

镁合金表面 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的 残余热应力分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.05.006

张海波 丁泽良
单湘衡 丁一帆
汤迎红 李文元

湖南工业大学
机械工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 采用有限元方法分析了镁合金 ZK60 表面 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的残余热应力分布特征, 研究了梯度层的层数与厚度、沉积温度对残余热应力的影响。结果表明, 与 TaC 单层和 TaC/Mg 双层涂层相比, TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的残余热应力最大值 (112 MPa) 分别减小 67.2% 和 66.1%。当梯度层 TaC-Mg 的层数由 1 增加到 8 时, 梯度涂层的径向应力最大值增大 3.3%; 而轴向应力和剪切应力的最大值则呈现先减小后增大的变化趋势, 其中层数为 3 时的残余应力最大值最小。随着梯度层的厚度由 0.25 μm 增加到 1.50 μm , 径向应力、轴向应力和剪切应力最大值分别降低 16.6%、47.6% 和 32.4%; 但是当厚度继续增加到 2.0 μm 时, 残余应力最大值的增幅小于 8%。黏结层 Mg 的厚度对残余应力的影响较小, 但残余应力随沉积温度的升高呈线性增加。

关键词: 镁合金; 功能梯度涂层; 残余应力; 有限元分析

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2020)05-0045-07

引文格式: 张海波, 丁泽良, 单湘衡, 等. 镁合金表面 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的残余热应力分析 [J]. 包装学报, 2020, 12(5): 45-51.

1 研究背景

镁合金具有与人骨接近的力学性能、体内可降解以及优异的生物相容性等特点, 是一种很有潜力的可降解医用植入材料^[1]。然而, 在人体环境下, 镁合金植入体的快速降解能力容易导致其提前失效^[2-3]。在镁合金表面制备陶瓷涂层, 不仅能降低植入体的降解速率, 而且能提高植入体的生物相容性、力学性能和

抗菌性能^[4-9]。

碳化钽 (TaC) 陶瓷具有优异的耐蚀性、耐磨性和良好的生物相容性, 是植入体表面涂层的理想材料^[10-11]。然而, TaC 涂层与镁合金基底的物性参数相差较大, 涂层制备过程中的温度变化会诱发两者的结合界面产生较大的残余热应力, 从而导致涂层曲翘、开裂和脱落, 发生提前失效^[12]。

梯度涂层可以实现由基底到涂层表面的组成与

收稿日期: 2020-07-21

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4067, 2020JJ6079)

作者简介: 张海波 (1995-), 男, 浙江嘉兴人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为生物涂层材料,

E-mail: 962226215@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等方面的教学与研究, E-mail: 10176@hut.edu.cn

结构呈梯度变化,有效缓解涂层与基底之间的性能不匹配,减小残余应力,提高涂层/基体系统的结合强度^[13]。例如,A. Venugopal等^[14]发现磁控溅射制备的Al-Mo梯度涂层的结合强度是单一涂层的2倍以上。Lü W. Z.等^[15]在钛合金刀具表面制备的TiAlSiN梯度涂层的结合力,较非梯度涂层提高300%。Li Q. L.等^[16]通过等离子喷涂法在FeCrAl涂层表面制备的Al₂O₃-40%TiO₂梯度涂层,比未处理材料的结合强度提高了21.7%。

目前,国内外关于镁合金表面梯度涂层残余应力的研究鲜有报道。本文采用有限元分析软件ANSYS14.0研究镁合金ZK60表面TaC/TaC-Mg/Mg梯度涂层的残余热应力,分析梯度涂层的层数与厚度、黏结层的厚度和沉积温度对残余应力大小和分布的影响,以期涂层的制备提供理论参考。

2 数值分析

2.1 几何模型

图1为镁合金ZK60表面梯度涂层的几何模型,模型选用高度为25 μm、直径为50 μm的圆柱体。为简化模型和提高运算速度,对其中轴剖面的1/2进行分析。如图所示,涂层由三部分组成,即:表面层 h_1 、中间过渡层 h_2 和黏结层 h_3 。其中表面层为TaC,厚度3 μm;中间过渡层为TaC-Mg梯度层,厚度0.75~6.00 μm;黏结层为Mg,厚度0.10~1.2 μm。

