

基于数字图像处理的等离子喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层 纳米压痕有限元模拟*

张永昂, 王引真, 冯涛, 郁振其, 李春鹏

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 以等离子喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层为研究对象, 应用数字图像处理技术提取涂层孔隙分布形态, 生成了包含孔隙在内的涂层有限元模型, 并模拟计算了涂层纳米压痕压入过程。通过阈值迭代法、小波变换法和边界图形几何矢量化, 提取了涂层真实微观结构的几何矢量图, 并根据该结构图计算涂层孔隙率为 6.88%。以提取的涂层矢量结构图为有限元模型基础, 模拟纳米压痕试验加载过程, 其载荷-位移曲线与试验曲线匹配性较好, 表明该方法可将涂层微观结构和宏观力学性能结合起来。

关键词: 等离子喷涂; 数字图像处理; 纳米压痕试验; 模拟

中图分类号: TG174.453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)02-0040-05

Simulation of Nanoindentation Tests of Plasma Sprayed NiCr-Cr₃C₂ Coatings Based on Digital Image Processing

ZHANG Yong-ang, WANG Yin-zhen, FENG Tao, YU Zhen-qi, LI Chun-peng

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong)

Abstract: Digital image processing (DIP) technology was used to extract meso-structure of plasma sprayed NiCr-Cr₃C₂ coating and a finite element model including random distribution pores was then built to simulate the nanoindentation test. Image segmentation was processed using grayscale threshold. After that, the edges of pores approximate to the original micrograph were obtained by wavelet transform. Based on this diagram, the calculated porosity was 6.88%. Finally, through geometry vectorization algorithm, the finite element mesh was generated to model the nanoindentation process in consideration of pores. The modeling load-depth curve agrees with with the experimental curve, which indicates the combination of DIP and simulation can be used to link microstructure with macro-mechanical properties.

Key words: plasma sprayed coating; digital image processing; nanoindentation tests; simulation

0 引言

等离子喷涂涂层内随机分布着孔隙及微观裂纹, 这些微观缺陷割裂了涂层的完整性, 使涂层力学性能与块体材料性能如弹性模量, 应力分布等存在较大差异。采用纳米压痕技术测量喷涂涂层的纳米硬度及涂层弹性模量可以更准确地反映微观条件下孔隙及裂纹分布对涂层性能的影响。此

外, 数字图像处理技术可分辨不同性质材料如孔洞、裂纹等并能提取出涂层材料的微观结构特征, 从而保留材料真实的非均质性。基于此的数值计算, 可精确分析上述非均质相对涂层性能的影响。数字图像处理-有限元技术广泛应用于岩石、混凝土、沥青和涂层微观结构的提取和性能计算。

秦武^[1]通过 MATLAB 数字图像处理技术提

收稿日期: 2012-11-01; **修回日期:** 2013-03-22; **基金项目:** * 中国石油大学(华东)研究生创新基金(11CX06064A)

作者简介: 张永昂(1989-), 男(汉), 山东菏泽人, 硕士生; **研究方向:** 材料表面改性与失效

网络出版日期: 2013-03-26 16:02; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130326.1602.012.html>

引文格式: 张永昂, 王引真, 冯涛, 等. 基于数字图像处理的等离子喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层纳米压痕有限元模拟 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 40-44.

取了混凝土骨料和砂浆之间的边界,利用 ABAQUS 软件模拟了圆形和凸多边形骨料模型的四点弯拉和轴拉断裂过程。王端宜^[2]运用数字图像处理技术对沥青混合料的工业 CT 图像进行处理,提取了集料、空隙和胶浆的分布状态,并运用有限元计算了沥青混合料劈裂试验。杨松^[3]通过图像预处理、Canny 算子边缘检测提取了混凝土裂纹信息,结合边界矢量化技术和有限元网格生成技术计算了裂纹区域受力情况。沈伟^[4]基于数字图像处理技术获取了与实际等离子喷涂氧化锆涂层显微组织图片一致的有限元网格模型,并模拟分析孔洞等微观缺陷对裂纹扩展的影响。李辉^[5]借助 MATLAB 软件,采用图像分析法,通过降噪处理、灰度选择、膨胀处理和腐蚀处理计算了等离子喷涂 TiO₂ 涂层孔隙率。Narayanan Ramanujam^[6]通过数字图像处理技术软件提取了等离子喷涂 YSZ(氧化锆)-CoNiCrAlY 涂层中各物相分布,并模拟分析了涂层受 Al₂O₃ 粒子冲蚀时各物相的剥离过程。

