

# 有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命可靠性分析

Reliability Analysis of Fatigue Life for Polymethyl

Methacrylate with Edge Joint Structure

高宗战<sup>1</sup>, 何新党<sup>1</sup>, 姜志峰<sup>2</sup>, 岳珠峰<sup>1</sup>

(1 西北工业大学 工程力学系, 西安 710072;

2 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024)

GAO Zong-zhan<sup>1</sup>, HE Xin-dang<sup>1</sup>, JIANG Zhifeng<sup>2</sup>, YUE Zhu-feng<sup>1</sup>

(1 Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical

University, Xi'an 710072, China; 2 Jiangxi Hongdu Aviation Industrial

Shareholding Co., Ltd., Nanchang 330024, China)

**摘要:** 针对有机玻璃边缘连接结构弯曲疲劳实验结果, 提出了结构低周疲劳寿命模型, 对有机玻璃边缘连接结构可靠性进行分析。考虑材料属性、疲劳幅值载荷的随机性, 分别采用 Monte-Carlo 法和四阶矩法, 借助有限元分析软件 Marc 对结构进行了可靠性分析, 得到低周疲劳载荷作用下结构疲劳寿命的可靠度, 比较两种计算结果, 发现四阶矩法计算结果与 Monte-Carlo 法计算偏差很小, 适用于有机玻璃边缘连接结构疲劳可靠性分析; 同时分析了基本变量均值与标准差影响结构可靠性的灵敏度, 得到载荷为影响结构疲劳寿命可靠性的主要因素。

**关键词:** 有机玻璃边缘连接; 疲劳寿命; 可靠性; Monte-Carlo 法; 四阶矩法

中图分类号: TB33; O346 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)05-0020-05

**Abstract:** A low cycle fatigue life model was put forward based on bending experiment results of polymethyl methacrylate edge joint structures. Using this model, the reliability of the polymethyl methacrylate edge joint structure was analyzed by software MSC MARC. The material properties and fatigue load amplitudes were considered as random factors. The Monte-Carlo method and the forth moment method were utilized to get the fatigue life reliability of the polymethyl methacrylate edge joint structure under low cycle fatigue loading conditions. Comparing the two methods, it is found that the results are approximate with shorter analysis time for the forth moment method. Therefore, it is more suitable for reliability analysis of the polymethyl methacrylate edge joint structure. The parameter sensitivity was also analyzed with the mean value and standard deviation. The load amplitude is found to be the major factor.

**Key words:** edge joint structure of polymethyl methacrylate; fatigue life; reliability; Monte-Carlo method; forth moment method

座舱盖为飞机关键构件, 通常由中央的透明件和四周的金属框架组成。由于透明件与金属框架的力学性能相差很大, 因此, 不能将透明件与金属框架直接连接起来, 一种连接形式为将透明件与涤纶钢胶接起来再与金属框架连接<sup>[1]</sup>。本工作所研究的透明件连接方式如图 1 所示。这种连接方式在透明件四周增加与透明件厚度相同的涤纶钢垫块, 通过涤纶钢带将透明件和涤纶钢垫块用胶黏剂粘接在一起, 然后在涤纶钢垫块上制孔, 通过螺栓与金属骨架连接。这种连接方式的优点是避免了直接在透明件上制孔, 而改为在韧性较好的涤纶垫块上制孔。采用此种连接方式的有幻影

5, K8 飞机改进型活动舱盖<sup>[2]</sup>。座舱盖透明件安全可靠性直接影响飞机的使用和飞行员的安全, 它不但应有足够的强度和刚度, 还应具有足够的抗疲劳性能<sup>[3]</sup>, 以保证飞机在长期交变载荷作用下飞行安全。

对有机玻璃边缘连接结构进行低周疲劳寿命预估是座舱盖设计的重要环节。目前, 广泛采用确定性寿命分析方法<sup>[4, 5]</sup>, 通常通过对有机玻璃边缘连接结构进行疲劳寿命实验, 得到寿命模型, 并结合安全系数进行有机玻璃边缘连接结构的寿命设计。但是, 实践证明, 由于有机玻璃材料在实际加工过程中, 其材料属性、几何尺寸、工作条件以及载荷等都存在随机性, 有机玻璃

