

涂层材料表面硬度温度相关性理论模型

麻建坐, 曹晓峰, 彭钊忠

(重庆工业职业技术学院 机械工程学院, 重庆 401120)

摘要: **目的** 理论表征涂层材料温度相关性表面硬度。**方法** 在材料温度相关性强度理论表征最新研究成果基础上, 结合材料硬度与强度的定量关系, 综合考虑涂层材料制备温度和服役温度对材料力学性能的影响, 建立了涂层材料温度相关性表面硬度理论表征模型。**结果** 该理论表征模型建立了不同温度下涂层材料表面硬度与参考温度下的表面硬度、温度相关性弹性模量、残余热应力、温度、材料熔点等之间的定量关系, 利用建立的模型, 可以由任意参考温度下的涂层材料表面硬度预测不同温度下的涂层材料表面硬度。为了验证模型的正确性, 采用建立的理论表征模型, 分别预测了碳化硼、碳化硅、类金刚石、钛合金、氧化镍等涂层材料的温度相关性表面硬度, 并与实验测试结果进行了对比, 结果表明理论预测值与实验值具有很好的一致性。**结论** 建立的理论表征模型可以有效地预测不同温度下的涂层材料表面硬度, 为涂层材料的温度相关性硬度理论预测提供了途径。

关键词: 涂层; 表面硬度; 温度相关性; 理论模型; 预测

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)01-0062-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.01.009

Temperature-dependent Model to Estimate the Surface Hardness of Thin Films

MA Jian-zuo, CAO Xiao-feng, PENG Dian-zhong

(School of Mechanical Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

ABSTRACT: The work aims to characterize the temperature-dependent surface hardness of thin films theoretically. In consideration of preparation temperature of thin films and effects of service temperature on mechanical properties of materials, the theoretical temperature-dependent surface hardness characterization model for thin films was developed based on the latest research achievement of theoretical characterization for temperature-dependent strength and the quantitative relationship between hardness and strength of materials. The theoretical characterization model was used to establish the quantitative relation between coating surface hardness at different temperature and the surface hardness at reference temperature, the temperature-dependent Young's modulus, the residual thermal stress, the temperature, and the melting point. The surface hardness of thin films at different temperatures could be predicted from the surface hardness at the reference temperature by the model. To verify the model, the temperature-dependent surface hardness of thin films like BC, SiC, amorphous carbon, Ti alloy, and NiO was respectively

收稿日期: 2018-09-26; 修订日期: 2018-10-31

Received: 2018-09-26; **Revised:** 2018-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11602041, 51875068); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2018jcyjAX0475); 重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJ1603004)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11602041, 51875068); the Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology (cstc2018jcyjAX0475); the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1603004)

作者简介: 麻建坐 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: mjzcqu@163.com

Biography: MA Jian-zuo (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering. E-mail: mjzcqu@163.com

predicted by the established theoretical characterization model and then compared with the experimental results. The theoretical prediction values were consistent with the experimental results. The model can effectively predict the surface hardness of thin films at different temperature and provide a way for theoretical prediction of temperature-dependent surface hardness of thin films.

KEY WORDS: thin film; surface hardness; temperature-dependent; theoretical model; prediction

涂层材料由于具有优异的耐磨性和耐腐蚀性,在航空航天、化工、钻探、机械加工等领域得到了广泛应用^[1-2]。涂层材料的硬度作为评价涂层材料力学性能的一个重要参数,受到广大科研工作者与工程技术人员广泛关注^[3-4]。实验方面,学者采用不同的测试技术^[4-5]对大量涂层材料的硬度进行了研究^[1,6-10]。Frischmuth 等^[6]实验测试了不同制备条件下碳化硅涂层的硬度, Rouhani 等^[7]实验测试了类金刚石涂层在不同温度下的硬度, Liu 等^[9]实验测试了钛合金涂层在不同基体制备温度时的硬度。理论方面, Chicot 等^[11]理论分析了涂层材料硬度测试过程中塑性变形和弹性变形对硬度测量结果的影响,大量理论研究表明,硬度与材料强度存在定量关系^[12,17-23],不同学者针对不同材料建立了室温下硬度与强度的表征模型^[12,17-23]。

综上,大量学者已对涂层材料硬度开展了实验与理论研究工作。然而,一方面,由于高温实验难以开展,使得涂层材料温度相关性硬度测试实验鲜见报道;另一方面,现有的涂层材料硬度理论表征工作大都集中于对室温下涂层硬度的描述。而涂层材料常常被应用于高温环境,温度对材料性能有很大的影响^[1],因此有必要开展涂层材料温度相关性硬度理论表征。本文结合硬度与强度的关系以及重庆大学李卫国等^[24-27]建立的温度相关性强度理论模型,考虑制备温度以及制备过程中产生的残余热应力对涂层材料硬度的影响,建立了涂层材料温度相关性表面硬度理论表征模型,并通过与实验结果的对比,验证了模型的正确性。