文中以等离子喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层为研究对象,考虑涂层真实微观结构及涂层组元的空间分布不均匀性,基于图像数字处理技术提取涂层微观特征信息,获取可导入 ANSYS 软件计算的涂层矢量结构图,模拟对比了纳米压痕过程载荷-压深曲线。

1 试验方法

采用 APS-2000 A 型大气等离子喷涂设备,在 45 钢基体上制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层,喷涂工艺参数为:电压 65 V,电流 500 A,送粉气流量为 6 m³/h,喷涂距离 100 mm。喷涂粉末由先导(益阳)等离子粉末有限公司提供,其粒径为(40±2) μm,质量分数为 20% Ni,5% Cr,杂质含量 < 1.5%,其余为 Cr₃C₂。

采用 V-LUX1000 型原位纳米力学系统对 NiCr-Cr₃C₂ 涂层进行测试,载荷设定为 6 000 μN,其分辨率为 3 nN,位移分辨率为 4×10⁻⁴ nm。纳米硬度和弹性模量分别为 4.04 GPa 及 181.53 GPa,其载荷-位移曲线如图 1 所示。

2 涂层微观结构提取

图 2 为 NiCr-Cr₃C₂ 涂层横截面组织形貌,如图 2 所示,涂层由白色相金属陶瓷、黑色相孔隙

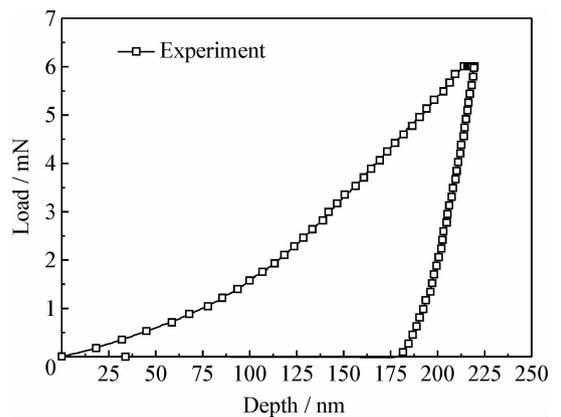


图 1 NiCr-Cr₃C₂ 涂层纳米压痕载荷-压深曲线
Fig. 1 Load-depth curves of the NiCr-Cr₃C₂ coating

和微裂纹构成。为模拟涂层孔隙对纳米压痕试验压入过程的影响,需分割出黑色孔隙相和白色基体材料(陶瓷相和氧化物)。而金相图像是作为物理图像文件储存在计算机中,就其自然格式而言,计算机中的物理图像文件不能直接用来加工与处理,必须先转化为数字图像文件。数字图像处理技术可将研究的物理图像转化为储存在计算机中的数字图像,并运用计算机对图像信息进行分析处理从而得到所需的图像信息。

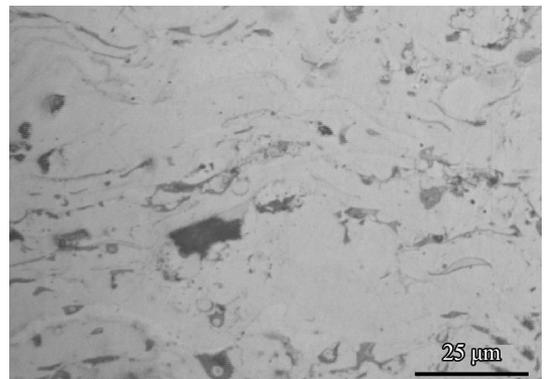


图 2 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的截面组织
Fig. 2 Cross-section morphology of NiCr-Cr₃C₂ coating

2.1 灰度阈值分割

灰度阈值 T 是区分物体和背景像素的门限,大于或等于阈值的像素属于目标物体,其他像素则属于背景。为将目标物体黑色孔隙和白色背景金属陶瓷基体这两种组元分割开来,需设置合适的 T 值将图像分为两部分,得到一个二值图像。

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

式中,1代表白色金属陶瓷基,0代表黑色孔隙。

选取图像的平均灰度值进行迭代运算,以该初始值将图像分割为两类区域,小于初始阈值区域的灰度平均值为 T_0 ,大于初始阈值区域的灰度平均值为 T_1 。以值 $(T_0+T_1)/2$ 为下一步初始迭代阈值开始迭代计算,直至相邻两次阈值不再变化,该值则为最佳阈值。文中通过阈值迭代法所求 $T=167$,将图像分割为二值图像,为提取涂层细观结构提供了高质量图像信息,如图3所示。本例所取视野尺寸面积为 $9.6496 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$,图像共包含 135 142 个像素点,图3黑色孔隙像素个数为 9 301,则可得孔隙率(P)为 6.88%。

