

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.01.009

梯度结构对 Ti6Al4V 表面 Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti 多层涂层残余热应力的影响

单湘衡, 李文元, 张海波, 丁一帆, 丁泽良

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用有限元法对 Ti6Al4V 表面 Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti 多层涂层的残余热应力进行分析, 研究中间梯度层 Nb₂O₅-Ti 的层数与厚度、成分分布指数对涂层残余热应力的影响, 并对其进行优化。结果表明: 随着梯度层数由 1 层增加到 6 层, 深层的残余热应力最大值由 12.6 MPa 减小到 11.7 MPa; 但梯度层数继续增大到 8 层时, 残余热应力最大值无明显变化。梯度层越厚, 残余热应力最大值越小。当成分分布指数由 0.5 增大到 3.0 时, 残余热应力最大值呈现先减小后增大的变化趋势, 其中分布指数为 1.5 时的残余热应力最大值 (8.93 MPa) 最小。通过正交试验法得到了多层涂层的梯度层的最优结构参数组合, 即梯度层数为 7, 梯度层厚度为 1 μm, 成分分布指数为 1.5。优化后的多层涂层残余热应力的最大值为 8.53 MPa, 较 Nb₂O₅ 单层涂层 (20.9 MPa) 和 Nb₂O₅/Ti 双层涂层 (22.1 MPa) 的残余热应力最大值分别减小了 59.2% 和 61.4%。

关键词: 功能梯度涂层; 残余热应力; 有限元分析; 正交试验法

中图分类号: TG113.12

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)01-0063-06

引文格式: 单湘衡, 李文元, 张海波, 等. 梯度结构对 Ti6Al4V 表面 Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti 多层涂层残余热应力的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(1): 63-68.

Effects of Gradient Structure on Thermal Residual Stress of Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti Multilayer Coatings on Ti6Al4V

SHAN Xiangheng, LI Wenyuan, ZHANG Haibo, DING Yifan, DING Zeliang

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: An analysis has been made of the residual thermal stress of Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti multilayer coating on Ti6Al4V by adopting the finite element method, followed by a research and optimization of the influence of the number and thickness of the film layer and composition exponent of the Nb₂O₅-Ti gradient interlayers on the residual thermal stress. The results show that the maximum residual thermal stress decreases from 12.6 MPa to 11.7 MPa with the increase of gradient interlayers from 1 layer to 6 layers, but the maximum value of residual thermal stress undergoes no significant change with the number of gradient layers increasing to 8 layers. The thicker the gradient layer is, the smaller the maximum residual thermal stress will be. When the composition exponent increases from 0.5 to 3.0, the maximum residual thermal stress first decreases and then increases, and the maximum residual thermal stress (8.93 MPa) is the

收稿日期: 2020-10-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4067, 2019JJ60059), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (20A159)

作者简介: 单湘衡 (1995-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为生物涂层材料,

E-mail: 562007290@qq.com

通信作者: 丁泽良 (1966-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事表面涂层与特种加工方面的教学与研究, E-mail: 10176@hut.edu.cn

minimum with the composition exponent being 1.5. The optimal combination of structural parameters of the gradient layer of multilayer coating can be obtained by using the orthogonal test method, i.e., with the number of gradient layers being 7, the thickness of each gradient layer $1\ \mu\text{m}$, and the composition exponent 1.5. The maximum residual thermal stress of the optimized multilayer coating is $8.53\ \text{MPa}$, which is 59.2% and 61.4% lower than that of Nb_2O_5 monolayer ($20.9\ \text{MPa}$) and $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Ti}$ bilayer coating ($22.1\ \text{MPa}$), respectively.

Keywords: functional gradient coating; thermal residual stress; finite element analysis; orthogonal test

0 引言

医用钛合金 Ti6Al4V 在耐腐蚀性、耐磨性、生物相容性和力学性能等方面具有良好的综合性能,是目前医用植入体的首选材料^[1-2]。但是,随着植入时间的延长, Ti6Al4V 会因为体液腐蚀而释放出有毒的金属离子^[3]。因此,在 Ti6Al4V 表面沉积耐腐蚀涂层意义重大。 Nb_2O_5 涂层在耐腐蚀性、耐磨损和生物相容性等方面具有优异的综合性能^[4-6],作为植入材料的表面改性涂层,具有得天独厚的优势。但是, Ti6Al4V 和 Nb_2O_5 的物性参数相差较大,若 Nb_2O_5 直接沉积在 Ti6Al4V 表面,两者的结合界面会产生较大的残余热应力^[7],导致涂层附着力减小,并且会发生开裂、脱落等现象。