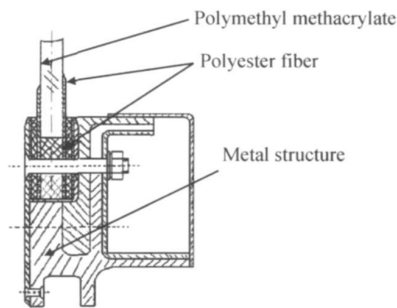


图 1 一种飞机座舱盖透明件边缘连接结构  
Fig. 1 One edge joint structure of aircraft canopy

的疲劳强度、疲劳寿命也存在一定的分散性。而传统的方法采用确定性设计参数来计算寿命值或疲劳强度值,没有充分考虑参数的随机性,不能预估设计风险,并需要采用安全系数法来防止失效。因此,所预测的疲劳强度值以及寿命值往往偏低,造成设计过于保守。

鉴于疲劳寿命确定性分析方法的弊端,本工作对图 1 所示透明件边缘连接结构在给定疲劳强度下(50000 次循环)的疲劳寿命进行可靠性研究。首先,对有机玻璃边缘连接结构进行疲劳实验,可以确定边缘连接结构疲劳失效的起始位置<sup>[6]</sup>;利用有限元软件 Marc 计算透明件边缘连接结构在弯曲载荷作用下应力分布,给出疲劳失效区域的应力;根据适用于有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命估算方法(局部应力法)建立失效区域应力与疲劳寿命模型<sup>[6,7]</sup>;同时在本课题组所编制包含有多种可靠性分析方法的飞机结构强度和寿命可靠性分析与设计软件(Asrads1.0)中加入设计

参数的统计分布规律,选取可靠性分析方法——蒙特卡罗法(Monte Carlo),设定样本点为 5000 对透明件边缘连接结构进行寿命可靠性分析;采用四阶矩法对结构进行可靠性分析。

1 弯曲疲劳寿命模型

对 MDYB-3 航空有机玻璃边缘连接结构进行常温下弯曲疲劳实验,基于实验结果,结合有限元分析,采用局部应力法对结构进行疲劳寿命分析,得到结构寿命预测模型如式(1)。文献[6,7]可知,实验寿命与预测模型预测寿命吻合较好<sup>[7]</sup>。

$$\sigma = \left( \frac{1.49 \times 10^{44}}{N} \right)^{\frac{1}{23.55}} \tag{1}$$

式中:σ 为结构危险区域 Mises 应力;N 为疲劳循环次数。

2 确定性分析

本工作首先对有机玻璃边缘连接结构在疲劳载荷幅值  $P_{max} = 1.179\text{kN}$  时,加载频率  $f = 1\text{Hz}$ ,应力比  $R = 0.1$ ,采用正选加载情况下,进行了 5 次疲劳寿命实验,发现结构寿命均超过 50000 次。采用有限元分析软件 Marc 对有机玻璃边缘连接结构在载荷  $P_{max} = 1.179\text{kN}$  作用下进行应力分析,材料参数为表 1 中均值。有限元模型与边界条件如图 2 所示。有限元计算可以发现弯曲载荷作用下有机玻璃边缘连接结构上应力分布云图如图 3 所示,并且最大拉应力位置与结构

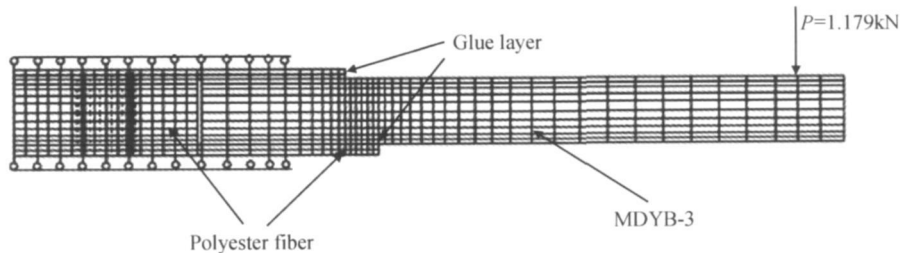


图 2 有机玻璃边缘连接结构有限元分析模型  
Fig. 2 FEM model of polyester fiber for edge joint structure

