

人工机械心瓣热解碳/石墨界面结合强度分析

韦静, 张建辉

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 研究人工心瓣热解碳涂层与基体结合强度的影响因素, 从而分析提高人工心瓣寿命的途径。**方法** 通过改进的剪切试验法, 得到人工机械心瓣热解碳涂层/石墨基体的平均界面剪切结合强度。利用有限元分析软件 ANSYS 建立三维模型, 对人工机械心瓣热解碳涂层/石墨基体的界面剪切应力进行分析, 将分析结果与试验结果进行对比。利用 ANSYS 验证不同涂层厚度以及不同涂层弹性模量的情况下, 界面剪切应力的变化情况。**结果** 试验所得的平均界面剪切结合强度为 5.535 MPa, 有限元分析得到的平均结合强度值为 5.98 MPa。随着涂层厚度的增加, 涂层与基体结合强度降低; 随着涂层弹性模量的增加, 涂层与基体结合强度增大, 但弹性模量并非越大越好, 应有一个合适的值。**结论** ANSYS 分析是准确的。制备热解碳涂层时, 应尽量薄一些, 热解碳的弹性模量相对石墨应尽量大一些。

关键词: 人工机械心瓣; 热解碳涂层; 石墨; 界面结合强度; 有限元分析

中图分类号: TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)06-0037-06

Analysis of Interfacial Adhesive Strength of Pyrolytic Carbon-Graphite for Artificial Mechanical Heart Valves

WEI Jing, ZHANG Jian-hui

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the factors influencing the bonding strength of the coating and the substrate to figure out a method to increase the lifetime of Artificial Mechanical Heart Valves. **Methods** The interfacial adhesive strength of pyrolytic carbon-graphite for Artificial Mechanical Heart Valves was tested by the improved shear test. The finite element analysis software ANSYS was used to complete a three-dimensional analysis of interfacial shear stress of pyrolytic carbon-graphite, and the results were compared with the experimental results so that the accuracy of ANSYS analysis could be verified. ANSYS was used to analyze the differences of interfacial adhesive strength with different thicknesses of coating and elasticity modulus. **Results** The average interfacial adhesive strength was 5.535 MPa according to shear test, while the value was 5.98 MPa as calculated by ANSYS. The interfacial strength decreased as the thickness of Pyrolytic coating increased, and increased as the coating elastic modulus increased,

收稿日期: 2014-08-09; 修订日期: 2014-08-30

Received: 2014-08-09; Revised: 2014-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(50975070); 浙江省自然科学基金(LY12E05002)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (50975070) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (LY12E05002)

作者简介: 韦静(1989—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 主要研究人工机械心瓣热解炭涂层/石墨基体结合强度。

Biography: WEI Jing (1989—), Female, from Jiangsu, Master student, Research focus: interfacial adhesive strength of pyrolytic carbon coating and graphite substrate used for artificial mechanical heart valves.

通讯作者: 张建辉(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为医疗器械。

Corresponding author: ZHANG Jian-hui (1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: medical apparatus.

but the elastic modulus value was not the higher the better, and there should be a proper value. **Conclusion** The ANSYS analysis was accurate. The Pyrolytic carbon coating should be as thin as possible and the elasticity modulus should be larger than that of Graphite.

KEY WORDS: artificial mechanical heart valves; pyrolytic carbon; graphite; interfacial adhesive strength; finite element analysis

人工机械心瓣是植入心脏内代替人体心脏瓣膜的人工器件,具有天然心脏瓣膜功能。一旦植入人体,一年需要启闭四千万到五千万次,输送血液总量高达四千万吨^[1],并且需在这样的环境中持续工作数十年。人工机械心瓣瓣片是在石墨基体上通过化学气相沉积法涂覆热解碳制得,涂层与基体的界面结合良好与否在很大程度上决定着材料的服役寿命,在相同的外界载荷下,界面强度越高,界面韧性越好,就意味着抵抗裂纹产生和扩展的能力越强,涂层越不易从基体上剥落,从而材料的使用寿命越长^[2]。因此,热解碳涂层与石墨基体之间的良好结合是保证人工机械心瓣正常工作的重要条件。

