

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.05.005

发动机飞轮壳道路载荷谱试验分析研究*

牛 健, 俞小莉, 黄 瑞*, 冯 燕, 陈俊玄, 刘震涛, 周 迅
(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 飞轮壳作为发动机的重要结构件和支撑件, 极易发生断裂破坏。为获得飞轮壳的应力特征, 开发了基于 NI-DAQ 的车载数据采集系统, 分别在“粗纹理”和“大构造”两种典型路况、满载与空载两种载荷工况下采集了飞轮壳危险部位应力谱信号。开发了基于 C++ 的数据分析平台, 进行了应力谱信号的修正和时域频域特征提取, 包括时域内平面应力分析、频域内应力幅值谱分析和瀑布图分析。研究表明, 飞轮壳处于单轴应力状态, 飞轮壳失效机理为交变应力作用下的疲劳破坏; 飞轮壳破坏的主要原因为 80 Hz 以下的低频振动; 造成系统破坏主要激振源为发动机, 主要影响因素为发动机转速。通过各个典型工况下的对比分析发现, 飞轮壳破坏主要发生在高不平度路面、满载负荷工况和高发动机转速工况。

关键词: 飞轮壳; 应力谱; 时频分析; 振源提取

中图分类号: TH114; U467

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)05-0563-05

Road load spectrum test analysis for engine flywheel cover

NIU Jian, YU Xiao-li, HUANG Rui, FENG Yan, CHEN Jun-xuan, LIU Zhen-tao, ZHOU Xun
(Institute of Power Machinery and Vehicular Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As an important structure and support part of engine, flywheel cover is easily damaged. In order to obtaining the stress characteristics of flywheel cover, one kind of data acquisition system based on NI-DAQ was established to collect the stress spectrum of the dangerous parts in flywheel cover during two typical road condition including coarse grained and large structure and two kinds of load condition including full load and empty load. The correction of stress spectrum and the extraction of time-frequency feature were completed by using data processing platform based on C++, including plane stress analysis, amplitude spectrum analysis and waterfall analysis. The results indicate that flywheel cover works under uniaxial stress state, and the failure mechanism of flywheel cover is fatigue damage under the action of alternating stress. The main damage results from low frequency vibration below 80 Hz. The dominant vibration source is engine and the engine speed is the major effect factor. Comparison between various working conditions indicates that the damage mainly occurs in high roughness surface, full load condition and high engine speed condition.

Key words: flywheel cover; stress spectrum; time-frequency analysis; vibration source extraction

0 引 言

飞轮壳连接发动机和变速器, 保护离合器和飞轮, 而且还设有悬置点和起动机安装支架, 是重要的基础部件。在整车工作过程中, 飞轮壳受到发动机激励、路面激励、变速惯性转矩以及启动机的冲击激励等载荷,

均可能使飞轮壳产生交变应力, 从而导致疲劳断裂。飞轮壳开裂后, 将直接破坏曲轴与变速器第一轴的同轴度, 造成发动机、离合器、起动机以及传动装置工作失常等故障。因此必须对飞轮壳破坏原因做深入研究, 找到一种适合评价飞轮壳破坏的分析流程, 为其故障诊断、寿命估计、结构改进提供必要的理论依据。

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206141)

作者简介: 牛 健(1989-), 男, 河南南阳人, 主要从事发动机零部件疲劳可靠性方面的研究。E-mail: niuj@zju.edu.cn

通信联系人: 黄 瑞, 男, 助理研究员, 工学硕士。E-mail: hrss@zju.edu.cn

目前,现代设计理论与实验方法^[1-2]已经广泛应用于内燃机结构设计,有限元^[3]、多体动力学与路谱技术^[4]的发展,有利于设计者短时间把握新产品的结构性能。耿广瑞^[5]和贾朝军^[6]利用有限元法分别计算了飞轮壳静态与动态强度;隋军^[7]、张旭升^[8]、高云凯^[9]等分别对不同车型动力总成进行了试验或计算模态分析,认为动力总成的弯曲振动是造成汽车离合器壳开裂的主要原因;李洪涛等^[10]通过对某型客车飞轮壳载荷谱的分析得出飞轮壳的破坏是由路面随机激励造成的。以上研究主要采用有限元计算方法和模态分析方法进行飞轮壳强度分析,较少从实测应力谱中分析飞轮壳破坏的机理。国外针对飞轮壳强度研究公开发表的成果很少,飞轮壳作为一种薄壁结构件,主要关注其 NVH 性能^[11]。