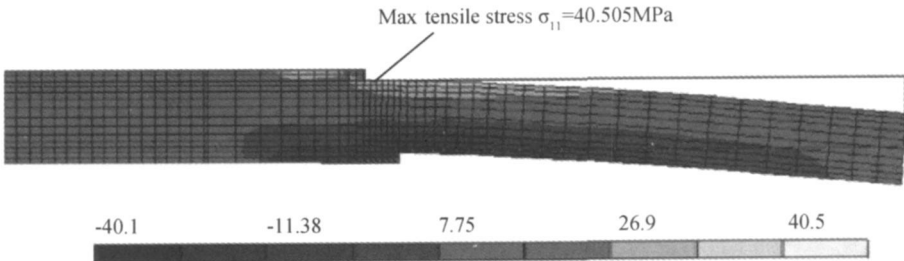


图 3 有机玻璃边缘结构上有限元分析应力分布云图  
Fig. 3 Stress distribution on the polymethyl methacrylate structure with the edge joint

破坏位置相同, 可知, 拉应力导致结构失效。1. 179kN 载荷作用下, 结构上最大应力为 40 505MPa。根据寿命公式可知, 结构的寿命为  $2.07 \times 10^6$  远远大于 50000, 确定分析可认为, 有机玻璃边缘连接结构在载荷作用下达到低周疲劳设计要求。

3 可靠性计算

应用本课题组所编制的《飞机结构强度和寿命可靠性分析与设计软件》对有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命可靠性进行分析。软件界面如图 4 所示, 该软件

可以实现随机变量的 8 种分布类型: 正态分布、均匀分布、对数正态分布、指数分布、两参数威布尔分布、I 型极小分布、伽玛分布和瑞利分布; 软件包括了 7 种可靠性方法: 改进一次二阶矩法、蒙特卡罗法、重要抽样法、线抽样法、四阶矩法、一次响应面法和二次响应面法。软件也可以调用有限元软件( Ansys, Patran, Nastran, Marc, Abaqus 等), 实现复杂结构自动化可靠性分析。软件分析流程如下: 问题描述—定义极限状态方程—定义响应模型—变量映射—定义响应—确定性分析—

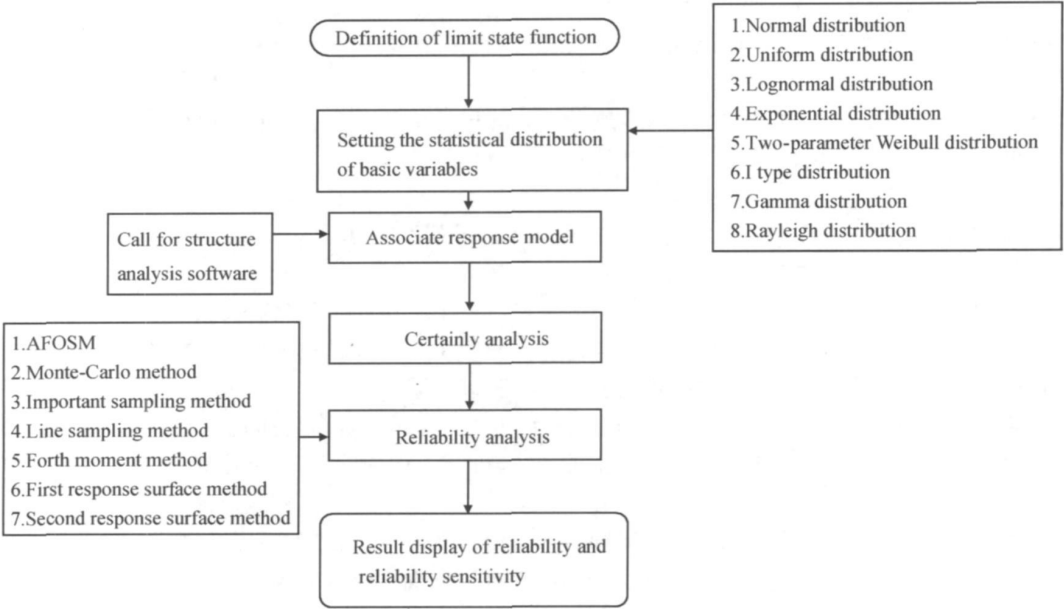


图 4 软件分析流程  
Fig. 4 Flow chart of the software

可靠性分析。

本工作基于有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命实验与有限元分析, 考虑影响结构疲劳寿命参数的随机性, 使用《飞机结构强度和寿命可靠性分析与设计软件》, 分别选取 Monte-Carlo 法和四阶矩法, 借助 Marc 有限元软件对有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命可靠性进行分析。

