

# 工程选材组合评价模式的研究及其应用\*

张天云<sup>1,2</sup>, 刘涛<sup>1</sup>, 康玉虎<sup>1</sup>

(1 兰州城市学院信息网络中心, 兰州 730070; 2 兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

**摘要** 在分析加权平均法、模糊综合评价法、TOPSIS法和灰色关联度评价法各自优缺点的基础之上, 针对单一评价方法的不足, 运用序号总和理论与众数理论, 结合上述4种多指标评价方法, 建立工程选材组合评价模式。以低温存储罐材料的选择为例, 从功能性和经济性角度出发, 选择了8种评价指标, 由层次分析法得到10种候选材料的评价指标的权重, 运用上述组合评价模式进行组合评价。结果表明, 全硬态301型不锈钢是最佳的低温存储罐材料, 与客观实际相符, 且组合评价模式所得排序结果优于单一评价方法。在工程设计中使用组合评价模式进行选材评价, 有助于弥补单一评价法的缺陷, 是工程选材决策的有力工具。

**关键词** 工程材料 组合评价 材料选择

中图分类号: TB3

文献标识码: A

## Research and Application of Combined Assessment Model for Engineering Materials Selection

ZHANG Tianyun<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, KANG Yuhu<sup>1</sup>

(1 Center of Information and Network, City University of Lanzhou, Lanzhou 730070;

2 State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

**Abstract** On the base of analyzing the advantage and disadvantage of weighted average, fuzzy assessment, TOPSIS and grey assessment, aimed for the deficiency of single assessment method, combined assessment model (CAM) is established by combining four kinds of multi-objective methods mentioned above with the theory of serial number summation and mode theory. Taking the choice of storage pot material under low temperature working condition as an example, 10 kinds of candidate materials, selected based on functionality and economic, whose weight set of 8 kinds of assessment indexes obtained by analytic hierarchy process, are evaluated by using CAM. The results show that the 301 stainless steel is the best storage pot material under low temperature working condition, which is in accordance with the actuality, and conclusion obtained from CAM excels any result of single method. CAM contributes to atonement for the deficiency of single assessment method in engineering design. It is a powerful tool for making decision in engineering materials selection.

**Key words** engineering materials, combined assessment, materials selection

## 0 引言

材料的选择是工程设计的先导, 极大地影响着产品的设计、制造、成本、质量和寿命。在选材过程中, 由于可用材料众多、且涉及因素复杂, 因而难以进行最佳选择<sup>[1,2]</sup>。大量统计数据表明, 材料及其产品生产是导致能源短缺、资源过度消耗乃至枯竭和环境污染的主要原因之一。通过综合评述, 对不同的候选材料做出整体评价和排序, 得到最佳材料, 对优化资源配置、降低能耗、节约成本且提高效益具有重要意义。

目前, 加权平均法<sup>[3-5]</sup>、模糊综合评价<sup>[6-8]</sup>、TOPSIS法<sup>[9-12]</sup>和灰色关联度法<sup>[13-17]</sup>是工程、经济、社会和管理等众

多领域中应用广泛且有效的多指标评价方法。本文在研究它们各自优缺点的基础之上, 针对单一评价方法所得结果在一定程度上存在片面性的不足, 基于序号和理论及众数理论, 组合各单一方法所得评价结果, 建立了工程选材组合评价模式, 并以低温存储罐材料的选择为例, 研究了其在工程设计选材中的适用性。

## 1 评价方法简介

### 1.1 加权平均法

加权平均法是最常见的方法, 其计算简单、应用广泛<sup>[4]</sup>。在测定材料各评价指标的基础上, 给出对应权重, 然后用加

\* 甘肃省教育厅科研项目基金(0511-04); 甘肃省自然科学基金项目(ZS022-A25-030)

张天云, 男, 1968年生, 副教授, 博士 Tel: 0931-3032060 E-mail: Lzyyun@lztu.edu.cn

权平均值来综合<sup>[5]</sup>,得出被评对象的评价值。该方法适用于被评对象的评价指标是比例型,其比值不会因单位的选择不同而改变。

## 1.2 模糊综合评价

模糊综合评价是利用模糊数学论进行评价的一种方法<sup>[6]</sup>,又称多元决策分析,是许多学科领域经常涉及的问题。模糊数学理论通过隶属函数<sup>[7]</sup>模拟人的思维推理过程,充分利用人脑对模糊现象能够做出正确判断的优点,使定性化的因素向量化逼近,通过划分各评价等级,对各指标的归属程度做出分析。因此,模糊综合评价对复杂事物的描述更加深入和客观,所得结果比较科学。此法在某种程度上弥补了经典数学与统计数学的不足,在定性定量之间架起了联系的桥梁。