国内外对于人工机械心瓣瓣片的研究基本集中在沉积工艺、微观结构和表面改性等方面,对于热解碳涂层与石墨基体的结合强度鲜有报道。涂层与基体材料间的结合有多种形式,目前还没有单一的表征参量和表征方法能够准确地表征涂层与基体的结合强度^[2]。实际的结合强度可以由两种方式表示:一是力的形式,即涂层从基体上分离时单位面积上所需的最大力;二是能量的形式,即涂层从基体上分离时单位面积上所需的能量^[3]。常用的测量方法有粘接拉伸法、剪切法、划痕法等。粘接拉伸法受胶粘剂的影响,当涂层与基体的结合强度大于胶粘剂强度时,就无法使涂层从基体上剥离。划痕法已有商业化仪器,但是只适用于较薄的涂层,并且其力学模型尚不清晰^[3]。剪切法非常适用于各类厚涂层/基体材料,对于十分薄的涂层(纳米至十几微米)可能无法实施^[2],并且传统的剪切法需将涂层涂覆在圆形试样上,样品制备比较麻烦。文中采用改进的剪切试验法测定热解碳涂层与石墨基体之间的剪切结合强度,并利用有限元软件 ANSYS 进行模拟分析,结合不同的热解碳涂层厚度以及不同的热解碳涂层弹性模量进行比较。

1 热解碳涂层/石墨基体界面结合强度测试

1.1 试样制备

用细砂纸对石墨材料进行手工抛光,去除加工痕

迹,制成直径约 25 mm、厚度约 1.34 mm 的圆片型基体。由于基体需要在反应器中不断翻腾使涂层涂覆均匀,基体若过大、过重,会坠落于反应器底部,因此基体直径较小,厚度较薄。

采用准稳态流化床化学气相沉积工艺,以丙烷为碳源,硅烷为硅源,氩气为稀释气体和载气,氧化锆空心球为床层粒子,在石墨圆片基体上沉积得到低温各向同性热解碳材料。热解碳涂层沉积到约 1 mm 后停炉,随炉冷却至室温后出炉。

沉积试样经金刚石低速切割,表面进行研磨、抛光处理,制成 3.14 mm×5.9 mm×14.9 mm 的长方体试样,两侧涂覆的热解碳涂层厚 0.9 mm。

1.2 测试方法

考虑到涂层与基体均属于脆性材料,采用改进的剪切试验法评定热解碳涂层/石墨基体的结合强度^[4],结合强度以界面开裂时的界面剪切应力来表征。改进的剪切试验法如图 1 所示^[5],其中下夹具固定,上夹具向下运动施加与涂层/基体结合面平行的载荷,试样与下夹具通过胶粘剂固定^[5]。所选用的胶粘剂为 2178AB 胶,经 6 h 固化后,能达到的最大剪切强度为 24 MPa。

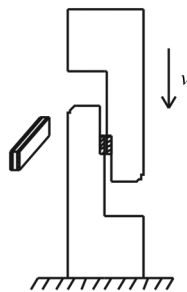


图 1 改进剪切试验法示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the improved shear test

由于试样几何形状及尺寸的限制,夹具由自行设计。夹具材料选用 45 钢,考虑到夹具加工的便利性与装载时的对中性,上下两个夹具的形状及尺寸一致。零件图及实体图如图 2 所示。台阶的加工深度为 0.9 mm,与两侧涂层的厚度一致。第一段加工平面与第二段加工平面存在 5 mm 的长度差,确保若仪器将涂层完全剪切下来时有一段缓冲距离,避免损伤

