doi: 10. 11933 / j. issn. 1007-9289. 20211104003

流-固-热多工况耦合作用下梯度复合涂层 应力分布仿真分析^{*}

方博石¹ 杨文明¹ 陈皓生² (1. 北京科技大学机械工程学院 北京 100083; 2. 清华大学机械工程系 北京 100084)

摘要:针对复合涂层的现有仿真方法多基于单一物理场的影响,不能反映多物理场耦合作用等实际工况下的力学性能。以航空发动机附件机匣的典型工况环境为背景,建立描述流-固-热耦合作用下梯度复合涂层各物理参数变化的数学模型,计算涂层不同分布方式下其内部的 von Mises 应力分布。结果表明,过渡层材料组分的渐变方式对涂层热应变和层内 von Mises 应力分布有较大影响,以航空发动机附件机匣中某型花键副为例,在施加实际工况下的载荷和温度条件后,温度场引起的热应力较载荷-润滑引起的应力更大,在润滑、热场和载荷的耦合作用下,三种分布方式的涂层最大应力均位于表层,随梯度的增大逐渐向基体扩散;梯度增大的过渡方式在涂层内可以获得最小的最大 von Mises 应力。在所关注的温度范围内,与梯度减小的过渡方式相比,使用梯度增大的过渡方式可使最大 von Mises 应力减小 14.5%。所建立的仿真方法可模拟近似实际工况,研究结果可用于指导梯度复合涂层的设计和制备。

关键词:复合涂层;梯度复合涂层;流-固-热耦合;力学性能 中图分类号:TB12

Simulation Analysis of Stress Distribution of Gradient Composite Coatings under the Application of Fluid-solid-thermal Coupling

FANG Boshi¹ YANG Wenming¹ CHEN Haosheng²

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing,

Beijing 100083, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Previous simulation methods for composite coatings are mostly based on the influence of one single physical field, which cannot reflect the real mechanical properties under actual working conditions such as multi-physics coupling. According to the typical working conditions of aero-engine accessories, a mathematical model describing the fluid-solid-thermal coupling phenomenon for gradient composite coatings is established, and the distribution of von Mises stress inside the coatings for different changing ways of compositions is calculated. It is shown that the three transition ways cast different results of thermal strain and von Mises stress in the coatings. Take the spline used in the aero-engine accessories as an example, the thermal stress is much larger than the stress caused by load-lubrication coupling under the application of the actual load and temperature conditions. With the action of the coupling effects of load-thermo-lubrication, the maximum stress locates at the surface layer and the stress spreads to the substrate with the increase of composition gradient. The transition way with increasing gradient can obtain the smallest "max von Mises stress" in the coatings. Within the temperature range of interest, the "max von Mises stress" reduces 14.5% by comparison with that for the decreasing gradient method. The simulation methods established can simulate the actual working conditions more closely. The research results can be used to guide the design and preparation of gradient composite coating.

^{*} 国家科技重大专项(2019-VII-0015-0155)和国家自然科学基金(52005033)资助项目。

Fund: Supported by National Science and Technology Major Project of China (2019-VII-0015-0155) and National Natural Science Foundation of China (52005033). 20211104 收到初稿, 20220328 收到修改稿

Keywords: composite coatings; gradient composite coatings; fluid-solid-thermo coupling; mechanical property

0 前言

复合涂层一般是由两种及以上材料制备而成的 涂层,常用于降低材料的磨损率,改善材料的高 温性能,从而提升零部件的寿命,已广泛应用于 机械制造^[1]、医学^[2]及航空航天^[3]等领域。为了防 止涂层与基体间力学性能差异过大,提高涂层的 层结合力,避免涂层从基体脱落,复合涂层中通 常需要使某些种类材料成分的含量沿高度方向连 续变化,形成梯度过渡层,从而与涂层整体形成 梯度复合涂层。与单一材料的涂层相比,梯度复 合涂层可获得良好的综合力学性能^[4-5]。在复合涂 层的制备方法上,依据材料种类和性能要求的不 同,通常有磁控溅射法^[6]、气相沉积法^[7]和激光 熔覆法^[8]。其基体材料一般视实际工况需要而定, 常见的有 Ti、Si 及 45 钢等^[9-11]。

