

文章编号: 1004-0609(2004)03-0378-07

多孔铝合金的孔隙率梯度及控制^①

李乃哲, 陈 策, 何德坪

(东南大学 材料科学与工程系, 南京 210096)

摘 要: 应用图像识别与处理技术, 描述了多孔铝合金的面孔隙率及体孔隙率; 研究了渗流法制备的多孔铝合金沿长度方向的孔隙率梯度, 并对整体孔隙率的均匀度进行了估计。研究表明: 多孔铝合金的中上部孔隙率最高, 顶端次之, 底端最低。多孔铝合金的孔隙率梯度主要是由渗流驱动压力梯度与凝固顺序所决定, 而颗粒的自然堆积密度影响相对较小。但通过振动控制方法, 调整颗粒堆积密度, 可以有效地改善多孔铝合金的孔隙率梯度, 使孔隙率梯度绝对值平均由 6.5% 降至 2.2%。

关键词: 多孔铝合金; 孔隙率; 孔隙率梯度

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Porosity gradient of porous aluminium alloy and its control

LI Nai-zhe, CHEN Ce, HE De-ping

(Department of Materials Science and Engineering,
Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Through image processing technique, the planar porosity, volume porosity of porous aluminium and porosity gradient along the length of porous aluminium alloy made by the negative pressure infiltration process were studied. The uniformity of the whole porosity was estimated. The results show that the porosity at the middle-superior part is the largest, at the bottom is the smallest, at the top is in the middle. The porosity gradient of porous aluminium is mostly affected not only by the spontaneous stacking density of granules, but also by the infiltration pressure gradient and solidification sequence. The porosity gradient can be improved effectively by changing the stacking density of granules through the vibration method, and the absolute value of porosity gradient can be reduced to 2.3% from 6.8%.

Key words: porous aluminium alloy; porosity; porosity gradient

自 20 世纪 50 年代以来, 闭孔胞状铝一直是超轻型金属结构的发展重点, 近年来, 由于高技术发展的需求, 使得新型多组元通孔多孔铝合金成为当前的研究热点领域之一^[1~14]。

多孔铝合金具有强烈的结构敏感性, 精确地描述、控制其孔结构参数至关重要, 其中又以孔隙率最为重要, 其他各参数都与此有关^[1, 4]。多孔铝合金孔隙率主要由 3 部分构成^[6]。采用渗流法制备多孔铝合金时, 多种因素的综合影响^[14]造成了沿长

度方向孔隙率的变化, 存在一定的梯度, 对性能有较大的影响, 因而有必要对多孔铝合金沿长度方向孔隙率的梯度变化、描述及控制进行深入研究。

本文作者采用图像识别与处理技术, 获得了通孔多孔铝合金的端面孔隙率, 可以很好地近似接近端面处的体孔隙率^[14]; 研究了孔隙率沿长度方向的变化规律及其影响因素, 提出了降低长度方向孔隙率梯度的方法, 并对整体的孔隙率均匀程度进行了估计。

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50231010; 90205005)

收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-10-13

作者简介: 李乃哲(1978-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 何德坪, 教授; 电话: 025-83794119; E-mail: dphe@seu.edu.cn

1 多孔铝合金的制备及面孔隙率描述

1.1 多孔铝合金的制备

与以往研究不同, 本文研制的是具有一定长度的多孔铝合金。将熔融的铝合金熔体浇入预热至一定温度并装有填料颗粒的模具中, 铝合金熔体在压力驱动下渗入颗粒间隙中, 室温凝固形成两者的复合体, 去除填料颗粒后即得到呈网状骨架的多孔铝合金^[10]。

实验条件保持相似: 1) 颗粒自然堆积, 粒径及其分布相同; 2) 铝合金熔体的过热度相同; 3) 颗粒预热温度及渗流驱动压力相同。

1.2 面孔隙率描述

通常对孔洞互相贯通的多孔铝合金采用体测法测量平均孔隙率, 只要测量设备精度足够高, 即可以获得相当好的精度。但受测量方法的限制, 只能局限于某个整体的孔隙率, 无法了解多孔铝合金孔隙率沿长度方向的变化, 因此有必要以方便而又科学的方法来描述多孔铝合金试样中的孔隙率均匀程度。

