

材料适用性评价模型构建研究

Construction of Model Evaluating Material Adaptability

郭启雯, 才鸿年, 王富耻, 张洪梅
(北京理工大学 材料学院, 北京 100081)
GUO Qi-wen, CAI Hong-nian, WANG Fu-chi, ZHANG Hong-mei
(School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of
Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 在初步建立材料适用性评价指标体系的基础上, 组织材料研究与应用方面的资深专家, 采用层次分析法对评价指标体系的合理性、评价因子的相对重要性(权重)等开展了评价。通过对专家评价结果的计算分析, 确定了指标体系各级评价因子的权重, 构建了材料适用性评价模型, 确定了材料适用性评价的具体操作方法。通过实证案例分析, 该评价模型能够比较客观、真实地概括材料适用性的主要特征, 具有可操作性, 评价结果与实际情况吻合。

关键词: 材料; 适用性; 评价模型

中图分类号: TH 140 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)01-0011-06

Abstract: Based on the construction of the evaluation indicator system for material adaptability, experienced experts were invited to evaluate the rationality of the evaluation indicator system and the relative importance(*i. e.* weight) of the evaluation factors using hierarchy analysis method. By computing and analyzing the experts' evaluation results, all levels of the evaluation factors for the evaluation indicator system and the specific evaluation method for the material adaptability were decided. At the same time, the evaluation model for material adaptability was constructed. Several examples are shown that the evaluation model can factually generalize the most characters of the material adaptability and be exercisable. The evaluated results accord with the practical process.

Key words: material; adaptability; evaluating model

材料在装备上的适用性评价, 实质上是针对材料应用的技术成熟性和在装备上的使用合理性进行科学评价^[1], 对于有依据地科学选材、推广应用具有共性应用价值的先进材料和提高新材料研制的效费比具有重要意义。由于材料在服役环境下其行为受多种因素的综合影响, 长期以来, 对材料的适用性评价一直是一项较为困难和复杂的工作。随着材料技术与应用数学、计算机等相关技术的发展与结合, 近年来已有一些科研人员在选材的评价方面开展了探索研究, 取得了一些宝贵经验^[2-7]。

本项目在初步建立材料适用性评价指标体系的基础上, 组织材料研究与应用方面的资深专家, 采用层次分析法对评价指标体系的合理性、评价因子的相对重要性(权重)以及赋值方法的合理性开展了评价。通过对专家评价结果的计算分析, 确定了指标体系各级评价因子的权重, 构建了材料适用性评价模型。通过实证案例评价与结果分析, 该评价模型能够客观、真实地概括材料适用性的主要特征, 具有科学性和可操作性,

评价结果与实际情况吻合。

1 材料适用性评价指标体系的合理性评价

1.1 材料适用性评价指标体系

材料是装备实现功能的基础与载体, 在确立材料适用性评价指标体系时, 依照满足应用需求、性能稳定可靠、持续稳定供货、经济可承受和具备环境友好性等条件, 对所有相关因素按照建立评价指标体系的原则进行了分析、筛选与合并, 并按照隶属关系初步建立了具有有序递阶层次结构的评价指标体系^[1](图 1)。

显然材料适用性评价指标体系是一个多目标、多指标的综合体系, 由 3 层结构构成: 第 1 层为目标层; 第 2 层为主因素层, 包括性能适用性、技术成熟性、能力保障性和经济可承受性等 4 项对材料适用性具有重要影响的主要因素; 第 3 层为指标因子层, 是评价的具体内容。