梯度层TaC-Mg中的TaC和Mg的体积分数沿涂层沉积方向(y轴正向)呈梯度变化。其中,TaC的体积分数梯度增加,Mg的体积分数梯度减少,以实现涂层的组成和性能呈梯度变化。通过改变梯度层的层数与厚度、黏结层厚度和沉积温度,研究涂层残余热应力的分布特性。

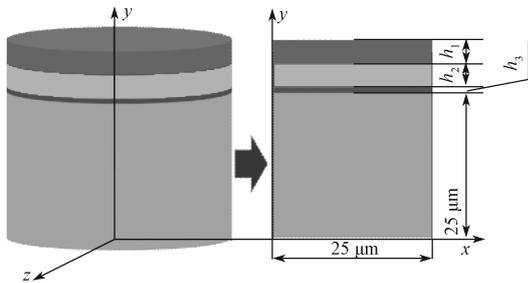


图1 几何模型

Fig. 1 Geometrical model

2.2 有限元模型

采用PLANE13四边形四节点热-力耦合线性单

元,对涂层/基体系统进行网格划分。由于涂层与基底的结合区域存在较高的应力梯度和较大的应力集中,为提高分析精度,对涂层/基体界面附近的网格进行细分。图2为涂层/基体系统的有限元分析模型。

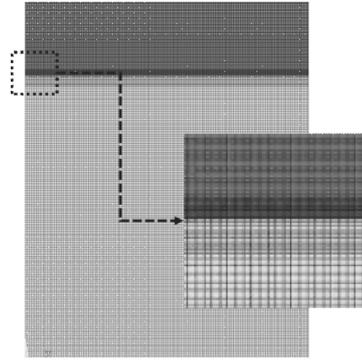


图2 有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model

2.3 边界条件

设定沉积涂层时的基底温度为 t_1 ,涂层自然冷却至室温 t_2 ,温度变化为 Δt ,即 $\Delta t=t_1-t_2$ 。当涂层与基体的热膨胀系数存在差异时, Δt 使得沉积后的涂层-基体结合界面产生残余热应力。磁控溅射镀膜机工作时,温度仪检测到基底表面的最高温度为70℃,即 $t_1=70$ ℃;取 $t_2=25$ ℃。为了简化分析,对模型作如下假设^[17-18]:

- 1) 所有材料均为各向同性材料,不考虑温度对材料物性参数的影响;
- 2) 涂层与涂层、涂层与基底结合界面结合良好,涂层不会脱落;
- 3) 涂层中不存在裂纹和微孔等微缺陷;
- 4) 涂层沉积时为无应力状态,只分析冷却后的残余热应力。

2.4 物性参数

表1为镁合金ZK60、金属镁和陶瓷TaC 3种材料的物性参数^[19-22]。

表1 材料物性参数

Table 1 Material physical parameters

材料名称	热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
ZK60	28.00	45.0	0.35
Mg	26.10	44.8	0.35
TaC	6.65	294.0	0.24

梯度层TaC-Mg各层的物性参数由复合材料的混合定律来计算。弹性模量的计算公式^[23]为

$$E_m = E_a V_a + E_b (1 - V_a), \quad (1)$$

式中: E_m 、 E_a 、 E_b 分别为梯度层、TaC、Mg 的弹性模量;