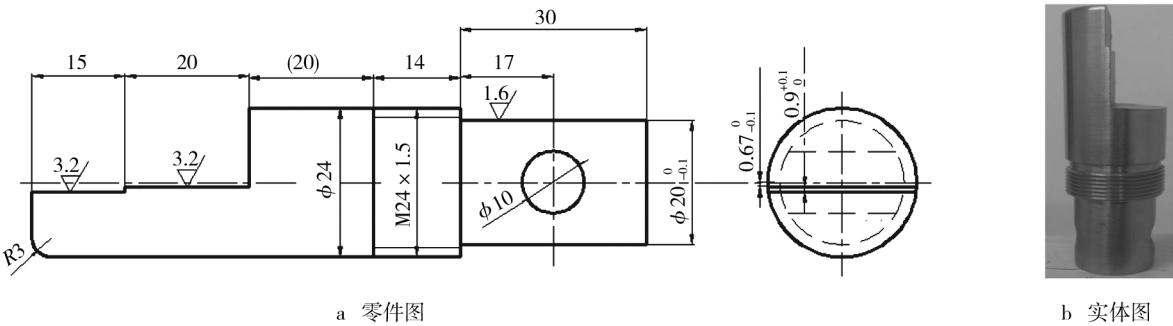


图 2 夹具
Fig. 2 The jig

仪器传感器。

1.3 测试过程及结果分析

在瑞格尔 3010 电子万能材料试验机上进行剪切试验,仪器的加载速度为 1 mm/min。图 3 为试样固定及加载的照片。

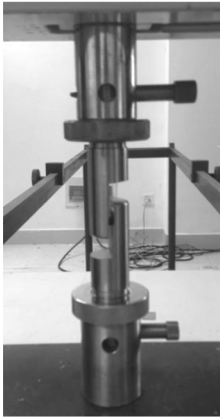


图 3 试样固定及加载
Fig. 3 The stationary and load for sample

夹具通过销钉、螺纹螺帽与仪器固定,试样通过胶粘剂与下夹具固定,并通过上下夹具的夹紧力进行水平方向的固定。试验过程中的位移-载荷曲线如图 4 所示。由图 4 可知,上夹具向下运动一段距离与试样接触后,载荷逐渐上升,达到最大载荷时,界面开裂,此时可听到明显的开裂声音,随后载荷逐渐减小。载荷的峰值即为界面开裂的临界载荷。

图 5 为样品开裂后的照片,可以看出热解碳涂层与石墨基体的界面处明显开裂,但涂层并未完全从基体上剥落。

热解碳涂层/石墨基体界面的平均剪切结合强度 τ_{ave} 的计算公式^[6-7]为:

$$\tau_{ave} = \frac{F_c}{S}$$

(1)

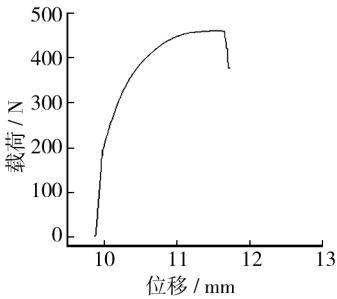


图 4 试样位移-载荷曲线
Fig. 4 The displacement-load curve of the sample

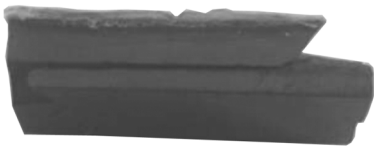


图 5 试样界面开裂实物图
Fig. 5 The picture of the sample with a crack in the interface

式中: F_c 为界面开裂的临界载荷; S 为热解炭涂层/石墨基体结合面面积。试验得到界面开裂的临界载荷及剪切结合强度,见表 1。测试所得的是界面开裂时的临界载荷,此时界面涂层还未完全从基体上剥落,因此公式(1)算得的涂层/基体界面平均剪切结合强度应小于实际剪切结合强度。

表 1 热解碳涂层/石墨基体结合强度数据
Tab.1 The data for the interfacial adhesive strength of Pyrolytic carbon/Graphite

试样 编号	临界载 荷 F_c /N	临界载荷 均值 \bar{F}_c /N	平均剪切结合 强度 τ_{ave} /MPa	平均剪切结合强 度均值 $\bar{\tau}_{ave}$ /MPa
1	461.43	468.65	5.39	5.535
2	475.87		5.68	

2 有限元分析

2.1 有限元模型建立

采用三维有限元模型进行计算,主要讨论热解碳涂层/石墨基体界面的剪切应力分布情况。热解碳涂层与石墨基体通过粘结的结合方式作为一个整体分析^[8-11],由于仅关心涂层与基体剥离之前的应力,所以只考虑弹性分析。热解碳与石墨材料的性质见表 2^[1]。计算中采用 20 节点三维块体单元。为了提高计算精度,在涂层/基体界面处采用较细的网格划分。在计算过程中,为了避免接触分析引起的非线性问题,将电子万能材料试验机传递的力简化为作用在左侧涂层上方的均布载荷^[11]。均布载荷 p 由公式(2)计算,算得其值为 35 MPa。

$$p=\frac{F_c}{A}$$

(2)

