文章编号: 1000-8608(2006)S-0S60-06

多层陶瓷涂层厚度配比应力场有限元分析

吴振强^{1,2},夏 原^{*1},李 光¹,徐方涛^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所,北京 100080;
 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:钢基铝层经等离子体电解氧化技术陶瓷化后,可在钢表面形成多层体系结构的陶瓷涂层. 采用有限元方法,对不同厚度配比的复合涂层在均布接触载荷作用下的应力分布进行了研究.结 果表明:铝层的存在可明显缓解界面处的剪应力.同时,铝层厚度增加,也使表面拉应力增大; Al₂O₃ 层决定着涂层内最大剪应力距离表面的距离,增强了涂层表面支撑能力,可减缓表面拉应 力值.特别,当 Al₂O₃ 层与 Al 层的厚度相等时,Al₂O₃/Al 界面处的剪应力最小;FeAl 层对表面 应力和界面应力影响较小.因此,当选择较厚陶瓷层和较薄铝层时,涂层内将具有较优的表面和 界面应力分布状态,从而可提高涂层力学性能.

关键词:厚度配比;多层涂层;界面应力;有限元方法 中图分类号:TG174.4 文献标识码:A

0 引 言

等离子体电解氧化(plasma electrolytic oxidation, PEO),又称为微弧氧化,是一种可直 接在 Al、Mg、Ti 等轻金属表面原位生长陶瓷层 的新技术^[1,2].近年来,将 PEO 与其他表面技术 复合应用于钢铁表面处理方面得到广泛关注,如 热喷涂/微弧氧化^[3,4]、等离子溅射/微弧氧化^[5]、 热浸铝/等离子电解氧化(HDA/PEO)复合技 术^[6,7]等.文献[6、7]研究表明:钢基铝层陶瓷化 复合涂层为多层的涂层结构,陶瓷层主要由致密 的 γ -Al₂O₃、 α -Al₂O₃和莫来石相组成,硬度可达 1 800 Hv.文献[4]对热喷涂/微弧氧化复合涂层 性能进行了测试,结果显示表面陶瓷涂层显著增 强了基体材料的抗磨损、耐腐蚀、耐高温等性能.

从基体到表面,复合涂层的硬度、弹性模量 和塑性变形能力等力学特性差别很大.特别,由 于中间塑性铝层的存在,不能采用成分梯度的概 念对该复合涂层体系进行设计.目前,对该复合 涂层体系结构设计和性能优化存在较大的盲目 控. 因此,对复合涂层的厚度配比关系进行准确 描述并对其进行设计成为钢基铝层陶瓷化技术 研究的关键.

有限元方法在涂层优化设计^[8]、应力分 析^[9~13]、涂层失效分析^[12]等多方面得到广泛应 用.本文采用有限元方法,对不同厚度配比关系 的复合涂层在均布接触载荷作用下的应力分布 进行研究,揭示涂层各分层在外载荷作用下的功 能特性,对涂层厚度配比关系进行分析.

1 有限元模型建立

1.1 厚度配比图

钢基铝层陶瓷化涂层截面结构如图 1(a)所示,从基体到表面由 FeAl 层、Al 层和 Al₂O₃ 层组成,形成了特殊的分层结构,由此可建立如图 1(b)所示的厚度模型.为描述方便,按照位置,从涂层表面到基体依次命名为表面、界面 1 (Al₂O₃/Al)、界面 2(Al/FeAl)、界面 3(FeAl/基体).用 ε , ζ , η 分别表示 Al₂O₃ 层、Al 层和 FeAl 层的厚度比,其值等于各分层厚度与涂层总厚度

收稿日期:2006-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572141).

作者简介: 吴振强(1979-), 男, 博士生, E-mail: wuzq@imech. ac. cn; 夏 原*(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, E-mail: xia@imech. ac. cn.

的比值,3个厚度比之间满足如下关系式:

增刊

$$\varepsilon + \zeta + \eta = 1 \tag{1}$$

如图 1(c)所示,借鉴三元相图中成分三角形的表示方法,用一个等边三角形表示复合涂层的厚度 配比关系,称之为涂层厚度配比图.图形内任一 点均代表一个厚度配比关系的涂层体系,如点 *O*.