V_a 为 TaC 的体积分数。

梯度层 TaC-Mg 各层的热膨胀系数计算公式^[24]为

$$\alpha_m = \frac{\sum \alpha_i E_i V_i}{\sum E_i V_i}, \quad (2)$$

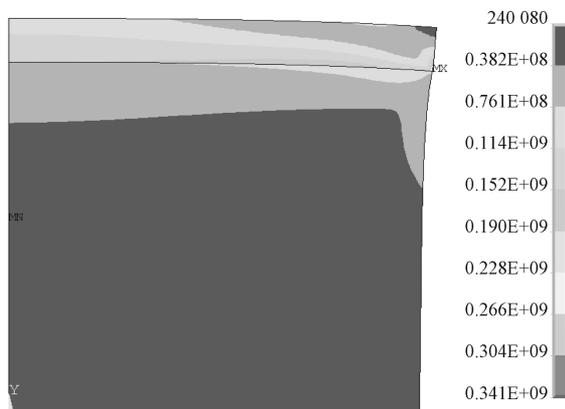
式中: α_m 为复合材料平均热膨胀系数;

α_i 、 E_i 、 V_i 分别为各组元的热膨胀系数, 弹性模量和体积分数。

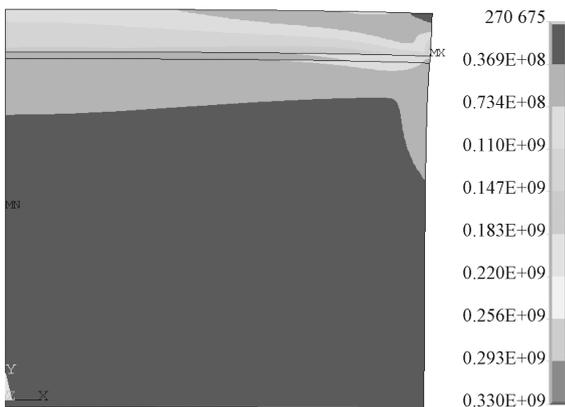
3 结果与分析

3.1 单层、双层和梯度涂层的应力分布云图

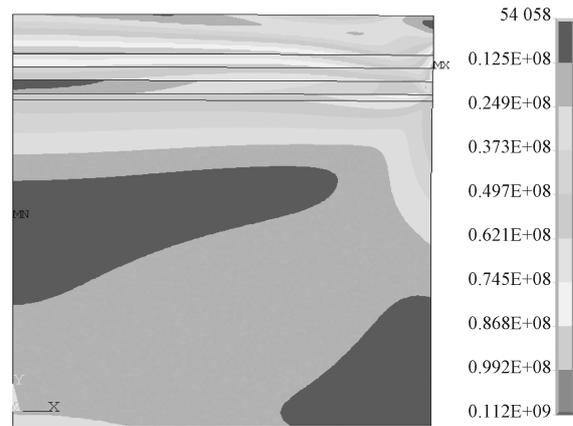
设 ZK60 表面 TaC 单层、TaC/Mg 双层以及 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层(以下分别简称为单层、双层和梯度涂层)中的 TaC 膜层厚度均为 $3.0 \mu\text{m}$, 双层和梯度涂层中的 Mg 层厚度均为 $0.5 \mu\text{m}$, 梯度涂层中的梯度层 TaC-Mg 厚度为 $3.0 \mu\text{m}$ 。梯度涂层的梯度层数为 3, 基底表面温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 通过有限元软件 ANSYS14.0 分析得到如图 3 所示的涂层残余应力云图。



a) TaC 单层



b) TaC/Mg 双层



c) TaC/TaC-Mg/Mg 梯度层

图 3 涂层残余应力云图

Fig. 3 Residual stress nephogram of the coatings

由图 3 可知, 梯度涂层的最大残余应力为 112 MPa , 较单层涂层 (341 MPa) 和双层涂层 (330 MPa) 分别减小 67.2% 和 66.1% 。另外, 3 种涂层的最大残余应力出现的位置也完全不同。其中单层和双层最大残余应力分别出现在 TaC 涂层与 ZK60 基底结合界面和 TaC 涂层与 Mg 黏结层结合界面的外边缘, 而梯度涂层的最大残余应力则出现在 TaC-Mg 梯度层结合界面的外边缘。涂层的最大残余应力越小, 涂层的强度越高; 最大残余应力出现的位置距涂基结合界面越远, 涂层对基底的保护效果越好。因此, TaC-Mg 梯度层能有效减小 ZK60 表面 TaC 涂层的残余应力, 提高涂层的结合强度。