1.2.1 测量原理及方法

利用试样端面对光线不同的反射能力, 在一定的光照射条件下, 通过图像采集设备记录下端面的图像信号, 然后对图像信号进行适当的处理, 由软件将其转变为数值信号, 并以数字的形式输出, 最后计算得出孔隙率值。

现以样品 A 为例, 讨论面孔隙率的测量过程。图 1 所示为样品图像预处理前与二值化处理后的图像。图像经二值化处理后, 通过计算机由图像识别软件测量孔洞面积, 并以像素点作为面积单位。经测量可知, 样品 A 的截面上孔洞中所包含的像素点总共为 627 299, 除以截面所含的总像素点 988 224, 得到样品 A 的面孔隙率为 63.48%。

通过称量法分别测出样品的质量 m 与体积 V , 计算得样品 A 的体孔隙率为 64.2%, 与图像扫描算法测得的样品面孔隙率 63.48% 相比, 二者相差很小。

1.2.2 面孔隙率与体孔隙率的比较

由数学推导可知, 随机截取样品所得截面的面孔隙率 θ_s 可作为整个样品的体孔隙率 θ_v 的无偏估计, 因而 $\theta_s = \theta_v$ 。

表 1 列出了不同样品的测量数据, 其中面孔隙率由样品扫描图像经软件计算所得, 体孔隙率由称量法测得(精度为 0.01%), 绝对误差 ε 为面孔隙率

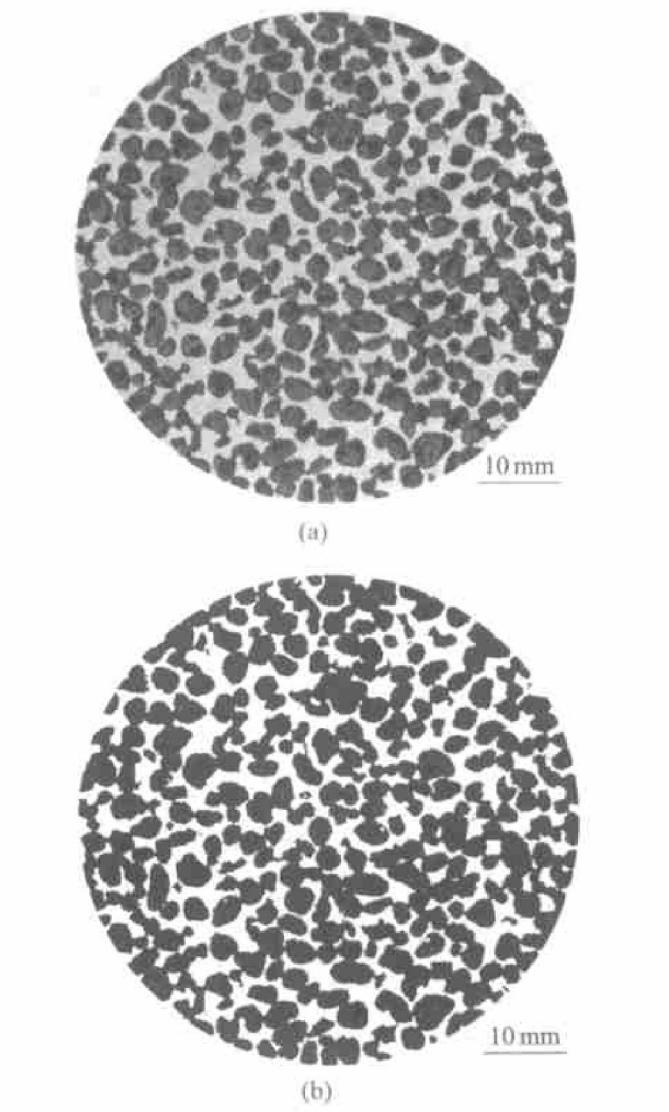


图 1 样品 A 预处理前与二值化后的图像
Fig. 1 Images of sample A for pre process and post process
(a) —Pre process; (b) —Post process

表 1 多孔铝合金样品的体孔隙率 θ_v 和面孔隙率 θ_s

Table 1 Volume porosity and planar porosity of porous aluminium alloy					
Sample No.	Aperture/ mm	θ_v / %	θ_s / %	ε / %	Average ε / %
1	1.25~ 1.60	58.5	58.43	- 0.07	- 0.64
2	2.00~ 3.00	59.6	58.89	- 0.71	
3	1.25~ 1.60	63.2	62.22	- 0.98	
4	2.00~ 3.00	64.2	63.48	- 0.72	
5	1.25~ 1.60	67.6	67.33	- 0.27	
6	2.00~ 3.00	68.3	67.24	- 1.06	