## 1.3 TOPSIS 法

TOPSIS 法也称逼近于理想解的排序方法,是多指标决策的一种有效方法<sup>[9]</sup>。其基本思想是<sup>[10]</sup>:确定初始化后的原始数据矩阵的理想解和负理想解(也称最佳方案和最劣方案),然后综合考虑各候选方案与理想解和负理想解之间的距离(通常采用欧氏距离)关系,通过计算距离相对接近度,得出各候选方案与理想解的接近程度,并以此作为评价各候选方案优劣的依据。

## 1.4 灰色关联度法

作为多指标决策的一种有效方法,灰色关联度法<sup>[13]</sup>能很好地分析数据曲线态势变化,是曲线形状相似性的衡量尺度。各备选方案与理想解的灰色关联度越大,可认为该方案越接近理想解,并以此作为评价各备选方案优劣的依据<sup>[14]</sup>。

上述4种方法尽管应用广泛,但各有不足。加权平均法虽然计算简单,方法应用过程中的解释较为直观,但受人为因素的干扰较大,评价效果与评价实施者对被评对象了解的深入程度,以及对方法运用细节把握的好坏有关;模糊综合评价不可避免地带有主观方面因素,甚至带有一些偏见,这会影响评价的结果,且隶属函数难以确定;TOPSIS 法与灰色关联度法分别从数据曲线的位置关系和形状相似性方面判断候选方案同理想解的接近程度,评价结果不够全面、客观<sup>[18]</sup>。

以上分析可知,4种方法都是从不同的角度进行评价,任何一种评价方法与特定评价对象之间都存在着适用程度的差异。因此,单一方法所得评价结论在一定程度上存在着片面性,而且确实存在对同一事物的评价可能因评价实施者、评价方法的不同而得出明显相异的结论。解决这一问题的方法之一就是进行组合评价,即对各种方法所得出的评价结果进行综合(组合)得到最终结果,作为决策依据。

## 2 工程选材组合评价模式的建立

工程选材时,以性能的硬要求<sup>[19]</sup>为准则筛选材料后,可得到一组候选材料。综合评价就是从这组候选材料中做出最佳选择,并给出其余材料的排序。设对  $n$  种经过初选后的候选材料(即候选方案)进行综合评价,每种材料有  $p$  个评价指标(性能),原始数据构成如下数据矩阵:

$$X' = (x'_{ij})_{n \times p}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$$

组合评价模式的建立需经过以下几个步骤。

### 2.1 初始化处理

#### 2.1.1 指标正向化

如果  $p$  个指标中有逆指标(即数值越小越好)或适度指标(即某个值最好),则将逆指标取倒数,转化为正指标(即数值越大越好);对于适度指标,设最合适值为  $\alpha$ ,则用式(1)将其转化为正指标。

$$x_{ij} = \frac{1}{|\alpha - x'_{ij}|}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

转化后的数据矩阵  $X$  为:

$$X = (x_{ij})_{n \times p}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$$

#### 2.1.2 无量纲化

用每个指标数值除以相应指标的最大值进行无量纲化,得到数据矩阵  $Y'$  为:

$$Y' = (y'_{ij})_{n \times p}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$$

#### 2.1.3 构造加权数据矩阵

设已确定各指标权重为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$ ,根据式(2)得到加权数据矩阵  $Y = (y_{ij})_{n \times p}$ 。

$$y_{ij} = \omega_j y'_{ij}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

### 2.2 综合评价模型的建立

#### 2.2.1 加权平均模型

由式(3)得到  $n$  种候选材料的分值,即  $d_i$ ,并以此作为排序的根据,分值越高,材料越优。

$$d_i = \sum_{j=1}^p y'_{ij} \omega_j$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

#### 2.2.2 模糊综合评价模型

(1)由上述  $p$  个评价指标,确定评价指标集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}$ ;

(2)立评判集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ,即评价指标适应程度的集合;

(3)确定评价指标权重集  $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p\}$ ;

(4)单指标评价,即相对于评价指标  $u_i$  分别求出对评判集中  $v_j$  的隶属度  $r_{ij}$ ,并建立模糊矩阵  $R$ ;

