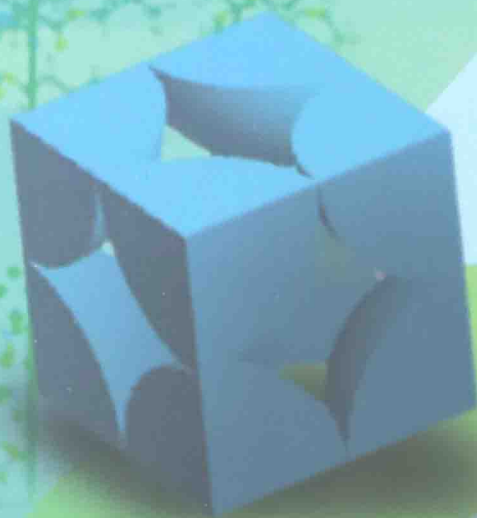


生物多孔支架三维快速成形 工艺数值分析

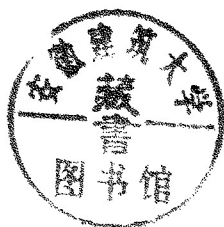
汪焰恩 著



科学出版社

生物多孔支架三维快速成形 工艺数值分析

汪焰恩 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

从功能性多孔轻质材料粉体原材料制备到零部件制备中涉及各种工艺环节。本书从分子动力学、计算流体力学和离散单元理论出发,详尽论述了数值分析对功能材料探索的重要性,并建立功能性多孔材料零部件制备的计算工艺。本书从微观、介观和宏观系统对多孔材料零件制备中的工艺数值计算做了系统介绍,有利于工艺实践。

本书可供物理、化学、生物、医学、冶金等涉及功能性轻质材料领域的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

生物多孔支架三维快速成形工艺数值分析/汪焰恩著. —北京:科学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-03-040237-0

I. ①生… II. ①汪… III. ①多孔性材料-金属压力加工-生产工艺-数值分析 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 052461 号

责任编辑:李 萍 甄文全/责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴/封面设计:范璧合

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:16 插页:2

字数:320 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代生物制造技术的迅速发展,生物活性骨支架已成为组织工程的重要研究热点之一。生物活性骨支架的结构设计和制造工艺一直是骨组织工程研究核心技术。活性骨支架的力学性能和渗透性能的相互制约是活性骨支架制造工艺所需重点解决的核心机理问题。利用传统异体骨支架灭活法所制备的骨支架虽能作为骨填充材料,但存在免疫源污染和血管细胞难以生长无法回避的难题;利用惰性金属制备的骨支架虽然力学性能优异,但由于机体排异反应而不能长久植入体内。三维打印增材制造方法的提出为解决常温制造复合骨形态蛋白酶多孔生物陶瓷骨支架提供了一个有效解决途径,但其制造工艺机理一直是众多骨组织工程研究者所关注的热点,对活性骨支架制造工艺机理的研究可以有效促进活性骨组织工程支架的制造和推广。

有效弹性模量和渗透特性是研究活性人工骨支架性能优劣的评判依据。利用生物黏结剂黏结羟基磷灰石生物陶瓷粉体和微球制备人工骨支架的工艺从微观和宏观直接影响骨支架的力学性能和渗透特性。然而,黏结剂喷洒量取决于成形机喷嘴的结构和作用机理。因此,为了有效分析活性骨支架制造机理,有必要从喷嘴结构综合考虑液体属性形成液滴、液滴碰撞、支架微观结构、有效弹性模量和支架孔隙率、连通性和比表面积等一系列有关活性骨支架制备工艺机理进行研究。明晰该制造机理不仅有利于生物活性骨支架制备和个性化定制不同参数的骨支架,同时对未来软体支架制备和陶瓷基复合材料轻质支架制备都将有积极参考价值。为此,作者根据多年从事活性骨支架制造机理研究成果,以及近年来在这一领域所发表的最新相关成果,写成此书。