1 涂层材料温度相关性硬度模型

对传统金属材料, Tabor^[12]首次提出硬度 H 和屈服强度 σ_y 之间的关系:

$$H = K \sigma_y \quad (1)$$

式中: K 为一个常数, K 的大小通常取决于硬度计压头形状和压头材料的力学性能^[12]。大量研究表明, K 值大小受材料刚度的影响^[13-16]。Hay^[13]采用实验测量硬度时的压头压入深度来间接表征刚度的影响,发现 K 随着压入深度的增加而减小。随后,科学家对传统多晶材料硬度与极限抗拉强度的关系进行了广泛研究^[17-20],得到了硬度与极限抗拉强度 σ_{UTS} 之间类似于公式(1)的线性关系^[21]:

$$H = K \sigma_{UTS} \quad (2)$$

由公式(1)和公式(2)可知,材料硬度随材料的屈服强度或极限抗拉强度呈线性变化,而硬度、屈

服强度和极限抗拉强度受温度变化的影响。美国学者 Busby 等^[22]通过研究奥氏体钢和铁素体钢在不同温度下硬度与屈服强度之间的关系发现,在一定温度范围内,硬度和屈服应力的变化关系不受测试温度的影响,即 K 是一个温度不敏感的量。Edwards 等^[23]通过实验测试室温至 288 °C 下商用 304 和 316 钢材样品的硬度,证明了以上结论的正确性。Nunes 和 Larson^[22]从实验和理论方面证实,对于很多金属材料(包括低碳钢、铁、铜、铝和钛等),其硬度和屈服强度之间的关系在一定温度范围内保持不变。因此,在一定温度范围内,当温度变化没有引起材料屈服或破坏机制的明显改变时,可以认为 K 是一个与温度无关的常数。

关于温度对屈服强度和极限抗拉强度的影响,重庆大学李卫国等^[24-27]针对塑性材料和脆性材料分别建立了温度相关性屈服强度模型和断裂强度模型:

$$\sigma_y(T) = \left[\frac{E(T)}{E(T_0)} \times \frac{T_m - T}{T_m - T_0} \times \frac{1 + \nu_{T_0}}{1 + \nu_T} \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_y(T_0) \quad (3)$$

$$\sigma_{th}(T) = \left[\frac{E(T)}{E(T_0)} \times \frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_{th}(T_0) \quad (4)$$

式中: T 、 T_0 和 T_m 分别为当前测试温度、参考温度和材料的熔点; $E(T)$ 和 $E(T_0)$ 分别为温度 T 和参考温度 T_0 下的弹性模量; ν_T 和 ν_{T_0} 分别为温度 T 和参考温度 T_0 下的泊松比,金属塑性材料的泊松比受温度的影响较小^[25]; $\sigma_y(T)$ 和 $\sigma_y(T_0)$ 分别为温度 T 和参考温度 T_0 下的屈服强度; $\sigma_{th}(T)$ 和 $\sigma_{th}(T_0)$ 分别为温度 T 和参考温度 T_0 下的断裂强度。温度相关性屈服强度模型和断裂强度模型已被系列材料实验结果所验证^[24-30]。

结合模型(1)、(2)、(3)和(4),忽略泊松比的温度相关性,可得塑性材料和脆性材料温度相关性硬度的统一模型为:

$$H(T) = \left[\frac{E(T)}{E(T_0)} \times \frac{T_m - T}{T_m - T_0} \right]^{\frac{1}{2}} H(T_0) \quad (5)$$

其中, $H(T)$ 和 $H(T_0)$ 分别是温度 T 和参考温度 T_0 下的材料硬度。

由式(5)可知,材料硬度温度相关性与弹性模量的温度相关性息息相关。然而,对于涂层材料,不仅服役温度变化会引起弹性模量和硬度的改变,涂层加工时基体材料温度的不同也会导致弹性模量和硬度的改变^[8-10],因此涂层材料的硬度和弹性模量是服役温度和涂层制备时基体材料温度的函数。综合考虑到服役温度 T_C 和基体材料温度 T_S 的影响,涂层材料

温度相关性硬度模型可表示为:

$$H(T_C, T_S) = \left[\frac{E(T_C, T_S)}{E(T_{C0}, T_{S0})} \times \frac{T_m - T_C}{T_m - T_{C0}} \right]^{\frac{1}{2}} H(T_{C0}, T_{S0}) \quad (6)$$

式中: $H(T_C, T_S)$ 和 $E(T_C, T_S)$ 分别为制备涂层基体材料温度 T_S 、服役温度 T_C 对应的硬度和弹性模量; $H(T_{C0}, T_{S0})$ 和 $E(T_{C0}, T_{S0})$ 分别为制备涂层基体材料温度 T_{S0} 、服役温度 T_{C0} 对应的硬度和弹性模量。在模型(公式(6))中,通过参考温度下的硬度 $H(T_{C0}, T_{S0})$ 和温度相关性弹性模量 $E(T_C, T_S)$,考虑了由制备温度不同引起的涂层内部组织结构差异对硬度的影响。

