

功能梯度材料表面分形维数的研究

Study on Surface Fractal Dimension of Functionally Gradient Materials

王 鲁¹, 李雪利¹, 王富耻¹, 刘国权²

(1 北京理工大学, 北京 100081; 2 北京科技大学, 北京 100083)

WANG Lu¹, LI Xue-li¹, WANG Fu-chi¹, LIU Guo-quan²

(1 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2 University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要: 研究了等离子喷涂工艺制备的 $ZrO_2/NiCrAl$ 系功能梯度材料, 测量了其水平面与垂直面的分形维数。结果表明, 随着 $NiCrAl$ 含量的升高, 分形维数呈曲线变化, 分形维数与抗弯强度具有较好的对应关系; 在 $NiCrAl$ 含量为 30% 附近存在渗流区域, 抗弯强度值出现突变。对该材料的研究, 初步建立了分形维数与宏观性能之间的关系。

关键词: 功能梯度材料; 分形维数; 抗弯强度

中图分类号: TB333 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 11-0025-03

Abstract: Fractal dimension (D_f) of $ZrO_2/NiCrAl$ functionally gradient materials (FGMs) which was prepared by plasma spraying technology was investigated. The results show that D_f displays curvilinear variety with $NiCrAl$ content increased, and it can be found there is a good corresponding relation between fraction dimension and bending strength. When $NiCrAl$ content is around 30%, there is the percolation phenomena, and the bending strength is obviously increased. The studies set up the relationship between fractal dimension and macroscopical properties.

Key words: functionally gradient materials; fractal dimension; bending strength

对于用材料的微观结构来表征材料的宏观性能这一问题, 分形理论是一种具有极高工程价值的分析方法。用分形维数定量表征功能梯度材料表面微观形貌及其与性能之间的关系是可行的^[1], 随着软件技术发展, 这一方法变得更为准确、简捷, 可以抛弃最初复杂的定量图像分析方法, 使得用微观结构来研究宏观性能具有更高的可实现性。而且, 采用直接观察试样表面的分形特征, 用表面形貌来推断其力学性能, 可省去烦琐的性能测试过程, 提高效率, 降低成本。

本文采用等离子喷涂工艺制备的 $ZrO_2/NiCrAl$ 系功能梯度材料, 测试方法为面积-周长法, 用喷涂表面与垂直于喷涂表面平面的分形维数描述微观形貌与宏观力学性能之间的相互关系, 建立起用分形维数来描述功能梯度材料力学性能的机制。

1 研究方法

1.1 测试系统

采用德国 SIS 公司 analySIS 图像分析系统的 PRO 版本, 该版本具有采集、建档、处理、分析、测量、编程等强大功能, 适于多领域的图像分析工作。采

集后的图像可进行灰度转换、图像编辑、图像几何学变换、各类算法处理等操作。测量时, 光学显微镜与计算机通过 CCD 采集头相连, 在光镜下采集到的显微形貌通过 CCD 直接输入计算机, 再利用 analySIS 对图像进行后期处理。

1.2 理论方法

面积-周长法, 即小岛法 (Slit Island Method)^[2,3] 是一种最普遍的分形测量方法。在材料科学中, 主要用来测量断裂表面。通常, 测量时在样品表面镶样或镀一层 Ni, 然后平行于断口平面用细砂纸磨去一层, 在显微镜下观察时, 被磨掉的发亮部分为“岛”, 而未磨到的地方由于镶样或镀 Ni 发暗, 称为“湖”。随着打磨程度的加深, 材料断口横截面上岛的个数和大小也将不同, 岛的面积和周长存在如下关系:

$$P(\cdot)^{1/D} \propto \rho(\cdot) A(\cdot)^{1/2} \quad (1)$$

对上式两边取对数得:

$$\log P(\cdot) = D \log \rho(\cdot) + (D/2) \log A(\cdot) = \text{const.} + (D/2) \log A(\cdot) \quad (2)$$