(5)综合评判,模型为  $B = \omega R$ 。其中  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ ,是模糊综合评价结果向量,它是  $V$  上的一个模糊子集。 $\omega$  为模糊合成算子, $b_i$  表示候选材料对评判集中  $v_i$  的隶属程度;

(6)模糊向量单值化,对各评判等级赋以分值,然后用  $B$  中对应的隶属度将分值加权平均,即单值化,并依此对候选材料进行排序,分值越高,材料越优。

#### 2.2.3 TOPSIS 评价模型

(1)确定理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$

由于指标已正向化,可用候选材料中各指标的最大值构成  $Y^+$ (理想材料),各指标的最小值构成  $Y^-$ (负理想材料)。

$$Y^+ = (y_{01}^+, y_{02}^+, \dots, y_{0p}^+)^T$$

$$Y^- = (y_{01}^-, y_{02}^-, \dots, y_{0p}^-)^T$$

其中:  $y_{0j}^+ = \max\{y_{ij}\}, j=1, 2, \dots, p; y_{0j}^- = \min\{y_{ij}\}, j=1, 2, \dots, p$ 。

(2)计算欧氏距离  $D_i^+$  和  $D_i^-$

根据式(4)计算第  $i$  种候选材料到理想解与负理想解的欧氏距离  $D_i^+, D_i^-$ 。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^p (y_{ij} - y_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^p (y_{ij} - y_j^-)^2}$$

$i=1, 2, \dots, n$  (4)

$D_i^+$  越小,表明第  $i$  种候选材料在位置上距理想解越近,  
 $D_i^-$  越小,表明第  $i$  种候选材料在位置上距理想解越远。

(3)计算相对接近度

根据式(5)计算第  $i$  种候选材料与理想解的相对接近度,并以此对候选材料排序,分值越高,材料越优。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

$i=1, 2, \dots, n$  (5)

### 2.2.4 灰色关联度评价模型

(1)理想解  $Y^+$  的确定与 TOPSIS 评价模型一致

(2)计算关联度

根据式(6)计算各候选材料的关联度。

$$R_i = \frac{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \frac{\min_{1 \leq i \leq n} |y_{ij} - y_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} |y_{ij} - y_{0j}|}{|y_{ij} - y_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} |y_{ij} - y_{0j}|}}{1}$$

(6)

式中:  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p; \rho$  为分辨系数,在  $(0, 1)$  内取值,一般取 0.4。  $R_i$  越大,表明第  $i$  种候选材料在曲线形状上与理想解越接近,并以此对候选材料排序,同样,分值越

高,材料越优。

### 2.3 组合评价模式的实现

运用序号和理论对评价结果进行组合,即将上述 4 种评价方法得到的排序结果相加,得到序号总和,以此作为候选材料排序的依据。若出现序号总和值相同的位序,则运用众数理论,即根据各位序的频数分布情况决定其先后顺序关系,得到  $n$  种候选材料的最终评价结果。

### 3 应用

以低温存贮罐材料的选择为例,研究上述组合评价模型在工程材料选材中的应用。

存储罐的工作温度为 77K, 10 种候选低温材料的牌号和性能如表 1<sup>[19]</sup> 所示。它们遍及铝合金、不锈钢、钛合金、超合金、聚合物和铜合金。铝合金具有比强度高、容易加工、成本低等综合性能,因而在致冷装置结构上已经大量采用;铜及其合金属于用作深冷装置结构的最佳金属,在低温下它们能保持优异的塑性;不锈钢的耐蚀性能、强度、可塑性等都很高;钛合金的比强度很高,韧性比铝合金好,但价格较贵;聚合物材料的低温韧性和塑性都很差,在作低温存储容器应用时是一个严重缺点,需用纤维等增强。

根据低温存贮罐的工作特性,从功能性角度出发,选择低温韧性、室温屈服强度、室温杨氏模量、密度、热膨胀系数、导热率和比热作为评价指标;从经济性角度出发,选择成本作为评价指标。材料强度越高,可使存贮罐壁越薄,不仅可减轻质量,而且可使冷却时的热损失更少;材料密度越小,存贮罐质量越轻;材料导热率越低和比热小,热损失也越小;热膨胀系数低,则热应力小;成本显然越越低越好。因此,确定韧性、室温屈服强度、室温杨氏模量为正指标,密度、热膨胀系数、导热率、比热、成本为逆指标。