与体孔隙率的差值。从中可以看出, 面孔隙率与体孔隙率非常接近, 绝对误差 ε 平均为 0.64%。因而可以采用测量面孔隙率的方法, 近似得出端面处的体孔隙率。

1.2.3 测量精度及影响因素

在不考虑软件测量误差的情况下，扫描精度与样品的制备情况是影响测量结果的主要因素。

将填料颗粒看作最紧密堆积，可以算出扫描精度所带来的面孔隙率与体孔隙率的绝对误差为 0.6%，具体计算过程见文献[14]。由于颗粒的实际堆积密度远小于最紧密堆积，因而 5.5 远小于 0.6%。

在样品预处理的打磨过程中，表层靠近孔洞的基体发生变形，增加了基体的表面积，使样品的面孔隙率下降，与体孔隙率相比呈现负偏差。这一现象对于基体强度差的纯铝更为明显，而对于基体强度较好的铝合金则相对较小。在同样的扫描精度的情况下，胞状纯铝测量误差 $\varepsilon = -3.450\%$ ，多孔铝合金测量误差 $\varepsilon = -0.635\%$ 。

2 孔隙率沿长度方向的变化规律

将制备好的多孔铝试样沿渗流长度方向从上至下切割成 $d\ 50\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的试块，分别标号为

1, 2, 3, ..., 采用称量法测量其孔隙率，结果见表 2。根据表 2 中的数据，对孔隙率沿渗流长度方向的变化进行曲线拟合(图 2 中的实线)，其中纵坐标为孔隙率，横坐标为试块中点距离原点的距离。

从表 2 中可以看出，在自然堆积、正常浇注的条件下，整个试样中孔隙率存在较大的梯度，最大偏差 $\Delta\theta_{\max}$ 平均为 6.8%，两端偏差 $\Delta\theta_s$ 平均为 5.8%。同时，沿长度方向孔隙率的变化存在一定的规律：中上部孔隙率最高，顶端次之，底端最低(图 2)。

3 孔隙率梯度的形成机理

多孔铝合金的孔隙率由 3 部分组成^[6]：颗粒堆积密度引起的孔隙率是其主要部分，称为 $\theta_{\text{堆积}}$ ；铝合金熔体对填料颗粒不润湿形成了附加孔隙率，称为 $\theta_{\text{附加}}$ ；铝合金熔体凝固收缩产生的孔隙率，称为 $\theta_{\text{收缩}}$ 。总的孔隙率为三者之和： $\theta = \theta_{\text{堆积}} + \theta_{\text{附加}} + \theta_{\text{收缩}}$ 。根据孔隙率的形成原因，认为多孔铝合金孔隙率沿长度方向的梯度受 3 个方面因素的影响：凝

表 2 颗粒自然堆积时多孔铝合金沿长度方向的孔隙率

Table 2 Porosity gradient of porous aluminium alloy along length by spontaneous stacking

Alloy	Particle size d/mm	Sample No.						$\Delta\theta_{\max}$	$\Delta\theta_s$	Average	
		1	2	3	4	5	6			$\Delta\theta_{\max}$	$\Delta\theta_s$
ZL101	2.0~3.0	63.8	64.4	65.3	63.8	60.8	59.0	6.3	4.8	2.3	1.5
	1.25~1.60	64.5	65.5	63.2	64.7	62.2	59.2	6.3	5.3		
ZL111	2.0~3.0	65.3	65.9	63.2	65.7	60.6	57.5	8.4	7.8		
	1.25~1.60	64.1	65.0	62.0	64.3	62.0	58.8	6.2	5.3		

The maximum deviation $\Delta\theta_{\max}$ is the difference between the maximum and the minimum porosity; $\Delta\theta_s$ is the difference of porosity between two ends.