式中, A 为面积, P 为周长, D 为分形维数; 在本文中, 将其中一组元看作“岛”, 其余组元作为“湖”, 即

可用测量断口的小岛法来测量平面的分形维数。

1.3 实验方法

每一平面分别选取 12 个不同的区域, 通过测量每一区域下第二相所占的面积和周长, 在面积 (A) - 周长 (P) 对数坐标下, 离散点线性拟合直线斜率的 2 倍即为分形维数。选用的两种材料为 (1) 氧化钼部分稳定氧化锆成分, 7% -8% Y_2O_3 > 98% Y_2O_3 + ZrO_2 。粒度范围 (- 200+ 300) 目 > 70%, - 320 目 < 30%。(2) 镍铬部分, 17%-19% Cr, 5.5% -6.5% Al, 余量 Ni。粒度范围 (- 150+ 300) 目。使用的喷涂设备为 GDP-80 型和 MET CO-7M 型高能等离子喷涂仪, 主要工艺参数如表 1 所示。

在 NiCrAl/ ZrO_2 成分百分比为 1 9, 2 8, 3 7, 4 6, 5 5, 7 3 时, 分别测量这些成份下试样喷涂表面 (水平面) 与垂直喷涂表面 (垂直面) 的分形维数, 图 1 是 NiCrAl 含量为 10% 时水平面与垂直面

的形貌图, 其中白色区域为 NiCrAl。从图中可以看出, 由于喷涂过程中, 粉末粒子以很大的动能撞击基体表面, 熔融状态的球形粉末发生剧烈的变形, 沉积在基体上 (即水平面) 形成饼状; 而垂直面 (粒子沉积方向为 Y 轴方向) 则呈现为条状。

表 1 等离子喷涂工艺主要参数
Table 1 Main parameter of plasma spraying

工艺参数	喷涂材料及参数值	
	ZrO ₂	NiCrAl
电压/ V	80	75
电流/ A	600	500
N ₂ 流量/ (L · min ⁻¹)	85	85
H ₂ 流量/ (L · min ⁻¹)	15	15
载气流量/ (L · min ⁻¹)	37	37
喷涂距离/ mm	110	120

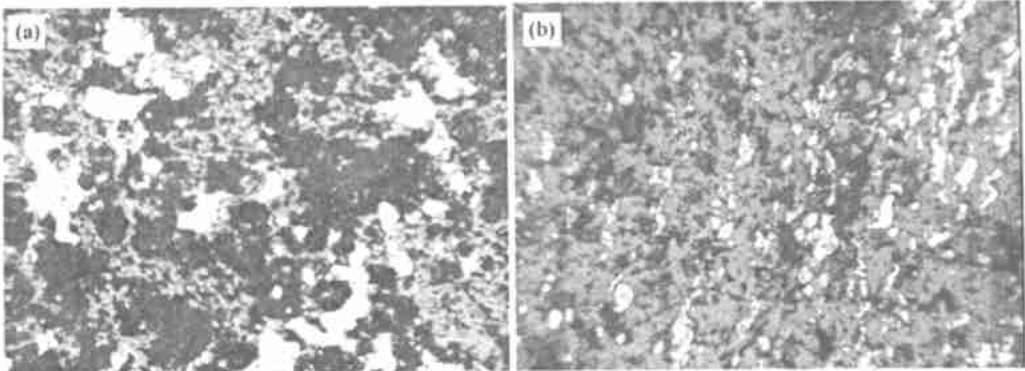


图 1 90% ZrO_2 + 10% NiCrAl 表面形貌图 (a) 水平面; (b) 垂直面
Fig. 1 90% ZrO_2 + 10% NiCrAl surface microstructure (a) horizontal plane; (b) vertical plane