表 1 低温材料的牌号和性能

Table 1 Types and properties of low temperature materials

材料	低温 韧性	屈服强度 (室温)/MPa	杨氏模量(室温) GN/m <sup>2</sup>	密度 kg/cm <sup>3</sup>	热膨胀系数 ×10 <sup>6</sup> /K	导热率 J/ (cm · s · °C)	比热 (室温~77K) J/(g · °C)	成本 美元/磅
301 不锈钢 (全硬态)	770.0	1365	189.00	7.90	16.90	0.040	0.334	0.76
310 不锈钢 (75%冷加工)	186.7	1120	210.00	7.90	14.40	0.030	0.334	0.60
Inconel X-750 超合金	368.0	840	217.00	8.51	11.50	0.330	0.293	2.13
Inconel 718 超合金	239.0	1190	217.00	8.51	11.50	0.310	0.293	2.13
Ti-5Al-2.5Sn 钛合金	176.4	700	112.00	4.46	9.36	0.016	0.376	2.05
Ti-6Al-4V 钛合金	178.5	875	112.00	4.43	9.40	0.016	0.376	2.25
聚四氟乙烯	2.0	14	0.42	2.16	99.00	0.001	0.552	30.00
高导无氧铜	136.0	60	120.00	8.94	16.80	0.810	0.293	0.97
2014-T6 铝合金	75.5	420	74.20	2.80	21.40	0.370	0.686	0.44
5052-0 铝合金	95.0	91	70.00	2.68	22.10	0.330	0.686	0.46

目前,层次分析法(AHP)<sup>[20]</sup>在确定评价指标权重方面得到了广泛的应用<sup>[21,22]</sup>,本文根据该法(过程略),得到上述8种评价指标的相应权重为0.31620、0.18989、0.07531、0.07531、0.07531、0.07531、0.04267和0.15000。

对原始数据初始化处理后,根据上述工程材料组合评价模式,得到各候选低温存贮罐材料的评价结果(具体数值见表2)。其中,模糊综合评价方法将材料各指标的适应程度确定为5级,即评判集为 $V = \{\text{最好、较好、一般、较差、差}\}$ ,相应的分值分为(9、7、5、3、1),并建立了相应的隶属度函数。在TOPSIS法和灰色综合评价方法中,理想解 $Y^+$ 为0.3162、

0.1899、0.0753、0.0753、0.0753、0.0753、0.0427和0.1500,负理想解 $Y^-$ 为0.0008、0.0019、0.0001、0.0182、0.0071、0.0001、0.0182和0.0022。由表2可知,硬化状态的301型铬镍奥氏体不锈钢在候选材料中是最佳的选择。它的主要优点是韧性好、强度高和弹性模量大,成本也合理。排在其后的3种材料按顺序分别是冷变形量为75%的310型奥氏体不锈钢、Inconel X-750超合金和Inconel 718超合金,这些材料都有比较好的力学性能和热性能。尽管铝合金的价格在候选材料中是最便宜的,但其力学性能较差,比热容和导热率相对而言较高,这些都是较为严重的缺点,所以排序靠后。

表2 评价结果

Table 2 Evaluation results

材料	结果	加权平均法		模糊综合评价法		TOPSIS法		灰色关联度法		组合评价	
		得分	排序	得分	排序	得分	排序	得分	排序	得分	排序
301 不锈钢(全硬态)		0.7600	1	6.8726	1	0.7671	1	0.8342	1	4	1
310 不锈钢(75%冷加工)		0.5247	2	4.9913	2	0.4557	3	0.7488	2	9	2
Inconel X-750 超合金		0.4982	3	4.8063	3	0.4755	2	0.7250	4	12	3
Inconel 718 超合金		0.4933	4	4.7701	4	0.4461	4	0.7423	3	15	4
Ti-5Al-2.5Sn 钛合金		0.3906	6	3.9409	6	0.3304	6	0.6933	7	25	6
Ti-6Al-4V 钛合金		0.4128	5	4.1211	5	0.3591	5	0.7016	5	20	5
聚四氟乙烯		0.1855	10	2.2666	10	0.1877	10	0.6608	9	39	10
高导无氧铜		0.2768	9	3.0094	9	0.2329	9	0.6547	10	37	9
2014-T6 铝合金		0.3746	7	3.7539	7	0.3393	7	0.7009	6	27	7
5052-0 铝合金		0.3305	8	3.4019	8	0.3121	8	0.6870	8	32	8

