

文章编号:1673-9981(2017)04-0220-04

# 基于分形理论的粉末注射生坯的有效热导率研究\*

周 林

宁波工程学院,浙江 宁波 315016

**摘 要:**运用分形理论描述粉末注射生坯微观形貌特征,研究了316L PIM生坯热脱脂工艺过程,分析了面积分形维数和迂曲分形维数对有效热导率—孔隙率关系的影响.研究表明:PIM生坯有效热导率随着孔隙率的增加而减小;在相同孔隙率下,有效热导率随着面积分形维数的增大而增大,随着迂曲分形维数的增大而减小.

**关键词:**粉末注射成形;分形;有效热导率

**中图分类号:**TF124

**文献标识码:**A

粉末注射成形(Powder Injection Molding, PIM)是一种结合注塑成形及粉末冶金的先进制造技术,可用于大批量高效制造复杂形状的金属及陶瓷产品<sup>[1-2]</sup>. PIM技术的优势在于综合了塑料注射成型的设计柔性和粉末冶金技术广泛的选材范围.典型的PIM制造过程包括喂料准备、注射成形、脱脂及烧结等主要工艺步骤,PIM制品在脱脂过程中会逐渐脱去有机聚合物形成的微观毛细多孔结构,在后续的烧结过程中逐渐致密化形成复杂的微观结构.因此,研究PIM生坯脱脂过程中微观结构的变化规律及其表征具有重要意义.郑洲顺等人<sup>[3-4]</sup>已经对粉末颗粒形状的分形特性做了研究,并认为在粉末注射成形过程中,粉末颗粒能在模具中注射形成自然堆积散体结构,其是具有分形特性的典型的多孔介质.施明恒等人<sup>[5]</sup>通过计算不同孔隙率的多孔介质模型的面积分形维数 $d$ ,利用分形维数并结合土壤的导热模型,推导出了土壤的有效导热系数.余妙春<sup>[6]</sup>采用热阻模拟方法,推导了有效扩散系数与孔隙率的关系式,并推导出热导率与分形维数的表达式,从而计算出经验常数. Huai等人<sup>[7]</sup>构建了几种孔径及分布不同的多孔介质分形结构,基于有限容积法模拟分形结构的热传导,推导出有效热导率

与孔隙率、固相热导率和液相热导率的关系.

由于加热脱脂目前仍是PIM生坯脱脂的主要手段,而加热脱脂过程中生坯的导热特性与其微观结构关系密切.因此,本文基于完全分形理论,通过计算截面分形维数,创建PIM生坯有效导热率模型,以求更好的描述PIM生坯的导热特性及其脱脂过程.

## 1 PIM生坯的分形结构特征

由于PIM生坯在脱脂过程中形成的多孔结构复杂,而且孔隙分布多样,在研究过程中将PIM微观模型简化为孔隙均匀分布且固相和孔相具有分形特性,在迭代过程中初始结构的分形相在无限小尺度下也自相似.

### 1.1 面积分形维数

以面积分形维数来描述PIM生坯中固相所占据空间的大小,维数越高固相填充的空间越多,固相的面积占有率和度量尺度存在以下关系<sup>[8]</sup>:

$$N(\delta) \propto \delta^{-D_f}. \quad (1)$$

对式(1)两边取对数,得到:

收稿日期:2017-11-30

\* 基金项目:浙江省自然科学基金项目(LQ13E050006)

作者简介:周林(1980-),男,江苏扬州人,副教授,博士.

$$D_f = \log N / \log \delta. \quad (2)$$

式(1)~(2)中,  $N$  为几何体的面积占有率,  $\delta$  为度量尺度,  $D_f$  为固相面积分形维数且  $1 < D_f < 2$ .

### 1.2 迂曲分形维数

PIM 生坯在脱脂过程中形成的微观结构十分复杂, 其脱脂过程和导热特性也十分复杂, 其内部孔隙分布均匀程度不仅对导热传质过程有影响, 而且对孔隙的连通性和迂曲率及对气化后的有机聚合物的扩散也具有显著影响. 迂曲分形维数体现了孔隙的复杂程度, 可由下式表达<sup>[9]</sup>:

$$L_T(\lambda) = L_0^{D_i} \lambda^{1-D_i}. \quad (3)$$

式(3)中,  $L_T(\lambda)$  为气体在直径为  $\lambda$  的孔道内经过的实际距离,  $L_0$  是孔道两端的特征距离,  $D_i$  为迂曲分形维数且  $1 < D_i < 2$ .

## 2 粉末注射生坯的导热计算

PIM 生坯多孔微观结构符合傅里叶导热定律:

$$K_{eff} = \frac{QL}{\Delta t A}. \quad (4)$$

式(4)中  $K_{eff}$  为 PIM 生坯的有效导热系数,  $W/(m \cdot K)$ .