式中: F_c 为界面开裂时的临界载荷; A 为载荷施加面的面积。

表 2 热解碳与石墨的性质参数

Tab.2 The property parameters of Pyrolytic carbon and Graphite

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
热解碳	30.2	0.21	2.12
石墨	12	0.15	1.80

计算过程中采用的边界条件为:1)假定右侧涂层侧面 X,Y 方向位移为零;2)假定左侧涂层侧面 X 方向位移为零;3)假定右侧涂层下表面 Y 方向位移为零。定义左侧涂层与基体界面沿着 Y 方向由上至下为路径 1。

2.2 有限元分析结果

通过对模型的计算,得到界面的剪切应力分布云图,见图 6a。再运用 Origin 对界面剪切应力数据进行处理,得到沿路径 1 的剪切应力分布曲线,见图 6b。由图 6b 可以看出,界面上的剪切应力沿路径 1 呈递减趋势,最大剪切应力为 10.23 MPa,发生在界面顶端,大于试验所得的平均界面剪切结合强度 5.535 MPa。利用 Origin 对沿路径 1 的剪切应力曲线积分求平均值^[9],得到平均值为 5.98 MPa,与试验所得的平均值相差 0.445 MPa,在误差允许的范围内。

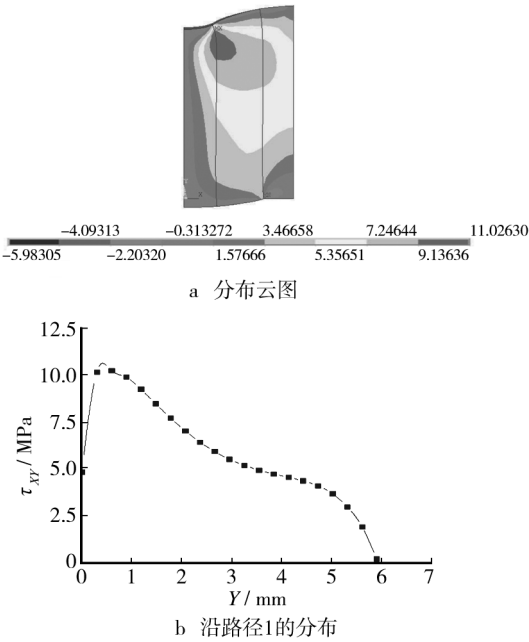


图 6 热解碳涂层-石墨基体界面剪切应力分布

Fig.6 The distribution of interfacial shear stress on the interface of pyrolytic carbon coating-graphite substrate

综合分析,可以确定该有限元模型的准确性。通过分析界面上剪切应力的分布曲线,综合考虑试验得出的结合强度值以及有限元分析得出的结合强度峰值,可以推测,实际的热解碳涂层/石墨基体剪切结合强度能达到 10 MPa 左右。

2.3 涂层厚度对涂层/基体界面剪切应力分布的影响

改变涂层厚度,使其由 0.1 mm 增至 1.3 mm,递增值为 0.2 mm,研究界面剪切应力随涂层厚度的变化。如图 7 所示,涂层厚度越小, Y 在 1.0 ~ 5.9 mm 之间的剪切应力分布越均匀,最大剪切应力皆出现在界面上端。

图 8 为界面最大剪切应力及界面平均剪切应力随涂层厚度的变化曲线。可以看出,随着涂层厚度的增加,界面平均剪切应力近似呈直线上升,最大剪切应力增大趋势也较明显,表明界面剪切应力受涂层影响较明显,涂层越厚,所受的外力传递至界面的效果越明显。涂层的厚度增加,其所允许的弹性应变就减小,更加容易在连接较为薄弱的界面处形成裂纹等失效形式。此外,涂层残余应力也对界面结合强度有着重要的影响,只有涂层与基体的结合强度大于涂层的残余应力,才能保证二者有良好的结合。对于基体材料而言,表面残余应力的存在阻碍了裂纹的产生与扩