3.1 随机变量及其分布

影响有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的不确定因素主要有加工工艺、材料尺寸、胶层厚度、材料参数、胶接工艺以及疲劳载荷随机性等。本工作主要考虑材料参数以及疲劳幅值载荷的不确定性对有机玻璃边缘连接结构可靠性的影响。选取的随机变量及其分布特征如表 1 所示。

表 1 随机变量及其分布特性

Table 1 Random variables and distribution characters

Basic variables	Distribution form of basic variables	Mean value of Young's modulus/ MPa	Standard deviation of Young's modulus/ MPa <sup>1/2</sup>
MDYB-3(PMMA)(E <sub>1</sub> ) / MPa	Normal distribution	3140	112
Adhesives(E <sub>2</sub> ) / MPa	Normal distribution	50	5
Poly ester fiber(E <sub>3</sub> ) / MPa	Normal distribution	4800	96
Amplitude of loading(P) / N	Normal distribution	13.1	0.8

3.2 极限状态方程

基本随机向量  $x = [E_1, E_2, E_3, P]$  服从正态分布, 其中  $E_1, E_2, E_3$  分别为有机玻璃、胶黏剂和涤纶钢的弹性模量,  $P$  为疲劳载荷幅值, 其均值和标准差见表 1, 响应函数用  $f(x)$  表示, 是基本随机向量的函数。由疲劳寿命公式可知, 低周( 50000 次循环) 疲劳强度  $S_N = 47.2 \text{ MPa}$ 。因此, 选取功能函数为  $g(x) = S_N - f(x)$ , 极限状态方程为  $g(x) = 0$ 。

3.3 可靠性分析方法

目前已有的可靠性分析方法可以分为两类, 其一是基于近似解析法的可靠性分析方法, 这类方法中以改进的一次二阶矩方法为代表; 其二是基于数字模拟的可靠性分析方法, 这类方法以 Monte-Carlo 方法为代表<sup>[8]</sup>。一次二阶矩法的主要缺陷在于对极限状态方程的解析表达式有较强的依赖性。Monte-Carlo 数值模拟法适合于隐式极限状态方程, 但其显著的缺点是计算工作量太大。重要抽样作为 Monte-Carlo 法的改进方法, 将抽样中心移到设计点, 以抽样效率高且计算方差小而用于工程实际中<sup>[9]</sup>, 但对于小概率问题仍不太适合大型复杂结构的可靠性。许多学者提出了一种基于极限状态函数矩估计失效概率的计算方法, 该方法依据所研究问题的不同复杂程度, 分别可以采用极限状态函数的二阶矩、三阶矩和四阶矩来计算失效概率, 并给出了极限状态函数各阶矩的点估计方法。二阶矩和四阶矩法比较容易实现而且四阶矩方法的精度较高, 基于极限状态函数矩的失效概率计算方法不要求设计点, 因此它适用于隐式极限状态方程<sup>[10]</sup>。由于

它属于一种近似解析法, 所以计算工作量非常小。因此, 本工作采用 Monte-Carlo 法和四阶矩法来分析有机玻璃边缘连接结构的可靠性以及基本变量的灵敏度。

3.4 可靠性计算

本工作中的极限状态方程为隐式形式, 需要调用有限元来计算极限状态函数值, 因此对可靠性计算方法效率有要求。本工作分别选取 Monte-Carlo 法和四阶矩法计算疲劳寿命的随机响应。表 2、表 3 分别给出了利用 Monte-Carlo 法和四阶矩方法对结构进行可靠性灵敏度的计算结果。