本研究开发高精度、高实时性型号采集系统,采集某重型卡车在一个完整运输过程中的应力谱;对该应力谱进行修正处理,并提取发动机转速信号;分析应力谱时频特性,提取导致损伤的振源信息;考察振动损伤与路况、载荷和发动机转速的关系。

1 飞轮壳载荷谱采集及处理

1.1 数据采集系统

数据采集系统的硬件部分为:一台便携式笔记本、

一套美国 NI 公司的多通道便携型数据采集器 Compact-DAQ 机箱及适用于应变信号采集的 9237 和 9945 板卡组成^[12]。软件部分采用 LabVIEW 编程进行控制与实时监测,数据采集系统如图 1 所示。

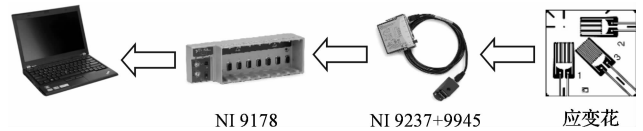


图 1 数据采集系统

1.2 测试方案

测试对象为某型重卡搭载的飞轮壳,试验车基本参数如表 1 所示,飞轮壳材料力学性能如表 2 所示。

表 1 实验用车基本参数

基本参数	数值
整车质量/kg	8 800
载重量/kg	25 000(无挂车)
排量/mm ²	126 × 130
标定功率/kW/ 转速/(r · min ⁻¹)	276/2 200
最大扭矩/(N · m)/ 转速/(r · min ⁻¹)	1 460/1 400 ~ 1 600
发动机型式	直列六缸四冲程增压水冷柴油机
悬置方式	四点悬置

表 2 测试飞轮壳材料力学性能

部件名称	材料牌号	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	弯曲疲劳极限/MPa	极限应力/MPa
飞轮壳体	HT250	7 300	147	0.28	60	250

载重卡车实际作业工况多为道路行驶,为全面考察不同路况下飞轮壳振动响应,本研究选择测试地点为某大型矿区。测试路面分为两段:公路(HIGHWAY)和河床路面(RIVERBED)。其中,公路路面为混凝土铺设道路,较为平整;河床路面为河床自然形成的无铺设软基道路,有较大幅度的扭曲度和坑洼。公路路面构造波长约为 1 mm ~ 10 mm,矿区路面构造波长约为 100 mm ~ 500 mm,分别对应国际耐久性协会(PLARC)给出的路面构造分类中的“粗纹理”路面和“大构造”路面,是载重卡车运行的典型路面。

本研究随车测量了重卡一个正常矿砂转运工作循环中的应力历程,分为空载河床路面、满载河床路面、满载公路路面 3 段。

本研究通过对已破坏飞轮壳断裂位置的统计观测并结合频率响应分析,确定了 10 个测点,编为 1 ~ 10 号,实际断裂位置与频响分析示意图如图 2 所示,实验测点布置示意图如图 3 所示。由于飞轮壳内部空间局限性,本研究选择其中 3、6、9 为应变花测点,其他测点为单向应变片测点。