本书系统地阐述了活性骨支架制造机理,共分为 8 章。第 1 章概述多孔材料分类应用领域,重点引出生物多孔材料支架在制造学理论的难点和精准制造生物多孔材料支架三维增材制造方法;第 2~3 章分别阐述粉体和微粒制备工艺及所涉及的数值分析理论分析生物陶瓷粉体的孔隙率和渗透性数学模型;第 4 章主要阐述了基于分子动力学理论生物活性骨支架力学性能计算研究;第 5~7 章分别阐述了基于窄管理论和相似法理论分析压电喷嘴对液滴的形成、液滴喷射工艺参数、液滴与生物陶瓷粉体和球体碰撞沉积理论;第 8 章介绍了利用有限元理论与固体力学数值法分析三维快速成形生物增材制造活性骨支架宏观力学模型。

本书中的主要研究内容是作者多年来在该领域内悉心研究的课题成果。在多

项国家自然科学基金项目的支持下,作者对制作骨支架相关工艺进行了研究,在压电窄管理论形成液滴、计算流体力学分析液滴喷射和碰撞、分子动力学方法分析制备支架弹性模量、离散单元法分析骨支架孔隙特性、结构力学和有限元法分析支架有效弹性模量方面的理论、实验和数值模拟方面的研究中取得了许多重要成果。今天有幸将这些研究成果和体会汇集成书呈现给同行和读者,作者要衷心感谢国家自然科学基金委员会对研究工作的长期支持,感谢西北工业大学专著出版基金项目的鼎力支持。同时,作者还要感谢那些在书中被引用的专著和相关参考文献的作者,衷心感谢魏生民教授的悉心指导,感谢杨明明、魏庆华、柴卫红、李鹏林、韩琴、周金华、王月波、潘飞龙、李欣陪和李川川对本书工作给予的支持以及无私帮助。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请同行和读者批评指正。

作 者

2014 年 3 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 光学电子器件应用	1
1.1.2 分离介质和功能性载体应用	2
1.1.3 导电高分子合成材料应用	2
1.1.4 生物医学应用	2
1.1.5 多孔材料的研究与发展	3
1.1.6 多孔材料孔径分类	3
1.2 非金属多孔材料的特点与应用领域	4
1.2.1 多孔聚合物材料的特点及应用	5
1.2.2 陶瓷类多孔材料的特点及应用	5
1.2.3 多孔陶瓷材料的制备工艺	6
1.2.4 多孔陶瓷材料的应用领域	8
1.2.5 生物活性多孔材料的特点及应用	11
1.2.6 生物诱导材料	12
1.3 多孔材料的微观结构性能参数	15
1.3.1 孔隙率表述	15
1.3.2 孔隙形貌检测与表述	17
1.3.3 渗透率	18
1.3.4 比表面积	18
1.3.5 多孔材料连通率	19
1.4 多孔材料的力学性能表征	19
1.4.1 多孔材料的机械性能	19
1.4.2 多孔材料制造加工过程中的数值分析理论介绍	20
1.5 本书的论述范围与结构	21
第2章 多孔材料颗粒制备及其数值分析	22
2.1 颗粒材料制备工艺	22
2.1.1 造粒工艺分类	22