采用 Monte-Carlo 法时, 对随机变量抽样 5000 次, 得到结构的失效概率  $P_f = 0.0234$ ; 采用四阶矩法得到结构的可靠性指标  $\beta = 1.972$ , 失效概率为  $P_f = 0.0242$ 。两种方法计算得到的寿命可靠度误差为 3.3%。对采用 Monte-Carlo 法得到的 5000 组功能函数值进行统计分析, 发现其分布形式服从正态分布如图 5 所示, 分别采用正态检验法、柯尔莫哥洛夫检验法以及矩检验方法, 取显著水平  $\alpha = 0.05$ , 对 5000 组数值是否服从正态分布进行假设检验, 三种检验结果均认为采用 Monte-Carlo 法得到的 5000 组功能函数值服从正态分布, 其均值  $\mu_{g(x)} = 4.965$ , 标准差  $\sigma_{g(x)} = 2.505$ , 失效概率  $P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = 0.0237$ ,

该方法与 Monte-Carlo 法直接得到的失效概率误差为 1.26%。采用 Monte-Carlo 法, 选取抽样样本为 5000 时, 计算时间需要 110h, 而采用四阶矩法计算仅需要 12h, 而两种方法的误差不大, 但四阶矩法的计算效率

表 2 Monte-Carlo 法参数灵敏度分析结果

Table 2 Result of basic parameters sensitivity analysis by Monte-Carlo method

Basic variable	Material parameter			Amplitude of loading( $P$ )/N
	MDYB-3 (PMMA)	Adhesives	Polyester fiber	
	( $E_1$ )/MPa	( $E_2$ )/MPa	( $E_3$ )/MPa	
Sensitivity of mean value of basic variable	$1.605 \times 10^{-5}$	$-4.667 \times 10^{-4}$	$-6.28 \times 10^{-6}$	$9.872 \times 10^{-2}$
Sensitivity of standard deviation	$-1.085 \times 10^{-7}$	$3.216 \times 10^{-5}$	$1.480 \times 10^{-5}$	$1.356 \times 10^{-1}$

表 3 四阶矩法参数灵敏度分析结果

Table 3 Result of basic parameters sensitivity analysis by forth moment method

Basic variable	Material parameter			Amplitude of loading( $P$ )/N
	MDYB-3(PMMA)	Adhesives	Polyester fiber	
	( $E_1$ )/MPa	( $E_2$ )/MPa	( $E_3$ )/MPa	
Sensitivity of mean value of basic variable	$4.028 \times 10^{-6}$	$-4.750 \times 10^{-5}$	$-1.7535 \times 10^{-6}$	$1.322 \times 10^{-1}$
Sensitivity of standard deviation	$-1.211 \times 10^{-7}$	$2.826 \times 10^{-6}$	$8.144 \times 10^{-4}$	$1.971 \times 10^{-1}$

明显提高, 并具有较高的计算精度。

3.5 灵敏度分析

为了得到影响有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的

最主要因素, 对随机变量进行灵敏度分析。从表 2、3 可以看出, 疲劳载荷是影响有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的最主要因素, 其次分别是胶黏剂的材料属性。

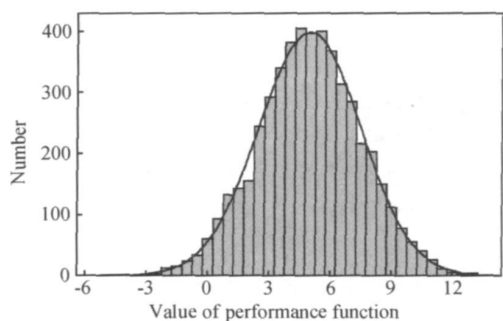


图 5 功能函数值分布

Fig. 5 Value distribution of performance function

通过灵敏度分析可以对影响寿命的主要随机变量进行控制, 为有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的概率设计工作提供依据。

## 4 结论

(1) 通过对有机玻璃边缘连接结构进行疲劳寿命实验以及有限元应力分析, 确定有机玻璃边缘连接结构疲劳断裂危险位置, 以及得到危险区域应力与疲劳寿命公式。

(2) 利用 Monte Carlo 和四阶矩法计算有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的随机响应, 四阶矩法计算时间明显缩短。两种方法计算得到的寿命可靠度误差为 3.3%。可以认为, 四阶矩法具有较高计算效率和计算精度。