梯度复合涂层材料组成和分布的复杂性,使得 涂层设计较单一涂层更加复杂,制备工艺更加困难。 传统表面改性材料的设计及优化常使用试验试错 法,不仅耗时较长,且成本较高。近年来,随着计 算机技术的发展,模拟计算与试验相结合的方法 为表面改性与涂层材料的优化设计提供了新思 路。国内外相关学者相继报道了应用模拟仿真方 法评估涂层力学性能、摩擦学性能及疲劳行为等 的研究。GORISHNYY 等^[12]应用有限元法,研究 了球-盘摩擦模型中多层 Cr-CrN-Cr₂N 的力学性 能,并将其用于复合涂层的优化设计,指导涂层 的制备。LI等^[13]应用三维有限元模型模拟了划痕 试验,得到与试验一致性较好的结果。 CHRISTOFIDES 等^[14]建立了销-盘磨损试验的微 观力学有限元模型,用于研究试验过程中涂层中 的塑性应变行为。王华君等^[15]对涂覆有功能梯度 涂层的热锻模进行仿真,对比分析了均质热锻模 及涂覆有梯度复合涂层的热锻模在锻造后产生的 温度场和应力场,验证了在热锻模表面进行梯度 表面复合涂层处理的优越性。吴蕾^[16]应用有限元 方法,预测人工关节在人体内的磨损情况,结果 表明髋臼表面磨损区域主要集中于关节上部,其 中在上部偏后处线磨损量最大。此外,北京航空 航天大学[17-18]、哈尔滨工业大学[19-20]、哈尔滨工 程大学^[21]等单位还相继开展了涂层接触应力及 热应力的模拟计算工作,并针对热障涂层、轴承 涂层等材料的失效机制,提出了相应的优化设计 方法。

上述模拟仿真工作是对涂层模拟计算领域的 可贵探索和贡献,但现有模拟仿真法多针对单一 工况因素的影响进行计算,而工业实际中某些制 备有复合涂层的零部件往往工作在极其复杂的工 况下。比如,先进航空发动机附件机匣中的某些 零部件,通常需要在其表面制备梯度复合涂层以 提高其耐磨性和寿命,使用过程中这些复合涂层 通常处于复杂载荷、环境高温、表面润滑等多种 工况环境下,而且这些因素相互耦合,共同影响 了涂层及基体的性能。为此,本文以航空发动机 中具有广泛应用潜力的梯度复合涂层为对象,将 其工作过程中的典型工况归结为流-固-热的多场 耦合作用,建立这一类高度非线性问题在梯度复 合涂层中应用时的计算方法,并应用该方法预测 涂层的力学性能。

1 模型与方法

1.1 几何模型及参数

本文以航空发动机上具有广泛应用潜力的梯度复合涂层为对象,应用现有研究中通常采用的 球-盘模型,其组成如图1所示。从基体向外分别 为梯度过渡层和单一成分层,本文计算中各层材 料均使用航空发动机附件机匣典型传动件上的常 用材料,其中基体为15Cr14,单一成分层为类金 刚石碳膜(DLC)。仿真过程中使用的各层物理参 数和尺寸参数在表1中给出。



表1 梯度复合涂层及基体的物理参数和尺寸参数

Table 1Physical parameters and dimensions of

the gradient composite coatings

Parameter	Coating with Single component	Tansition layer	Substrate
Thickness / μm	1	2	120
Elasticity modulus / GPa	300	-	82
Poisson ratio	0.31	-	0.28
Cefficient of thermal conductivity / (W / (m • K))	17.24	-	15.24
Coefficient of thermal expansion / (1 / °C)	12.41	_	9.41