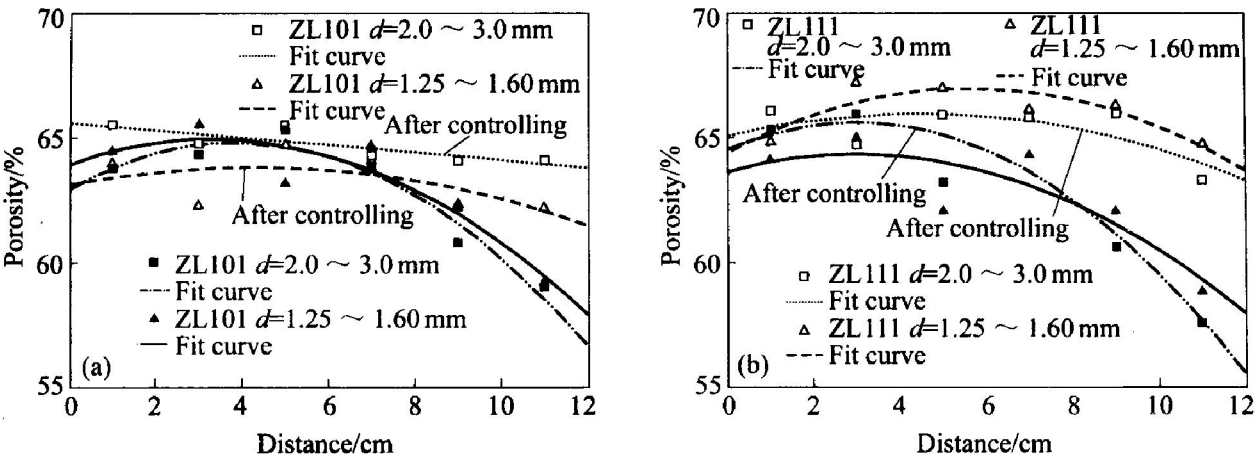


图 2 多孔铝合金沿长度方向孔隙率变化拟合曲线

Fig. 2 Fit curves of porosity variety along length

固时试样中所受的气体压力梯度影响孔隙率中的 $\theta_{\text{附加}}$; 试样的凝固顺序影响孔隙率中的 $\theta_{\text{凝固}}$; 填料颗粒堆积密度影响孔隙率中的 $\theta_{\text{堆积}}$ 。

3.1 压力梯度的影响

渗流开始时铝合金熔体前端的压力值瞬间达到渗流压力值 p , 而顶端仍然为大气压 p_0 , 两者之间存在压力差, 正是这一压力差将熔体吸入填料颗粒间隙中。渗流前端铝合金熔体所受的压力值最大 $\Delta p = p_0 - p$ 。由于铝合金熔体流动过程中的粘滞阻力以及与填料颗粒的摩擦阻力, 由下至上, 铝合金熔体中的压力差绝对值不断减小。这在长度方向的填料颗粒间隙中造成了同样的压力梯度, 如图 3 所示。

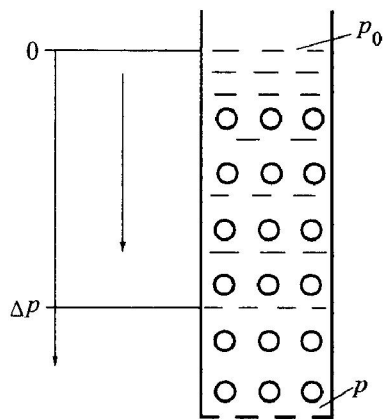


图 3 渗流过程中铝合金熔体所受压力差绝对值

Fig. 3 Pressure on aluminium alloy melt during infiltration

驱动压力值变化, 造成试样孔隙率中的 $\theta_{\text{附加}}$ 的变化, 驱动压力大, 则 $\theta_{\text{附加}}$ 小, 从而孔隙率 θ 相应减小。因而, 在不考虑其他因素时, 压力梯度造成了多孔铝合金试样孔隙率由上至下逐渐减小。压力梯度对多孔铝合金试样沿长度方向孔隙率梯度的影响是由渗流法本身的工艺特点所引起的。

3.2 凝固顺序的影响

渗流过程的时间很短, 铝合金熔体的散热可以不考虑。渗流结束后, 铝合金熔体开始冷却凝固。底端铝合金熔体与吸盘底座间的传导散热明显高于四周和顶端的对流散热, 此外, 长度的影响, 使得四周散热又高于顶端。因而, 总的凝固次序为: 底端先于四周, 四周先于顶端, 顶端又先于中上部, 如图 4 所示。