功能梯度材料 (functionally graded materials, FGM) 是由两种或多种材料成分组合而成的复合材料,其组成、结构和性能沿某一方向发生连续变化^[8]。梯度中间层可以使基体到涂层之间的成分呈现连续变化,缓解基体与涂层之间的性能失配^[9-11],降低界面应力,从而提高涂层和基体之间的结合强度。为了使梯度涂层具有最佳的结合性能,同时减小涂层的制备工作量,在涂层制备前,对梯度涂层的残余热应力进行分析并对其结构参数进行优化非常重要。

本文拟运用 ANSYS14.0 有限元分析软件,对 Ti6Al4V 表面 $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ti}/\text{Ti}$ 多层涂层的残余热应力进行研究,分析中间梯度层 $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ti}$ 的层数与厚度、成分分布指数等对多层涂层残余热应力的影响,并且采用正交试验法对这些参数进行优化,以期为医用钛基植入材料表面改性涂层的设计与制备提供一定的理论参考。

1 分析模型

1.1 几何模型及有限元划分

Ti6Al4V 表面 $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ti}/\text{Ti}$ 多层涂层的几何模型采用圆柱体模型,如图 1a 所示。Ti6Al4V 基体的厚度和半径均为 $25\ \mu\text{m}$,基体表面涂层的总厚度

为 H (包含厚度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 Ti 黏结层,厚度为 h 的 $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{-Ti}$ 梯度层和厚度为 $3\ \mu\text{m}$ 的 Nb_2O_5 表面层)。考虑到模型的几何对称性和边界条件的对称性,为了节约计算时间,将其简化为二维模型进行分析,如图 1b 所示。

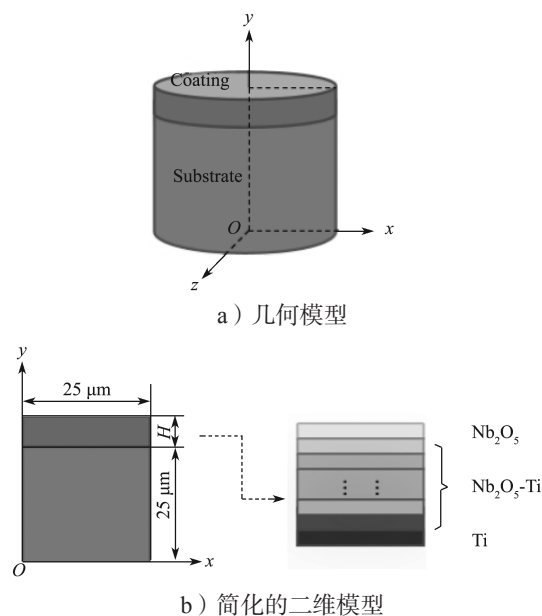


图 1 模型示意图

Fig. 1 A model diagram

采用 Plane13 单元对模型进行网格划分。由于涂层/基体结合界面附近区域的应力集中现象较为严重,故划分网格时需对该区域进行细化,直至结果的变化微小。图 2 为有限元网格划分模型。

1.2 边界条件

对有限元模型的左侧(对应于圆柱的轴线)施加约束,其余 3 边在热载荷作用下可自由伸缩。在分析过程中,采用如下假设:

1) 分析模型为完全弹性,无塑性变形,而

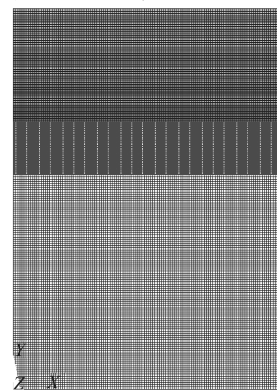


图 2 网格划分模型

Fig. 2 Mesh division model

且材料为各向同性;

- 2) 模型中的温度分布均匀;
- 3) 材料的物理性能参数不随温度变化;
- 4) 涂层界面结合良好, 无相对滑动。

涂层制备时的基底温度 t_1 为 70 °C, 冷却后的温度 t_2 为 25 °C, 温差 $\Delta=t_1-t_2$ 为 45 °C。由于涂层与基体的热膨胀系数不同, Δ 的存在会使得涂层/基体结合界面产生残余热应力。