另一方面,在涂层制备过程中,由于涂层和基体材料的物理机械性能不同,加工制备前后,环境温度变化引起膜-基系统中形成残余热应力^[31]。如果加热和冷却过程中产生的热应力始终处在弹性阶段,那么这种热应力是可逆的,一旦物体内温度趋于一致,残余热应力就消失^[32]。热膨胀系数和弹性模量是影响残余热应力最主要的两个物理参数^[31]。从增韧、提高涂层断裂韧性的角度看,在涂层制备过程中产生适当的残余压应力,可以一定程度上抵消在使用过程中外载荷造成的机械拉应力,提高涂层抗外力破坏的能力^[31]。一般情况下,由于涂层厚度与基体厚度相差较大,涂层冷却过程中产生的热应力可由公式(7)近似计算^[33]。

$$\sigma_{\text{res}} = E_f(\alpha_s - \alpha_f)\Delta T \quad (7)$$

式中: σ_{res} 为残余热应力; α_s 和 α_f 分别为基体材料和涂层材料的热膨胀系数; E_f 为涂层材料的弹性模量; ΔT 为温度差。

Sines 和 Carlson 研究了应力状态对硬度影响的关系,表明硬度随着拉应力的增加而减小,同时随着压应力的增加而增加;硬度的变化率与残余热应力的变化量成正比^[31-32]。综合考虑残余热应力的影响,若已知不同温度下的残余热应力时,涂层材料温度相关性硬度模型可表示为:

$$H(T_C, T_S) = \left[\frac{E(T_C, T_S)}{E(T_{C0}, T_{S0})} \times \frac{T_m - T_C}{T_m - T_{C0}} \right]^{\frac{1}{2}} H(T_{C0}, T_{S0}) \times \left[1 + \frac{H(T_{C1}, T_{S1}) - H(T_{C0}, T_{S0})}{H(T_{C0}, T_{S0})} \times \frac{\sigma_{\text{res}}(T_C, T_S) - \sigma_{\text{res}}(T_{C0}, T_{S0})}{\sigma_{\text{res}}(T_{C1}, T_{S1}) - \sigma_{\text{res}}(T_{C0}, T_{S0})} \right] \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\text{res}}(T_C, T_S)$ 为制备涂层基体材料温度 T_S 、服役温度 T_C 对应的涂层残余热应力; $H(T_{C1}, T_{S1})$ 和 $\sigma_{\text{res}}(T_{C1}, T_{S1})$ 分别为制备涂层基体材料温度 T_{S1} 、服役温度 T_{C1} 对应的涂层材料硬度和残余热应力; $\sigma_{\text{res}}(T_{C0}, T_{S0})$ 为制备涂层基体材料温度 T_{S0} 、服役温度 T_{C0} 对应的涂层残余热应力。

2 结果及讨论

利用建立的温度相关性涂层材料表面硬度表征

模型(公式(8)),对一些涂层材料在不同温度下的硬度进行了理论预测,并与实验结果进行了比较。在理论计算过程中,包括弹性模量和熔点在内的所有参数均来自文献。模型中所使用的熔点由涂层材料基体的熔点决定。

2.1 碳化硼涂层

Han 等^[8]采用磁控溅射沉积技术,分别在室温、250 °C 和 450 °C 下,制备了无定型非晶态碳化硼涂层,研究了在制备过程中单晶硅基体温度不同时对碳化硼涂层微观结构和力学性能的影响。结果表明,基体温度对碳化硼涂层的微观结构和厚度没有明显影响,涂层厚度约为 1.1 μm^[8]。不同基体温度下制备的碳化硼涂层的弹性模量如图 1 所示^[8],基体硅的熔点为 1685 K^[34]。取室温作为参考温度,利用模型(公式(8))预测了不同制备温度下的碳化硼涂层硬度,并与实验结果进行了对比,如图 2 所示。为了避免基材变形对涂层硬度测量结果的影响, Han 等^[8]在采用纳米压痕仪测量涂层硬度时,最大压痕深度约为 90 nm,小于膜厚的 1/10,可忽略基体对测量的影响,且他们制备的碳化硼涂层具有良好的弹性。

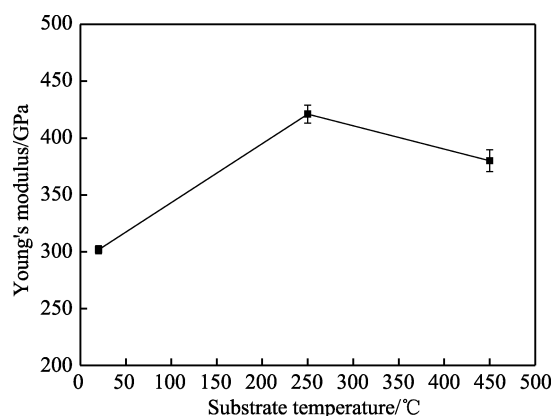


图1 基体温度对碳化硼涂层杨氏模量的影响
Fig.1 Effect of substrate temperature on the Young's Modulus of BC thin films