由于凝固顺序的差异, 造成了试样孔隙率的差异, 先凝固的部分收缩时能够得到铝合金熔体的补

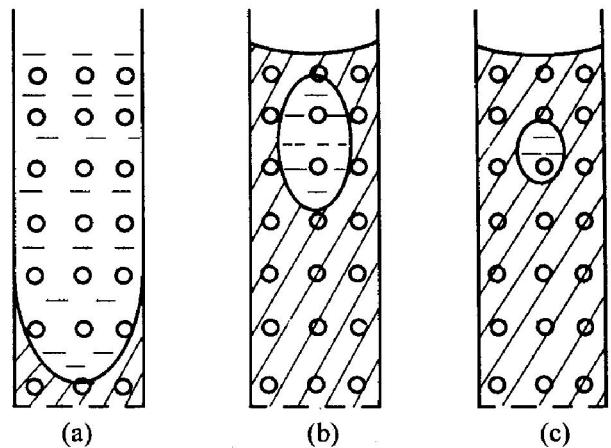


图 4 铝合金熔体凝固顺序示意图

Fig. 4 Schematic drawing of solidification sequence

缩, $\theta_{\text{收缩}}$ 小, 而后凝固的部分则得不到铝合金熔体的补缩, $\theta_{\text{收缩}}$ 大。因而, 在不考虑其他因素的情况下, 孔隙率中上部最高, 顶端次之, 底端最低。凝固顺序对多孔铝合金试样沿长度方向孔隙率梯度的影响也是由渗流法工艺特点所引起的。

3.3 颗粒堆积密度的影响

填料颗粒在自然堆积的情况下, 仅仅考虑自身重力的作用, 则填料颗粒受到上面的颗粒的压力、相互之间的摩擦力以及与器壁的摩擦力。通常, 上端的堆积密度不大于下端的堆积密度, 但重力及摩擦力对填料颗粒堆积密度的影响很复杂, 因而, 对试样孔隙率梯度的影响也很复杂。

1) 堆积密度梯度对孔隙率梯度的影响

填料颗粒的堆积密度是决定孔隙率的主要因素, 堆积密度大, 则多孔铝合金试样孔隙率高。假设颗粒自然堆积时, 颗粒堆积密度的梯度较大, 顶端堆积密度远小于底端, 颗粒堆积密度梯度造成多孔铝合金试样由上至下孔隙率逐渐增加。这与压力梯度与凝固收缩的影响相反, 部分抵消后两者的作用, 仍使得顶端孔隙率高于底端, $\Delta\theta_s$ 接近平均值 5.8% (如表 2 及图 2 所示)。

为了研究颗粒自然堆积时, 堆积密度沿长度方向的梯度对孔隙率梯度的影响, 进行如下实验: 将填料颗粒以自然堆积的方式装入模具中, 按正常的工艺加热到预热温度、保温、冷却, 然后将烧结后的整块填料完整取出, 倒置后重新放入模具中; 再按正常制备工艺, 制备多孔铝合金。获得的多孔铝合金试样, 按照同样的尺寸 ($d 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$), 由上至下切割成圆柱形试块, 通过称量法测得孔隙

率。

根据前面的假设可知, 填料块倒置后, 颗粒堆积密度由上至下将逐渐减小, 顶端堆积密度要远大于底端, 则颗粒堆积密度造成多孔铝合金试样从上至下孔隙率逐渐减小。这与压力梯度和凝固收缩影响相同, 三者共同作用, 必然使得顶端孔隙率远远高于底端, $\Delta\theta_s$ 远远大于不颠倒填料块时的 5.8%。否则, 说明颗粒自然堆积时, 堆积密度沿长度方向的梯度较小。

实验选用 ZL101 合金、颗粒直径 $d = 1.25 \sim 1.6 \text{ mm}$, 实验中倒置填料块, 其他实验条件与前文的正常制备过程相似。实验结果见图 5, 从中可以看出, 顶端和底端孔隙率差值为 3.3%, 并未远大于不颠倒填料块时两端偏差的平均值 5.8%, 即填料块倒置对于多孔铝合金孔隙率的变化并无太大的影响。由此可以推断, 在本实验条件下, 颗粒自然堆积密度沿长度方向的梯度较小, 因而对孔隙率梯度影响也较小。