2.1.2	羟基磷灰石陶瓷粉体成形工艺流程	24
2.1.3	混料	24
2.1.4	坯料的塑化	25
2.1.5	造粒	26
2.1.6	超高压成形法	27
2.1.7	烧结	27
2.2	多孔材料基体微观形态研究	29
2.2.1	微观团粒结构对颗粒体的影响	29
2.2.2	分形维数定义	31
2.2.3	分形维数 D 与孔隙率关系	33
2.2.4	颗粒间介观结构的分析	36
2.3	多孔材料宏观性能表征	40
2.3.1	多孔材料多场研究目的与意义	40
2.3.2	多孔介质多场耦合研究现状	41
2.3.3	多孔介质多场耦合研究的特点	41
2.4	多孔材料中多场耦合性能的守恒定律	42
2.4.1	质量守恒	44
2.4.2	动量守恒	44
2.4.3	能量守恒	45
2.5	本章小结	46
第3章	颗粒类多孔材料的成形及其微观结构分析	47
3.1	颗粒类多孔材料的应用及成形工艺	47
3.1.1	颗粒类多孔材料的应用	47
3.1.2	颗粒类多孔材料堆积成形工艺	48
3.2	离散单元法	49
3.2.1	离散单元法的发展及应用	49
3.2.2	离散单元法的理论	51
3.2.3	离散单元法的基本假设	52
3.2.4	离散单元法的接触模型	53
3.2.5	颗粒简化模型	56
3.2.6	颗粒单元的接触判断	58
3.2.7	颗粒单元的运动理论	60
3.2.8	离散单元法的求解步骤	62

3.3 基于离散单元法的颗粒流软件 PFC3D	63
3.3.1 PFC3D 软件的简介及应用	64
3.3.2 颗粒流方法的基本思想与假设	66
3.3.3 PFC3D 计算模型的生成方法	67
3.3.4 边界条件	69
3.3.5 颗粒流离散单元法求解的过程	71
3.4 颗粒类多孔材料微观特性计算方法	72
3.4.1 颗粒堆积孔隙率、配位数的计算	72
3.4.2 颗粒堆积连通性的计算	79
3.4.3 计算程序	81
3.5 本章小结	84
第4章 基于分子动力学的材料计算模拟	85
4.1 分子动力学	85
4.1.1 基本原理	86
4.1.2 常用数值解法	87
4.1.3 分子动力学模拟流程	89
4.2 分子模拟软件	90
4.3 计算机模拟中的粒子系综	93
4.3.1 微正则(NVE)系综	94
4.3.2 正则(NVT)系综	95
4.3.3 等温等压(NPT)系综	97
4.3.4 等焓等压(NPH)系综	98
4.4 计算机模拟中的力场	98
4.4.1 COMPASS 力场	99
4.4.2 CVFF 力场	101
4.4.3 DREIDING 力场	102
4.4.4 UNIVERSAL 力场	103
4.5 多孔材料计算模拟	103
4.5.1 模型结构研究	104
4.5.2 模型性能研究	104
4.6 胶黏剂与羟基磷灰石表面相互作用的模拟	105
4.6.1 模型的构建和 MD 模拟	105
4.6.2 模拟结果及分析	107

4.7 本章小结	111
第5章 黏结喷洒与微喷嘴压电微喷工艺	112
5.1 计算流体动力学概述	114
5.1.1 计算流体动力学简介	114
5.1.2 计算流体动力学主要分支	115
5.1.3 流体动力学控制方程	116
5.1.4 CFD方法的一般求解过程	119
5.1.5 商用CFD软件	121
5.2 压电振动	122
5.2.1 压电效应及压电方程	122
5.2.2 压电振动分析	124
5.3 压电喷头	135
5.3.1 典型结构	135
5.3.2 分析方法	137
5.4 压电挤压管振动及内部流场分析	138
5.4.1 压电管振动分析	138
5.4.2 液腔压力分析	140
5.5 本章小结	143
第6章 均匀液滴压电喷射数值	144
6.1 压电微滴喷射压力波分析与传播	144
6.1.1 压电喷嘴结构组成	144
6.1.2 压力波在压电管内的传播与计算	145
6.2 液滴喷射过程	148
6.3 计算模型的建立	150
6.3.1 控制方程	153
6.3.2 表面张力的处理	155
6.3.3 自由表面的处理	156
6.3.4 边界条件	158
6.3.5 定性要求	159
6.3.6 数值计算步骤与流程图	160
6.4 液滴喷射数值模拟	161
6.4.1 参数设置	161
6.4.2 几何模型建模	161