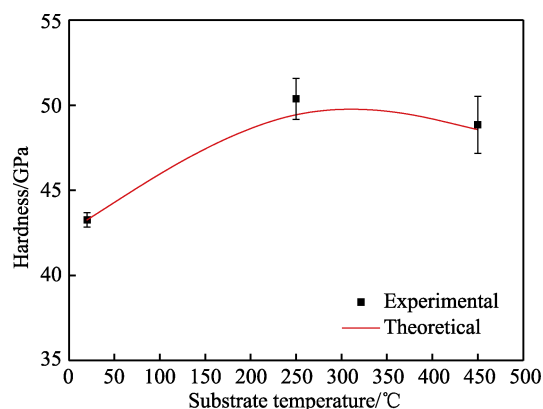


图2 基体温度对碳化硼涂层硬度的影响(实验值^[8])
Fig.2 Effect of substrate temperature on the hardness of BC thin films (Experimental data^[8])

2.2 碳化硅涂层

碳化硅涂层的基体材料为硅晶片，在制备过程中，基体硅晶片温度不同对应的碳化硅涂层弹性模量如图 3 所示^[6]，残余热应力如图 4 所示^[6]。取制备时基体温度 50 ℃为参考温度，在不同基体温度下，碳化硅涂层硬度理论预测结果与实验结果的对比如图 5 所示。理论计算过程中，弹性模量取平均值，基

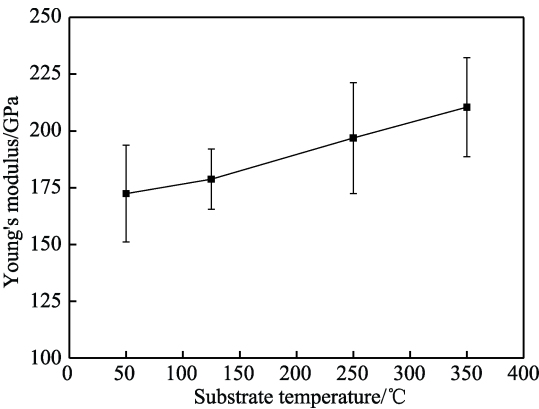


图 3 基体温度对碳化硅涂层杨氏模量的影响
Fig.3 Effect of substrate temperature on the Young's Modulus of SiC thin films

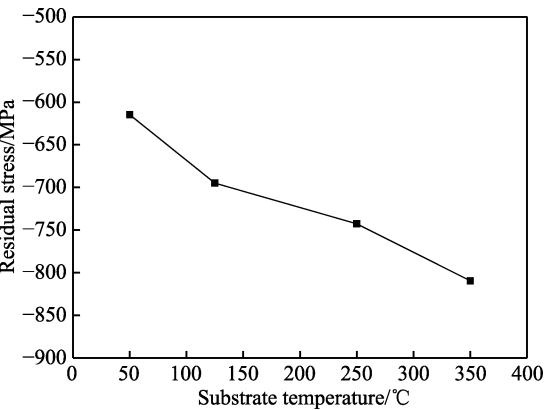


图 4 碳化硅涂层残余热应力随基体温度的变化规律
Fig.4 Change of SiC thin film stress along with the substrate temperature

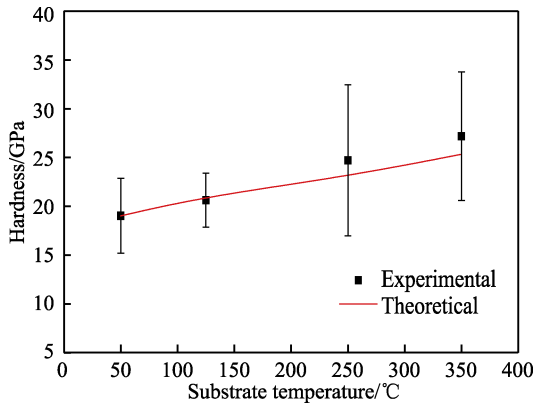


图 5 基体温度对碳化硅涂层硬度的影响（实验值^[6]）
Fig.5 Effect of substrate temperature on the hardness of SiC thin films (Experimental data^[6])

体温度为 50、125 ℃时对应的残余热应力为参考值，从图 5 中可以看出，理论值与实验值取得了很好的一致性。

2.3 类金刚石涂层

类金刚石涂层的基体材料为硅晶片，制备温度为室温，不同样品的基本制备参数如表 1 所示^[7]。类金刚石涂层的弹性模量随服役温度的变化规律如图 6 所示^[7]。Rouhani 等^[7]指出类金刚石涂层硬度随温度的变化是由应力释放引起的，假设残余热应力随着测试温度的升高呈线性变化关系，取室温下的硬度为参考值，不同温度下类金刚石涂层的硬度理论预测结果与实验对比值如图 7 所示。从图 7 可以看出，不同温度下的硬度可以由公式（8）进行理论预测。在 300~350 ℃时，样品‘δ’有大量 sp²结合的簇状或环状碳网格产生，温度高于 350 ℃时，其含量保持稳定^[7]，sp²结合的簇状或环状碳网格会降低涂层的硬度，而模型中没有考虑这种结构的影响，因此当温度高于 300 ℃时，样品‘δ’理论预测略高于实验值。