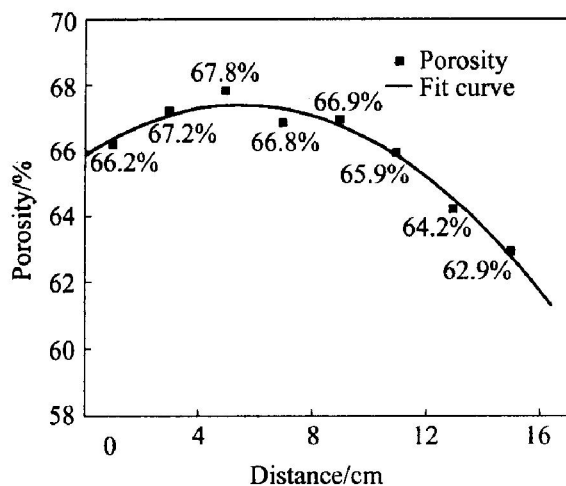


图 5 填料块倒置后获得的多孔铝合金孔隙率

Fig. 5 Porosity of aluminum alloy after inversion of prefabricated part

2) 理论分析

填料颗粒在模具中的堆积问题与粮食颗粒在粮仓中堆积很相似, 因而可以运用粮仓的有关理论来分析这一问题。在粮仓结构中, 通常以仓壁高度 H 与仓的内径 D 之比来划分深仓和浅仓, $H/D > 1.5$ 的为深仓, $H/D < 1.5$ 的为浅仓。

詹森采用连续介质模型^[15], 在力学平衡方程中, 加入由纵向压力产生的横向向壁压力系数来考虑粮仓结构中颗粒与仓壁之间的摩擦力, 给出了粮食堆积高度与粮仓底面所承受的力的关系式为

$$F = (\rho/K\mu)[1 - \exp(-\mu Kh/r)]$$

式中 ρ 为颗粒的质量密度; μ 为颗粒与仓壁之间

的摩擦因数; h 为颗粒的堆积高度; r 为水平净截面的水力学半径, $r = S/L$, S 和 L 分别为截面的面积与周长; K 为侧压力系数, $K = \tan^2(45^\circ - \varphi)$, φ 为颗粒的内摩擦角。

当粮仓中的颗粒物堆积高度较低时, $\mu Kh/r$ 值较小。此时, 可以简单的认为 $1 - \exp(-\mu Kh/r) = \mu Kh/r$, 代入上面的关系式得, $F = \rho h$, 此即适用于浅仓的朗金(Rankine)公式。

图 6 中方块符号为测量值, 虚线为詹森公式计算值, 点线表示静水压的情况^[15]。由詹森公式、朗金公式以及图 6 可以看出, 如粮仓中颗粒物较少, 即浅仓时, 压力随高度增加迅速增长, 而当粮仓中颗粒物达到一定高度以后, 粮仓底面所受压力不再随颗粒物的增加而增大。原因是颗粒堆积时, 颗粒与颗粒之间以及颗粒与仓壁之间的摩擦力抵消了部分颗粒的质量, 因而使得压力减小。

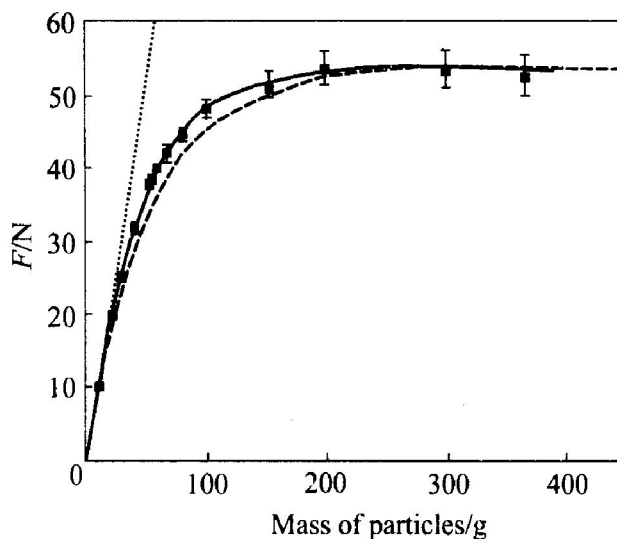


图 6 粮仓底面承受的力与颗粒质量的关系

Fig. 6 Relation between pressure of granary bottom and mass of particle

制备一定长度多孔铝合金时, 填料颗粒堆积高度与堆积直径之比通常大于 2 (120 mm/50 mm), 可以作为深仓看待。当颗粒堆积高度大于一定的数值后, 继续增加颗粒堆积高度, 并不能使底部颗粒所承受的压力随之增加, 使得颗粒堆积密度沿高度方向的梯度较小, 因而对多孔铝合金试样孔隙率梯度的影响也较小。这与前文的实验结果相吻合。