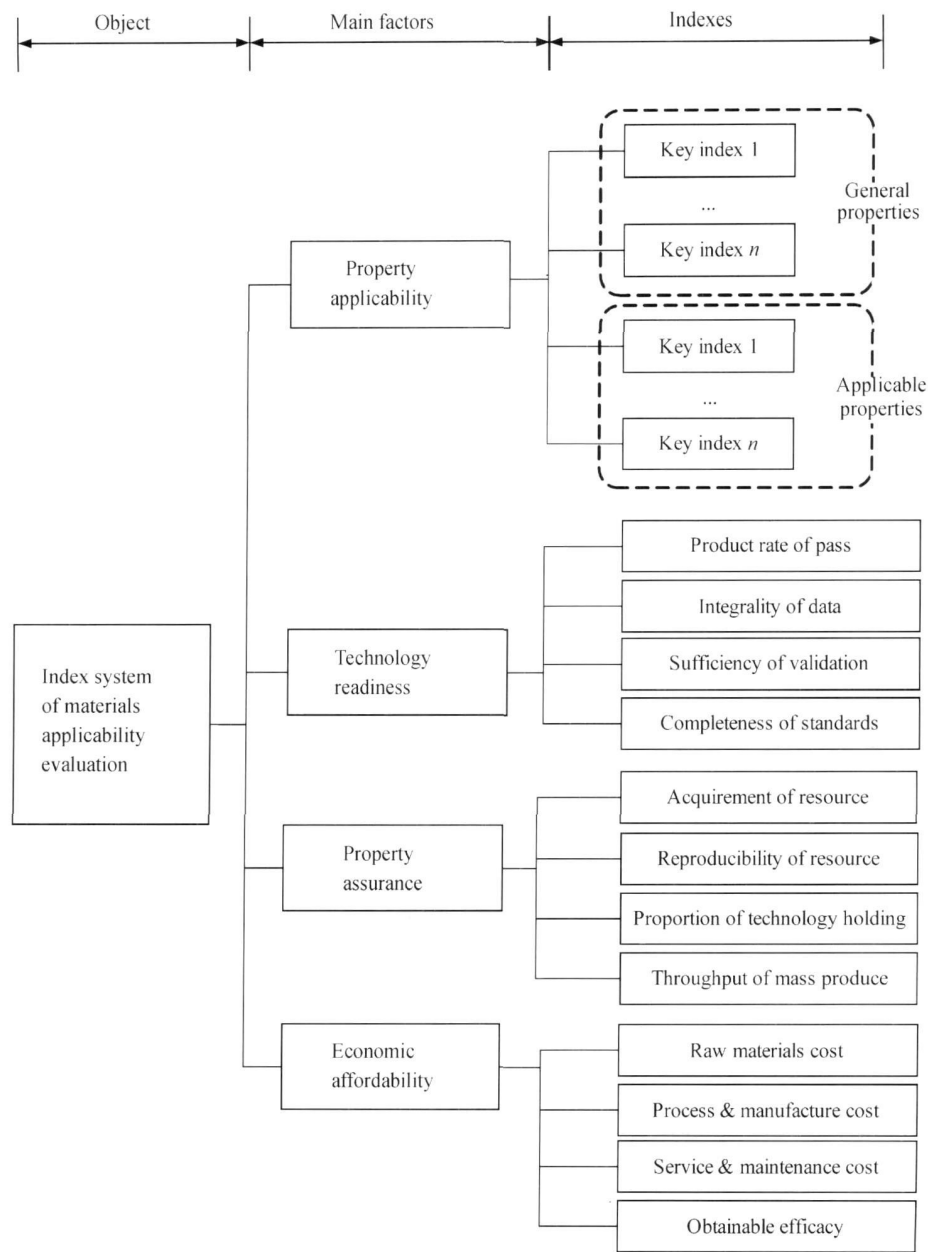


图 1 材料适用性评价指标体系

Fig. 1 The evaluation indicator system for material adaptability

1.2 指标体系合理性专家评价

为确定该指标体系的合理性、科学性与有效性,课题组邀请了资深专家对指标体系选择的主因素与各项指标进行了合理性评价。

1.2.1 专家组成

参与评价的专家由两类专家组成,一类是材料应用方面的专家,主要是负责装备总体设计与选材的总工程师,他们既了解装备对材料的应用需求,同时熟悉和掌握材料的发展与使用情况;另一类是多年从事研究的材料技术专家,具有深厚的专业技术领域知识,对整个材料技术领域的发展与应用情况有全面和深入的

了解。所有这些专家都具有 20 年以上的工作经历和丰富的实践经验,具有研究员或教授等正高级技术职称,专业面覆盖了结构材料、结构/功能一体化材料、功能材料(含信息材料)等主要技术领域,是公认的资深专家。利用这些专家的知识与经验,对材料适用性评价指标体系进行合理性评价,其评价结果具备权威性。