关于梯度过程层的各物理参数,目前文献中一 般采用三种方式确定,分别为实测法、复合法以及 微观力学法^[15]。实际中由于过渡层很薄,很难由试 验测量得到其物理参数,而且设计过渡层的目的是 实现表层和基体间物理参数的渐变,避免参数突变 引起的应力集中等不利因素,所以本文采用复合法 获得过渡层的物理参数。根据复合法原理,将过渡 层的各物理参数表示为^[22]

$$p = \phi_1 p_1 + \phi_2 p_2 \tag{1}$$

式中, *p* 为涂层的某一物理参数, *p*₁、 *p*₂分别为构成 该涂层的单一材料的物理参数, *φ*₁、 *φ* 表示材料的 占比。过渡层由 DLC 和基底材料复合而成。

需要指出的是,弹性模量是影响涂层力学性能 的关键参数,涂层设计时通常以该参数作为主要设 计对象,过渡层内弹性模量的渐变方式对涂层性能 有较大影响,因此本文主要针对三种变化方式的过 渡层弹性模量进行计算,如图2所示。将这三种变 化方式分别称为梯度减小、线性变化、梯度增大的 形式。其中,梯度增大与梯度减小对应的参数沿厚 度方向随位置以三次幂函数的形式变化。



本文主要研究工况因素对梯度复合涂层力学性 能的影响,所以将其简化为球-弹性壁模型,如图 3 所示。假定球体为刚性球,为了减小计算量,计算 时球的几何模型无需建模,但需要利用式(2)换算 得到等效弹性模量加在涂层表面^[23]:

$$E = \frac{2}{\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}}$$
(2)

式中, v₁ 和 v₂ 分别为涂层和球体的泊松比, E₁ 和 E₂ 分别为其等效弹性模量。同时对模型进行对称性 简化,根据镜面对称特征,只建立一半的几何模型, 如图 3 所示。顶层的半圆形区域为润滑油的作用区 域。网格划分时采用"细化"等级。



图 3 计算模型 Fig. 3 Calculation model

在实际工况条件下,梯度复合涂层受到外载荷 P、 表面润滑膜的流体作用和环境热的影响。经调研发现, 以航空发动机附件机匣中广泛使用的某型花键副为 例,其分度圆直径为 30.48 mm,实际工作中最大扭矩 为 200 N•m,环境工况最大温度为 200 ℃。本文计 算中首先对实际花键副的啮合过程进行建模分析,计 算其在 200 N•m 扭矩作用下齿面上的最大 von Mises 应力,再由球-盘模型计算得到相同最大 von Mises 应 力对应的载荷作为本文中使用的载荷 P,其值为 8.94 N。各因素作用的示意图也在图 1 中给出。

1.2 涂层表面润滑剂流动数学模型

在填充润滑剂的球-壁面间的空间内,当球与壁 面之间有相对运动时,润滑剂在它们的带动下发生 流动,如图4所示,由于该空间沿涂层厚度方向上 的尺寸很小,所以假设流体内的黏性力的作用远大 于惯性力的影响,将润滑剂流动简化为薄膜流动。

描述润滑剂薄膜流动的方程为雷诺方程[24]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla_{t} \bullet (h\rho v_{av}) - \rho(v_{W} \bullet \nabla h_{W} + v_{b} \bullet \nabla h_{b}) \quad (3)$$
$$v_{av} = \frac{1}{2} (I - n_{r} n_{r}^{T}) (v_{W} + v_{b}) - \frac{h^{2}}{12\mu} \nabla_{t} p_{f} \quad (4)$$

式中, h 为润滑膜厚度, ρ 为润滑剂密度, μ 为润 滑剂黏度, νw 为参考平面上一点对应的平均流速, $p_{\rm f}$ 为润滑剂内的压力, ∇为梯度算子, $h_{\rm W}$ 为壁高, $h_{\rm b}$ 为基高。润滑膜的计算范围设置为 0 < r < 0.02 m, 在 r = 0 处, $\partial p_{\rm f} / \partial r$ = 0; 在 r = 0.02 m 处 $p_{\rm f}$ = 0.