表 1 采用滤质阴极真空电弧镀(FCVA)技术制备的硅基类金刚石涂层参数

Tab.1 Parameters of the silicon-based diamond thin films prepared by filtered cathodic arc vacuum (FCVA) deposition system			
Parameters	Film‘β’	Film‘γ’	Film‘δ’
Pressure of argon gas P_{Ar}/Pa	0.066	0.133	0.2
Bias voltage/V	-700	-700	-700
Deposition time/min	16	32	72
Thickness/nm	650±20	650±20	650±20
Deposition rate/(nm·min ⁻¹)	40±4	20±2	9±1
Density/(mg·cm ⁻³)	3±0.05	2.7±0.1	2.6±0.1
Residual stress/GPa	-3.5±0.5	-1.9±0.3	-1.5±0.5

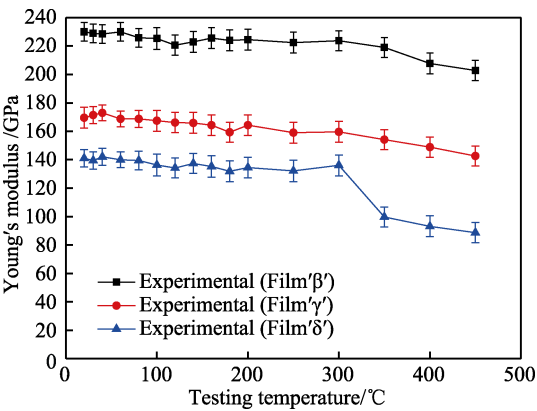


图 6 不同温度下测量的类金刚石涂层杨氏模量
Fig.6 Young's Modulus of amorphous carbon films tested at different temperatures

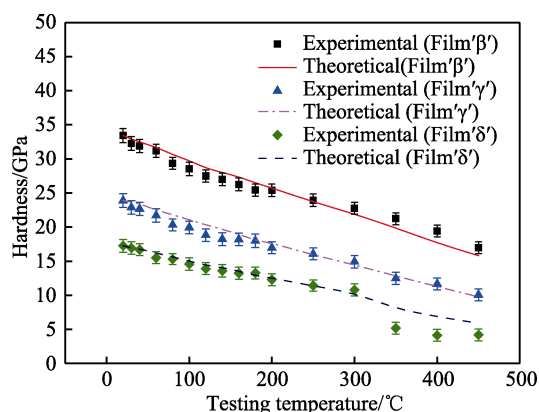


图7 温度相关性类金刚石涂层硬度 (实验值^[7])
Fig.7 Temperature dependent hardness of amorphous carbon thin films (Experimental data^[7])

2.4 钛合金涂层

钛合金涂层的基体材料为硅晶片, 在制备过程中, 基体硅晶片温度不同时对应的钛合金涂层的弹性模量如图8所示^[9], 残余热应力如图9所示^[9]。取制备时基体温度 125 °C 为参考温度, 不同基体温度下, 钛合金涂层硬度理论预测结果与实验结果对比

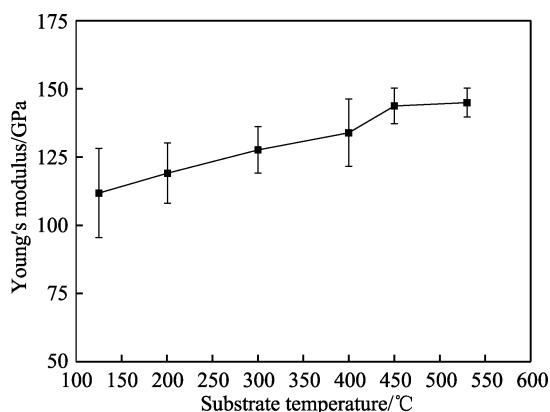


图8 基体温度对钛合金涂层杨氏模量的影响
Fig.8 Effect of substrate temperature on the Young's Modulus of titanium (Ti) alloy thin films

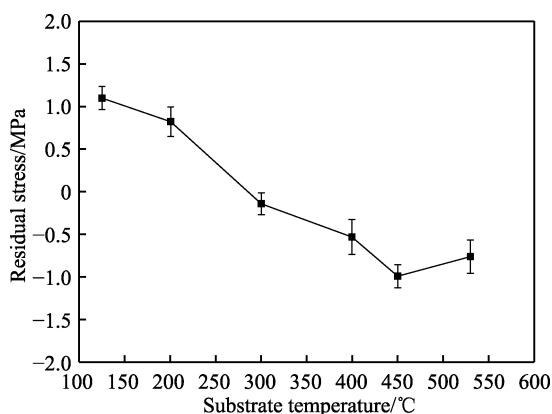


图9 钛合金涂层残余热应力随基体温度的变化规律
Fig.9 Change of Ti alloy thin film stress along with substrate temperature