2 结果分析

2.1 水平面、垂直面分形维数

图 2 是 NiCrAl 含量与水平面、垂直面分形维数的关系图, 从图中可以看到水平面和垂直面的分形维

数 D_f 具有一致的规律, 说明用分形维数 D_f 来定量表征材料的微观形貌是可行的。在 NiCrAl 百分含量为 20% 时, D_f 有一最大值, 随金属含量升高, 分形维数又出现一最小值, 这说明分形维数与百分含量之间呈现曲线的变化规律, 它形成的主要原因是沉积颗粒剧

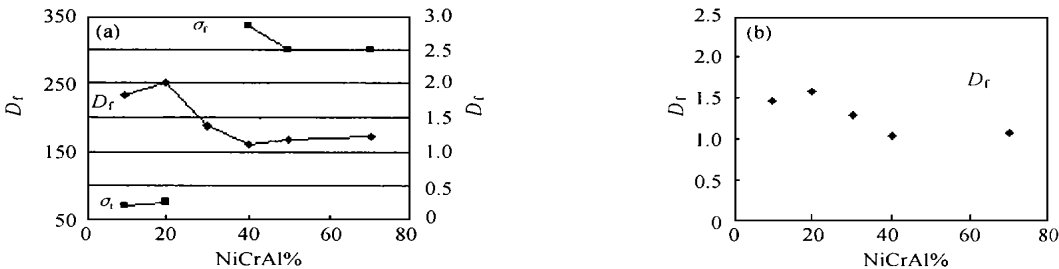


图 2 NiCrAl 百分含量与垂直面、水平面分形维数的关系 (a) 水平面; (b) 垂直面
Fig. 2 Relation between NiCrAl content and fractal dimension (a) horizontal plane; (b) vertical plane

烈变形而形成极其复杂的第二相形态和微观形貌。

2.2 分形维数与力学性能的关系

本文采用三点弯曲法测量了不同成分配比时试样的抗弯强度 f (MPa), 由于抗弯强度性能测试的需要, 这里使用单一涂层, 涂层试样采用石墨为基体, 这样制备完成后试样非常容易从石墨板上取下; 另一方面, 石墨具有良好的热传导性能, 可以减少制备过程中的热应力。对每组成分比取 6 根试样 (试样尺寸为 $4\text{mm} \times 3\text{mm} \times 30\text{mm}$) 测试, 然后取平均值, 即为该种成分时的 f 值。

由图 2 可知, 在 NiCrAl 含量 $< 20\%$ 时, D_f 与 f 都随 NiCrAl 含量增加而增加; 而在 NiCrAl 含量 $> 40\%$ 时, f 随 D_f 的上升而下降。在 NiCrAl 含量为 20% 时, $f = 76.17\text{MPa}$; 在 NiCrAl 含量为 40% 时, $f = 333.36\text{MPa}$, f 上升了 4.4 倍, 抗弯强度出现一突变值, 这里可能是一个渗流区域, 在此渗流阈值附近, FGM 的宏观力学性能发生了非线性变化。文献 [4] 研究了 Ti-Al₂O₃ 金属陶瓷的渗流现象, 用渗流理

论讨论了显微结构同宏观电导率的关系, 如电导率和热导率及弹性性质都在相同的渗流值 $\sim 0.16\text{vol}\%$ 处发生突变。文献 [5] 研究 Ni-ZrO₂ 系 FGM 发现, 金属陶瓷的物理性能不但发生突变, 而且不同的物理性能对应着不同的渗流值, 如热导率的渗流值 (含 Ni 重量百分数为 60) 滞后于电导率的渗流值 (含 Ni 重量百分数为 15), 由此产生一种新型导电绝热材料。本文首次给出了 ZrO₂/NiCrAl 系功能梯度材料由渗流结构决定的力学性能的突变关系。