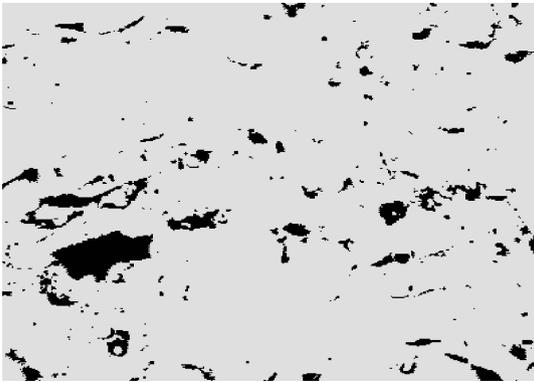


图3 NiCr-Cr₃C₂ 涂层灰度阈值分割图

Fig. 3 Segmented NiCr-Cr₃C₂ coating based on grayscale threshold

2.2 边缘检测

常用的边缘检测算子为 Roberts 算子、Log 算子、Canny 算子^[5],这些算子具有较好的实时性,但这些方法的边缘定位精度往往不够高。小波变换具有检测区域突变的能力,是边缘检测的良好工具,其局部极大值点表征了图像信号的突变点位置,即图像的边缘位置,检测过程如下^[8]。

用 $\theta(x,y)$ 表示高斯平滑函数,令

$$\theta_2(x,y) = \frac{1}{4'}\theta\left(\frac{x}{2'}, \frac{y}{2'}\right) \quad (2)$$

该函数分别对 x, y 求偏导,得小波函数:

$$\begin{cases} \varphi_2^1(x,y) = \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial x} = \frac{1}{4'}\varphi^1\left(\frac{x}{2'}, \frac{y}{2'}\right) \\ \varphi_2^2(x,y) = \frac{\partial \theta(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{4'}\varphi^2\left(\frac{x}{2'}, \frac{y}{2'}\right) \end{cases} \quad (3)$$

任意二维函数 $f(x,y)$ 进行卷积后得

$$\begin{cases} \mathbf{W}_2^1 f(x,y) = f \times \varphi_2^1(x,y) \\ \mathbf{W}_2^2 f(x,y) = f \times \varphi_2^2(x,y) \end{cases} \quad (4)$$

则 $\mathbf{W}_2^1 f(x,y)$ 和 $\mathbf{W}_2^2 f(x,y)$ 构成一组二进小波序列, $j \in \mathbf{N}$ 。

在尺度 2^j 下,梯度矢量的模为

$$\text{Mod}_{2^j} f(x,y) = \sqrt{|\mathbf{W}_2^1 f(x,y)|^2 + |\mathbf{W}_2^2 f(x,y)|^2} \quad (5)$$

其幅角为

$$\text{Arg}_{2^j} f(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{|\mathbf{W}_2^2 f(x,y)|}{|\mathbf{W}_2^1 f(x,y)|}\right) \quad (6)$$

沿着梯度模极大值方向检测小波变换系数模的局部极大值点就可得到图像边缘点。

文中采用基于小波变换的检测算法来确定目标物体边缘。图4中孔隙的闭合分界面由灰度值为1的像素点连接而成,图像清晰可见涂层细观结构及涂层中孔隙等非均质相的实际空间分布。

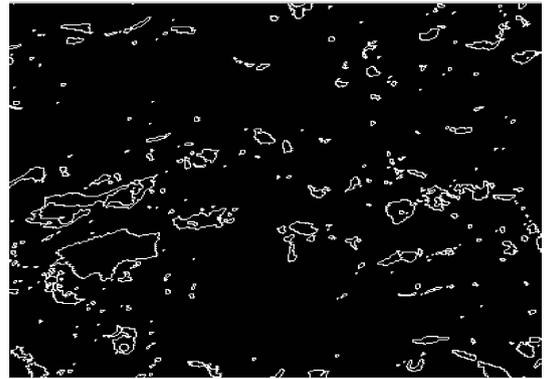


图4 基于小波变换边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection results based on wavelet transform method

3 考虑涂层细观结构的纳米压痕模拟

3.1 材料模型

采用幂强化模型表征涂层材料(不包含孔洞)的弹性,幂强化模型所示材料应力-应变关系如式(7)所示即材料屈服前服从胡克定律,屈服后服从幂强化规律。

$$\sigma = \begin{cases} E \varepsilon & \sigma \leq \sigma_y \\ R \varepsilon^n & \sigma \geq \sigma_y \end{cases} \quad (7)$$

式中 σ_y, n, E, R 分别为 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的屈服强度,应变硬化指数,弹性模量及强度因子。