由表2还可看出,单一评价方法所得结论具有一定的片面性,甚至会出现排序严重错位现象。例如, TOPSIS法所得结果中,310不锈钢(75%冷加工)排名为第3,而Inconel X-750超合金的排名为第2。Inconel超合金都是镍基合金,尽管其力学性能很好,但其密度较大且价格较为昂贵,不应排在不锈钢之前。而采用组合评价模式可通过同质相加、异质相消的特性,较好地弥补单一评价法所不可避免的某些缺陷,使结果更接近客观实际。

#### 4 结语

(1)分析了加权平均法、模糊综合评价法、TOPSIS法和灰色关联度法4种多指标评价法的优缺点,运用序号和理论及众数理论,将4种多指标评价法有机结合,建立工程选择组合评价模式。

(2)以低温存贮罐材料的选择为例,从功能性和经济性角度出发,选择8种评价指标,根据AHP法得到的权重,运用上述组合模式对10种候选材料进行优选排序。结果表明,最佳的低温存贮罐材料为全硬态301型不锈钢,且通过比较可知,所得排序结果优于单一方法,更接近客观实际。

(3)在工程设计材料选择过程中,采用组合评价模式从多角度对候选材料进行评价,分析问题更加全面,较好地弥补了单一评价法的不足,评价结果更加科学、客观、合理,尤其当材料性能复杂且相似材料种类较多时,使用该方法进行

综合评价,是一种有效的工具。

#### 参考文献

- 1 Ljungberg Lennart Y, Edwards Kevin L. Design, materials selection and marketing of successful products [J]. Mater Design, 2003, 24: 519
- 2 Matos M J, Simplicio M H. Innovation and sustainability in mechanical design through materials selection [J]. Mater Design, 2006, 27: 74
- 3 Wu Tiejian, Sepulveda Alfred. The weighted average information criterion for order selection in time series and regression models [J]. Statistics Probability Lett, 1998, 29: 1
- 4 Yuste S B. Weighted average finite difference methods for fractional diffusion equations [J]. J Comput Phys, 2006, 216: 264
- 5 Cai Anhui, Sun Guoxiong, Pan Ye. Evaluation of the parameters related to glass-forming ability of bulk metallic glasses [J]. Mater Design, 2006, 27: 479
- 6 Sheen J N. Fuzzy evaluation of cogeneration alternatives in a petrochemical industry [J]. Comput Mathematics Appl, 2005, 49(5-6): 741
- 7 Soltani A R, Fernando T. A fuzzy based multi-objective path planning of construction sites [J]. Autom Construction, 2004, 13: 717

- 8 Avineri Erel, Joseph Prashker, Avishai Ceder. Transporta-  
tion projects selection process using fuzzy sets theory [J].  
Fuzzy Sets Systems, 2000, 116: 35
- 9 Chen C T. Extensions of the TOPSIS for group decision  
making under environment [J]. Fuzzy Sets Systems, 2000,  
114: 1
- 10 Olson D L. Comparison of weights in TOPSIS models [J].  
Mathematical and Comput Modelling, 2004, 40: 721
- 11 Opricovic Serafim, Tzeng Gwo Hsiung. Compromise solu-  
tion by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR  
and TOPSIS [J]. Euro J Operational Res, 2004, (156): 445
- 12 Deng Hepu, Yeh Chunghsing. Inter-company comparison us-  
ing modified TOPSIS with objective weights [J]. Comput  
Operations Res, 2000, 27(10): 963
- 13 Lin J L, Lin C L. The use of grey-fuzzy logic on the optimi-  
zation of the manufacturing process [J]. J Mater Techn,  
2005, 160: 9
- 14 Chiang Kota, Chang Fuping. Application of grey-fuzzy logic  
on the optimal process design of an injection-molded part  
with a thin shell feature [J]. Int Commun Heat Transfer,  
2006, 33: 94
- 15 Lin J L, Lin C L. The use of orthogonal array with grey re-  
lational analysis to optimize the electrical discharge machi-  
ning process with multiple performance characteristics [J].  
Int J Machine Tools Manufacture, 2002, 42: 237
- 16 Moran J, Granada E, Miguez J. Use of grey relational ana-  
lysis to assess and optimize small biomass boilers [J]. Fuel  
Proc Techn, 2006, 87: 123
- 17 Lai Hsinhis, Lin Yangcheng, Yeh Chunghsing. Form de-  
sign of product image using grey relational analysis and neu-  
ral network models [J]. Comput Operations Res, 2005, 32:  
2689
- 18 Chen Meifang, Tzeng Gwohshung. Combining grey relation  
and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host coun-  
try [J]. Mathematical and Comput Modelling, 2004, 40: 1473
- 19 杨瑞成, 邓文怀, 冯辉霞. 工程设计中的材料选择与应用  
[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 20 Mohammed A K. Selecting the appropriate project delivery  
method using AHP [J]. Int J Project Manage, 2002, 20: 469
- 21 Omasa Takeshi, Kishimoto Michimasa, Kawase Masaya, et  
al. An attempt at decision making in tissue engineering: Re-  
actor evaluation using the analytic hierarchy process (AHP)  
[J]. Biochem Eng J, 2004, 20: 173
- 22 Kamal M. Application of the AHP in project management  
[J]. Int J Project Manage, 2001, 19: 19