如图 2 所示,连接三角形各边界中点,可把 厚度配比图划分为 4 个区域: $Z_1 ~ Z_4$. Z_1 为 FeAl 层厚度占主导的区域, Z_2 为 Al 层厚度占主 导的区域, Z_3 为 Al₂O₃占主导的区域, $m Z_4$ 表示 各分层厚度较为均衡的区域.



图 2 厚度配比图区域划分



1.2 有限元模型

选取 45 个不同厚度配比关系的典型涂层体 系,对应位置点在厚度配比图中分布如图 3 所 示,分别建立每个涂层体系的有限元模型(如图 4),计算在接触载荷下,涂层表面应力和界面应 力的分布情况,把其最大值作为该涂层体系的厚 度配比应力值.



图 3 典型的涂层体系位置

Fig. 3 Locations of the typical coatings systems

图 4(a)为涂层承受均布接触载荷的情况, P₀为接触载荷,a为载荷接触半径,涂层的总厚 度保持不变,其值为 100 μm. 图 4(b)为平面应 变有限元模型的网格划分情况,模型长度和宽度 分别为 30a 和 20a;在接触区域附近进行网格细 化,单元总数为 73 000 个,涂层厚度方向划分为 40 个单元.在边界 BC 施加 x 向和 y 向位移约 束,其他为自由边界.本文是对复合涂层进行有 限元弹性分析,取 P₀ 为 100 MPa, a 为 250 μm, 模型其他参数如表 1 所示.



图 4 涂层有限元模型 Fig. 4 FEM model of CCAS coatings

表1 复合涂层有限元模型参数

Tab. 1 Parameters of multilayer coating FEM model

	E/GPa	<u>ب</u>
钢基体	210	0.28
FeAl 层	259	0.30
Al 层	70	0.33
Al ₂ O ₃ 层	, 390	0.30

2 计算结果与分析

在摩擦磨损环境中,陶瓷涂层的使用寿命经 常不依赖于传统的材料磨损,而是取决于涂层的 剥落(adhesive failure)或涂层的断裂(cohesive failure).涂层脱落是由界面应力的升高引起的, 而涂层的断裂是由于涂层内部或表面应力引起 的^[11,12].脆性的陶瓷涂层抗压能力较强,而抗拉 能力较弱,当表面的拉应力超过断裂强度就会在 涂层表面产生裂纹,过大的界面应力导致涂层在 界面处剥落.因此,本文将重点研究涂层表面和 界面处的应力变化.

2.1 涂层表面最大拉应力分布

图 5 显示了在接触载荷下,表面最大拉应力 值在厚度配比图中分布情况. 从图中可知表面 拉应力 σ_{xx} 的最大值位于铝层厚度较大的 Z₂ 区 域,特别在靠近边界 BF 和顶点 B 附近,其峰值可 达 41.1 MPa;边界 AC、AE 附近区域的拉应力值 较小,其值低于 10 MPa; 应力等直线的分布近似 与边界 AC 平行,从边界 AC 到顶点 B,即铝层厚 度增加方向,应力值增幅较大,可看出在复合涂 层体系牢,铝层厚度变化对涂层表面拉应力有很 大影响.可见,由于铝层的强度和承载能力较低, 当铝层较厚时,不能给陶瓷层提供足够的承载能 力,陶瓷层易发生变形而引起表面拉应力增大. 而当铝层厚度一定时,FeAl 层和 Al₂O₃ 层的厚 度比变化对表面拉应力影响较小.



图5 厚度配比表面拉应力 σ== 分布图

Fig. 5 Distribution of maximal surface tensile stress in thickness-ratio diagram

2.2 涂层内最大剪应力分布

图 6 是在接触载荷下,涂层内的最大剪应力 τ_{xy} 在厚度配比图中的分布情况,由图 6 可知,涂 层厚度体系的改变,对涂层内最大剪应力影响不 是很大,其值介于 30~40 MPa,最大值位于点 F 附近.