纳米压痕过程所涉及到的物理变量较多,可利用量纲理论简化不同属性的物理量^[9],直观反映纳米压痕过程参数和被测材料力学性能参数之间的一般规律。

用幂指数模型拟合加载曲线,如式(8)所示:

$$P = P_m \left(\frac{h}{h_m} \right)^x \quad (8)$$

式中 P_m 为最大压入载荷, x 为幂指数, h_m 为最大压入深度。 P_m 和 x 可以由被压材料的基本力学性能、薄膜厚度及最大压入深度之间的函数关系式描述:

$$P_m = \varphi(\sigma_{yf}, n_f, E_f, \nu_f, \sigma_{ys}, n_s, E_s, \nu_s, h_m, h_f) \quad (9)$$

$$x = \Phi(\sigma_{yf}, n_f, E_f, \nu_f, \sigma_{ys}, n_s, E_s, \nu_s, h_m, h_f)$$

式中 ν_f 和 ν_s 分别为涂层和基体泊松比, h_f 为涂层厚度。纳米压痕试验中材料的泊松比对测量结果的影响较小,可固定式中涂层及基体材料的泊松比,此外有限元计算时也可固定 n_s 和 $\frac{\sigma_{ys}}{E_s}$,通过量纲理论可得:

$$\frac{P_m}{E_s h_m^2} = \varphi\left(\frac{\sigma_{yf}}{E_s}, n_f, E_f \frac{E_f}{E_s}\right) \quad (10)$$

$$x = \Phi\left(\frac{\sigma_{yf}}{E_s}, n_f, E_f \frac{E_f}{E_s}\right)$$

运用有限元软件可设定材料具有不同的力学性能参数:屈服强度 σ_y 、弹性模量 E 和应变硬化指数 n ,模拟纳米压痕实验加-卸载过程,即正向分析过程;亦可运用有限元模拟和纳米压痕实验反演分析被测材料的弹塑性性能参数,所推导出的涂层材料应力-应变关系,如式(11)所示。

$$\sigma = \begin{cases} 183 \times 10^3 \varepsilon & \sigma \leq 27.6 \\ 0.272 \times 10^3 \varepsilon^{0.26} & \sigma \geq 27.6 \end{cases} \quad (11)$$

3.2 计算结果

为进行力学计算,必须对上述包含非均质性信息的涂层结构图进行网格划分,首先把离散的边界图形数据转换为几何矢量信息,进而实现有限元网格的生成,采用 PLANE42, TARGE169 及 CONTA171 单元,其中 TARGE169 及 CONTA171 为接触单元,如图 5 所示。涂层网格划分时采用 Q-Morph 自由网格划分。划分网格时主要考虑涂层可能发生的接触区域,与压头接触的材料划分密网格共 4 282 个,远离接触的区域网

格数为 83 073。

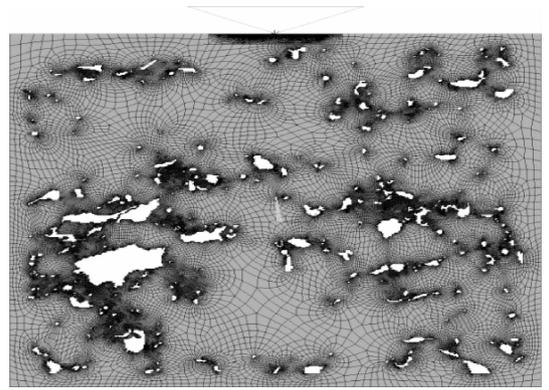


图 5 涂层结构的网格划分

Fig. 5 Calculation model of meshed coating structure

此外,压痕试验所用 Berkovich 压头等效为锥角 70.3° 的圆锥压头,因压头材料弹性模量比涂层高一个数量级,故可认为刚体^[9]。

在试样基底施加位移约束,压头控制节点处施加横向位移约束并施加纵向 220 nm 位移载荷,图 6 为模拟和试验加载曲线对比图。接触分析为高度非线性行为,由于涂层中存在的孔隙导致模拟加载前期有较大的偏差和波动,但加载后期与试验加载过程有较好的匹配性。