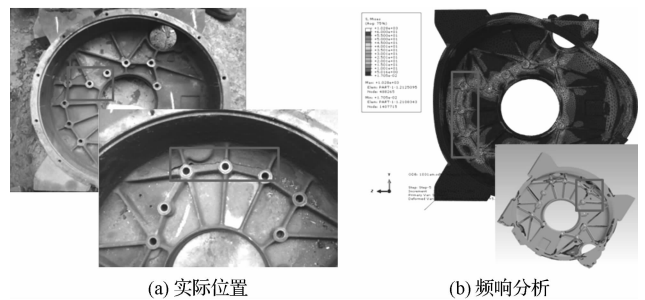


图 2 实际断裂位置与频响分析示意图

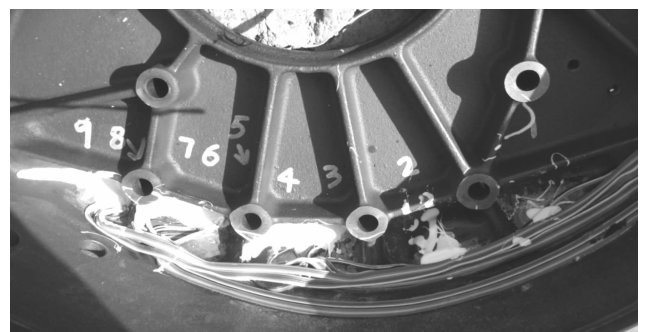


图 3 实验测点布置示意图

1.3 测试结果

本研究通过测量得到各测点在空载河床路面、满载河床路面、满载公路路面应变信号,其采样率为2 000 SPS。其中3号应变花测点沿飞轮壳径向应变时间历程样本如图4所示。

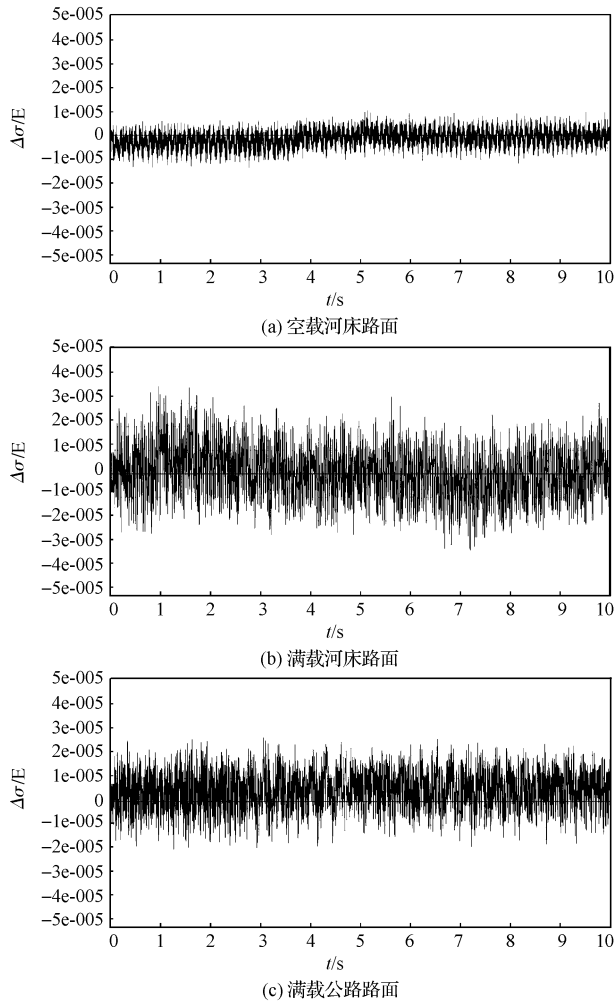


图4 测点3在3个工况下应变信号样本

1.4 载荷谱预处理

由于车载实验易受各种外界因素干扰,实测信号会出现尖峰干扰、平整线突起或跌落和温度漂移等,首先需要它们进行剔除或修正。

尖峰干扰表现为一个或少量的数据点突然耸起或跌落,通过差分对比、峰值系数、幅值设限等算法,可对尖峰位置进行自动检测。平整线突起或跌落表现为成块的数据陡然上凸或下凹,通过差分移动窗统计法可对 Flat-line 异常信号的位置进行自动检测。温度漂移表现为数据整体向某一方向偏移,可能是随实验进行飞轮壳温度变化等因素引起,本研究以两端点为参考点,分段拟合线性或多项式的趋势项对温漂进行修正。