1.2.2 专家评价结果

对材料适用性评价指标体系的合理性进行评价,主要围绕对主要影响因素与指标因子选择的合理性开展评价,评价内容与评价标准见表 1。

表 1 评价内容与评价标准

Table 1 The content and rules of the evaluation

Evaluation content	Evaluation rule	Explanation
Importance	High	A great effect on the material adaptability
	Middle	A general effect on the material adaptability
	Low	A minor effect on the material adaptability
Efficiency	High	Obtainable, typical practical significance
	Middle	Basically obtainable, generally practical significance
	Low	Difficult to obtain, unobvious practical significance
Comparability	High	Quantifiable or quantitative index, good comparability
	Middle	Basically quantifiable, general comparability
	Low	Difficult to quantify or compare

Remark: When it is evaluating, the result only is one of “high, middle and low”. If two items are selected, the lowest level is effective.

对专家的评价进行统计与分析, 其结果为所有主因素和绝大部分的指标因子选择均被评价为合理或比较合理, 但指标因子中“使用维修成本”的评价为“中”, 通过分析认为该项指标因子确实是一项比较难于获得和量化的数据, 因此遵照专家意见在指标体系中剔除了这项指标因子。还有一些主因素和指标因子的“可比性”评价等级为“中”, 说明了在适用性评价中, 这些主因素以及指标因子的定量评价比较困难。因此, 对指标因子特别是一些定性评价的指标因子的量化赋值方法开展了专门研究, 对其合理性也进行了专家评价, 得到了认可。

2 指标体系主因素与指标因子的相对重要性(权重)评价

体系的选择之外, 还要对每个主因素项以及各指标因子的重要程度进行辨识, 确定其权重。评价模型中权重是非常关键的参数, 对评价结果起着至关重要的作用, 不同的权重会得到不同的评价结果^[6, 7]。确定权重的方法一般有专家调查(德尔菲)法、层次分析法、熵值法、模糊聚类分析法等, 由于本项研究缺少完整的样本数据, 特别是含有较多的定性指标, 因此比较适合采用定性分析与定量分析相结合的层次分析法^[8]。

层次分析法是按照指标体系的层次结构, 把多层次多指标的权重赋值简化为各指标项重要性的两两比较, 然后通过数学处理得到权重系数。在本项研究中, 首先按照指标体系的层次结构和隶属关系分别构建主因素和相关指标因子的判断矩阵, 请专家对判断矩阵中各主因素或指标因子的重要性程度进行两两比较, 采用 1~ 9 标度法(表 2)进行量化, 构成比较判断矩阵

$C = (C_{ij})_{n \times n}$ 。

对材料适用性评价结果具有重要影响的除了指标

表 2 1~ 9 标度法

Table 2 1-9 scaling method

Value of scale c_{ij}	Meaning
1	The same importance of two factors
3	The former factor A is slightly important than the latter B.
5	The former factor A is obviously important than the latter B.
7	The former factor A is particular important than the latter B.
9	The former factor A is vitally important than the latter B.
2, 4, 6, 8	The middle between above two adjacent values.
Reciprocal	If the ratio of the importance of the factor a_i to b_j is c_{ij} , the ratio of the importance of the factor b_i to a_i is $c_{ji} = 1/c_{ij}$.

2.1 主因素判断矩阵

后, 得到主因素重要性判断矩阵 $C_{\text{主因素}} = (c_{\bar{j}})_{4 \times 4}$ (表 3)。

由专家对主因素的重要性程度进行两两比较

表 3 主因素重要性判断矩阵

Table 3 The judgment matrix of the importance of the main factors

a_i	b_j			
	Property adaptability	Technology readiness	Property assurance	Economic affordability
Property adaptability	1	c_{12}	c_{13}	c_{14}
Technology readiness	c_{21}	1	c_{23}	c_{24}
Property assurance	c_{31}	c_{32}	1	c_{34}
Economic affordability	c_{41}	c_{42}	c_{43}	1

