

可降解金属

(上册)

郑玉峰 秦岭 杨柯等著



科学出版社

可降解金属

(上册)

郑玉峰 秦岭 杨柯等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

医用可降解金属兼具传统医用金属材料的综合力学性能和独特的体液腐蚀降解特性,是近年来生物医用金属材料领域的研究热点。

本书分为上、下两册。上册内容包括:第一部分基础篇,共5章,重点介绍可降解金属的定义、分类、发展历史、研究方法、合金元素的生理学作用,以及可降解金属的新颖结构、可降解金属的表面改性方法;第二部分应用篇,共8章,重点介绍可降解金属医疗器械的加工与设计,可降解镁金属器械在骨科、心血管科、普外科等临床场合的应用,可降解镁合金吻合钉的设计与评价,镁营养添加剂与相关疾病的治疗与防护,含可降解镁金属粉末的骨组织工程支架设计与评价,可降解镁金属的生物功能探索。

本书可供从事可降解金属材料的设计、生产和生物医学应用研究的技术人员阅读,也可供相关专业高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

可降解金属(上册) / 郑玉峰等著. —北京: 科学出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-03-050394-7

I. ①可… II. ①郑… III. ①金属材料 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257570 号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张:26 1/4

字数:504 000

定价:160.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

由于具有可降解性和生物力学性能(如高拉伸强度、与骨相似的弹性模量等),加之低廉的成本,以镁和镁合金为代表的可降解金属成为新型的内植物材料,是目前金属生物材料领域的研究热点。实际上,早在 19 世纪后期就有学者将可降解镁基金属用于血管结扎和肠、血管吻合。到 20 世纪 30 年代,就有关于可降解镁基金属作为骨科内植物材料的报道,诸多尝试均因内植物在体内降解过快而以失败告终。进入 21 世纪以来,在材料学家和临床医生的不断努力之下,降解速率等问题可能通过应用防护涂层、新合成方法、新镁合金的发明而取得突破。基于上述努力,尽管可降解金属目前不能像常用的非降解骨内固定物、心血管支架那样应用于临床,但鉴于其具备现有金属生物材料所没有的可降解性和一些优于目前应用的聚乳酸等可吸收材料的特点,人们一直没有放弃促使可降解金属成为具有独特性能的医学内植入材料的追求和努力。

研发可降解金属内植物,最为关键的要素在于“安全”。以骨科内植物为例,可降解金属需具有足够的力学安全、降解时间安全、降解微环境安全性能。其次,使用可降解金属同样是对疾病治疗模式的创新,应符合个性化和精准化的要求,应能满足不同患者对于内植物尺寸、降解速率、力学性能及其在降解过程中变化的要求,应该是“个体化”和“功能化”的。这就需要实现镁和镁合金的疾病适配、力学适配、降解适配、元素适配、免疫适配。

我国的可降解金属研究一直处于国际先进和领先行列,特别是在可降解镁基金属的设计加工、表面改性、降解机制、降解后微环境生物学分析等方面,国内的科学家有许多较新颖的研究报道。《可降解金属》一书集合了我国从事可降解金属研究的 14 家单位多个团队的智慧结晶,将带给读者系统的、前沿的知识和启迪。



2016 年 5 月 20 日

序 二

长期以来,我国在镁或医用镁合金方面的研究一直处于全球领先地位。然而,我国此领域的科研成果在发表文章、取得专利之后,往往没在产业化道路上走下去。在2010年宜安科技股份有限公司研发了国内纯度较高的金属镁之后,本人就细想,高纯镁可有哪些用途?我国的医用镁合金研究已有十多年历史,成果相当好,但距离产业化还有一段路要走。

2012年本人作为召集人,在科技部的支持下,建立了“医用镁合金创新联盟”,搭建了自主知识产权的可吸收镁合金医疗器械技术研发平台,开展了产学研用的系列化工作。鉴于新材料作为体内植入物需要有国外案例作为参考,在2013年德国企业正式宣布获得欧盟认证后,宜安科技股份有限公司和医用镁合金创新联盟积极展开申报,在2014年年初与国家食品药品监督管理总局在北京举行全国性的医用镁会议后,终于在2014年年底取得绿色通道资格。在2015年举办了一系列临床会议后,于年底开展临床试验。

《可降解金属》一书系统总结了以北京大学郑玉峰教授为首的我国14家单位,近40名专家在可降解金属研究领域的最新、最重要的学术成果。书中重点介绍可降解金属医疗器械在骨科、心血管科、普外科等临床场合的应用、设计与评价,具有很高的学术参考价值。