1.3 材料的物性参数

基底材料 Ti6Al4V 和涂层材料 Nb₂O₅、Ti 的热物理性能参数^[12-14]如表 1 所示。

表 1 材料的热物理性能参数

Table 1 Thermophysical properties of materials

材料	弹性模量 / GPa	泊松比	热膨胀系数 / 10 ⁻⁶ K ⁻¹	导热率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Nb ₂ O ₅	60	0.20	5.8	0.98
Ti	116	0.41	9.0	17
Ti6Al4V	114	0.34	8.9	6.7

梯度层材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 、导热率 λ 可采用如下线性混合方式进行计算^[15]:

$$p(z) = \varphi_{\text{Nb}_2\text{O}_5} p_{\text{Nb}_2\text{O}_5} + \varphi_{\text{Ti}} p_{\text{Ti}} \quad (1)$$

式中: $p(z)$ 为梯度层材料的物性参数;

$\varphi_{\text{Nb}_2\text{O}_5}$ 和 φ_{Ti} 分别为 Nb₂O₅ 和 Ti 的体积分数;

$p_{\text{Nb}_2\text{O}_5}$ 和 p_{Ti} 分别为 Nb₂O₅ 和 Ti 的物性参数。

梯度层材料的体积分数采用如下幂函数表示^[16]:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{Nb}_2\text{O}_5} = \left(\frac{i-1}{n-1} \right)^P \\ \varphi_{\text{Ti}} = 1 - \varphi_{\text{Nb}_2\text{O}_5} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P 为梯度层的成分分布指数;

n 为涂层总数;

i 为第 i 个涂层, 取值范围为 1~ n 。

图 3 为不同成分分布指数下的梯度层中 Nb₂O₅ 组元的体积分数与所在梯度层的关系曲线。

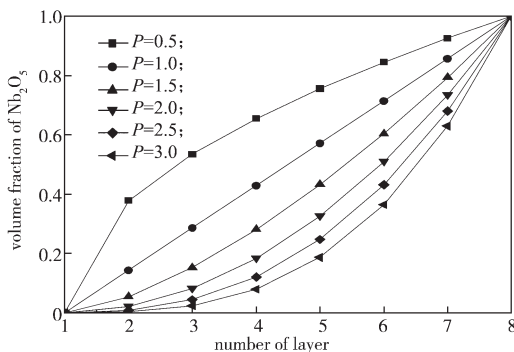


图 3 Nb₂O₅ 在梯度层中的体积分数

Fig. 3 Volume fraction of Nb₂O₅ in the gradient interlayers

由图 3 可知, $P < 1$ 时, 曲线上凸, 表示靠近黏接层 Mg 的梯度层中 Nb₂O₅ 的含量增加较快, 如图中 P

为 0.5 时, 梯度层第 3 层中的 Nb₂O₅ 体积分数达到了 54%。 $P > 1$ 时, 曲线下凹, 表示靠近涂层表面的梯度层中的 Nb₂O₅ 含量增长较快。如图中 P 为 2.0 时, 梯度层第 6 层中 Nb₂O₅ 的体积分数为 37%, 而第 8 层则达到了 100%。过大和过小的 P 值都会造成涂层中某种成分含量的快速增加和梯度加大, 导致涂层中出现较大的残余热应力。因此, 根据涂层成分的组成, 选择合适的 P 值非常重要。

复合材料的热膨胀系数使用 Turner 公式计算, 其表达式为^[17]

$$\alpha_m = \frac{\sum_i \alpha_i k_i \varphi_i}{\sum_i k_i \varphi_i} \quad (3)$$

式中: α_m 为复合材料的平均热膨胀系数;

α_i 、 k_i 、 φ_i 则为梯度材料中各组元的热膨胀系数、体积弹性模量和体积分数。

2 结果与讨论

2.1 梯度层层数对残余应力的影响

设梯度层的成分分布指数 P 为 1, 梯度层的总厚度为 2.5 μm , 且各层的厚度相等, 得到图 4 所示多层涂层的 Von Mises 等效残余热应力 (以下简称残余热应力) 最大值随梯度层层数的变化曲线。