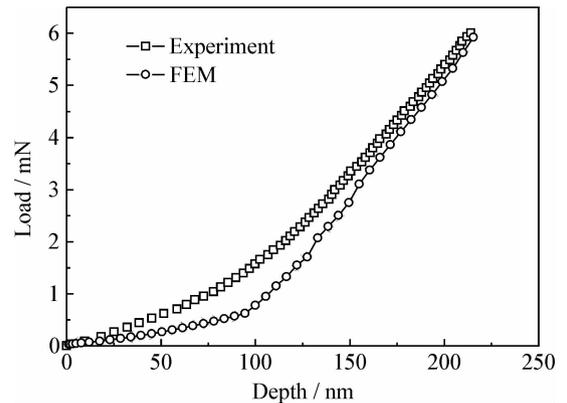


图 6 模拟和试验加载曲线对比图

Fig. 6 Comparison of loading curves between experiment and simulation results

4 结 论

借助数字图像处理技术,通过阈值迭代法进行灰度阈值分割、小波变换法检测目标物体边缘和边界图形几何矢量化,较为精确地提取出等离子喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层中孔隙等目标物体的微观结构特征,生成了包含真实形貌信息的涂层有

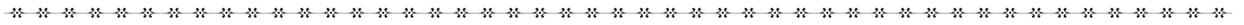
限元模型。在此基础上计算了涂层孔隙率并对纳米压痕压入过程进行了二维弹塑性模拟,所得载荷-压深曲线与试验曲线吻合较好,表明数字图像-有限元方法可有效模拟涂层纳米压痕压入过程。

参考文献

[1] 秦武,杜成斌,孙立国. 基于数字图像技术的混凝土细观层次力学建模 [J]. 水利学报, 2011, 42(4): 431-439.
 [2] 王端宜,吴文亮,张肖宁,等. 基于数字图像处理和有限元建模方法的沥青混合料劈裂试验数值模拟 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(4): 968-973.
 [3] 杨松,邵龙潭,郭晓霞,等. 基于混凝土裂纹数字图像的有限元网格生成 [J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 635-640.
 [4] 沈伟,范群波,王富耻,等. 基于涂层显微组织图片的拉伸实验有限元数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(2): 231-234.

[5] 李辉,纪小健,王银鹏,等. Matlab 图像处理在表征热喷涂涂层结构中的应用 [J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 25-28.
 [6] Ramanujam N, Nakamura T. Erosion mechanisms of thermally sprayed coatings with multiple phases [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(1/2): 42-53.
 [7] 罗军辉,冯平,哈力旦·A. 精通 MATLAB7.0 在图像处理中的应用 [M]. 北京: 机械出版社, 2005: 201-216.
 [8] 王蓉,高立群,柴玉华,等. 综合 Canny 法与小波变换的边缘检测方法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(12): 1131-3.
 [9] 马永,姚晓红,田林海,等. 利用纳米压入的反演分析法确定金属材料塑性性能 [J]. 金属学报, 2011, 47(3): 321-326.

作者地址: 青岛经济技术开发区长江西路 66 号 266580
 中国石油大学(华东)机电工程学院
 Tel: (0532) 8698 3503-8315
 E-mail: zhangyongangjia@163.com



• 学术动态 •

国家发改委公布第二批再制造试点名单

为贯彻落实党的十八大提出的建设生态文明的战略要求,推进循环经济发展,实现再制造产业规模化、规范化发展,发改委于近日公布了第二批再制造试点单位,28 家企业入围,分别是:北京奥宇可鑫表面工程技术有限公司、北京首钢报废机动车综合利用有限公司、长城汽车股份有限公司、唐山瑞兆激光再制造技术有限公司、河北省物流产业集团有限公司、哈飞工业集团汽车转向器有限责任公司、沃尔沃建筑设备(中国)有限公司、采埃孚销售服务(中国)有限公司、上海孚美汽车自动变速箱技术服务有限公司、张家港富瑞特种装备股份有限公司、玉柴再制造工业(苏州)有限公司、江苏新亚特钢锻造有限公司、全兴精工集团有限公司、浙江再生手拉手汽车零部件有限公司、滁州市洪武报废汽车回收拆解利用有限公司、山东能源集团大族激光再制造有限公司、河南飞孟激光再制造有限公司、武汉法利莱切割系统工程有限责任公司、湖南机油泵股份有限公司、湖南博世汽车部件(长沙)有限公司、江西江铃汽车集团实业有限公司、广州市跨越汽车零部件工贸有限公司、广东明杰零部件再制造有限公司、陕西北方动力有限责任公司、大连报废车辆回收拆解有限公司、威伯科汽车控制系统(中国)有限公司、青岛联合报废汽车回收有限公司、三立(厦门)汽车配件有限公司

通知要求,各再制造试点单位要加大投资力度,提升技术装备水平,拓展再制造旧件回收渠道和再制造产品销售网络,尽快形成产业规模。国家优先将试点单位成熟的再制造技术、工艺和设备纳入国家鼓励的相关名录,将符合条件的再制造产品纳入国家再制造产品推广补贴的范围。

(摘自中华人民共和国国家发展和改革委员会 网)