如图10所示。理论计算过程中, 弹性模量取平均值, 基体温度为 125、200 °C 时对应的残余热应力为参考值, 从图10可以看出, 理论值与实验值取得了很好的一致性。

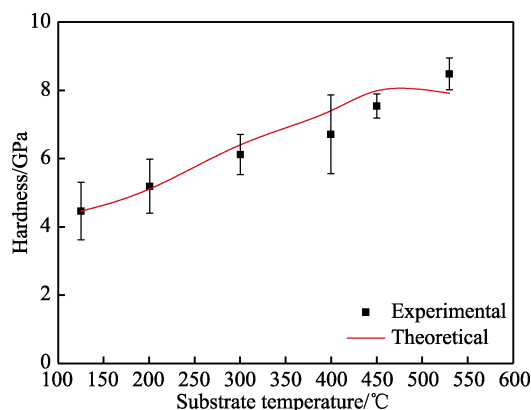


图10 基体温度对钛合金涂层硬度的影响 (实验值^[9])
Fig.10 Effect of substrate temperature on the hardness of Ti alloy thin films (Experimental data^[9])

2.5 氧化镍涂层

氧化镍涂层的基体材料为单晶硅, 在制备过程中, 基体单晶硅温度不同时对应的氧化镍涂层的弹性模量如图11所示^[10], 氧化镍涂层厚度和晶粒尺寸分别如图12和图13所示^[10]。取制备时基体温度 25 °C 为参考温度, 不同基体温度下, 氧化镍涂层硬度理论预测结果与实验结果对比如图14所示。对于氧化镍涂层, 在较高的温度下容易获得较大的晶粒, 并更容易获得最优原子取向^[10], 因此在理论计算过程中, 利用颗粒尺寸和涂层厚度将由公式(8)获得的计算结果进行了线性修正。从图14中可以看出, 理论预测结果与实验结果取得了很好的一致性。

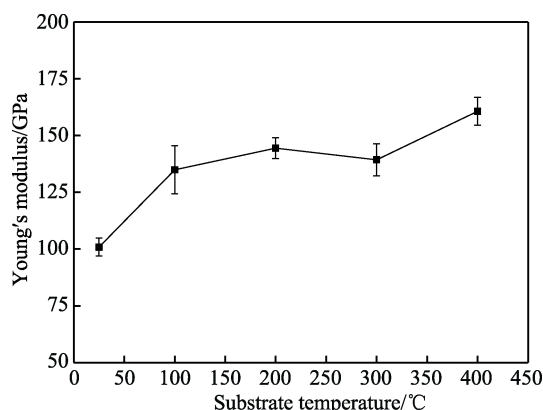


图11 基体温度对氧化镍涂层杨氏模量的影响
Fig.11 Effect of substrate temperature on the Young's Modulus of NiO thin films

2.6 模型预测效果分析

从图2、5、7、10、14的理论预测结果与实验结果对比中可以看出, 利用本文建立的理论模型, 可以

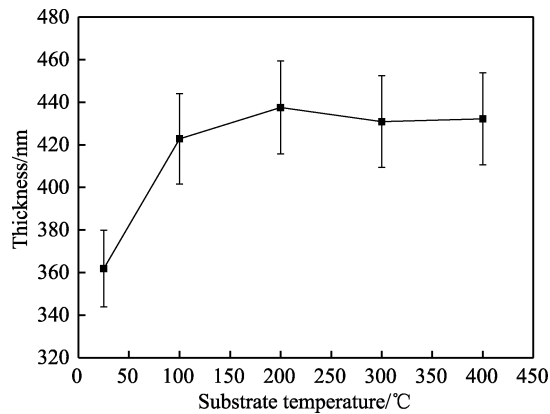


图 12 基体温度对氧化镍涂层厚度的影响
Fig.12 Effect of substrate temperature on the thickness of NiO thin films

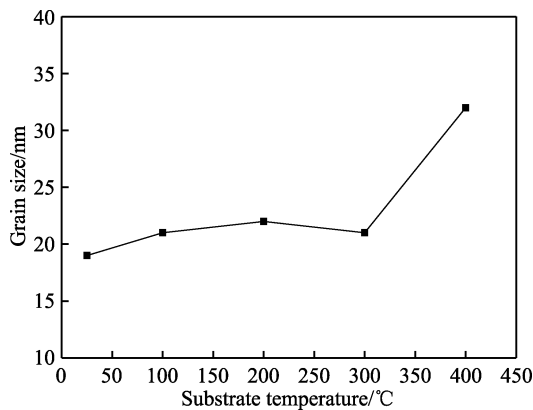


图 13 基体温度对氧化镍涂层晶粒尺寸的影响
Fig.13 Effect of substrate temperature on the grain size of NiO thin films

