR M L, BALANDRAUD X, GRÉDIAC M, et al. Applying infrared thermography to study the heating of 2024-T3 aluminium specimens under fatigue loading[J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(6): 505—515.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175364); 山西省自然科学基金资助项目(2013011014-3)

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2013-11-13

作者简介: 王凯(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事金属材料失效及安全评定, 材料连接及界面行为研究, 联系地址: 山西省太原市迎泽西大街 79 号太原理工大学材料科学与工程学院(030024), E-mail: wangkai19890908@hotmail.com

通讯作者: 王文先(1963—), 男, 教授, 博导, 主要从事材料连接及界面行为研究, 联系地址: 山西省太原市迎泽西大街 79 号太原理工大学材料科学与工程学院材料加工系 502 室(030024), E-mail: wwxx960@126.com