6.4.3 划分计算网格	162
6.4.4 边界条件	164
6.4.5 初始化条件	164
6.4.6 选择物理模型	165
6.5 微滴影响因素数值分析	165
6.5.1 分析液滴喷射过程	165
6.5.2 影响参数分析	167
6.6 本章小结	175
第7章 胶黏剂微滴碰撞固体球面的数值研究	177
7.1 液滴撞击固体表面的研究	177
7.2 液滴撞击固体基面过程分析	184
7.2.1 液滴撞击平面基板过程	184
7.2.2 液滴撞击球面基板过程分析	185
7.3 液滴撞击球面数值模拟	187
7.3.1 计算区域的离散	187
7.3.2 计算模型的选择	188
7.3.3 材料属性的设置	189
7.3.4 边界条件设置	189
7.3.5 设置求解控制参数	190
7.3.6 流场迭代计算	191
7.3.7 计算结果的后处理	191
7.4 液滴在球面上沉积行为的影响参数分析	192
7.4.1 撞击速度对液滴沉积行为的影响	192
7.4.2 球面直径对液滴沉积行为的影响	195
7.4.3 黏度对液滴沉积行为的影响	196
7.4.4 表面张力对液滴沉积行为的影响	197
7.5 本章小结	199
第8章 颗粒多孔材料零件的数值计算工艺与力学性能	200
8.1 颗粒快速成形工艺	200
8.1.1 快速成形现状	200
8.1.2 快速成形分类	201
8.1.3 颗粒类快速成形多孔材料工作原理	206

8.2	非均质材料性能的数值分析法介绍	207
8.2.1	多孔材料的孔隙率变化控制方程	208
8.2.2	多相物质数学模型	209
8.3	颗粒类多孔材料均匀化	212
8.3.1	直接均匀化法	212
8.3.2	间接法	214
8.3.3	二尺度展开法	217
8.4	单元胞有效弹性模量	220
8.4.1	有效场与有效性能的概念	220
8.4.2	建立单元胞	221
8.4.3	微球堆积理论模型	222
8.4.4	计算机数值模拟等效模型建立	227
8.5	喷射黏结层对有效弹性模量的影响	227
8.5.1	有限元模型的建立	227
8.5.2	结果分析	233
8.6	本章小结	233
参考文献		234
彩图		

第 1 章 绪 论

1.1 概述

多孔材料是一种由固体骨架组成的相互连通或彼此封闭的大量离散孔洞所构建的轻质网络结构材料。多孔材料按照不同分类标准有不同的分类方法,按照材质可分为金属基多孔材料和非金属基多孔材料;按照材料孔隙率大小(材料孔隙在多孔体系中的相对含量,称为孔隙率或孔隙度),可将它们分为中低孔率材料和高孔率材料。中低孔率材料的孔隙多呈封闭结构,高孔率材料则有三种不同的情况:①连续固相为多边形二维排列,类似于蜜蜂的六边形巢穴,故称“蜂窝材料”。②连续固相为三维网络,孔隙相互连通,故称“开孔材料”。③连续固相构成孔隙的多面体固体壁面,孔隙呈封闭或半封闭状态,故称为“闭孔材料”或“半开孔材料”。

若按孔洞排列方式可分为均匀有序多孔材料和无序非均匀多孔材料。典型孔结构有:一种是由大量有规则的多边形孔洞在平面上聚集形成的有序二维结构;更为普遍的是由大量多面体形状的孔洞在空间聚集形成的三维结构,通常称之为“泡沫”材料。按照孔径和孔道尺寸,国际化学与应用化学联合会(IUPAC)规定孔径小于 2nm 的多孔材料为微孔材料,孔径大于 2nm 且小于 50nm 的多孔材料为介孔材料,孔径大于 50nm 的多孔材料为大孔材料;按照用途不同可分为吸附材料、离子交换和化工催化材料;按照制造方法,有天然形成孔洞的疏松组织材料的天然多孔材料、利用发泡剂或制泡剂得到的发泡多孔材料和利用增材制造方法得到的多孔材料。