Fig. 4 Model of the lubrication flows

1.3 梯度复合涂层及基体热传导数学模型

本文计算的热应力分析分为两部分,即固体内 各点的温度场分析及温度场导致的热应力分析。由 能量守恒方程可知,导致涂层温度变化的热量包括 单位时间内涂层界面从外界获得的热量和内部热源 产生的热量,本计算中忽略摩擦生热的影响,故只 包括外界传热。此时能量守恒方程成为

$$-\iint_{S} \boldsymbol{q} \cdot \boldsymbol{n} \mathrm{dS} = \iiint_{V} c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \mathrm{d}V$$
 (5)

式中, T 为温度, c 为涂层材料的比热容, ρ 为材料 的密度, q 为热流密度矢量。由傅里叶定律可知, 单位时间内通过截面的热量正比于垂直于该截面方 向上的温度变化率和截面面积,可得 $q = -k\nabla T$, k为传热系数,本文假设涂层材料均为各向同性材料, 所以 k 为常数。

由方程(5)中积分区间的任意性,根据高斯定 律可将能量守恒方程简化为微分方程

$$k\nabla^2 T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{6}$$

1.4 涂层及基体固体力学数学模型

在分析涂层及基体的应力和应变时,通常需要 求解描述其受力和变形量间关系的本构方程。其中, 对于由温度变化引起的热应变,表示为

$$\varepsilon_{T} = \alpha (T_{2} - T_{1}) = \alpha \Delta T \tag{7}$$

式中, α为材料的热膨胀系数。考虑热应变时,涂 层及基体的应变分量由自由热膨胀(收缩)引起的 应变分量与应力引起的应变分量叠加而成,表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \boldsymbol{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \boldsymbol{\sigma}_{kk} + \alpha \Delta T \boldsymbol{\delta}_{ij}$$
(8)

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ 为应变张量, $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 及 $\boldsymbol{\sigma}_{kk}$ 为应力张量, $\boldsymbol{\alpha}$ 为材料的热膨胀系数, ΔT 为温差。计算时模型的下表面被设置为固定约束,其余表面均为自由表面。

上述流体润滑、热传导和载荷作用相互耦合,共 同影响了梯度复合涂层的性能,本文考虑的耦合因素 如图 5 所示。热源产生的温度场通过热应力影响涂层 内的应力分布,同时温度场还会通过改变流场的基高 度 h_b分布来影响流体压力分布,此外,润滑剂的流动 状态通过表面压力影响涂层内的应力分布。





流-固-热多工况因素耦合作用下的复合涂层数 学模型由方程(3)~(8)及相应的边界条件组成。 本文利用基于有限元方法的 Comsol 软件求解该数 学模型,所采用的求解方案如图 6 所示。探究在 载荷、热和润滑的耦合作用下,涂层、基体中 von Mises 应力的变化规律。



Fig. 6 Solving strategy

2 结果及分析

2.1 热应力作用的影响

为了验证上述方法的正确性,针对只有温度场 影响下的梯度复合涂层进行应力分析,分别应用前 述方法和商业软件 Ansys 计算温度初始值为 20 ℃、 表面温度为 200 ℃时,过渡层组分在三种不同渐变 方式时各层的 von Mises 应力分布。计算结果分别如图 7 和 8 所示。可以看出,两种计算方法的结果相比,最 大 von Mises 应力的大小和发生的位置均具有较好的一 致性,验证了本文计算方法的可行性。



图 7 过渡层材料不同渐变方式时层内 von Mises 应力分布(本文计算方法)

Fig. 7 Distribution of the von Mises stress in the coatings for three different transition ways (calculated by the present method)





在过渡层的三种渐变方式中,最大应力均发生 在涂层的表层。随着过渡梯度的增大,应力逐渐向基 体扩散。其中,以梯度减小方式分布的涂层表层应力 最大,涂层与基体交界处应力最小;而以梯度增大方 式分布的涂层表层应力最小,涂层与基体交界处应力 最大。图9给出了涂层上表面热应变(以竖直方向上 的变形量表示)的计算结果,以梯度减小方式分布的 涂层在竖直方向上的变形量最小,以梯度增大方式分 布的涂层在竖直方向上的变形量最大。