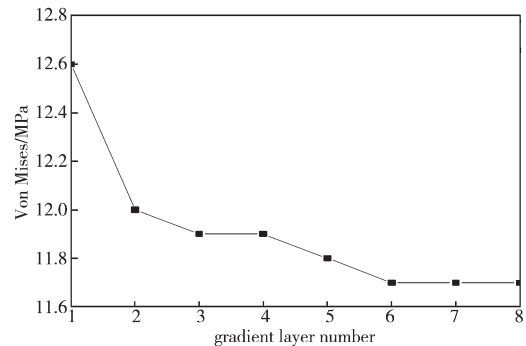


图 4 梯度层层数对残余热应力最大值的影响

Fig. 4 Effects of the number of gradient layers on the maximum value of residual stress

由图 4 可知, 随着梯度层 Nb₂O₅-Ti 的层数由 1 层增加到 6 层, 其残余热应力最大值由 12.6 MPa 减小到 11.7 MPa, 降幅为 7.1%; 但是, 当层数继续增加到 8 层时, 残余热应力最大值没有变化。这一变化特点与文献 [18] 的研究结论一致。由于梯度层的层数越多, 涂层的制备难度越大, 制造成本越高。因此, 应在满足涂层性能的前提下, 尽量选用小的梯度层层数, 因此后续实验中选择梯度层层数为 6。

2.2 梯度层厚度对残余热应力的影响

设成分分布指数 P 为 1.0, 梯度层的层数为 6, 各梯度层厚度相等, 每层的厚度为 0.2~2.0 μm 。图 5 为残余热应力最大值随梯度层单层厚度 (以下简称梯

度层厚度)的变化曲线。

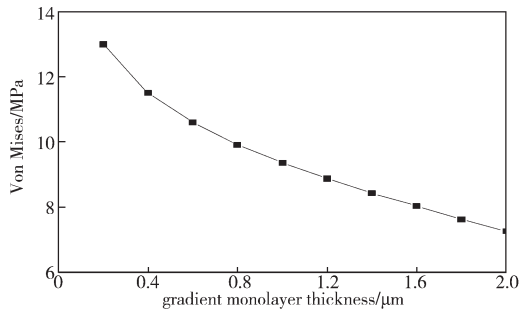


图5 梯度层厚度对残余热应力最大值的影响

Fig. 5 Effects of the thickness of gradient layers on the maximum value of residual stress

由图5可以得知,随着梯度层厚度的增大,涂层的最大残余热应力最大值逐渐减小;但是梯度层厚度增大,涂层的残余热应力最大值的下降速率降低。其中,梯度层厚度由0.2 μm增加到1.0 μm时,涂层最大残余热应力由13 MPa减小到9.4 MPa,下降速率为4.5 MPa/μm;而厚度由1.0 μm增大到2.0 μm时,涂层最大残余热应力由9.4 MPa减小到7.26 MPa,下降速率为2.14 MPa/μm。

由于过厚的梯度层会使涂层发生弯曲效应,改变残余应力的分布,导致涂层体系综合力学性能降低,并大大增加制作时间和制造成本^[19]。因此,合适的涂层厚度需兼顾性能与成本之间的关系。

2.3 成分分布指数对残余热应力的影响

设梯度层厚度为1 μm,梯度层层数为6,成分分布指数 P 值取0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0,得到图6所示的 P 值对梯度涂层残余热应力的影响曲线。

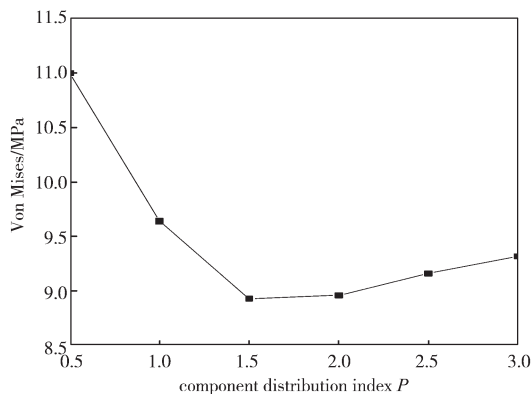


图6 成分分布指数对残余热应力的影响

Fig. 6 Effects of the component distribution index on residual stress

由图6可知,随着 P 值的增大,涂层的残余热应力最大值呈现先减小后增大的变化趋势,其中, P 值为1.5时的残余热应力最大值(8.93 MPa)最小,其相较于 P 值为0.5时的残余应力最大值(11 MPa)减小了18.8%。这是由于小的 P 值会增大黏结层和梯度层的材料不匹配性,而大的 P 值会增大涂层的表