由于多孔与孔径的均一性特征,多孔材料可以作为药物释放的包埋材料、酶或蛋白运送过程中的保护层、在高选择性催化剂和催化剂载体、高效吸附剂、高强度轻质结构材料、新型复合材料等在生物医用等领域有着广泛的应用前景。按照量子理论,孔径与光的波长相当的有序多孔结构具有独特的光学性质,这类材料在新兴的光子晶体激光二极管、光子晶体光纤等光电子器件的制造领域可望发挥很大的作用。

1.1.1 光学电子器件应用

多孔材料在光电子领域应用广泛^[1],其中发展前景最好的是它在光子晶体方面的应用。光子晶体最基本的性质是光子带隙和光子局域。利用光子带隙特性,

可制备出光子晶体光纤和光子晶体全反射镜；利用光子带隙对原子自发辐射的抑制特性，可以大大降低由于自发跃迁而导致复合的概率，设计出低阈值激光器和光子晶体激光二极管；通过在光子晶体材料中引入缺陷，迫使光子禁带中产生频率极窄的缺陷态，可制造出高性能的光子晶体光过滤器、单频率光全反射镜和光子晶体光波导；若利用其点缺陷，则可制作成高品质因子的光子晶体谐振腔。综合利用光子晶体的各种性能，还可以有其他更广泛的应用，如光开关、光放大器、光聚焦器等。

1.1.2 分离介质和功能性载体应用

多孔膜与相应的膜分离技术包括微滤、超滤、电渗析、反渗透等，已广泛应用于食品、医药卫生、生物技术、化工、环境等领域，发挥着越来越重要的作用^[1]。膜技术经历了从有机高分子材料到无机多孔膜。由于无机多孔膜具有耐高温、化学稳定、耐腐蚀、力学强度高、结构稳定和易于清洗等特点，尤其适应膜分离过程在高温、苛刻环境下实际应用的需要，因而在医药卫生、石油化工、生物技术等方面有着广泛的应用。

作为载体材料的多孔材料，既可作为催化剂载体也可作为药物载体。作为催化剂载体，可用于氧化、氢化、酸催化、碱催化、卤化、生物催化、聚合反应、光催化；作为药物载体，可提高药物特定部位治疗效应，控制药物释放速率，降低毒副作用。

1.1.3 导电高分子合成材料应用

高分子多孔材料^[2]由于在孔道的合成中具有特殊的意义，因此高分子多孔材料具有特殊的应用价值。例如，MCM-41 材料的孔道呈现一维结构排列，结合孔径的限制效应，使得高分子材料的支链生长受限；或高分子链在沿孔道方向生长呈现更为有序的排列，在制备导电高分子或结晶高分子方面具有特殊的优越性和潜在的应用价值，可作为多种金属和无机导电材料的代用品，尤其在激光发射器等尖端技术领域不可缺少的一类材料产品上具有重要应用价值。这种多孔结构型高分子导电材料用于试制轻质塑料蓄电池、太阳能电池、传感器件、微波吸收材料以及试制半导体元器件等。但由于还存在稳定性差（特别是掺杂后的材料在空气中的氧化稳定性差）以及加工成形性、机械性能方面的问题，结构型高分子导电材料目前尚未进入实用阶段。