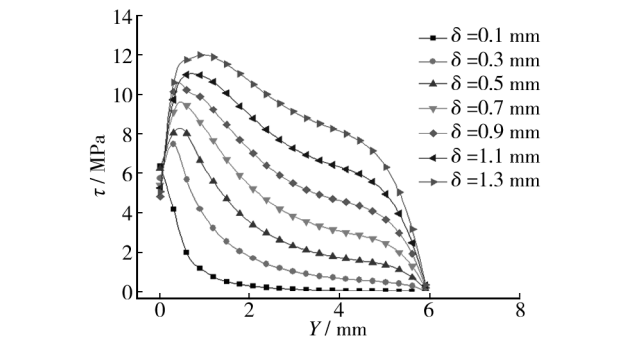


图 7 不同厚度涂层与基体界面沿路径 1 的剪切应力分布
Fig. 7 The distribution curve of interfacial shear stress along path1 with different coating thicknesses

展;但是对于涂层材料而言,无论是压应力,还是拉应力,都会对涂层与基体的结合产生不利影响^[12]。涂层的厚度增加,残余应力也加大^[13],对涂层与基体的结合不利。由文献可知,在实践中,涂层越厚,就越容易剥落,表明其结合强度越差^[13]。综合上述分析,在制备涂层时,应该使涂层尽量薄一些。

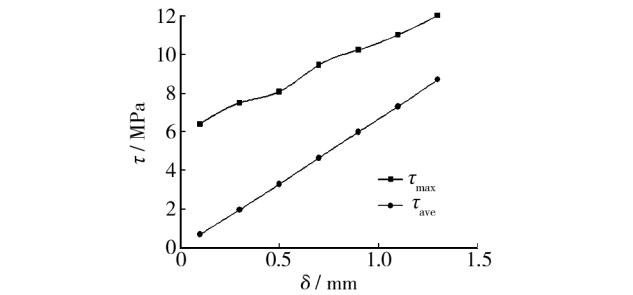


图 8 界面剪切应力随涂层厚度的变化
Fig. 8 Variation of interfacial shear stress with different coating thicknesses

对于整个人工机械心脏瓣膜的使用性能而言,瓣片的厚度决定了其质量。瓣片越厚,则相应地,质量就越大,瓣叶启闭时的能量消耗也越大;瓣片越薄,则其刚度越差,极易变形^[14]。因此,人工机械心瓣热解炭涂层的厚度应该综合考虑界面结合强度、残余应力以及整个瓣膜的使用性能,以此确定一个合适的厚度值。

2.4 涂层性质对涂层/基体界面剪切应力分布的影响

根据文献选取不同弹性模量的热解碳进行分析^[15],石墨基体的弹性模量不变,共选取了如表 3 所示的 5 种涂层/基体系统。通过有限元分析得到各个系统界面剪切应力沿路径 1 的分布曲线,如图

9 所示。

表 3 不同弹性模量热解碳涂层/石墨基体系统
Tab.3 The Pyrolytic carbon coating and Graphite substrate systems with different elasticity modulus

系统	热解碳弹性模量 E_c/GPa	石墨弹性模量 E_s/GPa	E_c/E_s
A	17.0	12	1.42
B	23.0	12	1.92
C	28.3	12	2.36
D	30.2	12	2.52
E	38.6	12	3.22

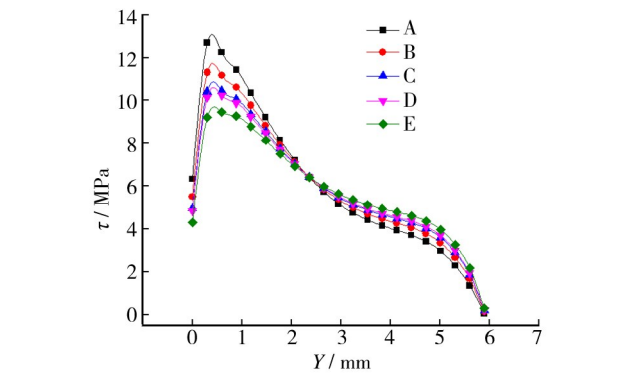


图 9 各系统界面剪切应力沿路径 1 的分布
Fig. 9 The interfacial shear stress distribution along path1 with different systems

由图 9 可以看出,5 个系统的界面剪切应力都沿路径 1 呈递减趋势。随着热解碳弹性模量的增大, E_c/E_s 比值逐渐增大。界面剪切应力曲线的变化逐渐平缓,表明其界面处的剪切应力分布逐渐趋于均匀,对涂层与基体的结合有利。