4 孔隙率梯度的改善及估计

4.1 孔隙率梯度改善

压力梯度与凝固顺序作为影响孔隙率梯度的 2

然堆积时的6.8%，减小为2.3%。

5) 在不破坏多孔铝合金试样的情况下，对整体孔隙率的均匀程度进行了估计。

REFERENCES

- [1] Banhart J, Ashby M F, Fleck N A. Cellular metals and metal foaming technology[A]. International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology[C]. Bremen: Verlag MIT, 2001. 1-520.
- [2] Banhart J, Ashby M F, Fleck N A. Metal foams and porous metal structures[A]. International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures[C]. Bremen: Verlag MIT, 1999. 1-420.
- [3] Gibson L J, Ashby M F. Cellular Solids-Structure and Properties[M]. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 1-528.
- [4] Ashby M F, Evans A G. Metal Foams: A Design Guide[M]. Boston: B-H Press, 2000. 1-5.
- [5] 吴照金, 何德坪. 泡沫铝凝固过程中孔隙率的变化[J]. 科学通报, 2000, 45(8): 829-835.
WU Zhaojin, HE Deping. The changes of aluminum form porosity during the solidification[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(8): 829-835.
- [6] 杨东辉, 何德坪. 多孔铝合金的孔隙率[J]. 中国科学B, 2001, 31(3): 265-271.
YANG Donghui, HE Deping. The porosity of cellular aluminium alloy[J]. Science in China(Series B), 2001, 31(3): 265-271.
- [7] 郑明军, 何德坪, 戴戈. 胞状铝合金凝固过程中固-液两相区的附加力场[J]. 中国科学, 2002, 32(3): 472-480.
ZHENG Mingjun, HE Deping, DAI Ge. The force of porous aluminum alloy in liquid-solid phase during solidification[J]. Science in China, 2002, 32(3): 472-480.
- [8] 郑明军, 何德坪, 陈峰. 多孔铝合金的压缩应力-应变特征及能量吸收性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 81-85.
ZHENG Mingjun, HE Deping, CHEN Feng. Com-
- pressive stress-strain behavior and energy absorption capability of porous aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): 81-85.
- [9] 何德坪, 闻德荪, 张勇, 等. 铝熔体在多孔介质中的渗流过程[J]. 材料研究学报, 1997, 11(2): 113-119.
HE Deping, WEN Desun, ZHANG Yong. The infiltration process of aluminum melt in porous media[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11(2): 113-119.
- [10] 马立群, 何德坪. 新型泡沫铝的制备及其孔结构的控制[J]. 材料研究学报, 1994, 8(1): 11-17.
MA Lìqun, HE Deping. Fabrication and pore structure control of new style aluminium foams[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1994, 8(1): 11-17.
- [11] 何德坪, 陈锋, 张勇. 发展中的新型多孔泡沫金属[J]. 材料导报, 1993(4): 11-15.
HE Deping, CHEN Feng, ZHANG Yong. The development of new style aluminium foams[J]. Materials Review, 1993(4): 11-15.
- [12] 张勇, 舒光冀, 何德坪. 用低压渗流法制备泡沫铝合金[J]. 材料研究学报, 1993, 7(6): 473-478.
ZHANG Yong, SHU Guangji, HE Deping. Fabrication of porous aluminium alloy by low pressure infiltration[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1993, 7(6): 473-478.
- [13] 何德坪, 马立群, 余新泉. 新型通孔泡沫铝的传热特性[J]. 材料研究学报, 1997, 11(4): 431-434.
HE Deping, MA Lìqun, YU Xinquan. The heat transfer characteristic of foamed metal with open pore[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11(4): 431-434.
- [14] CHEN Ce. Study on the Porosity Gradient of Porous Aluminum with Length and Its Higher Specific Strength[D]. Nanjing: Southeast University, 2003. 4-36.
- [15] 厚美瑛, 陆坤权. 奇异的颗粒物质[J]. 科学, 2000, 53(1): 28-31.
HOU Meiyang, LU Kunquan. The fantastic granule materials[J]. Sciences, 2000, 53(1): 28-31.

(编辑 陈爱华)