1.1.4 生物医学应用

多孔材料在生物医用领域应用广泛^[3]，不仅可作为硬组织器官替代材料，而且可作为软组织器官细胞培养支架，同时还可作为输血泵、包装袋等产品的原

料,也是基因生长载体的重要材料。例如,超高分子量聚乙烯 (ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 一般指黏均分子量大于 100 万的聚乙烯,是一种线性高结晶性的热塑性工程塑料。其分子式为 $[-CH_2-CH_2-]_n$,密度为 $0.936\sim 0.964\text{g/cm}^3$;热变形温度 (0.46MPa) 为 85°C ,熔点为 $130\sim 136^\circ\text{C}$ 。UHMWPE 还具有优良的对化学药品稳定性、吸水性、电绝缘性、生物惰性等。由于 UHMWPE 具有十分优越的物理、化学、机械性能,在各行各业都受到了广泛的应用,可作为矿业行业中的衬里材料,机械行业中的齿轮、轴瓦等。UHMWPE 同样在医学上也获得了大量应用,目前主要集中在关节替代材料中,超高分子量聚乙烯多孔材料已经成为人工骨组织工程支架的重要材料。同时,它还可用于牙托材料、医用移植物和整形缝合等领域,由于它的生物相容性和耐久性都较好,并具有高稳定性,不会引起过敏,已作临床应用。除 UHMWPE 外,还有聚四氟乙烯多孔材料在医用领域应用也很广泛。

聚四氟乙烯 (PTFE) 可制备多孔膜。由于使用的 PTFE 多孔膜的孔径、孔率、厚度等规格不同,以及基布的特性不同,可制作各种性能优异的复合材料应用于各行各业。利用 PTFE 多孔复合材料的大孔径、多孔率等特点,PTFE 多孔材料与医用纱布复合可组成防粘连的医用包扎材料,主要是因为 PTFE 多孔材料具有不粘连的特征。此外,PTFE 多孔复合材料还可用作高效气液相色谱柱材料、传感器用敏感材料、特种电池材料,甚至在酶或蛋白运送过程中的保护层材料。

1.1.5 多孔材料的研究与发展

多孔材料的研究与发展已经受到人们的普遍重视,许多应用在技术上已经成为可能。特别是多孔材料在能源、环保、化学工业方面的应用已初露锋芒,深层次的开发、应用和推广将带来无穷的经济效益与社会效益。

1.1.6 多孔材料孔径分类

多孔材料按照成分可分为无机多孔材料和有机多孔材料。无机多孔材料包括金属多孔材料和非金属多孔材料,而有机多孔材料可分为生物医用多孔材料和非生物有机多孔材料。由于分类标准有差异,因此本书更加关心孔径分类法,按照国际化学标准和孔拓扑排列方式可进行下面的分类。

1.1.6.1 单级微孔材料

微孔材料^[4]是非金属无机多孔材料中重要的组成部分,它具有规则的孔道结构和较强水热稳定性。在离子交换和化学催化反应过程中,具有很强的吸附和分离功能,因此在化工生产中被作为吸附剂和催化剂。分子筛按照结晶形态分为 A 型分子筛、X 型分子筛、Beta 分子筛、Y 型分子筛以及 ZSM-5 分子筛等。

1.1.6.2 介孔材料

介孔材料^[5]具有很高的稳定性和孔道的择形效应,其孔径尺寸介于2~50nm。1992年被Mobil公司研制出的MCM-41是介孔材料,它是一种孔径可调(1.5~10nm)的具有均一六方排列的介孔孔道的材料。由于介孔材料具有较大的孔径尺寸和大的外表面,使其在大分子催化反应中得到了广泛的应用。

复旦大学赵东元教授等^[6]采用三嵌段共聚物P123为模板,合成了介孔材料SBA-15,这种材料是应用比较广泛的介孔材料。它具有高度有序的六方晶相,孔径尺寸在4.5~30nm范围内可以调节,且具有比MCM-41厚的介孔孔壁,这使得它具有更好的水热稳定性。报道比较多的介孔材料有M41S类、SBA类、HMS类和MSU类系列材料等。之后又相继报道了一系列介孔碳的合成,如CMK-1、CMK-3、CMK-5和NC-2等。现在普遍认同的介孔材料的合成机理主要有液晶模板机理、协同作用机理、电荷密度匹配机理等。