由图 10 可以看出,随着热解碳弹性模量的增大,平均界面剪切应力缓慢下降,最大剪切应力下降较明显。其中由 C 系统至 D 系统,最大剪切应力下降的趋势稍缓,可以猜测是由于 C 系统与 D 系统热解炭的弹性模量变化值仅为 1.9 GPa,明显小于另外几个系统之间的差值。涂层的弹性模量越大,则其刚度越大,在一定应力作用下发生的弹性形变越小,对界面的结合有利。但是涂层的弹性模量也并非越大越好, E_c/E_s 过大,也就是膜过硬,可能会导致界面处的应力分布不均或者应力峰值过大,对涂层与基体的结合不利^[11]。综合上述分析,对于一定的石墨基体,选择的热解碳涂层材料应有一恰当的弹性模量值。

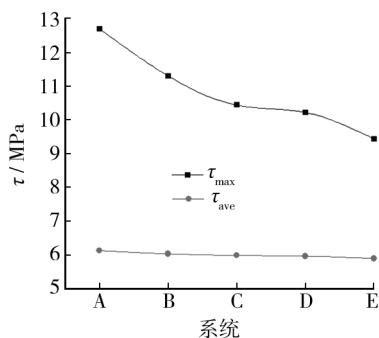


图10 各系统的最大界面剪切应力与平均界面剪切应力

Fig. 10 The maximum and average interfacial shear stress of different systems

3 结论

1) 通过改进的剪切结合强度测试法,利用瑞格尔3010电子万能材料试验机测得热解碳涂层/石墨基体的剪切结合强度为5.535 MPa。

2) 利用ANSYS建立模型,将分析结果与试验数据进行比对,确认了模型的正确性。通过对界面剪切应力分布曲线、最大剪切应力以及平均剪切应力进行分析,认为制备涂层时应尽量使涂层薄一些,涂层的弹性模量相对基体有限度地大一些。

参考文献

- [1] 邢兴. 人工心瓣热解炭力学性能研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [2] 杨班权, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基体材料界面结合强度测量方法的现状与展望[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 67—79.
- [3] 苏修梁, 张欣宇. 表面涂层与基体间的界面结合强度及其测定[J]. 电镀与环保, 2004, 24(2): 6—11.
- [4] 马峰, 蔡珣. 膜基界面结合强度表征和评价[J]. 表面技术, 2001, 30(5): 15—19.
- [5] FERRARIS M, VERNÉE, APPENDINO P, et al. Coating on Zirconia for Medical Applications[J]. Biomaterials, 2000, 21: 765.
- [6] 崔学军, 程平, 张海涛, 等. 涂层与基体界面结合强度测定模型的有限元模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2): 357—361.
- [7] BUSHBY R S, SCOTT V D. Liquid Phase Bonding of Al and Al/Nicalon Composite Using Copper Interlayers[J]. Material Science and Technology, 1993, 9: 417—423.
- [8] 杨金霞. 基体拉伸法测试膜基界面结合力的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] DEHOFF Paul H, ANUSVICE Kenneth J, WANG Zhi-xin. Three-dimensional Finite Element Analysis of the Shear Bond Test[J]. Dent Mater, 1995, 11: 126—131.
- [10] 周伟. 涂层结合强度的试验研究及有限元分析[D]. 衡阳: 南华大学, 2005.
- [11] 程序, 闫静, 王宏宇, 等. 高结合性能涂层与基体界面结合强度测定模型的有限元模拟[J]. 中国制造业信息化, 2010, 39(17): 22—26.
- [12] 孔德军, 张永康, 鲁金忠, 等. 基于XRD的涂层界面结合强度的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1): 259—261.
- [13] 朱晓东, 米彦郁, 胡奈赛, 等. 膜基结合强度评定方法的探讨——划痕法、压入法、接触疲劳法测定的比较[J]. 中国表面工程, 2002, 57(4): 28—31.