图 9 过渡层材料不同渐变方式时涂层上表面 沿竖直方向上的变形量

Fig. 9 Vertical deformation of the top surface for different transition ways

2.2 载荷-润滑耦合作用的影响

为探究载荷-润滑耦合作用对涂层性能的影响, 使用瞬态计算时间范围 0~0.006 s 内润滑剂对涂层 上表面作用的流体压力、油膜厚度及涂层和基体内 的应力分布。计算中将球上施加的法向载荷逐渐加 载至 8.94 N,润滑油的黏度设置为 0.8 Pa•s,球与 壁面的相对速度设置为 1 m/s。结果发现,当有流 体润滑时,过渡层三种梯度变化方式条件下作用在 涂层表面的流体压力分布和油膜厚度均无明显区 别,但三种变化方式对应的各层内的应力分布不同, 如图 10 所示。增加流体润滑后,外载荷通过流体作 用在梯度复合涂层上的应力影响区域大小不同,其 中过渡层材料组分以梯度增大方式变化时的应力影 响区最大,而其他两种变化方式对应的应力影响区 域无明显区别。

2.3 流-固-热耦合作用的影响

热应变通过影响基高度来影响润滑剂的流动, 为了获得流体润滑、热及载荷的耦合作用,将 2.1 节中得到的上表面 *z* 向位移结果提取出来,经多项 式拟合后作为基高输入薄膜流动方程中。三种梯度 过度涂层的 *z* 向位移的拟合结果分别为:

$$W(x) = -0.009\ 7x^2 + 0.000\ 1 \tag{9}$$

$$W(x) = -0.01x^2 + 0.0001 \tag{10}$$

$$W(x) = -0.010 \, 3x^2 + 0.0001 \tag{11}$$

式(9)~(11)分别对应过渡层材料梯度减小、线 性变化和梯度增大的变化方式的涂层。





图 11 给出了三种分布方式下涂层表面受到的 流体压力的分布。由于热膨胀带来的流体基高度 h。 发生变化,三种涂层表面的流体压力均有不同程度 的增大,其中以梯度增大变化方式分布的涂层对应 的流体压力的相对增大量最大,增大 2.2%;以线性 变化和梯度减小方式分布的涂层对应流体压力则分 别增大 2.1%和 1.9%。这与图 9 中过渡层材料不同 渐变方式引起热应变量的相对大小相一致。

流-固-热耦合作用下梯度复合涂层内的应力分布 如图 12 所示。与单纯温度场作用下的热应力分布类 似,在流-固-热耦合工况作用下,过渡层以梯度增大变 化时可获得最低的 von Mises 应力分布,而且前者对应 的涂层内的最大应力位于涂层表层。与只有温度场作 用时的结果相比,三种过渡层变化方式对应的涂层内 的最大应力变化并不显著,而且最大应力位于涂层的 表层,并随梯度的增大由表层逐渐向基体扩散。比较 前述单纯温度场作用和载荷-润滑耦合作用的结果发 现,在梯度复合涂层内由温度场引起的热应力远大于 由载荷引起的应力。因此,在本文所使用的温度范围 和载荷大小的条件下,流-固-热耦合作用的计算结果与 单纯温度场作用下的结果类似。但另一方面,流-固-热耦合作用下应力在层间的过渡更为平滑,这是因为 热应变与载荷-润滑作用下的应变方向相反,二者的叠 加在一定程度上减弱了热应变的影响。





如图 13 所示为载荷 8.94 N,流-固-热耦合作用 时三种过渡层变化方式条件下涂层内最大 von Mises 应力随温度变化的结果。可以看出,不论涂 层以何种梯度方式过渡,层内最大 von Mises 应力 均随温度的增大而增大。这是因为温度越高,涂层 内的热应力也越大,与载荷引起的应力叠加后的总 应力也越大。三种过渡方式对应的最大应力随温度 的变化关系相似,但梯度增大的过渡方式可以在涂 层内获得最小的最大 von Mises 应力,而梯度减小 的过渡方式在涂层内的最大 von Mises 在三者中 最大,尤其是在高温 200 ℃时,与梯度减小的过渡 方式相比,使用梯度增大的过渡方式可使最大 von Mises 应力减小 14.5%。





