Ca^{2+} 离子在界面两边进行互扩散, 这种扩散符合离子晶体的扩散特征即阳离子扩散快^[3], 故这类焊接是一个扩散型的焊接行为。

微波加热源于材料内部的分子、离子振动,同时使分子、离子的动能增加,这样在微波交替电场的作用下, Al^{3+} 、 Ca^{2+} 离子受到强制振动,在一定温度条件下加

速 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 的扩散^[4], 因 Al^{3+} 离子半径 ($0.51 \text{ \AA}$) 比 Ca^{2+} 离子半径 ($0.99 \text{ \AA}$) 小, Al^{3+} 扩散更加容易、扩散距离远, 所以 Al 在界面区域梯度分布明显, 同时在外加压力作用下, 界面接触更加紧密, 界面两的 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 互扩散能容易的进行, 故微波焊接能在较低温度和较短时间内完成. 当温度较低如 $1050 \sim 1100^\circ\text{C}$ 或压力较小时如 1.0 MPa 时难于焊接, 且焊接面均有未焊合的焊缝. 当压力较大时, 则生物陶瓷易出现裂纹, 这可能是生物陶瓷强度低, 在较大压力下材料变形的结果.

致谢 本工作为湖北省自然科学基金(批准号: 95J57)资助项目.

图 5 焊接界面附近的元素线分布

参考文献

- 1 李世普,编著.生物陶瓷.武汉:武汉大学出版社,1989.48
- 2 福島英冲,山中日英夫.東博純ほか. . . ホの . . . 口波加熱とその接合の応用.精密工学会誌,1988,54(2):65
- 3 Poirier J.P. 著,关德林译.晶体的高温塑性变形.大连:大连理工大学出版社,1989.191
- 4 佐藤忠夫,小条順司,川内谷直諄ほか. . . 口波加熱法による . . . ホの接合.日本・イム記・ . . 協会学術論文
誌,1989,97(6):623~627

(1997_04_01 收稿, 1997_12_05 收修改稿)

共沉降法制备金属/陶瓷连续梯度功能材料

黄继华 赵 军 李敬峰^④ Kawasaki Akira^④
Watanabe Ryuzo^④

(北京科技大学材料科学与工程系, 北京 100083; ④日本东北大学工学部材料加工学科, 日本仙台 980)

摘要 发展了一种新的制备连续梯度功能材料的方法——共沉降法。用该方法制备了 $\phi 33 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 的 SUS316/3Y PSZ 梯度材料,组织结构和成分分布曲线均表明试样中成分是连续分布的。

关键词 梯度功能材料 共沉降法

梯度功能材料(FGM)是近年来为研究宇航遮热材料而发展起来的一种新型复合材料,在

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb1998-43-5-550>

医学、电子和原子能等领域均具有重要的应用价值. 制备科学和技术是梯度功能材料应用和发展的基础. 目前已发展了多种梯度功能材料的制备方法, 如气相沉积(CVD, PVD)、等离子喷涂(PS)、自蔓延高温合成(SHS)、粉末冶金法(PM)等等^[1,2]. 其中粉末冶金方法被认为是比较灵活的、有希望制备大型构件的方法之一, 也是目前学术界研究较多的方法. 但是, 目前的粉末冶金方法采用的主要是叠层法, 即先按设计将两种粉末按不同比例混合, 然后一层一层叠层压制并烧结, 材料两侧之间成分分层阶跃变化. 这种叠层法由于没有真正消除成分突变的界面, 因而无论从制备工艺本身的可操作性还是从应力缓和的程度上都存在很大的局限性. 成分连续分布一直是梯度材料制备领域追求的理论目标. 本文用共沉降法制备的梯度材料成分连续分布, 且原理上可以制备任意大小、任意厚度的梯度层.