- Galvanized Steel [J]. Electroplating & Pollution Control, 2011, 30(2): 26—28.
- [5] SONG Y, MANSFELD F. Development of a Molybdate Phosphate-Silane-Silicate Coating Process Electroplated Steel [J]. Corrosion Science, 2006, 48(1): 154.
- [6] MU Guang-nan, LI Xiang-hong, QU Qing, et al. Molybdate and Tungstate as Corrosion Inhibitors for Cold Rolling Steel in Hydrochloric Acid Solution [J]. Corrosion Science, 2006, 48(2): 445—459.
- [7] 韩克平, 叶向荣, 方景礼. 镀锌层表面硅酸盐防腐膜的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 9(2): 167—169.
- HAN Ke-ping, YE Xiang-rong, FANG Jing-li. Study on Silicate Anticorrosive Coating of the Galvanized Layer [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1997, 9(2): 167—169.
- [8] ROMAN L, BLIDARIU M, CRISTESCU C. Study of Conversion Coating on Zinc Deposition Obtained from Low Pollution Solutions [J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1997, 75(5): 171—178.
- [9] KONG Gang, LU Jin-tang, WU Hai-jiang. Post Treatment of Silane and Cerium Salt as Chromate Replaces on Galvanized Steel [J]. Journal of Rare Earths, 2009, 27(1): 164—167.
- [10] 李鸿宾, 陈建设, 刘辉, 等. 热镀锌表面铈盐钝化 [J]. 材料与冶金学报, 2002(3): 203—205.
- LI Hong-bin, CHEN Jian-she, LIU Hui, et al. Studies on Cerium Nitrate Passivation of Galvanized Steel Surface [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2002(3): 203—205.
- [11] 张洪生, 杨小蕾, 陈熹. 植酸在金属防护中的应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(5): 242—243.
- ZHANG Hong-sheng, YANG Xiao-lei, CHEN Xi. The Application of Phytic Acid in Metal Protection [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(5): 242—243.
- [12] 徐丽萍, 胡丰, 杨兴亮, 等. 镀锌钢板无铬钝化研究新进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(6): 535—538.
- XU Li-ping, HU Feng, YANG Xing-liang, et al. The New Progress of Chromium-free Passivating in Galvanized Steel [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2011, 23(6): 535—538.
- [13] 闫捷, 赵立红, 蒋元力, 等. 镀锌层单宁酸钝化膜的耐蚀性 [J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(8): 32—35.
- YAN Jie, ZHAO Li-hong, JIANG Yuan-li, et al. Corrosion Resistance of Passive Film Converted on Zinc Coating from Tannic Acid System [J]. Electroplating & Finishing, 2011, 30(8): 32—35.
- [14] 李克安. 分析化学教程 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- LI Ke-an. Analytical Chemistry Course [M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [15] 祁景玉. 现代分析测试技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- QI Jing-yu. The Modern Analytical Techniques [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.

(上接第 21 页)

- REN Yong-feng, BI Zong-yue, LI Zhou-bo. Comparison of the Corrosion Rate of 3Cr Steel and Carbon Steel in CO₂ Environment [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 29—31.
- [18] MROWEC K. Study on Sulfidation Mechanism of 30 Steel [J]. Oxidation of Metals, 1985, 23(3/4): 107—137.
- [19] 张兴华, 骆晨, 刘明. AF1410 高强度钢大气腐蚀试验研究 [J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 19—22.
- ZHANG Xing-hua, LUO Chen, LIU Ming. Atmospheric Exposure Test of AF1410 High-strength Steel [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 19—22.
- [20] 汪新衡, 钱书琨, 刘安民. 激光熔覆纳米 Al₂O₃ 颗粒增强 Ni 基金金涂层界面组织和高温热腐蚀性能 [J]. 表面技术, 2013, 42(6): 23—26.
- WANG Xin-heng, QIAN Shu-kun, LIU An-min. Interface Microstructure and High Temperature Corrosion of Nano-Al₂O₃ Particle Reinforced Ni-based Alloy Powder Laser Cladding [J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 23—26.

(上接第 42 页)

- ZHU Xiao-dong, MI Yan-yu, HU Nai-sai, et al. The Discussion of Evaluation Method of Bond Strength between Coating and Substrate—Comparison of Scratch Method and Contact Fatigue Method [J]. China Surface Engineering, 2002, 57(4): 28—31.
- [14] 张勇. 人工双叶机械瓣设计与制造 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- ZHANG Yong. Design and Manufacturing of Bileaflet Artificial Valve [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [15] 颜志齐. 热解石墨 [J]. 碳素工艺与设备, 2002(9): 91—106.
- YAN Zhi-qi. Prolytic Graphite [J]. Carbon Technology and Equipment, 2002(9): 91—106.