1.1.6.3 大孔材料

单级多孔材料中有些特殊需求,需要提供大于50nm的孔道尺寸,此时大孔材料就会发挥其独特作用。大孔材料主要用于光学和声学方面,它具有一些微孔材料和介孔材料所不具备的特殊光学性质和声学特性,因此多用于光学材料和声学材料中,但是由于其合成工艺的不确定限制了大孔材料的发展和应用。

1.1.6.4 多级孔材料

多级孔材料^[7]是一类复合多孔材料,主要包括微孔-介孔复合材料、微孔-大孔复合材料、微孔-介孔-大孔复合材料等。

多级孔材料具有的独特的孔道结构使它在一些催化反应中表现出了较好的效果,常被用于催化剂载体,比如在石油化工领域的烷基化反应、正十六烷裂化反应、聚乙烯和聚丙烯的催化裂化反应中等。在反应中,复合材料展现了微孔材料良好的择形效果、酸性和水热稳定性,有利于产物的生成。同时,复合材料又有一定的介孔或大孔存在,增大了部分孔道尺寸,使得反应物和活性中心能够更好的接触,也有利于产物的传质与分离,提高催化剂的活性。因此,多孔复合材料成为当今科研工作者们研究的一个热点话题。

1.2 非金属多孔材料的特点与应用领域

多孔金属材料在最近20年里,受到材料学家和工程专家的关注,得以快速发展。由于它兼具功能和结构双重属性,因此已经成为新型的工程材料。它不仅保留了金属的可焊、导电及延展等特性,还具备其他多孔材料所具备的吸能减

振、消音降噪、透气透水、低热导率等多孔材料的特性。由于它还具有其他多孔材料所不具备的电磁屏蔽特性,因此使得金属多孔材料在安全和抗电磁干扰领域具有积极应用前景。多孔金属的制备方法主要有固态金属烧结法、液态金属凝固法、金属沉积法、自蔓延高温合成法及腐蚀造孔等。多孔金属复合材料的制备,是以上述各种方法为基础,进行再加工或复合加工。

随着现代化工、机械加工、航空航天以及现代军事工业的发展,对于非金属多孔材料的需求日益紧迫,尤其对于非金属多孔材料的制造工艺和零件加工工艺更是迫切需要理论指导。非金属多孔材料按照材料属性可分为多孔聚合物材料和陶瓷类多孔材料。

1.2.1 多孔聚合物材料的特点及应用

多孔聚合物材料^[8]因其独特的微孔结构和大比表面积的特点,使得多孔聚合物材料具有特殊的表面性质,可以使近表面原子行为和集体耦合现象被破坏,可应用于低密度、高导热和高电离性能的高比表面积材料,如:泡沫、膜、过滤器、色谱介质以及固体载体。同样,也可在催化剂载体、过滤吸附体、生物组织材料替代品以及环境科学等方面有很高应用价值。按照量子理论,孔径与光的波长近似的有序多孔结构具有独特的光学性质,这类材料在新兴的光子晶体激光二极管、光子晶体光纤等光电子器件等制造领域有潜在应用价值。

为了提高细胞的培养和成活,利用开放多孔聚合物材料制造方法建立体外培养环境来制造细胞培养支架,可以有效提高细胞培养支架的比表面积,增加细胞贴壁的有效表面积,可大大提高细胞培养效率。同样,利用多孔生物材料可以制造出人造脏器官,帮助人体活细胞成活于聚合物软体支架。同时,可以按照设计者意愿让活体细胞在设计好的多孔支架上生长,然后降解支架得到需要的内脏器官。这样可以有效解决组织工程中替代器官供源紧张的世界难题。