本研究利用带通滤波、零水平穿级计数方法提取

各工况下的发动机转速^[13]。

2 应力谱信号分析

2.1 平面应力分析

飞轮壳材料 HT250 为珠光体灰铸铁,本研究采用第一强度理论,以最大主应力作为飞轮壳失效破坏的判断依据。第3、6、9号测点为应变花测点,各个应变片夹角45°,设定沿飞轮壳径向应变片方向为得到主应变的大小方向为 $\alpha_0 = 0^\circ, \alpha_2 = 45^\circ, \alpha_{90} = 90^\circ$,则该点主应力大小与方向为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{aligned} \right\} = \frac{E(\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ})}{2(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}E}{2(1+\nu)} \times \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \quad (1)$$

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{2\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ}}{\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ}} \quad (2)$$

采用C++编程,由应变信号求得的最大主应力角度如图5所示。

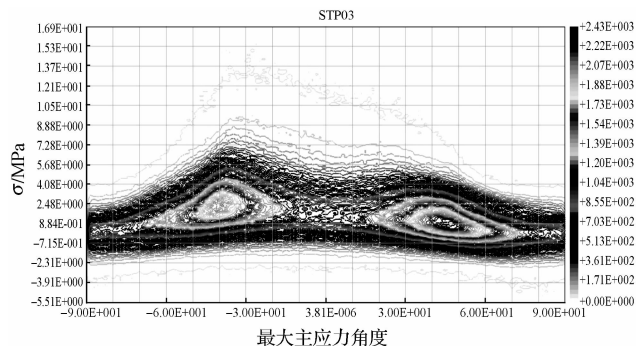


图5 测点3最大主应力角度分布

图5中,横坐标表示最大主应力角度,左侧纵坐标表示应力值,右纵坐标表示统计频数。由图5可见最大主应力角度集中在 $\pm 45^\circ$,有明显的单轴性。

最大主应力时间历程如图6所示。各测点最大主应力均远小于飞轮壳极限强度,其表明飞轮壳破坏并非由于外力作用下直接脆断,而是在交变应力作用下产生的疲劳破坏。

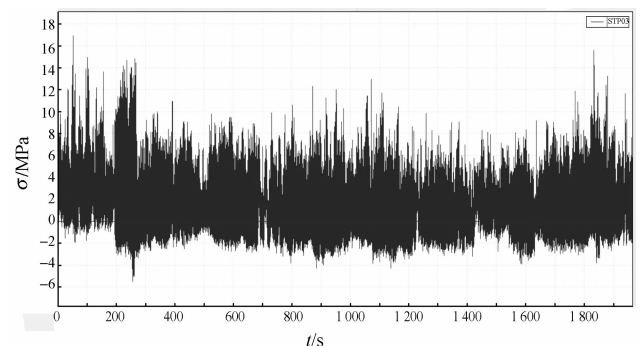


图6 测点3最大主应力时间历程

2.2 载荷幅值谱函数

频谱分析是将信号从时域转换为频域的分析方法,通过离散信号傅里叶变换可以得到振动幅值、功率等随频率的变化特征,进行振源识别,同时得到不同频率激振源对飞轮壳振动影响的大小。本研究采用测点应变作为飞轮壳振动强弱的判断标准,3号应变测点在3个工况下的应变幅值谱如图7所示。