2.2 指标因子判断矩阵

由专家对隶属于同一主因素的指标因子的重要性程度进行两两比较, 构建指标因子判断矩阵。性能适用性指标因子判断矩阵 $C_{\text{性能指标因子}} = (c_{ij})_{2 \times 2}$, 如表 4 所示; 技术成熟性指标因子判断矩阵 $C_{\text{成熟性指标因子}} = (c_{ij})_{4 \times 4}$, 如表 5 所示; 能力保障性指标因子判断矩阵 $C_{\text{保障性指标因子}} = (c_{ij})_{4 \times 4}$, 如表 6 所示; 经济可承受性指标因子判断矩阵 $C_{\text{经济性指标因子}} = (c_{ij})_{3 \times 3}$, 如表 7 所示。

表 4 性能适用性指标因子判断矩阵

Table 4 The judgment matrix of the material adaptability index factors

a_i	b_i	
	Key general	Key applicable
	property	property
Key general property	1	c_{12}
Key applicable property	c_{21}	1

表 5 技术成熟性指标因子判断矩阵

Table 5 The judgment matrix of the technology readiness index factors

a_i	b_i			
	Product rate of pass	Integrity of data	Sufficiency of validation	Completeness of standards
Product rate of pass	1	c_{12}	c_{13}	c_{14}
Integrity of data	c_{21}	1	c_{23}	c_{24}
Sufficiency of validation	c_{31}	c_{32}	1	c_{34}
Completeness of standards	c_{41}	c_{42}	c_{43}	1

表 6 能力保障性指标因子判断矩阵

Table 6 The judgment matrix of the materials property assurance index factors

a_i	b_i			
	Acquirement of resource	Reproducibility of resource	Proportion of technology holding	Throughput of mass produce
Acquirement of resource	1	c_{12}	c_{13}	c_{14}
Reproducibility of resource	c_{21}	1	c_{23}	c_{24}
Proportion of technology holding	c_{31}	c_{32}	1	c_{34}
Throughput of mass produce	c_{41}	c_{42}	c_{43}	1

表 7 经济可承受性指标因子判断矩阵

Table 7 The judgment matrix of materials economic affordability index factors

a_i	b_i		
	Raw materials cost	Process & manufacture cost	Obtainable efficacy
Raw materials cost	1	c_{12}	c_{13}
Process & manufacture cost	c_{21}	1	c_{23}
Obtainable efficacy	c_{31}	c_{32}	1

因此本项研究中采用了根法。

$$w_i = \frac{\left[\prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left[\prod_{j=1}^n a_{kj} \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

(2) 判断矩阵的一致性检验: 由步骤(1)计算得出的特征向量是否为合理的权重分配, 需要对判断矩阵进行一致性检验。分别对每个专家确定的各判断矩阵进行一致性检验, 若通过检验, 则进入到步骤(3), 否则终止。按照层次分析法提出的一致性检验方法, 认为当判断矩阵的随机一致性比率 $CR < 0.1$ 时具有满意的一致性, 即权重的分配合理。一致性检验的公式为

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

式中: CI 为判断矩阵的一般一致性指标; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标, 其具体值参见表 8。

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为判断矩阵的阶数。

3 确定各级评价指标体系权重

共有 17 位专家参加了主因素与指标因子重要程度的比较评价, 经研究采用下述步骤计算并确定各级评价指标体系的权重。

(1) 计算特征向量 w_i : 分别计算各位专家确定的主因素和各指标因子判断矩阵的特征向量 w_i 。常用计算特征向量的方法有和法、根法(几何平均法)、特征根法、对数最小二乘法等, 各种计算方法的结果不完全一样, 但比较接近, 而和法和根法的计算相对比较简单^[9],

表 8 平均随机一致性指标^[10]

Table 8 The mean random consistency index^[10]

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

(3) 计算各判断矩阵的权重向量 W : 对通过一致性检验的各专家的主因素和指标因子的特征向量即权重系数分别进行加和求平均, 以确定最终各判断矩阵的权重向量 W 。

$$W = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n) \tag{4}$$

其中 $w'_i = \frac{1}{n} \sum w_i$ (5)