图 3 为 NiCrAl 含量在 20% 时经线性回归后得到的 $\log A \sim \log P$ 拟合直线。在水平面时, 线性回归方程为 $Y = -0.54191 + 0.99883X$, 其斜率的 2 倍即为平面的分形维数, 相关系数 $R^2 = 0.86411$; 垂直面时, 线性回归方程为 $Y = 0.48787 + 0.78534X$, 相关系数 $R^2 = 0.92279$, 具有较好的线性关系, 这说明 P 与 A 较好的符合 (2) 式, 进一步说明了用 D_f 表征表面微观形貌的可行性。

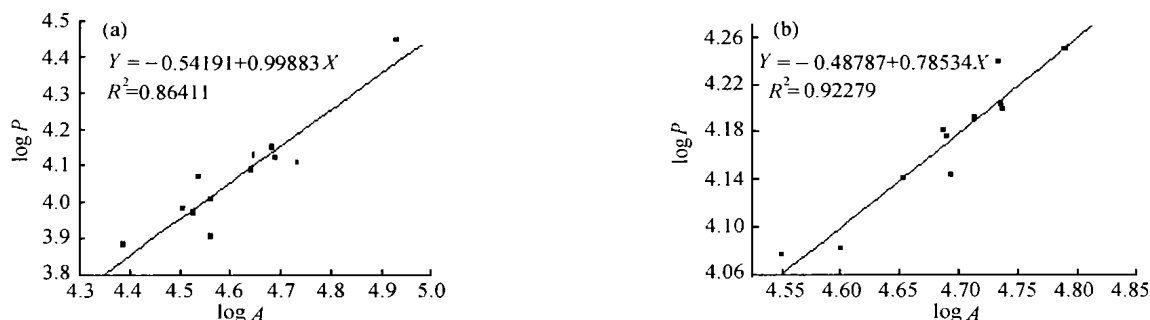


图 3 20% NiCrAl + 80% ZrO₂ 时 $\log A$ 与 $\log P$ 的关系图 (a) 水平面; (b) 垂直面
Fig. 3 Relation between $\log A$ and $\log P$ of 20% NiCrAl + 80% ZrO₂ (a) horizontal plane; (b) vertical plane

3 结论

(1) 喷涂试样表面与垂直喷涂表面的分形维数随 NiCrAl 百分含量的变化呈现一致的变化规律, 两个平面 D_f 值的不同反映了两个平面微观形貌的差异, D_f 可以定量表征材料的微观形貌。

(2) 由于等离子喷涂功能梯度材料微观结构的复杂性, 分形维数与百分含量之间不是单调上升或下降关系, 而是呈曲线变化。

(3) NiCrAl 含量 $< 20\%$ 时, D_f 与 f 都随 NiCrAl 含量增加而增加; NiCrAl 含量 $> 40\%$ 时, f 随 D_f 的上升而下降。在 NiCrAl 含量为 $20\% \sim 40\%$ 附近出现渗流集团, 其抗弯强度出现突变值。

参考文献

- [1] 杨云志, 陈治清. 梯度功能材料微观结构的分形表征 [J]. 功能材料增刊, 1998, 10: 952—957.
- [2] Mandelbort B B, Passoja D E and Paullay A J. Fractal character of fracture surface of metals [J]. Nature, 1984, 308: 721.
- [3] 穆在勤, 龙期威. 金属断裂表面的分形与断裂韧性 [J]. 金属学报, 1998, 24 (2): A142—A145.
- [4] 南策文, 陈新政. Ti-Al₂O₃ 金属陶瓷的渗流模型 [J]. 物理学报, 1987, 36 (4): 511.
- [5] 范秋林, 胡行方, 郭景坤. Ni-ZrO₂ 亚微米复合材料的导电导热机制 [J]. 中国科学 (A 辑), 1995, 25 (7): 777.

收稿日期: 2000-12-14; 修订日期: 2001-04-23

作者简介: 王鲁 (1962-), 男, 副教授, 博士, 主要从事复合材料与功能梯度材料等领域的研究, 联系地址: 北京理工大学 7 系 (100081)。