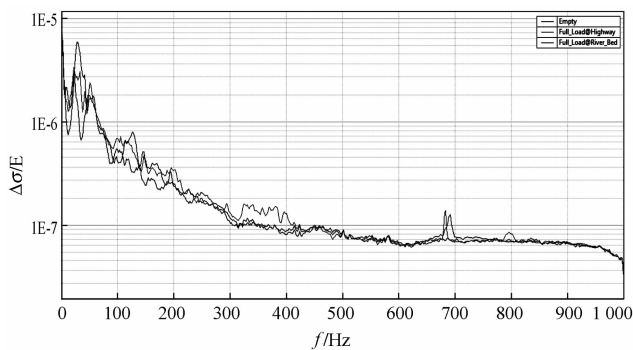


图7 3号测点载荷幅值谱函数

对飞轮壳造成破坏的主要因素为80 Hz以下的低频振动,峰值位于40 Hz~50 Hz;在空载时的振动整体小于满载工况。实验用车发动机额定转速 $2\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,工作转速范围 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}\sim 2\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,对应10 Hz~40 Hz振动激励,在幅值谱图上处于振动幅值较大区域,故发动机工作状态对飞轮壳振动影响显著;40 Hz~80 Hz振动可能为其他来源的激励,也可能是发动机工作过程中燃气压力、活塞敲击等高谐次激振源引起。

3 发动机激振相关性分析

为进一步考察飞轮壳振动与发动机的关联,本研究做出的振动信号瀑布图(图中颜色由冷色到暖色表示振动幅值由小变大)如图8所示。

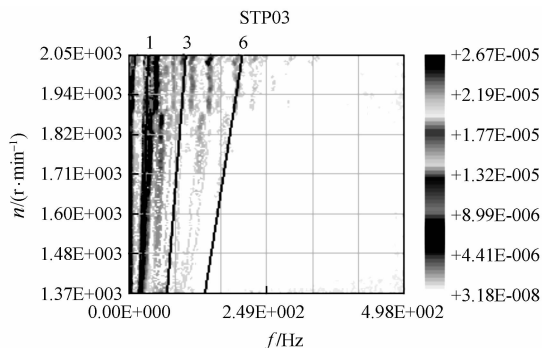


图8 3号测点满载河床路段瀑布图

该型号发动机为6缸机,本研究重点考察其1、3、6阶谐次激励。由瀑布图看出,飞轮壳的振动并非与

特定频率相关,而是与发动机的谐次线贴合密切,表明飞轮壳损坏主要受发动机工作状态的影响。振动幅值较大点集中在 $2\,200\text{ r}/\text{min}$ 以上的高转速区域,表明发动机转速可能是影响飞轮壳振动情况的最重要影响因素。

由1.4节提取的发动机转速与2.1节应变花平面应力分析,作出各测点最大主应力与发动机转速关系图如图9所示。随发动机转速提高,飞轮壳危险部位应力值显著增加。其原因可能为动力总成系统模态偏低,发动机转速增加,振动频率增加,接近系统固有模态。

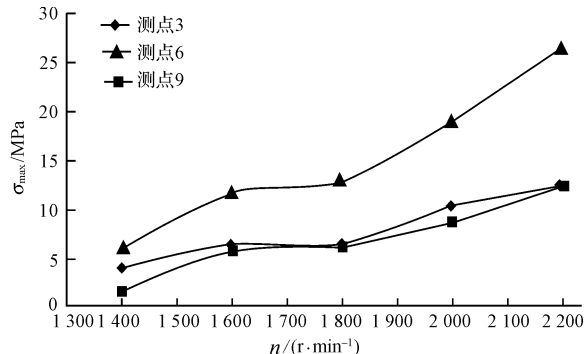


图9 最大主应力-转速关系图

4 结束语

(1)飞轮壳近似处于单轴应力状态;飞轮壳失效原因为交变载荷作用下的疲劳破坏。

(2)对飞轮壳造成破坏的主要因素为80 Hz以下的低频振动,主要振动激励源为发动机。

(3)飞轮壳应力值在不同运行环境下有显著差异,高不平度路面大于低不平度路面,满载工况大于空载工况,高转速工况大于第转速工况;尤其是在满载高不平度路面,发动机转速高于 $2\,000\text{ r}/\text{min}$ 时部分测点应力达到20 MPa以上,产生疲劳损伤。

参考文献(References):

[1] COLINS J A. Mechanical Design of Machine Elements and Machines[M]. John Wiley & Sons,2009.

[2] 李舜辞. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京:科学出版社,2006.

[3] COOK R D. Concepts and Applications of Finite Element Analysis[M]. John Wiley & Sons Inc.,2001.