层和近表层的材料不匹配性^[20],最终导致涂层中残余热应力增大。

2.4 梯度涂层的结构优化

根据前面的单因素分析结果,拟采用正交试验法确定多层涂层的最优结构参数。以残余热应力最大值为优化目标,其值越小越好,考察梯度层的层数与厚度、成分分布指数3个因素,表2为其水平表。选用四因素三水平的 $L_9(3^4)$ 正交试验表,如表3所示。

表2 因素水平表

Table 2 Orthogonal factor level table

水平	因素		
	A 梯度层数	B 梯度层厚度	C 成分分布指数
1	5	0.6	1.0
2	6	0.8	1.5
3	7	1.0	2.0

对正交试验分析结果进行极差分析,可得各因素对涂层残余热应力的影响程度,又能确定因素水平的最优组合。表3为正交分析和极差分析结果,由表3可知,序号9的残余热应力最大值最小。观察序号9对应的各因素最小 K 值,得到最佳的参数组合为 $A_3B_3C_2$,即梯度层数为7层,梯度层厚度为1.0 μm,成分分布指数为1.5。另外,表中的极差值 R 中,B因素最大,A因素次之,C因素最小,即这3个因素对 $Nb_2O_5/Nb_2O_5-Ti/Ti$ 多层涂层残余热应力的影响程度由大到小依次为梯度层厚度、层数和成分分布指数。

表3 正交分析方案及结果

Table 3 Orthogonal analysis scheme with its results

序号	因素			最大残余热应力 / MPa
	梯度层数	梯度层厚度	成分指数	
1	1 (5)	1 (0.6)	1 (1.0)	11.10
2	1 (5)	2 (0.8)	2 (1.5)	9.82
3	1 (5)	3 (1.0)	3 (2.0)	9.37
4	2 (6)	1 (0.6)	2 (1.5)	10.20
5	2 (6)	2 (0.8)	3 (2.0)	9.57
6	2 (6)	3 (1.0)	1 (1.0)	9.64
7	3 (7)	1 (0.6)	3 (2.0)	9.77
8	3 (7)	2 (0.8)	1 (1.0)	9.81
9	3 (7)	3 (1.0)	2 (1.5)	8.53
K_{1j}	10.097	10.357	10.183	
K_{2j}	9.803	9.733	9.517	
K_{3j}	9.370	9.180	9.570	
极差 R_j	0.727	1.177	0.666	

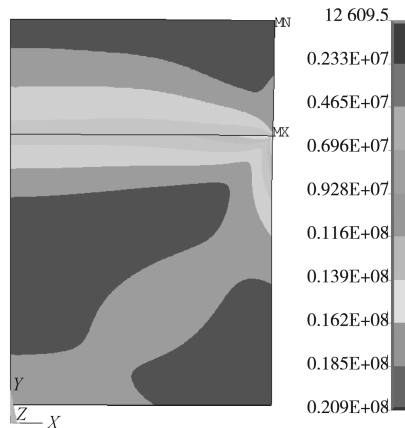
2.5 优化后的多层涂层与单层、双层涂层的残余热应力比较

设ZK60镁合金表面 Nb_2O_5 单层、 Nb_2O_5/Ti 双层和 $Nb_2O_5/Nb_2O_5-Ti/Ti$ 多层涂层(以下分别简称单层、双层和多层涂层)的总厚度相同,均为10.5 μm(如表4所示),梯度层的层数为7、厚度为1 μm、成

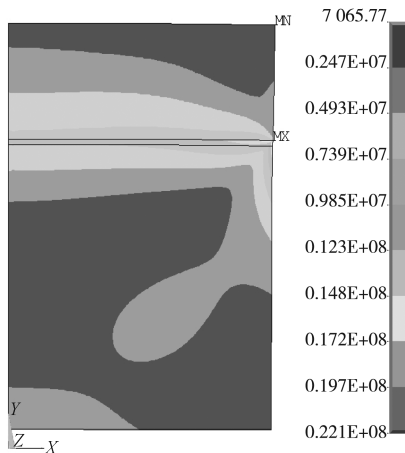
分分布指数为 1.5, 对各涂层进行残余热应力分析, 得到如图 7 所示的等效残余热应力云图。