3.2 梯度层的层数对残余热应力的影响

设 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层中的黏结层 Mg 的厚度为 $0.5 \mu\text{m}$, 表面层 TaC 厚度为 $3.0 \mu\text{m}$, 梯度层 TaC-Mg 的总厚度为 $3.0 \mu\text{m}$, 改变梯度层的层数, 得到图 4 所示的梯度层的层数对残余热应力最大值的影响曲线。

由图 4 可知, 随着梯度层数由 1 层增加到 8 层, TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的径向应力最大值由 73.7 MPa 增大到 76.1 MPa , 增幅为 3.3% ; 而轴向应力和剪切应力的最大值则呈现先减小后缓慢增大的变化趋势, 其中层数为 3 时的应力最大值为最小。这是由于随着梯度层数的增加, 相邻层之间的成分变化趋于平缓, 热膨胀系数等性能参数的差异减小^[25]。但是当层数大于 3 之后, 层数的继续增加会导致涂层内的连接界面数增多, 界面效应增强, 反而导致残余应力增大。从涂层的制造成本角度来考虑, 增加梯度层

的层数会导致成本增加。综合考虑, TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的梯度层数为 3 比较合适。

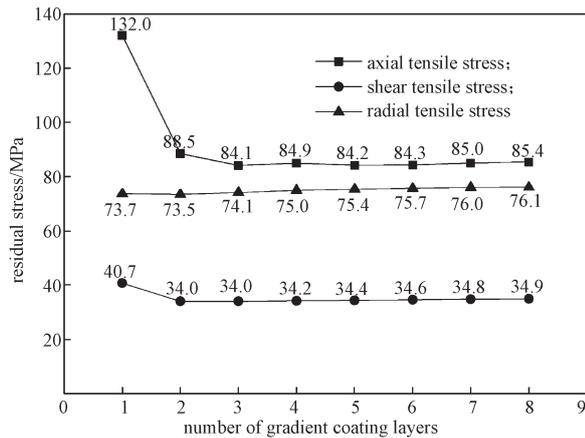


图 4 梯度层数对残余应力最大值的影响曲线

Fig. 4 Effect curves of the number of gradient layers on the maximum value of the residual stresses

3.3 梯度层的厚度对残余热应力的影响

设 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层中的黏结层 Mg 厚度为 0.5 μm , 表面层 TaC 厚度为 3.0 μm , 梯度层 TaC-Mg 的层数为 3, 每层的厚度相同, 厚度大小为 0.25~2.00 μm 。图 5 为不同梯度层厚度的各项残余应力最大值。

由图 5 可知, 随着梯度层的厚度由 0.25 μm 增大到 1.50 μm , 涂层的径向应力、轴向应力和剪切应力的最大值分别下降 16.6%, 47.6% 和 32.4%。因为较厚的过渡层可以减少涂层的应力梯度及大小^[26]。但是, 当梯度厚度由 1.50 μm 继续增加到 2.00 μm 时, 应力最大值的变化趋于平缓, 增幅在 8% 以内。由于增大涂层的厚度会导致涂层制造成本增加, 综合考虑, TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层的梯度层的厚度选择为 1.50 μm 。