3 结论

以航空发动机附件机匣的典型工况环境为背景,建立描述流-固-热耦合作用下梯度复合涂层各物理参数变化的数学模型,模拟不同涂层分布方式下涂层内 von Mises 应力分布。相较于针对单一物理场的仿真,提出的方法更接近于实际工况。但本文只针对不同温度的影响进行了研究,载荷对应力分布的影响有待于进一步计算。

参考文献

 张勤俭,赵路明,刘敏之,等. 刀具涂层技术的研究现 状和发展趋势[J]. 有色金属科学与工程,2014,5(2): 20-25.

ZHANG Qinjian, ZHAO Luming, LIU Minzhi, et al. Research status and development trends of cutting tool coating technology[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(2): 20-25. (in Chinese)

- [2] 邓珺. 医用钛合金表面羧基化碳纳米管涂层的制备及 其生物摩擦学性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
 DENG Jun. Preparation and biotribological properties of carboxylic carbon nanotube coating on medical titanium alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)
- [3] 段力,高均超,汪瑞军,等.航空发动机叶片表面热障 涂层温度分布的仿真分析[J].上海:上海交通大学学 报,2017,51(8):915-920.
 DUAN Li, GAO Junchao, WANG Ruijun. Simulation analysis of temperature distribution of turbine blades by thermal buffer coating for aero engine[J]. Shanghai: Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(8): 915-920. (in Chinese)
- [4] 唐达培,高庆,江晓禹.TiN、TiC和Ti(C,N)涂层的性能及影响因素研究[J]. 材料保护,2005,3:42-46.
 TANG Dapei, GAO Qing, JIANG Xiaoyu. Properties of TiN, TiC and Ti(C, N) coatings and the factors affecting the properties[J]. Materials Protection, 2005, 3: 42-46. (in Chinese)
- [5] 安亚君,刘先阳,朱利. 稀土氧化铈对高速钢梯度涂层 组织性能的研究[J]. 稀土, 2020, 41(3): 86-94.
 AN Yajun, LIU Xianyang, ZHU Li. Study on microstructure and properties of rare earth cerium oxide on high speed steel ladder coating[J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(3): 86-94. (in Chinese)
- [6] 迟迅,宋长虹,鲍君峰,等.磁控溅射制备钛基薄膜研究进展[J]. 热喷涂技术, 2020, 12(2): 17-21.
 CHI Xun, SONG Changhong, BAO Junfeng, et al. Research progress of titanium-based thin films prepared by magnetron sputtering[J]. Thermal Spray Technology, 2020, 12(2): 17-21. (in Chinese)
- [7] KULLMER R, LUGMAIR C, FIGUERAS A, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of PACVD Ti(B, N) and TiB₂ coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174-175: 1229-1233.
- [8] 解志欣,孙文磊. 激光熔覆技术制备梯度涂层的研究现状[J]. 热加工工艺, 2020: 1-7.
 XIE Zhixin, SUN Wenlei. Research status of gradient coating prepared by laser cladding technology[J]. Hot Working Technology, 2020: 1-7. (in Chinese)
- [9] 梁杨梦甜,范其香,王欣,等. CrAIN 纳米梯度涂层的 组织结构与性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 1-10. LIANG Yangnengtian, FAN Qixiang, WANG Xin, et al. Study on microstructure and properties of CrAIN nano-gradient coatings[J]. Surface Technology, 2021,

第3期

50(5): 1-10. (in Chinese)

[10] 吴龙,马捷,魏建忠,等. TC4 钛合金表面 WSi₂/W₅Si₃
 复合涂层制备及性能研究[J]. 钛工业进展,2020,37(5):
 18-22.