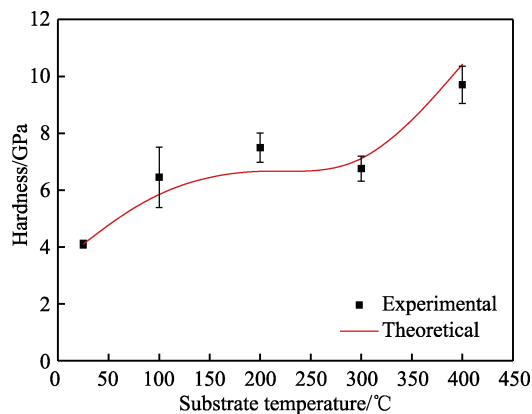


图 14 基体温度对氧化镍涂层硬度的影响 (实验值^[10])
Fig.14 Effect of substrate temperature on the hardness of NiO thin films (Experimental data^[10])

有效预测不同制备温度和服役温度对涂层材料表面硬度的影响。通过硬度仪实验测量涂层材料硬度时,实验测量结果受压头压入深度的影响,随着压入深度的增加,基体对测试结果的影响显著增加^[35-36]。虽然采用纳米压痕技术可以在一定程度上控制基体对测试结果的影响,但是当压入深度相对于涂层厚度较高时,测试结果是膜-基的系统硬度和弹性模量。在利

用模型(公式(8))进行理论预测时,采用膜-基系统的弹性模量可以相应地预测相同条件下的硬度。

3 结论

1) 建立了不同温度下涂层材料表面硬度与参考温度下的表面硬度、温度相关性弹性模量、残余热应力、温度、材料熔点等之间的定量关系。

2) 通过将理论预测值与碳化硼、碳化硅、类金刚石、钛合金、氧化镍等涂层材料的温度相关性表面硬度实验结果进行对比,验证了所建涂层材料温度相关性表面硬度理论模型的正确性。

3) 本研究建立的涂层材料温度相关性表面硬度理论表征模型,可以有效地预测不同温度下涂层材料的表面硬度,为涂层材料的温度相关性硬度理论预测提供了途径。

参考文献:

- [1] 赵子鹏, 李忠盛, 张新华, 等. 合金钢热障涂层等离子喷涂及高温力学特性研究[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 88-93.
ZHAO Zi-peng, LI Zhong-sheng, ZHANG Xin-hua, et al. Preparation and mechanical behavior at high temperature of plasma sprayed thermal barrier coatings on alloyed steel[J]. Surface technology, 2017, 46(5): 88-93.
- [2] 吴斌, 鲁侠, 王永欣, 等. TiN 及 TiSiN 涂层在海水环境下的摩擦学行为研究[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 143-148.
WU Bin, LU Xia, WANG Yong-xin, et al. Tribological behavior of TiN and TiSiN coatings in seawater[J]. Surface technology, 2017, 46(11): 143-148.
- [3] 鲜广, 赵海波, 梁红樱, 等. TiAlSiN 纳米复合涂层的改性研究现状及发展[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 33-42.
XIAN Guang, ZHAO Hai-bo, LIANG Hong-ying, et al. Modification research status and development of TiAlSiN nano-composite coatings[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 33-42.
- [4] 陈亚军, 周姝, 魏鹏宇. 表面显微硬度国内外检测标准探析[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 98-103.
CHEN YA-jun, ZHOU Shu, WEI Peng-yu. Introduction of domestic and foreign standards on microindentation hardness testing[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 98-103.
- [5] 杨光, 葛志宏. 几种薄膜涂层硬度测试方法的比较[J]. 表面技术, 2008, 37(2): 85-87.
YANG Guang, GE Zhi-hong. The comparison and evaluation for several testing methods of film coating hardness [J]. Surface technology, 2008, 37(2): 85-87.
- [6] FRISCHMUTH T, SCHNEIDER M, MAURER D, et al. Inductively-coupled plasma-enhanced chemical vapour deposition of hydrogenated amorphous silicon carbide thin films for MEMS[J]. Sensors & actuators A: Physical, 2016, 247: 647-655.
- [7] ROUHANI M, HONG C N, JENG Y R. In-situ thermal stability analysis of amorphous carbon films with different sp³ content[J]. Carbon, 2018, 130: 401-409.