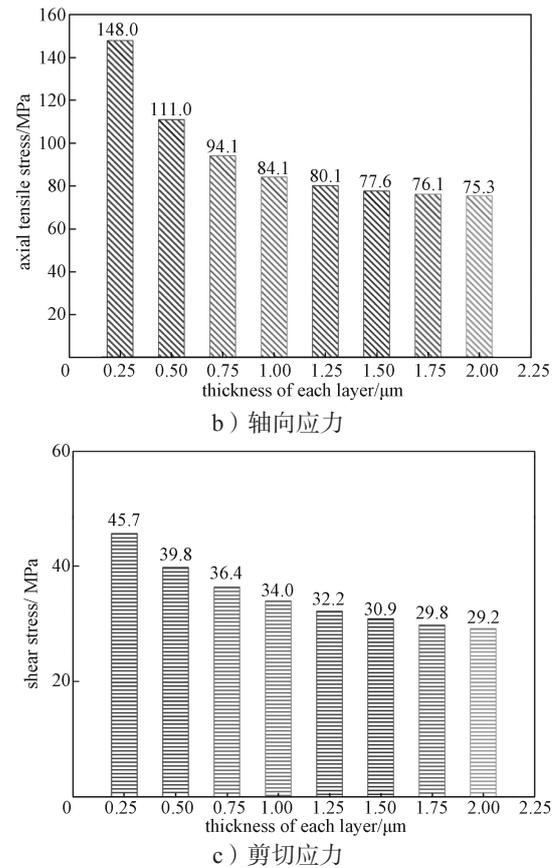
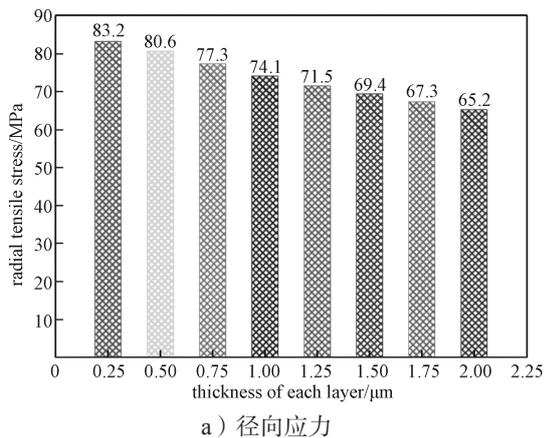


图 5 梯度层厚度对残余应力最大值的影响比较

Fig. 5 Comparison of effects of the thickness of the gradient layers on the maximum value of the residual stresses

3.4 黏结层的厚度对残余热应力的影响

设 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层中的表面层 TaC 厚度为 3.0 μm , 梯度层 TaC-Mg 的层数为 3, 梯度层的厚度为 1.5 μm , 改变黏结层 Mg 的厚度 (0.1~1.3 μm), 得到图 6 所示的黏结层厚度对 3 种残余应力最大值的影响曲线。

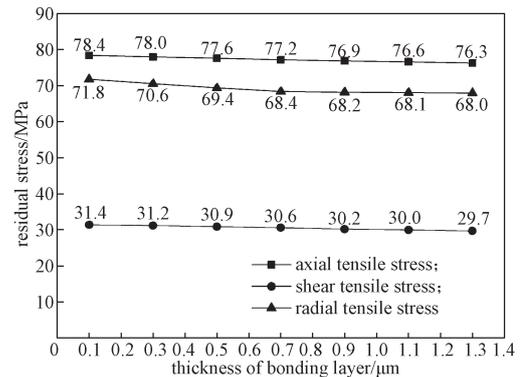


图 6 黏结层的厚度对残余应力最大值的影响曲线

Fig. 6 Effect curves of the thickness of the bonding layer on the maximum value of the residual stresses

由图 6 可知, 随着黏结层厚度由 $0.1 \mu\text{m}$ 增加到 $1.3 \mu\text{m}$, 残余应力最大值略有减小, 径向应力、轴向应力和剪切应力的降幅分别为 5.3% , 2.7% 和 5.4% 。这与 J. Haider 等^[27]的研究结果一致。由于 Mg 的力学性能远低于 TaC, 增加黏结层的厚度会导致涂层的整体力学性能降低。因此, 黏结层的厚度不宜过大。

3.5 沉积温度对残余热应力的影响

设 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层中的 TaC 陶瓷层厚度为 $3.0 \mu\text{m}$, TaC-Mg 梯度层的层数为 3, 梯度层的厚度为 $1.5 \mu\text{m}$, Mg 黏结层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$, 基底表面温度 t_1 分别取 $50, 100, 150, 200, 250, 300 \text{ }^\circ\text{C}$, 得到如图 7 所示的沉积温度对残余应力最大值的影响曲线。