(责任编辑 杨帆)

(上接第 68 页)

- 15 Rudnev V S, Vasileva M S, Lukiyanchul I V. On the sur-  
face structure of coatings formed by anodic spark method  
[J]. Protection of Metal, 2004, 40(4): 352
- 16 Patel J L, Saka N. Microplasmic coatings [J]. J Am Ceram  
Soc Bull, 2001, 80(4): 27
- 17 薛文斌, 王超, 邓志威, 等. TC4 钛合金表面交流微弧氧化  
膜研究 [J]. 无机材料学报, 2002, 17(2): 326
- 18 幸泽宽, 唐恩军, 段睿, 等. TC4 钛合金微弧阳极氧化膜层  
结构与性能的研究 [J]. 材料保护, 2005, 38(12): 54
- 19 王亚明, 等.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  系溶液中制备 Ti6Al4V 微弧氧化涂  
层的结构与摩擦学特性 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(5): 371
- 20 张宁, 强颖怀, 张春红, 等. 氮离子注入生物医用金属材料  
的表面性能研究 [J]. 热加工工艺, 2007, 36(4): 5
- 21 Conrad J R. Sheath thickness and potential profiles of ion-  
matrix sheaths for cylindrical and spherical electrodes [J]. J  
Appl Phys, 1987, 62: 4591
- 22 王钧石, 陈元儒, 陈庆武. Ti6Al4V 等离子体浸没式离子注  
入 [J]. 材料研究学报, 2001, 15(2): 225
- 23 Lakshmi S Gokul, Arivuoli D. Enhanced wear resistance of  
Ti-5Al-2Nb-1Ta orthopaedic alloy by nitrogen ion implanta-  
tion [J]. Tribology Int, 2006, 39: 548
- 24 张琦, 陶涛, 齐峰, 等. 非平衡磁控溅射氮化钛薄膜及其性  
能研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(2): 163
- 25 林松盛, 代明江, 候惠君, 等. 钛合金表面掺金属类金刚  
石薄膜的摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2007, 27(4): 382
- 26 Renevier N M, Fox V C, Teer D G, et al. Coating charac-  
teristics and tribological properties of sputter-deposited  
MoS<sub>2</sub>/metal composite coatings deposited by closed field un-  
balanced magnetron sputter ion plating [J]. Surf Coat  
Techn, 2000, 127: 24
- 27 Richman R H, Rao A S, Hodgson D E. Cavitation erosion  
of two Ni-Ti alloys [J]. Wear, 1992, 157: 401
- 28 张平则, 徐重, 张高会, 等. 纯 Ti 及 Ti-6Al-4V 双层辉光离  
子渗 Mo [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(5): 582
- 29 段良辉, 刘亚萍, 潘俊德, 等. 钛合金表面双层辉光离子渗  
铝的研究 [J]. 热加工工艺, 2005, (6): 40
- 30 黄俊, 周舸, 张平则. Ti-6Al-4V 钛合金的等离子 W-Mo 共  
渗 [J]. 热处理, 2007, 22(5): 40
- 31 徐重, 张高会, 张平则, 等. 双辉等离子表面冶金技术的新  
进展 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(6): 73
- 32 韩翠红, 钱翰城, 李俊, 等. 用高频感应氮化技术在  
Ti6Al4V 合金表面制备氮化膜的工艺探讨 [J]. 表面技术,  
2007, 36(2): 25
- 33 史艳俊, 钱翰城, 李俊, 等. Ti6Al4V 合金高频感应硬质氧  
化膜的制备 [J]. 表面技术, 2006, 35(5): 8
- 34 李崇桂, 田伟, 杨勇, 等. TC4 钛合金表面等离子喷涂  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt%TiO<sub>2</sub> 涂层及激光重熔研究 [J]. 材料热处理学  
报, 2007, 28(S1): 229

(责任编辑 曾文婷)