(4) 计算指标体系的综合权重: 为了在评价过程中简化计算, 采用综合权重的方法, 将主因素对相关指标因子的影响体现在指标因子的权重上。设综合权重为 W_k , 主因素权重为 W_m , 相关指标因子权重为 W_n ,

$$W_k = W_m \times W_n \tag{6}$$

按照步骤(1)~(4) 计算各级指标的权重及综合权重, 计算结果见图 2。

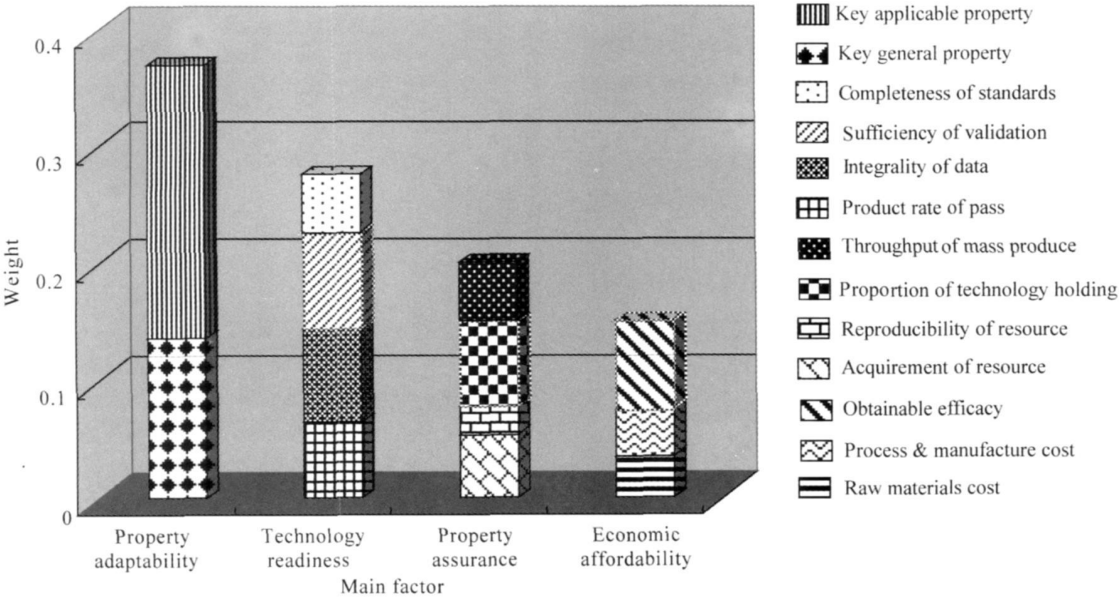


图 2 综合权重

Fig. 2 The synthesized weight

4 构建材料适用性评价模型

4.1 适用性评价模型

主因素权重令指标因子集为 $R = (r_1, r_2, \dots, r_{13})$, 综合权重集为 $W = (W_1, W_2, \dots, W_{13})$, 构建的材料适用性评价模型为

$$A = W^T \times R \tag{7}$$

这一模型既可作为单个材料的适用性评价, 亦可作为选材评价。若有 n 种候选材料需进行综合评价, 其评价集 $R = (r_{ij})_{n \times 13}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 13$ 。当作为单个材料的适用性评价时, R 为行矩阵, 可简化为

$$A = \sum_{j=1}^{13} W_j \times r_j \tag{8}$$

4.2 指标因子赋值标准

赋值标准是对指标的具体赋值方法进行的规范, 主要包括指标因子的物理意义、赋值方法、取值范围等。在进行材料适用性评价时, 指标因子的赋值由专家或用户完成, 因此赋值标准是使不同专家或对不同材料的指标因子进行的赋值和评价的结果具有可比性的重要保证。本项目研究对各项指标因子的具体物理意义和赋值标准以及对应的赋值等级等进行了详细的规定, 并请专家对其合理性进行了评价, 指标因子的赋值标准得到了专家认可。

4.3 指标因子初始化处理

由于指标因子具有多样性以及相互间的不可公度性, 需要在进行综合评价之前将各指标因子进行初始化处理, 转化为标准化的数值, 以便于进行综合评价与比较。指标因子的初始化处理主要包括指标的正向化

处理与无量纲化(归一化)处理。

5 适用性评价模型与评价方法测试

为验证材料适用性评价模型与评价方法的正确性、合理性,首先确定了验证测试方案,明确了以下方面:(1)测试的应用对象为已经完成生产定型即材料已经确定的装备部件,凭借已有的研究成果可以判断该部件材料方案的合理性,便于比对评价结果的正确性;(2)邀请相关装备部件研究的业内材料专家参与评价,充分利用业内专家的实际经验;(3)选择相应的待评价材料,设每一个应用对象为一组,每组根据专家经验选择出适用、比较适用和基本不适用的材料各若干种参与评价;(4)确定测试步骤并实施;(5)与业内专家共同分析评价结果,并与经验结果进行对比,提出对评价模型与评价方法的测试结论。