(3) 对采用 Monte Carlo 法得到的 5000 组功能函数值进行统计分析, 发现其服从正态分布。

(4) 对影响有机玻璃边缘连接结构疲劳寿命的主要因素进行灵敏度分析, 发现疲劳载荷和胶黏剂的材

料参数为影响结构疲劳寿命的主要因素。

## 参考文献

- [1] 张志林. 飞机座舱透明件设计理论及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学博士学位论文, 2005.
- [2] 朱鸣皋. 飞机透明件边缘连接设计及其应用[J]. 飞机设计, 1989, (2): 21-29.
- [3] 李亚智. 飞机结构疲劳与断裂分析中若干问题的研究[D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 2001.
- [4] 罗成利, 姚卫星. 有机玻璃结构疲劳寿命预测的损伤力学方法[J]. 机械强度, 2004, 26: 87-88.
- [5] RUI MIRANDA GUEDES. Lifetime predictions of polymer matrix composites under constant or monotonic load[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(5): 703-715.
- [6] GAO Z Z, YUE Z F. Fatigue failure of polyethylene methacrylate in adhesive assembly under unsymmetrical bending[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2007, 48(1): 89-96.
- [7] 高宗战, 刘伟, 岳珠峰, 等. 有机玻璃边缘连接元件疲劳性能实验研究[J]. 材料工程, 2007, (11): 7-10.
- [8] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [9] 袁修开, 吕震宙, 万越. 基于混合密度估计的自适应重要抽样可靠性及可靠性灵敏度分析[J]. 机械强度, 2008, 30(4): 590-595.
- [10] 宋军, 吕震宙. 可靠性灵敏度分析的一种新方法[J]. 航空学报, 2006, 27(5): 823-826.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775183); 博士点基金资助项目(N6CJ0001); 高等学校学科创新引智计划项目(B07050)

收稿日期: 2009-05-22; 修订日期: 2010-02-20

作者简介: 高宗战(1979—), 男, 讲师, 主要从事结构疲劳可靠性方面的研究, 联系地址: 西安市西北工业大学长安校区 883 信箱(710129), E-mail: gzz@nwpu.edu.cn

(上接第 19 页)

- [8] HSUEH C L, PENG Y J, WANG C C, et al. Bipolar membrane prepared by grafting and plasma polymerization[J]. J Memb Sci, 2003, 219: 1-13.
- [9] JOKELA K. Temperature-dependent X-ray scattering studies on radiation grafted and sulfonated poly(vinylidene fluoride)[J]. Mater Sci Forum, 2000, 321: 90-97.
- [10] 刘平生, 李利, 周宁琳, 等. 蒙脱土/聚丙烯酸高吸水性树脂的合成[J]. 复合材料学报, 2006, 23(3): 44-48.
- [11] BREWIS D M, MATHIESON I, CAYLESS R A, et al. Pre-treatment of poly(vinylidene fluoride) with potassium hydroxide[J]. Int J Adhes, 1996, 16: 87-95.
- [12] ROSS G J, WATTS J F, HILL M P, et al. Surface modification of poly(vinylidene fluoride) by alkaline treatment[J]. Polymer, 2000, 41: 1685-1696.
- [13] 索进平, 崔昆, 肖建中, 等. 新型以无机物为主的免增湿复合质

子交换膜[J]. 复合材料学报, 2004, 21(1): 23-27.

- [14] KREUER K D, PADDISON S J, SPOHR E, et al. Transport in proton conductors for fuel cell applications: simulations, elementary reactions, and phenomenology[J]. Chem Rev, 2004, 104: 4637-4678.

基金项目: 内蒙古自治区攻关计划项目(20081505); 内蒙古自治区自然科学基金项目(20080404MS0216); 内蒙古科技大学创新基金项目(2009NC022)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2010-03-15

作者简介: 郭贵宝(1970—), 男, 博士研究生, 从事燃料电池和传感器方面研究工作, 联系地址: 内蒙古包头市阿尔丁大街 7 号, 内蒙古科技大学化学与化工学院(014010), E-mail: guogb@imust.cn

通讯作者: 安胜利, 联系地址: 内蒙古包头市阿尔丁大街 7 号, 内蒙古科技大学(014010), E-mail: shengli\_an@126.com