图 7 是涂层内剪应力 τ_{xy} 最大值距离涂层表 面的距离分布图.由图 7 可知,厚度配比对涂层 内最大剪应力值距离表面的距离影响较大,等值 线分布约与边界 AB 平行,可见 Al₂O₃ 层厚度比 是影响最大剪切应力位置的关键因素.这是由 于铝层具有较强的变形能力,可缓解界面应力, 复合涂层内剪应力场以 Al₂O₃/Al 界面划分为两 个区域,剪应力最大值位于靠近表面的陶瓷层 内,随 Al₂O₃ 层厚度比的增加,最大剪应力会向 涂层内部移动.



图7 涂层内最大 t_{xy} 距离涂层表面距离 Fig. 7 Distance of the maximal t_{xy} from the surface

2.3 界面剪应力分布

界面命名如图 1(b) 所示. 在绘制界面剪应 力分布图时,由于位于涂层厚度配比图中顶点的 厚度体系只存在一个界面,规定界面 1~3 处的 应力值都等于该界面的应力值;位于厚度配比图 中边界上的厚度体系存在内外两个界面,此处规 定界面 1(Al₂O₃/Al)和界面 2(Al/FeAl) 处的应 力值等于外界面的应力值,而界面 3(FeAl/基 体)等于内界面的应力值.

S 63

界面应力是引起涂层剥落的主要因素,图 8、 图 9 显示了接触载荷下界面处最大剪应力值在 厚度配比图中的分布规律.由图可知,在边界 AC 附近,不包含铝层或铝层厚度较小的涂层体 系在界面具有较大的剪应力值,而顶点 B 附近区 域界面处的剪应力值较小,可见铝层的存在可大 大减缓界面处剪切应力.



- 图 8 界面 1(Al₂O₃/Al)处最大剪应力 τ_{xy} 分布
- Fig. 8 Distribution of maximal shear stresses τ_{ry} at Al₂O₃/Al interface



- 图 9 界面 3(FeAl/基体)处最大剪应 力 r_{xy} 分布
- Fig. 9 Distribution of maximal shear stresses τ_{rrr} at FeAl/substrate interface

由图 8 可知, Al₂O₃ 层与铝层厚度之比对界 面 1(Al₂O₃/Al)处剪应力影响较大,特别当两者 的厚度比约为 0.5 时,界面 1 处的剪应力值最 小,其值约为 22.1 MPa;随铝层厚度比减小,其 值逐渐增加,边界 AC、界面 1 处剪应力值最大, 约为 31.8 MPa. 而 FeAl 层的厚度对界面 1 处的 剪应力影响较小.界面 2 处的剪应力值介于界面 1 和界面 3 之间,最大值在边界 AC 附近,与 FeAl 层和 Al₂O₃ 层厚度之比相关,增大铝层厚 度会减小界面 2 处的剪切应力.

由图 9 知,在涂层厚度配比图中,界面 3 处 的剪应力变化幅值变化不大,为 28.2~31.9 MPa,最大值在边界 AC 附近,最小值在位于边界 CB 的中部附近,随 FeAl 厚度的增加,界面 3 处 的剪切应力会增大.在 FeAl 层占主体的 Z₁ 区 域,界面 3 的剪应力值较大.

通过以上计算和分析,可知当承受均布接触 载荷时,钢基铝层陶瓷化复合涂层中各分层均发 挥着特定的功能作用.

3 结 论

(1)中间铝层的存在可缆解涂层界面处的 剪切应力,同时也使涂层表面的拉应力增大.

(2) Al₂O₃层决定着涂层内最大剪应力距离 表面的距离,Al₂O₃层厚度增大,最大剪应力向涂 层内部偏移.同时,Al₂O₃层可增强涂层支撑能 力,减缓涂层表面的拉应力.当 Al₂O₃层与 Al 层 的厚度相等时,Al₂O₃/Al 界面处的剪应力最小.

(3) FeAl 对涂层表面和界面应力影响幅度 较小,当减小 FeAl 层厚度时,会部分减缓 FeAl/ 基体界面处剪应力值.