1 原理和试验方法

众所周知, 粉末颗粒在液体介质中的沉降行为可用斯托克斯沉降方程来描述, 同种粉末颗粒粗的沉降快, 不同种粉末同时沉降(共沉降)时颗粒粗的、密度大的沉降快. 因而对于确定的两种不同粉末, 通过调节沉降参量(沉降介质的密度和粘度、沉降距离等), 适当选择两种粉末的粒度和粒度分布, 控制两种粉末的沉降行为, 就可以获得从一种成分连续过渡到另一种成分的沉积层.

本文以乙醇作为沉降介质, 通过陶瓷和不锈钢粉末在乙醇中的共沉降制备金属/陶瓷梯度功能材料. 其中陶瓷粉末为钇部分稳定氧化锆(3Y-PSZ), 平均粒度为 $0.3\ \mu\text{m}$, 2次造粒粒度约为 $60\ \mu\text{m}$; 不锈钢粉末为日本 SUS316 粉末, 平均粒度为 $8\ \mu\text{m}$. 3Y-PSZ 和 SUS316 在乙醇中的浓度分别为 45×10^{-3} 和 $90 \times 10^{-3}\ \text{g/mL}$. 本研究沉降在内径 $\Phi 40\ \text{mm}$ 、长 $200\ \text{mm}$ 的玻璃管中进行, 沉积层经干燥、 $150\ \text{MPa}$ 模压成形、Ar 气氛中 $1300\ ^\circ\text{C} \times 1\ \text{h}$ 烧结制备 SUS316/3Y-PSZ 梯度功能材料. 用光学显微镜观察组织结构, 并用图象分析仪测定成分分布.

2 结果和讨论

本文用上述共沉降法成功地制备了 $\Phi 33\ \text{mm} \times 4.5\ \text{mm}$ 的 SUS316/3Y-PSZ 梯度功能材料试样. 如图 1 为试样横截面的组织照片(黑为 PSZ, 白为不锈钢); 图 2 为不同成分的典型组织照片; 图 3 为图象分析仪测定的成分分布曲线. 从图 1 和图 2 可见试样基本致密化, 且陶瓷和不锈钢界面结合良好, 无缺陷; 无论是组织照片还是成分分布曲线均显示试样中的成分是连续分布的.

成分分布(梯度)的可设计性是梯度功能材料的重要特征之一, 也是热应力缓和和性能设计的基础. 在共沉降法中可以通过粉末特性(两种粉末的粒度和粒度分布)的选择和沉降参量(沉降介质的物理化学性质、沉降高度、两种粉末的相对含量等)的调节来进行成分分布(梯度)的定量设计. 若假定两种粉末的沉降行为不相互影响, 且烧结后试样完全致密化, 则可得到

$$C_V(t) = \frac{1}{\rho_C} \frac{dm_C}{dt} / \left(\frac{1}{\rho_C} \frac{dm_C}{dt} + \frac{1}{\rho_M} \frac{dm_M}{dt} \right), \quad (1)$$

$$A \frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho_C} \frac{dm_C}{dt} + \frac{1}{\rho_M} \frac{dm_M}{dt}, \quad (2)$$

式中 $C_V(t)$ 为梯度层中陶瓷的体积分数作为时间的函数; $\frac{dm_C}{dt}$ 和 $\frac{dm_M}{dt}$ 分别为陶瓷和金属粉末的单位时间沉降量; ρ_C 和 ρ_M 分别为陶瓷和金属粉末的真密度; h 为梯度层厚度方向的位置变

图1 共沉淀法制备的 SUS316/3Y-PSZ 梯度材料组织照片($\times 50$)

图2 不同成分的典型组织照片($\times 90$)

(a) 93.39% PSZ; (b) 71.42% PSZ; (c) 10.90% PSZ; (d) 1.74% PSZ

量; A 为沉降面积. $\frac{dm_c}{dt}$ 和 $\frac{dm_M}{dt}$ 与粉末特性和沉降参量有关, 可由斯托克斯方程导得. 式(1), (2) 决定了梯度层中的成分分布 $C_V(h)$ 与粉末特性和沉降参量的关系, 因此可以根据粉末特性和沉降参量来推定(预测)成分分布, 也可以反过来根据设计的成分分布来选择粉末和沉降参量. 成分分布对粉末特性的要求可以通过2次造粒来满足.