1.2.2 陶瓷类多孔材料的特点及应用

多孔陶瓷发展于19世纪70年代,最初仅作为细菌过滤材料使用,随着材料细孔结构制造水平的不断提高,利用其与玻璃纤维、金属等相比具有气孔分布均匀、均匀的透过性、机械强度高和易于再生、较低的热传导性、耐高温及抗腐蚀等优良性能,拓展了多孔陶瓷的应用领域,同时引起全球材料科学界的密切关注。多孔陶瓷是一种具有高温特性的多孔材料,其孔径从纳米级到毫米级不等,孔隙率范围介于20%~95%,温度可从常温到1600℃。多孔陶瓷具有相对低密度和热导率、不同透过性,广泛被用于冶金、环保、能源、化工、生物、医药等领域,可被作为分离、过滤、吸声、减振和催化剂载体等,已在电子学和生物医学等方面有着特殊的用途^[9,10]。多孔陶瓷材料是以碳化硅、堇青石、刚玉砂等优

质原料为主料, 经过成形和特殊高温烧结工艺制备的一种具有开孔孔径、高开口气孔率的材料, 具有耐高压、高温、抗酸碱和有机介质腐蚀, 并且具有良好的生物惰性, 其成形孔隙率可控和高的开孔率、使用寿命长、产品再生性能好等优点, 可以应用于各种介质的精密过滤与分离、高压气体排气消音、气体分布及电解隔膜等领域, 还可用于生物医学研究领域。

多孔陶瓷主要有以下特点:

(1) 气孔率高。多孔陶瓷由于工艺不同可以具有较多的均匀可控的气孔, 包括开气孔和闭气孔, 开气孔可用于石化过滤和催化剂载体, 而闭气孔可以作为保温绝缘材料。

(2) 强度高。多孔陶瓷材料主要有金属氧化物、碳化硅、二氧化硅等材料成分, 若其经过高温煅烧后, 多孔陶瓷则具有较高机械强度。

(3) 物化特性稳定。陶瓷材料本身具有耐酸碱腐蚀, 也能够承受高温、高压, 自身洁净状态好等优良特性, 因此多孔陶瓷材料同样也具有这些优良特点, 并且多孔陶瓷材料可以作为一种优秀绿色环保功能材料。

(4) 过滤性能高, 再生性能好。作为过滤材料, 多孔陶瓷材料具有较窄的孔径分布范围和较高的气孔率与比表面积, 被过滤物与陶瓷材料充分接触, 其中的悬浮物、胶体物及微生物等污染物质被阻截在过滤介质表面或内部, 过滤效果良好。多孔陶瓷过滤材料经过一段时间的使用后, 用气体或者液体进行反冲洗, 即可恢复原有的过滤能力。

1.2.3 多孔陶瓷材料的制备工艺

多孔陶瓷的制备方法很多^[12,13], 传统方法有发泡法、致孔剂法、有机泡沫浸渍法、溶胶-凝胶法。近年来由于多孔陶瓷的应用领域不断发展, 因此催生了制备多孔陶瓷工艺的研究, 在传统制备技术基础上, 出现了挤出成形法、固相烧结、冷冻干燥、热压、离子交换等新工艺。

1) 发泡工艺

多孔陶瓷常用发泡工艺制备, 在陶瓷组分中添加有机或无机物质, 通过化学反应产生挥发性气体, 经干燥和烧结制成多孔陶瓷。由于容易控制产品的形状、成分和密度, 并可制备各种气孔形状和大小的多孔陶瓷, 因此发泡工艺特别适用于制备闭气孔的陶瓷材料。

2) 添加成孔剂工艺

该工艺与发泡法类似, 都需要在陶瓷配料中添加其他物质, 而该工艺是利用造孔剂在坯体中占据的空间, 通过烧结、剥离造孔剂形成气孔来制备多孔陶瓷。造孔剂同样也分为无机和有机两类: 无机造孔剂有碳酸氢铵、碳酸铵、氯化铵等高温可分解的盐类等; 有机造孔剂主要是高分子聚合物、天然纤维和有机酸等。