因 PIM 生坯在受热脱脂过程中, 热量由介质的固体相和孔隙相共同传递, 而这两相的结构特征截然不同, 因此导热路径不同, 从而获得改进的傅里叶导热定律:

$$K_{eff} = \frac{QL_x}{\Delta t A_x} + \frac{QL_y}{\Delta t A_y}. \quad (5)$$

式(5)中,  $L_x$  为气体在直径为  $r$  的孔道内经历的实际路径距离,  $L_y$  为生坯介质的厚度,  $A_x$  为生坯截面内孔隙总面积,  $A_y$  为固相的总面积,  $Q$  为在时间  $t$  内介质吸收的总热量. 将具体公式代入式(5)中, 即得到 PIM 生坯的有效导热系数公式<sup>[10]</sup>, 其中  $\epsilon$  为孔隙率.

$$K_{eff} = \left\{ \frac{K_2 L_y v t}{\epsilon a_2 \Delta t} + \frac{4 K_1 L_y V_1 (2 - D_f)}{a_1 \pi D_f r_{max}^2 \left[ 1 - \left( \frac{r_{min}}{r_{max}} \right)^{2 - D_f} \right]} \right\} \left( L_y^{D_i} \lambda^{1 - D_i} + \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right). \quad (6)$$

## 3 分析与讨论

由 316L 不锈钢粉末和石蜡基热塑性粘接剂组

成注射喂料, 通过热脱脂方式制成生坯. 通过分析生坯试样截面的孔隙率, 计算等效导热系数. PIM 的脱脂工序是保证产品无缺陷的关键步骤之一, 脱脂方式和工艺不合适会导致产品出现变形、破裂等缺陷, 并且这些缺陷在后续工序中也无法弥补. 实验中所采用的热脱脂工艺曲线如图 1 所示, 实验中最终脱脂率可达 98.5%.

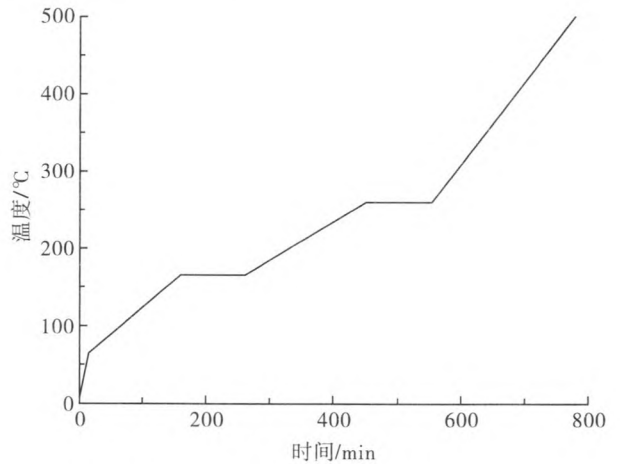


图 1 热脱脂时间-温度工艺曲线

Fig. 1 Time-temperature curve of thermal degreasing process

PIM 生坯有效热导率随孔隙率变化的曲线如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 有效热导率随着孔隙率的增加而减小, 这是因为生坯中颗粒固相和孔隙相热导率不同, 而孔隙率增加使得固相减少, 导致有效热导率降低. 此外, 从图 2 还可看出: 在相同孔隙率下, 有效热导率随着面积分形维数的增大而增大; 在相同面积分形维数下, 有效热导率随着孔隙率的增

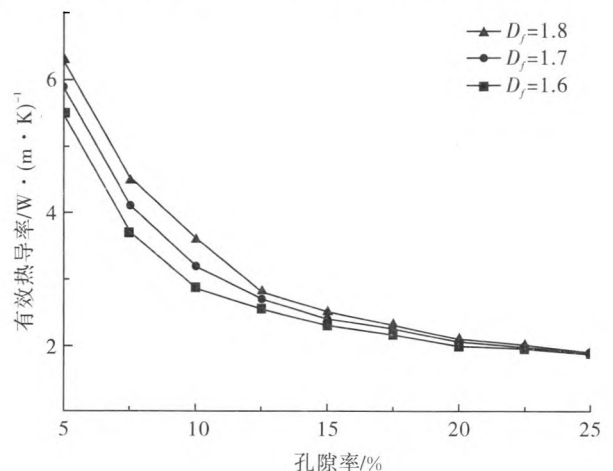


图 2 有效热导率随孔隙率变化曲线

Fig. 2 between effective thermal conductivity and porosity

大而减小.这是由于生坯的面积分形维数越大,截面中固相比率越高,因而导热率越大;而孔隙率越大,生坯的微观结构越复杂,热量传递及粘接剂排出时间越长,有效热导率越小.

图3为PIM生坯孔隙迂曲分形维数对有效热导率的影响曲线.从图3可见,在相同孔隙率下,有效热导率随着迂曲分形维数的增大而减小.这是由于迂曲分形维数越大,孔隙微观结构越复杂,孔隙导热效率越低,有效热导率越低.