表 4 涂层厚度

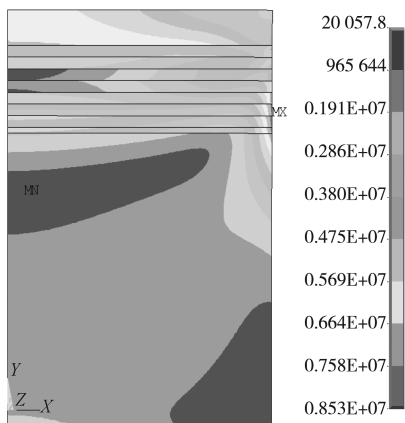
Table 4 Coating thickness		μm	
涂 层	Nb ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅ -Ti	Ti
单层涂层	10.5	-	-
双层涂层	10.0	-	0.5
多层涂层	3.0	7.0	0.5



a) Nb₂O₅



b) Nb₂O₅/Ti



c) Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti

图 7 涂层等效残余热应力云图

Fig. 7 Residual thermal stress nephogram of the coating

由图 7 可以得知, 多层涂层的最大残余热应力为 8.53 MPa, 较单层涂层 (20.9 MPa) 和双层涂层 (22.1 MPa) 的分别减小了 59.2% 和 61.4%。另外, 单层涂层和双层涂层的最大残余热应力分别出现在基体 / 涂层界面外边缘和黏结层 / 梯度层界面外边缘处, 而多层涂层的最大残余热应力出现在 Nb₂O₅-Ti 梯度层结合界面的外边缘处。由于涂层中的残余应力越大, 涂层的结合强度越低, 因此梯度结构提高了 Nb₂O₅ 涂层与基底 Ti6Al4V 之间的结合性能, 增强了涂层对基体的保护作用。

3 结论

本研究采用有限元方法分析了 Ti6Al4V 表面 Nb₂O₅/Nb₂O₅-Ti/Ti 多层涂层残余热应力的分布特征, 研究了中间梯度层 Nb₂O₅-Ti 的层数与厚度、成分分布指数等对多层涂层残余热应力的影响, 可得到如下结论:

1) 当梯度层层数由 1 层增加到 6 层时, 多层涂层的残余应力最大值由 12.6 MPa 减小到 11.7 MPa, 降幅为 7.1%, 但是当层数继续增加到 8 层时, 涂层的残余热应力最大值无明显变化。

2) 随着梯度层厚度的增大, 涂层的残余热应力最大值下降速率降低。其中, 涂层厚度由 0.2 μm 增加 1.0 μm 时, 最大残余热应力由 13 MPa 减小到 9.4 MPa, 下降速率为 4.5 MPa/μm; 而厚度由 1.0 μm 增大到 2.0 μm 时, 最大残余热应力由 9.4 MPa 减小到 7.26 MPa, 下降速率为 2.14 MPa/μm。

3) 随着 P 值的增大, 残余热应力最大值呈现先减小后增大的变化趋势, 其中 P 值为 1.5 时的残余热应力最大值 (8.93 MPa) 最小。

4) 通过正交试验法, 得到了中间梯度层的最优结构参数组合, 即梯度层层数为 7, 梯度层厚度为 1 μm, 成分分布指数为 1.5。该涂层的最大残余热应力为 8.53 MPa, 较单层涂层 (20.9 MPa) 和双层涂层 (22.1 MPa) 分别减小了 59.2% 和 61.4%。

参考文献:

[1] 周 泉, 丁泽良, 王 易, 等. Ti6Al4V 钛合金表面 Ta₂O₅/Ta₂O₅-Ti/Ti 多涂层的制备与性能研究 [J]. 包装学报, 2019, 11(6): 23-30.
 ZHOU Quan, DING Zeliang, WANG Yi, et al. Preparation and Properties of Ta₂O₅/Ta₂O₅-Ti/Ti Multilayer Coating on Ti6Al4V[J]. Packaging Journal, 2019, 11(6): 23-30.