在共沉降法中可以通过悬浊液浓度(粉末量)和沉降面积很方便地控制梯度层的厚度和大小. 如果能与其他成型技术相结合, 则共沉降法可以制备任意大小、任意厚度的梯度材料.

图3 厚度方向的成分分布曲线

参考文献

- 1 Kawasaki A, Watanabe R. Fabrication processes of functionally graded materials. *Bulletin of the Japan Institute of Metals*, 1997, 36(1): 55~ 61
- 2 Lee W Y, Stinton D P, Berndt C C, et al. Concept of functionally graded materials for advanced Thermal barrier coating applications. *J Am Ceram Soc*, 1996, 79(12): 3 003~ 3 012

(1997-05-24 收稿, 1997-11-07 收修改稿)

复杂河段水质模型有限单元法的网格确定方法

杨春平 钟袁元 曾光明

(湖南大学环境工程系, 长沙 410082)

摘要 研究了根据污染物在单元网格内的分布特征来确定河流水质模型有限单元法中单元网格的划分方法. 在给定网格长度的条件下, 结合河流水质模型有限单元法理论, 提出了根据污染源下游网格长度内污染物完成横向混合所需最大距离作为污染源侧近河岸单元网格的最大宽度, 并结合河流单宽流量估算方法来确定河流最小流带数的方法, 从而可利用河道地形图和已有的方法进行河流水质单元网格的划分和河流水质有限单元法的数值计算. 灵敏度分析表明, 该方法确定的最小流带数受河宽和网格长度的影响较小, 受污染物横向混合程度的影响在可接受的范围内, 方法的稳定性较好. 应用本文建立的方法进行复杂河段水质模型有限单元法数值计算, 可以避免单元网格划分的随意性和盲目性, 可以在满足精度要求的前提下减小计算工作量, 并解决了单元网格的确定需要依靠经验判断的难题.

关键词 河流 水质模型 有限单元法 数值计算 单元网格

1 问题的提出

污染物排入河流后, 在水流流场均匀稳定的情况下, 采用河流水质模型的解析解可以方便地模拟污染物在河流中的分布. 但是在多数情况下水污染源的产生地是城镇, 而大多数依水而筑的城镇, 其河道形状往往很不规则, 河段复杂, 有时还伴有河道的分叉现象. 因此模拟和预测这样河流的水质时, 不宜采用简化的解析模型求解, 而应采用数值方法求解^[1, 2].

复杂河段二维浅水水质模型可采用正交曲线坐标系下的有限单元法求解. 对每个单元网格建立质量平衡方程, 即可得到污染物在河流中的浓度分布^[1]:

$$L = G^{-1} W^L, \quad (1)$$

式中 L 和 W^L 均为 $n \times m$ 行 1 列的矩阵; $L = (L_{11} L_{12} \cdots L_{1m} L_{21} L_{22} \cdots L_{ij} \cdots L_{nm})^T$, L_{ij} 是由第 ij 单元中污染物的浓度; $W^L = (W_{11}^L W_{12}^L \cdots W_{1m}^L W_{21}^L W_{22}^L \cdots W_{ij}^L \cdots W_{nm}^L)^T$, W_{ij}^L 是由系统外单位时间内输入第 ij 单元的该污染物量, 即源强; m 是 y 方向流带的数目; n 是 x 方向河流断面的数目; G^{-1} 是 $m \times n$ 阶方阵, 称为二维河流的 BOD 响应矩阵. 类似地, 可得到二维河流中的 DO 分布^[1].

上述计算中, 单元网格的划分是在估算河流断面上单宽流量的基础上, 基于经验知识选