根据验证测试方案,选择了针对某种装备的 3 个典型部件的选材开展验证性测试。首先由业内专家分别针对 3 个典型部件确定备选材料(部件 1 为 7 个材料、部件 2 为 5 个材料、部件 3 为 3 个材料),按照材料适用性评价模型分别进行评价。经过 3 组典型部件选材方案的评价测试,得到的评价结果经与业内专家讨论,与真实情况吻合,初步证明了本项研究的结果,即材料适用性评价方法具有可行性、可操作性和评价结果直观明确的特点。

材料适用性评价是一项系统工程,由于这方面的研究开展时间短,用于验证测试的数据样本不够丰富,积累的数据少,还处于起步与探索阶段,因此迫切需要深入实践,广泛积累数据和经验,优化模型,确立和完善标准,提高评价的科学性与准确度。

6 结论

(1)材料适用性评价方法综合考虑了材料性能适

用性、技术成熟性、能力保障性和经济可承受性各主要因素的影响,通过权重比较合理地体现了各主要因素的贡献,是对材料比较全面的综合性评价,符合选材的客观要求。

(2)采用材料适用性评价方法可以得到量化直观的评价结果,实现了对性能相近或各有优势的选材方案的合理性评价与甄别,减少了凭经验人为选择最佳方案时的主观性。

参考文献

- [1] 郭启雯,才鸿年,王富耻,等.材料适用性评价指标体系构建研究[J].材料工程,2009,(9):9-12.
- [2] 曹杰,赵立权.绿色材料评价体系与方法的研究[J].华东船舶工业学院学报:自然科学版,2003,17(6):63-66.
- [3] 张良,刘光复,刘志峰.面向绿色设计的客户驱动型二级材料选择方法[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2006,29(2):209-212.
- [4] 刘书华.材料选择的模糊综合评判[J].机械工艺师,2000,(4):9-10.
- [5] 陈超.机械零件材料选择的模糊评价体系[J].机械设计,2001,(11):47-49.
- [6] 张天云,杨瑞成,陈奎.基于层次分析法确定工程材料评价指标的权重[J].兰州理工大学学报,2007,33(2):17-19.
- [7] 张天云,杨瑞成,任国军,等.基于相关系数的工程材料评价指标定量分析[J].机械工程材料,2009,33(4):97-100.
- [8] 王靖,张金锁.综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J].河北工业大学学报,2001,30(2):52-57.
- [9] 高尚.三种计算层次分析法中权值的方法[J].科学技术与工程,2007,7(20):5204-5207.
- [10] 王舒迟.材料适用性评价方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

收稿日期:2010-06-03;修订日期:2010-10-29

作者简介:郭启雯(1956—),女,副研究员,材料加工专业,联系地址:北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学材料学院(100081),E-mail:bitmsc@bit.edu.cn

(上接第10页)

2008, 266(12-13): 2953-2957.

- [12] HALLIBURTON L E, GILES N C, GARCES N Y, et al. Production of native donors in ZnO by annealing at high temperature in Zn vapor[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(17): 172108-172111.
- [13] SELIM F A, WEBER M H, SOLODOVNIKOV D, et al. Nature of native defects in ZnO[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(8): 85502-85504.
- [14] LUNSFORD J H, JAYNE J P. Electron paramagnetic resonance of oxygen on ZnO and ultraviolet-irradiated MgO[J]. The Jour-

nal of Chemical Physics, 1966, 44(4): 1487-1492.

基金项目:国家自然科学基金项目(50502006);北京市科技新星计划资助项目(2008A029);北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室和北京市教委共建项目(SYS100080419)

收稿日期:2010-01-05;修订日期:2010-11-18

作者简介:王旭东(1974—),男,工学博士,副教授,主要从事空间材料的辐照损伤和腐蚀与防护研究,联系地址:北京市海淀区学院路30号北京科技大学腐蚀与防护中心(100083),E-mail:xdwang@ustb.edu.cn