- [2] KOMOTORI J, LEE B J, DONG H, et al. Corrosion Response of Surface Engineered Titanium Alloys Damaged by Prior Abrasion[J]. *Wear*, 2001, 251(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12): 1239–1249.
- [3] RAFIEERAD A R, BUSHROA A R, ZALNEZHAD E, et al. Microstructural Development and Corrosion Behavior of Self-Organized TiO₂ Nanotubes Coated on Ti-6Al-7Nb[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(9): 10844–10855.
- [4] MAZUR M, SZYMANSKA M, KACZMAREK D, et al. Determination of Optical and Mechanical Properties of Nb₂O₅ Thin Films for Solar Cells Application[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 301: 63–69.
- [5] MAZUR M, KALISZ M, WOJCIESZAK D, et al. Determination of Structural, Mechanical and Corrosion Properties of Nb₂O₅ and (Nb_yCu_{1-y})O_x Thin Films Deposited on Ti6Al4V Alloy Substrates for Dental Implant Applications[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2015, 47: 211–221.
- [6] VENKATARAJ S, DRESE R, KAPPERTZ O, et al. Characterization of Niobium Oxide Films Prepared by Reactive DC Magnetron Sputtering[J]. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*, 2001, 188(3): 1047–1058.
- [7] 张政科, 程西云. 梯度结构对氧化铝陶瓷涂层接触应力的影响 [J]. *润滑与密封*, 2017, 42(11): 58–63.
ZHANG Zhengke, CHENG Xiyun. Influences of Gradient Structure on Contact Stresses of Al₂O₃ Ceramic Coatings[J]. *Lubrication Engineering*, 2017, 42(11): 58–63.
- [8] YANG K, FENG W Z, PENG H F, et al. A New Analytical Approach of Functionally Graded Material Structures for Thermal Stress BEM Analysis[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 62: 26–32.
- [9] HOU P, BASU S N, SARIN V K. Structure and High-Temperature Stability of Compositionally Graded CVD Mullite Coatings[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2001, 19(4/5/6): 467–477.
- [10] KOKINI K, DEJONGE J, RANGARAJ S, et al. Thermal Shock of Functionally Graded Thermal Barrier Coatings with Similar Thermal Resistance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 154(2/3): 223–231.
- [11] TAKEUCHI H, TSUNEKAWA Y, OKUMIYA M. Formation of Compositionally Graded Ni-P Deposits Containing SiC Particles by Jet Electroplating[J]. *Materials Transactions, JIM*, 1997, 38(1): 43–48.
- [12] 周 泉. 医用钛合金表面 Ta₂O₅/Ta₂O₅-Ti/Ti 复合涂层的制备与性能研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020.
ZHOU Quan. Preparation and Property Study of Ta₂O₅/Ta₂O₅-Ti/Ti Composite Coating on Medical Titanium Alloy Surface[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020.
- [13] MITTERHUBER L, KRAKER E, DEFREGGER S. Structure Function Analysis of Temperature-Dependent Thermal Properties of Nm-Thin Nb₂O₅[J]. *Energies*, 2019, 12(4): 610.
- [14] CHEN Hsichao, HUANG Chenyu, CHENG Powei. Stress Mechanisms of SiO₂ and Nb₂O₅ Thin Films Sputtered on Flexible Substrates Investigated by Finite Element Method[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 449–457.
- [15] BHATTACHARYYA A, MAURICE D. Residual Stresses in Functionally Graded Thermal Barrier Coatings[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 129: 50–56.
- [16] ZHANG X C, XU B S, WANG H D, et al. Effects of Compositional Gradient and Thickness of Coating on the Residual Stresses Within the Graded Coating[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(4): 1192–1197.
- [17] 郑扣松. HA 生物活性梯度涂层的制备和性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
ZHENG Kousong. Preparation and Properties of HA Bioactive Gradient Coatings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [18] 严资林, 黄群英, 宋 勇, 等. CLAM 钢基体表面 Al₂O₃ 功能梯度涂层残余应力模拟分析 [J]. *核科学与工程*, 2008, 28(4): 289–294.
YAN Zilin, HUANG Qunying, SONG Yong, et al. Simulation and Analysis of the Residual Stresses in Functionally Graded Al₂O₃ Coatings on CLAM Steel[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2008, 28(4): 289–294.
- [19] EVANS A G, HUTCHINSON J W. The Thermomechanical Integrity of Thin Films and Multilayers[J]. *Acta Metallurgica Et Materialia*, 1995, 43(7): 2507–2530.
- [20] 谢玲玲, 陈文亮, 牛亚然, 等. C/C 材料表面 ZrB₂-SiC 功能梯度涂层残余应力分析 [J]. *表面技术*, 2016, 45(12): 97–103.
XIE Lingling, CHEN Wenliang, NIU Yaran, et al. Residual Stress in ZrB₂-SiC Functional Gradient Coating on C/C Substrate[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(12): 97–103.

(责任编辑: 廖友媛)