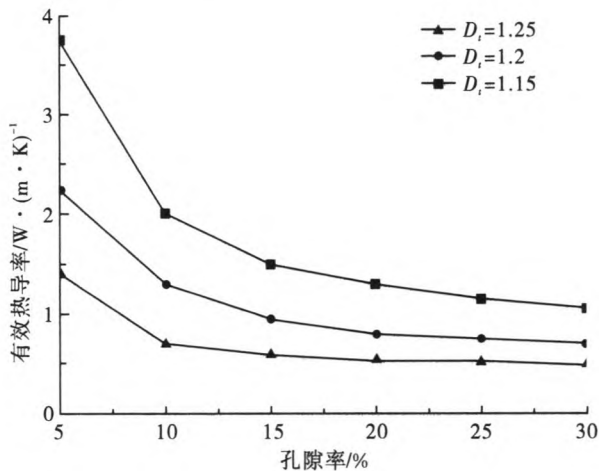


图3 孔隙迂曲分形维数对有效热导率的影响

Fig. 3 Effect of porous fractal dimension on effective thermal conductivity

## 4 结论

(1)用面积分形维数和迂曲分形维数来表征PIM注射生坯的微观结构,进而计算PIM注射生坯的有效导热率,可较好完成对PIM生坯复杂微观结构的重构,并且能方便准确地计算其等效热导率.

(2)用PIM生坯截面的微观分形结构特性建立

有效导热系数模型,可以较真实地模拟生坯内部导热特性.

(3)PIM生坯有效热导率随着孔隙率的增加而减小;而在相同孔隙率下,有效热导率随着面积分形维数的增大而增大,随着迂曲分形维数的增大而减小.

## 参考文献:

- [1] LIU L, LOH N H, TOR S B. Micro-powder injection molding: Sintering kinetics of microstructured components[J]. Scripta Materialia, 2006, 55: 1103-1106.
- [2] 贺毅强, 胡建斌, 张奕, 等. 粉末注射成形的成形原理与发展趋势[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(1): 139-144.
- [3] 郑洲顺, 曲选辉. PIM粉末颗粒的分形特征及其分形维数[J]. 中国机械工程, 2003, 14(5): 436-439.
- [4] 郑洲顺, 曲选辉, 李云平. 还原钴粉末的分形描述[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(4): 393-396.
- [5] 施明恒, 樊碧. 多孔介质导热的分形模型[J]. 热科学与技术, 2002, 1(1): 28-31.
- [6] 余妙春. 基于分形理论的网状结构植物纤维材料导热系数研究[D]. 福建: 福建农林大学, 2011.
- [7] HUAI Xiulan, WANG Weiwei, LI Zhigang. Analysis of the effective thermal conductivity of fractal porous media [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27 (17-18): 2815-2821.
- [8] ANDERSON A N, MCBRATNEY A B, FITZPATRICK E A. Soil mass, surface, and spectral dimension estimating fractal dimensions from thin section[J]. Soil Sci Am J, 1996, 60(7): 962-969.
- [9] YU B M, CHENG P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media[J]. Internal Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(14): 2983-2993.
- [10] 俞自涛, 胡亚才, 田甜, 等. 木材横纹有效导热系数的分形模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(2): 351-355.

## Study on the effective thermal conductivity of powder injection green part based on fractal theory

ZHOU Lin

Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China

**Abstract:** The micro morphological characteristics of powder injection molding green part was described by fractal theory. The hot decrease process of 316L PIM green part was studied, and the influence of

tortuosity fractal dimension and area fractal dimension on the effective thermal conductivity was also studied. The results show that the effective thermal conductivity of PIM green part was decreased with the increasing of porosity. Under the condition of the same porosity, the value of effective thermal conductivity increased as the area fractal dimension value increased, at the same time reduced as the tortuosity fractal dimension value increased.

**Key words:** powder injection molding; fractal; effective thermal conductivity

---

(上接第 215 页)

## Review of solid-state hydrogen storage materials

ZHANG Siqi

*Guangdong Research Institute of Rare Metals, Guangdong Province Key Laboratory of Rare Earth Development and Application, Guangzhou 510650, China*

**Abstract:** Hydrogen energy is one of the preferred alternative fuels for fossil fuels. The safety, economical and efficient storage of hydrogen is a technical bottleneck restricting the popularization and application of the hydrogen energy. Solid-state hydrogen storage is the most promising hydrogen storage technology. In this paper, the advantages and disadvantages of main solid-state hydrogen storage materials are summarized. The current research status is summarized and the future development of hydrogen storage materials is also expected.

**Key words:** hydrogen energy; hydrogen storage material; hydrogen storage alloy; solid-state hydrogen storage