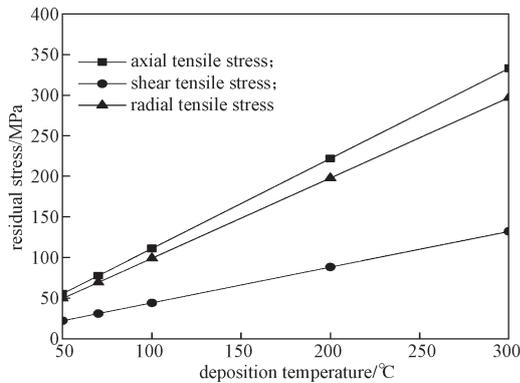


图 7 沉积温度对残余应力最大值的影响曲线

Fig. 7 Influence curves of the deposition temperature on the maximum value of the residual stresses

由图 7 可知, 当沉积温度由 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 梯度涂层的径向应力最大值由 50 MPa 增大到 297 MPa , 增幅为 494% , 轴向应力最大值由 55 MPa 增大到 333 MPa , 增幅为 505% , 剪切应力最大值由 22 MPa 增大到 132 MPa , 增幅为 500% 。残余应力最大值与沉积温度呈线性关系, 沉积温度越高, 涂层的残余应力越大^[28-29]。因此, 降低沉积温度有利于降低涂层的残余应力。

4 结论

采用有限元方法分析了 ZK60 表面 TaC 单层、TaC/Mg 双层和 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层内部残余热应力的分布特征, 研究了梯度层 TaC-Mg 的层数与厚度、黏结层 Mg 的厚度、沉积温度对 TaC/TaC-Mg/Mg 梯度涂层残余应力的影响, 可得如下结论:

1) 与单层、双层涂层相比, 梯度涂层的残余热应力最大值 (112 MPa) 分别减小 67.2% 和 66.1% ,

残余应力最大值出现的位置由 TaC/ZK60 结合界面、TaC/Mg 结合界面转移到 TaC-Mg 梯度层结合界面, 提高了涂层对基体的保护作用。

2) 当梯度层 TaC-Mg 的层数由 1 增加到 8 时, 梯度涂层的径向应力最大值增大 3.3% , 而轴向应力和剪切拉应力的最大值呈现先减小后增大的变化趋势, 其中层数为 3 时的残余应力最大值最小, 较 1 层时的最大值分别减小 36.3% 和 16.5% 。

3) 随着梯度层 TaC-Mg 的单层厚度由 $0.25 \mu\text{m}$ 增加到 $1.5 \mu\text{m}$, 径向应力、轴向应力和剪切应力最大值分别下降 16.6% 、 47.6% 和 32.4% ; 当厚度继续增加到 $2.0 \mu\text{m}$ 时, 各向应力最大值的增幅均小于 8% 。

4) 黏结层 Mg 的厚度对梯度涂层的残余应力影响较小。当厚度由 $0.1 \mu\text{m}$ 增大到 $1.3 \mu\text{m}$ 时, 梯度涂层的残余应力最大值的降幅小于 6% 。

5) 沉积温度对梯度涂层的影响较大。当沉积温度由 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 梯度涂层的残余应力呈线性增大, 其中径向应力、轴向应力和剪切应力最大值分别提高 494% , 505% 和 500% 。

参考文献:

- [1] HOU L, LI Z, PAN Y, et al. Microstructure, Mechanical Properties, Corrosion Behavior and Hemolysis of As-Extruded Biodegradable Mg-Sn-Zn Alloy[J]. AIP Conference Proceedings, 2016, 1727(10): 1-10.
- [2] SUN X, CAO Z Y, LIU J G, et al. Security Assessment of Magnesium Alloys Used as Biodegradable Implant Material[J]. Bio-Medical Materials and Engineering, 2015, 26(S1): 119-127.
- [3] DING W J. Opportunities and Challenges for the Biodegradable Magnesium Alloys as Next-Generation Biomaterials[J]. Regenerative Biomaterials, 2016, 3(2): 79-86.
- [4] GOLI E, AGHAJANI H. A Study on Corrosion Resistance of Al Magnetron Sputtering Coated AZ31 Magnesium Alloy[J]. Vacuum, 2018, 152: 231-238.
- [5] MUKHAMETKALIYEV T M, SURMENEVA M A, MUELLER M, et al. Thin Hydroxyapatite Coating on AZ91D Magnesium Alloy Fabricated Via RF-Magnetron Sputtering[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 98: 012027.
- [6] ZHANG D F, QI Z B, WEI B B, et al. Anticorrosive yet Conductive Hf/Si₃N₄ Multilayer Coatings on AZ91D

- Magnesium Alloy by Magnetron Sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 12–20.
- [7] ZHU X R, ZHU Z G, CHEN C, et al. Surface Properties Contrast Between Al Films and TiO₂ Films Coated on Magnesium Alloys by Magnetron Sputtering[J]. *Materials Research*, 2017, 20(2): 481–486.
- [8] MELNIKOV E S, SURMENEVA M A, TYURIN A I, et al. Improvement of the Mechanical Properties of AZ91D Magnesium Alloys by Deposition of Thin Hydroxyapatite Film[J]. *Nano Hybrids and Composites*, 2017, 13: 355–361.
- [9] LIU X J, GAN K, LIU H, et al. Antibacterial Properties of Nano-Silver Coated PEEK Prepared Through Magnetron Sputtering[J]. *Dental Materials*, 2017, 33(9): 348–360.
- [10] POLADI A, MOHAMMADIAN SEMNANI H R, EMADODDIN E, et al. Wettability and Biocompatibility of TaC_x Films Deposited on AISI316L Stainless Steel: Effect of Methane Concentration[J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2020, 30(2): 349–358.
- [11] 陈招科, 熊翔, 李国栋, 等. 化学气相沉积 TaC 涂层的微观形貌及晶粒择优生长[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1377–1382.
- CHEN Zhaoke, XIONG Xiang, LI Guodong, et al. Surface Morphology of TaC Coating Prepared by Chemical Vapor Deposition and Preferential Growth Mechanism of TaC Grains[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1377–1382.
- [12] 龚伟. Q235 钢基体表面 Y-TZP/LZAS 微晶玻璃功能梯度涂层的研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2015.
- GONG Wei. Study on Y-TZP/LZAS Glass Functional Gradient Coating on Q235 Steel Substrate[D]. Beijing: Chinese Academy of Engineering Physics, 2015.
- [13] WANG L, FU Q G, ZHAO F L. A Novel Gradient SiC-ZrB₂-MoSi₂ Coating for SiC Coated C/C Composites by Supersonic Plasma Spraying[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 313: 63–72.
- [14] VENUGOPAL A, SRINATH J, RAMESH NARAYANAN P, et al. Corrosion and Nano-Mechanical Behaviors of Magnetron Sputtered Al-Mo Gradient Coated Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(1): 105–114.
- [15] LÜ W Z, LI G J, ZHOU Y Y, et al. Effect of High Hardness and Adhesion of Gradient TiAlSiN Coating on Cutting Performance of Titanium Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 820: 153137.
- [16] LI Q L, DENG C M, LI L, et al. Microstructure and Interface-Adhesion of Thermally Sprayed Continuous Gradient Elastic Modulus FeCrAl-Ceramic Coatings[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(5): 5946–5959.
- [17] 董健, 窦炳胜, 贺飞羽, 等. 不锈钢表面渗铝层/ZrO₂ 复合涂层残余应力模拟[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 221–228.
- DONG Jian, DOU Bingsheng, HE Feiyu, et al. Residual Stress Simulation of Aluminized Layer/ZrO₂ Composite Coating on Stainless Steel[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(6): 221–228.
- [18] 孙戩, 徐颖强, 李万钟, 等. 热生长下热障涂层残余应力及失效分析[J]. *中国表面工程*, 2016, 29(1): 25–31.
- SUN Jian, XU Yingqiang, LI Wanzhong, et al. Residual Stress and Failure Analysis of Thermal Barrier Coatings with Thermal Growth[J]. *China Surface Engineering*, 2016, 29(1): 25–31.
- [19] LÓPEZ-DE-LA-TORRE L, WINKLER B, SCHREUER J, et al. Elastic Properties of Tantalum Carbide(TaC)[J]. *Solid State Communications*, 2005, 134(4): 245–250.
- [20] SAMSONOV G V, GREBENKINA V G, KLIMENKO V S. Coefficient of Thermal-Expansion of Refractory Compounds[J]. *Soviet Powder Metallurgy & Metal Ceramics*, 1971, 10(8): 643–647.
- [21] JIANG S Q, XU H G. Numerical Study on Strengthening Effect of Laser Shot Peening for Wrought Magnesium Alloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217/218/219: 2234–2237.
- [22] 王双雄. 镁合金 ZK60 表面 Ta-O/Mg 复合涂层的制备与性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- WANG Shuangxiong. Preparation and Properties of Ta-O/Mg Composite Coating on Magnesium Alloy ZK60 Surface[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2019.
- [23] 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]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2008, 28(4): 289–294.
- [24] 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. Fabricating and Property Research of Bioactive Gradient Coatings of HA[D]. Wuhan:

- Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [25] ZHANG S, WANG Y S, ZENG X T, et al. Evaluation of Interfacial Shear Strength and Residual Stress of Sol-Gel Derived Fluoridated Hydroxyapatite Coatings on Ti6Al4V Substrates[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(12): 1884–1893.
- [26] FU Y Q, DU H J, SUN C Q. Interfacial Structure, Residual Stress and Adhesion of Diamond Coatings Deposited on Titanium[J]. Thin Solid Films, 2003, 424(1): 107–114.
- [27] HAIDER J, RAHMAN M, CORCORAN B, et al. Simulation of Thermal Stress in Magnetron Sputtered Thin Coating by Finite Element Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(1): 36–41.
- [28] VALENTE T, BARTULI C, SEBASTIANI M, et al. Finite Element Analysis of Residual Stress in Plasma-Sprayed Ceramic Coatings[J]. Journal of Materials Design and Applications, 2004, 218(4): 321–330.
- [29] CLYNE T W, GILL S C. Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5(4): 401–418.

(责任编辑: 邓光辉)

Analysis of Thermal Residual Stresses of TaC/TaC-Mg/Mg Gradient Coating on Magnesium Alloy

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

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

Abstract: The finite element method was used to analyze the distribution of residual thermal stress of the TaC/TaC-Mg/Mg gradient coating on magnesium alloy ZK60. The effects of the number and thickness of gradient layers and deposition temperature on the residual stress were investigated. The results showed that the maximum residual thermal stress (112 MPa) of the TaC/TaC-Mg/Mg gradient coating was reduced by 67.2% and 66.1% compared to the TaC monolayer and TaC/Mg bilayer coatings, respectively. When the number of TaC-Mg gradient layers increased from 1 to 8, the gradient coating's maximum radial stress increased by 3.3%, while the maximum axial stress and shear stress showed the trend of increasing after decreasing, with the number of layers being 3, the maximum residual stress was the smallest. Expanding the gradient layer's thickness from 0.25 μm to 1.5 μm , the maximum values of radial stress, axial stress, and shear stress decreased by 16.6%, 47.6%, 32.4%, respectively. However, when the thickness continued to increase to 2.0 μm , the increase in the maximum value of the residual thermal stress was less than 8%. The thickness of the adhesive layer Mg had a small effect on the residual stress, but the residual stress increased linearly with the increase of deposition temperature.

Keywords: magnesium alloy; functionally gradient coating; residual stress; finite element analysis