- [8] HAN Z, LI G, TIAN J, et al. Microstructure and mechanical properties of boron carbide thin films[J]. *Materials letters*, 2002, 57(4): 899-903.
- [9] LIU G, YANG Y, JIN N, et al. The structural characterizations of Ti-17 alloy films prepared by magnetron sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 427: 774-781.
- [10] FASAKI I, KOUTOULAKI A, KOMPITSAS M, et al. Structural, electrical and mechanical properties of NiO thin films grown by pulsed laser deposition[J]. *Applied surface science*, 2010, 257(2): 429-433.
- [11] CHICOT D, YETNA N'JOCK M, ROUDET F, et al. Some improvements for determining hardness of homogeneous materials from the work-of-indentation[J]. *International journal of mechanical sciences*, 2016 (105): 279-290.
- [12] TABOR D. The hardness of metals [M]. London: Oxford University Press, 1951.
- [13] HAY J L, OLIVE W C, BOLSHAKOV A, et al. Using the ratio of loading slope and elastic stiffness to predict pile-up and constraint factor during indentation[J]. *Mrs Proceedings*, 1998, 522: 101-106.
- [14] MESAROVIC S D J, FLECK N A. Spherical indentation of elastic-plastic solids[J]. *Proceedings: Mathematical, physical and engineering sciences*, 1999, 455(1987): 2707-2728.
- [15] PARK Y J, PHARR G M. Nanoindentation with spherical indenters: Finite element studies of deformation in the elastic-plastic transition regime[J]. *Thin solid films*, 2004, 447-448: 246-250.
- [16] LEITNER A, MAIER-KIENER V, KIENER D. Essential refinements of spherical nanoindentation protocols for the reliable determination of mechanical flow curves[J]. *Materials & design*, 2018, 146: 69.
- [17] FLINN R A, TROJAN P K. Engineering materials and their applications[M]. Third ed. Boston: Houghton Mifflin, 1986: 84.
- [18] SHACKELFORD J F. Introduction to materials science for engineers[M]. Third ed. New York: MacMillan, 1992: 349.
- [19] CALLISTER J R. Materials science and engineering: An introduction[M]. Sixth ed. New York: John Wiley, 2003: 139.
- [20] BOYER H E, GALL T L. Metals handbook[M]. Desk ed. Geauga: ASM International, 1985: 1-60.
- [21] BROOKS I, LIN P, PALUMBO G, et al. Analysis of hardness-tensile strength relationships for electroformed nanocrystalline materials[J]. *Materials science & engineering: A*, 2008, 491(1): 412-419.
- [22] BUSBY J T, HASH M C, WAS G S. The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels[J]. *Journal of nuclear materials*, 2005, 336(2): 267-278.
- [23] EDWARDS D J, GARNER F A, SIMONEN E P, et al. Characterization of neutron-irradiated 300-series stainless steels to assess mechanisms of irradiation assisted stress corrosion cracking[J]. *Environmental degradation*, 2005, 406: 820.
- [24] LI Wei-guo, YANG Fan, FANG Dai-ning. The temperature-dependent strength model for ultra-high temperature ceramics[J]. *Acta mechanica sinica*, 2010, 26(2): 235-239.
- [25] LI Wei-guo, ZHANG Xian-he, KOU Hai-bo, et al. Theoretical prediction of temperature dependent yield strength for metallic materials[J]. *International journal of mechanical sciences*, 2016, 105: 273-278.
- [26] ZHANG Xian-he, LI Wei-guo, MA Jian-zuo, et al. A novel temperature dependent yield strength model for metals considering precipitation strengthening and strain rate[J]. *Computational materials science*, 2017, 129: 147-155.
- [27] DENG Yong, LI Wei-guo, SHAO Jia-xing, et al. A novel theoretical model to predict the temperature-dependent fracture strength of ceramic materials[J]. *Journal of the european ceramic society*, 2017, 37: 5071-5077.
- [28] LI Ying, LI Wei-guo, ZHANG Xian-he, et al. Modeling of temperature dependent yield strength for stainless steel considering nonlinear behavior and the effect of phase transition[J]. *Construction and building materials*, 2018, 159: 147-154.
- [29] MA Jian-zuo, LI Wei-guo, ZHANG Xian-he, et al. Tensile properties and temperature-dependent yield strength prediction of GH4033 wrought superalloy[J]. *Materials science & engineering: A*, 2016, 676: 165-172.
- [30] 李卫国, 邵家兴, 寇海波, 等. 材料高温力学性能理论表征方法研究进展[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(2): 93-123.
- LI Wei-guo, SHAO Jia-xing, KOU Hai-bo, et al. Research progress on the theoretical characterization methods for the high-temperature mechanical properties of material[J]. *Chinese journal of solid mechanics*, 2017, 38(2): 93-123.
- [31] 闫光远. TiSiN 涂层的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- YAN Guang-yuan. Fundamental research on preparation and properties of TiSiN coating[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [32] 令利增. 变形及残余应力对金属镀层力学性能的影响[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2009.
- LING Li-zeng. The effect of deformation and stress on mechanical properties of electrodeposited metal[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2009.
- [33] 孔德军, 张永康, 朱伟, 等. ZrO₂ 热障涂层残余应力分析[J]. *材料热处理学报*, 2008, 29(1): 128-132.
- KONG De-jun, ZHANG Yong-kang, ZHU Wei, et al. Study on residual stress of ZrO₂ thermal barrier coating [J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2008, 29(1): 128-132.
- [34] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学数据手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang. Handbook of inorganic thermodynamic data [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1993.
- [35] BEEGAN D, LAUGIER M T. Application of composite hardness models to copper thin film hardness measurement [J]. *Surface & coatings technology*, 2005, 199(1): 32-37.
- [36] PUCHI-CABRERA E S, STAIA M H, IOST A. Modeling the composite hardness of multilayer coated systems[J]. *Thin solid films*, 2015, 578: 53-62.