因此,对钢基铝层陶瓷化复合涂层来说,当 选择较厚的陶瓷层厚度和较薄的铝层与 FeAl 层 时,涂层体系结构内将会呈现较优的表面和界面 应力分布状态,可有效预防涂层表面裂纹和界面 裂纹的产生,从而提高涂层的服役性能.

参考文献:

- [1] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A. Plasma electrolysis for surface engineering [J]. Surf Coat Technol, 1999, 122:73-93
- [2] 关永军,夏 原. 等离子体电解沉积的研究现状

[J]. 力学进展, 2004, 34(2):237-250

- [3] LAZAREV V B, SANYJIN V P, SAAKIYAN L S, et al. The study of steel of aluminium coatings on steel, oxidized by micro-arc method [J]. Izvestiya Akademii Nauk SSSR Neorganicheskie Materialy, 1991, 27(4): 741-746
- [4] GU Wei-chao, SHEN De-jiu, WANG Yu-lin, et al. Deposition of duplex Al₂O₃/aluminum coatings on steel using a combined technique of arc spraying and plasma electrolytic oxidation [J]. Appl Surf Sci, 2006, 252:2927-2932
- [5] EFREMOV A P. Composite coating for protecting carbon steel stress corrosion failure [J]. Protection of Metals, 1989, 25(2):176-180
- [6] YU Sheng-xue, XIA Yuan. Formation and structure of composite coating of HDA and micro-plasma oxidation on A₃ steel [J]. Trans of Nonferrous Metals Soc of China, 2004, 14(Suppl. 2):310-314
- [7] 解世乐,王从曾,寇斌达,等. 碳钢热浸铝及微弧氧化研究 [J]. 轻合金加工技术,2003,**31**(9):35-38
- [8] UHLMANN E, KLEIN K. Stress design in hard coatings [J]. Surf Coat Technol, 2000, 131:448-451
- [9] BENNANI H H, TAKADOUM J. Finite element model of elastic stress in thin coatings submitted to applied forces [J]. Surf Coat Technol, 1999, 111(1):80-85
- [10] DJABELLA H. Finite element comparative study of elastic stresses in single, double layer and multilayered coated systems [J]. Thin Solid Film, 1993, 235:156-162
- [11] FAGAN M J, PARK S J, WANG L. Finite element analysis of the contact stresses in diamond coatings subjected to a uniform normal load [J]. Diamond Relat Mater, 2000, 9(1):26-36
- [12] DJABELLA H, ARNELL R D. Finite element analysis of contact stresses in an elastic coating on an elastic substrate [J]. Thin Solid Film, 1992, 213:205-219
- [13] 吴振强,夏 原,关永军. 铝层对热浸铝/等离子体 电解氧化复合涂层界面应力的影响 [J]. 材料热处 理学报,2006,27(2):103-107

FEM analysis of stresses field in multilayer ceramic coatings of thickness-ratio

WU Zhen-qiang^{1,2}, XIA Yuan^{*1}, LI Guang¹, XU Fang-tao^{1,2}

(1. Inst. of Mech., Chin. Acad. of Sci., Beijing 100080, China;2. Graduate School, Chin. Acad. of Sci., Beijing 100049, China)

Abstract: Multilayer ceramic coatings were formed on aluminized steel by plasma electrolytic oxidation technology. The effect of thickness-ratio on the stress field of multilayer coatings subjected to uniform normal contact load was investigated by using finite element method (FEM). As a result, interfacial stress is obviously reduced by Al layer. Meanwhile, with thickness of Al layer increasing, surface tensile stress also increases. Al₂O₃ layer is the main factor that affects the location of maximal shear stress within coatings. Moreover, thicker Al₂O₃ layer improves the coating supporting performance and lessens tensile stress at the surface. Especially, shear stress at the Al₂O₃/Al interface is minimal as Al₂O₃ layer and Al layer have the same thickness-ratio. Surface and interfacial stresses are slightly affected by FeAl layer. Therefore, when choosing thick ceramic layer and thin Al layer, there are appropriate stress distributions at surface and interfaces, and the mechanical properties of coatings can be strengthened.

Key words: thickness-ratio; multilayer coating; interfacial stress; finite element method