[4] 李孟良. 汽车道路谱标准现状与趋势研究[J]. 公路,2009(11):107-109.

[5] 耿广瑞. 商用车发动机飞轮壳强度分析[C]. Altar 2009 Hyper Works 技术大会论文集,2009.

[6] 贾朝军. 飞轮壳、离合器壳、变速器壳破裂原因分析及改

- 进[J]. 汽车技术,2004(4):9-12.
- [7] 隋军. 传动系的弯曲振动及其对汽车飞轮壳强度影响的研究[J]. 汽车技术,1994(6):14-22.
- [8] 张旭升. 柴油机动力总成弯曲振动对飞轮壳强度影响的模拟研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2004.
- [9] 高云凯. 汽车动力总成弯曲振动应力响应及其激励灵敏度分析[J]. 汽车工程,1996(3):163-167.
- [10] 李洪涛,周迅. 客车飞轮壳的载荷谱测试及疲劳寿命分析[J]. 浙江理工大学学报,2013,30(2):224-227.
- [11] GAGNON N H, GAGNON V G. Identification of power-train noise sources using sound intensity and modal analysis techniques[C]. SPIE International Society for Optical, 1997:2016-2020.
- [12] 闫宏伟. 基于NI-DAQ数据采集系统的设计与实现[J]. 可编程控制器与工厂自动化(PLC&FA),2004(9):109-113.
- [13] 严辉. 振动噪声信号在发动机转速提取中的运用[J]. 汽车工程师,2010(7):44-46.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

牛健,俞小莉,黄瑞,等. 发动机飞轮壳道路载荷谱试验分析研究[J]. 机电工程,2014,31(5):563-567.

NIU Jian, YU Xiao-li, HUANG Rui, et al. Road load spectrum test analysis for engine flywheel cover[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(5):563-567.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第552页)

中材料去除率可以提高50%以上,但是对于模具表面粗糙度不会产生较大的影响。

4 结束语

为解决利用气压砂轮激光强化模具过程中,由于高频小幅振动及长时间交变应力作用引起气压砂轮基体产生细微裂纹的问题。通过有限元仿真软件,本研究对芳纶浆粕增强复合气压砂轮的模态与光整中的接触区域应力分布特性的数值进行了分析,验证了通过添加短纤维方法改善气压砂轮抗振性与接触应力分布均匀性的可行性;并且得出结论:当添加质量分数为3.3%的芳纶浆粕时,可以兼顾复合气压砂轮仿形接触能力与应力分布的均匀性。

最后,通过光整加工试验的对比,本研究验证了复合气压砂轮对高硬度模具具有高效光整的可行性,能够较好地满足激光强化曲面模具的光整加工。

参考文献(References):

- [1] 晁拥军. 工模具材料强化处理应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 郑涌. 模具行业现状及其发展趋势[J]. 科技信息,2007(4):64-65.
- [3] 洪永昌,王明辉. 激光重熔和时效处理的镍基合金热喷焊层组织和性能的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(10):75-81.
- [4] 何柏林,孙佳,史建平. 工模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 热加工工艺,2009,38(18):85-89.
- [5] 计时鸣,曾晰,金明生,等. 软固结磨粒群加工方法及材料去除特性的分析[J]. 机械工程学报,2013,49(5):173-188.
- [6] 曾晰. 软固结磨粒气压砂轮的光整方法及加工机理研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.
- [7] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [8] LUO Q, RAMARAJAN S, BABU S V. Modification of the preston equation for the chemical-mechanical polishing of copper[J]. *Thin Solid Films*,1998,335(1):160-167.
- [9] TSENG W T, WANG Y L. Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical mechanical polishing processes[J]. *Journal of the Electrochemical Society*,1997,144(2):15-17.
- [10] WRSCHKA P, HERNANDEZ J, HSU Y, et al. Polishing parameter dependencies and surface oxidation of chemical mechanical polishing of al thin films[J]. *Journal of the Electrochemical Society*,1999,146(7):2689-2696.
- [11] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[编辑:罗向阳]