WU Long, MA Jie, WEI Jianzhong, et al. Preparation and properties of WSi_2 / W_5Si_3 composite coating on TC4 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2020, 37(5): 18-22. (in Chinese)

[11] 徐雁波, 贾磊. La₂O₃、CeO₂、Y₂O₃对 Ti-Al/WC 金属 陶瓷复合涂层耐磨性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(24): 96-101.
XU Yanbo, JIA lei. Effect of La₂O₃, CeO₂ and Y₂O₃ on

wear resistance of Ti-Al/WC cermet composite coating[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(24): 96-101. (in Chinese)

- [12] GORISHNYY T Z, OLSON L G, ODEN M, et al. Optimization of wear-resistant coating architectures using finite element analysis[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2003, 21(1): 332-339.
- [13] LI J, BERES W. Three-dimensional finite element modelling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate[J]. Wear, 2006, 260(11-12): 1232-1242.
- [14] CHRISTOFIDES C, MCHUGH P E, FORN A, et al. Wear of a thin surface coating: Modelling and experimental investigations[J]. Computational Materials Science, 2002, 25(1-2): 61-72.
- [15] 王华君, 彭毅, 王华昌, 等. 功能梯度表面涂层热锻模的仿真设计与分析[J]. 精密成形工程, 2010, 2(3): 32-35.
 WANG Huajun, PENG Yi, WANG Huachang, et al. Simulation design and analysis of hot forging die based on FGM surface coating[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(3): 32-35. (in Chinese)
- [16] 吴蕾. 模拟体液下 HA/ZrO₂复合涂层的摩擦磨损性能 与仿真预测[D]. 杭州:浙江工业大学, 2012.
 WU Lei. Wear property and simulation prediction of HA/ZrO₂ composite coating in simulated body fluid[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [17] 郝勇,齐红宇,马立强. 高温氧化对 EB-PVD 热障涂层 内部应力场分布影响的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1520-1526.

HAO Yong, QI Hongyu, MA Liqiang. Numerical simulation of effect of high temperature oxidation on stress field distribution of EB-PVD thermal barrier

coating[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1520-1526. (in Chinese)

 [18] 魏洪亮,杨晓光,齐红宇.等离子涂层典型界面损伤与破坏的数值模拟[J].北京航空航天大学学报,2007, 33(10): 1141-1145.

WEI Hongliang, YANG Xiaoguang, QI Hongyu. Numerical simulation of damage and fracture on typical interfaces of plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(10): 1141-1145. (in Chinese)

- [19] 吕晓莹. 基于界面应力与磨损控制的滚动轴承润滑薄 膜设计研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
 LÜ Xiaoying. Research on lubrication coating design of rolling bearing based on interfacial stress and wear control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] 卓会丹. 轴承表面 DLC 润滑薄膜的热特性与滚动摩擦效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
 ZHUO Huidan. Study on thermal characteristics and rolling friction of DLC film on surface of ceramics[D].
 Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] 罗京帅. 表面织构增强 B4C / Ni 复合涂层摩擦学与接触疲劳性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016. LUO Jingshuai. Research of contact fatigue and tribology performance of B4C / Ni composite coating reinforced by surface texture[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)
- [22] 张雁, 刘霓生, 陈林泉, 等. 梯度功能材料物性参数的 推定方法[J]. 固体火箭技术, 2004, 27(1): 77-80.
 ZHANG Yan, LIU Nisheng, CHEN Linquan, et al. Determination of the physical properties of functional gradient materials[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2004, 27(1): 77-80. (in Chinese)
- [23] SZERI A Z. Fluid film lubrication: Theory and design [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [24] HAMROCK B J, SCHMID S R, JACOBSON B O. Fundamentals of fluid film lubrication[M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.

作者简介:杨文明(通信作者),男,1985年生,副教授,博士研究生。 主要研究方向为计算多物理场。

E-mail: wmyang@ustb.edu.cn

陈皓生, 1975年生, 教授, 博士研究生。主要研究方向为摩擦学。

E-mail: chenhs@tsinghua.edu.cn