该书的作者均多为医用镁合金创新联盟的核心成员。我们有理由相信,在大家的共同努力下,我国将开拓具有自主知识产权的新型可降解金属医疗器械,打造世界级的品牌。

宜安科技总设计师



2016年7月8日

前 言

进入 21 世纪,可降解金属(biodegradable metals)不仅成为生物医用金属材料领域最热、最活跃的研究方向,也成为国际生物材料学术界普遍接受的一个新的学术分支(2012 年世界生物材料大会上首次作为主题设立分会场,并在 2016 年世界生物材料大会再次被批准列入分会主题)。Web of Science 数据库检索相关词条不难发现,可降解金属的基础科学研究自 2002 年起呈现出“从合金开发设计到性能提升方法”“从体外细胞实验到体内植入实验”“从动物到人”“从外周血管到心血管”“研究内容逐年深入、论文数量快速增长”的发展脉络,现在每年有数百篇的可降解金属研究论文在权威刊物上发表。2009 年起,每年国际上都会召开“可降解金属”国际会议,参会者来自美国、德国、中国、加拿大、瑞士、澳大利亚、英国、荷兰、新西兰、韩国、日本、巴西、土耳其等 20 多个国家。

可降解金属在欧美被誉为—类革命性的金属生物材料(revolutionized metallic biomaterial)。欧盟正通过第七框架下的 People Programme (Marie Curie Actions)滚动支持研究开发新型可降解镁合金;美国国家自然科学基金会于 2008 年批复“革命性医用金属材料”工程研究中心,投资 1800 万美金用于可降解镁合金材料及植入器件研究。2007 年德国 BIOTRONIK 公司在《柳叶刀》杂志报道了镁合金裸支架的临床研究成果,2013 年 1 月又在《柳叶刀》杂志报道了镁合金冠脉药物洗脱支架临床研究成果。2013 年 2 月《自然》子刊给予高度评价,指出“可吸收支架的梦想变为现实”。2013 年德国 Syntellix AG 公司开发的 MAGNEZIX® 可降解镁合金压缩螺钉成为全世界第一个获得 CE 认证的骨科产品(三类植入器械),用于小骨和骨碎片的固定。2014 年韩国药监局批准了 Mg-Zn-Ca 合金手掌骨骨折骨钉产品上市。上述事实使得我们有理由看好可降解金属的未来临床应用。

我国的可降解金属研究与国际同步且水平相当,特别是可降解镁合金的设计与制备、表面改性、降解行为、生物相容性等方面已开展了大量的探索研究工作并已开始进入临床应用研究阶段。国家先后在国家重点基础研究发展计划(973)、国家高技术研究发展计划(863)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金等项目设立了可降解金属及其医疗器械产品研发的课题,鼓励科技原始创新。我国有超过百家研究机构和企业目前在从事可降解金属及其医疗器械的研制,已在国际权威刊物发表了数百篇 SCI 论文并得到数千次的他引和正面评价,获得百余项授权或公开的国家发明专利,在国际会议上有多人次担任国际可降解金属会议主席或分会

主席并做各类邀请报告。这些都反映了我国科学家在可降解金属研究的学术水平和影响力。我国也是率先在国际上开展可降解金属的临床试验研究(目前仅有德国、中国和韩国)的国家。国家食品药品监督管理总局医疗器械技术审评中心的创新产品绿色通道已经批准注氮铁支架和纯镁骨钉产品开展临床试验。

作为前言,必须要跟读者分享的是可降解金属这个名词的由来及其定义。通常意义上讲,工程用金属对应的是腐蚀(corrosion),而高分子材料对应的是降解(degradation)。在传统的生物材料的分类中,医用金属一般是生物惰性的(bio-inert),希望有更好的腐蚀抗力;医用陶瓷或玻璃有些是生物惰性的;有些呈生物活性(bio-active)并可吸收(bio-absorbable),高分子材料有些是不可降解的,有些是可降解(biodegradable)和可吸收的(bio-absorbable)。可谓不同的材质有不同的表述。所以当冠名以镁合金为代表的新型的可在体液环境下逐渐发生腐蚀而各类腐蚀产物可以被生物体通过新陈代谢而转移或排出的这类医用金属时,到底该用什么名称是比较科学的?迄今还没有一个统一的看法。但作为医用金属,为了和工程用金属有所区别,人们没有使用“bio-corrodible”来描述,而是广泛地使用“biodegradable metals”这个英文名词来描述这类金属。看到这个名词的时候,大家都会明白这不是工程用途的金属,而是面向医学应用的可被体液腐蚀降解的金属。关于其定义,2014年作者与顾雪楠、Frank Witte 共同撰写的综述文章中首次明确给出:可降解金属,是指能够在体内逐渐被体液腐蚀降解的一类医用金属,它们所释放的腐蚀产物给机体带来恰当的宿主反应,当协助机体完成组织修复使命之后将全部被体液溶解,不残留任何植入物。按照概念的内涵和外延来看,需要强调的是,可降解金属的定义不是简单地说一种金属如果能够在体液环境中发生腐蚀降解,就是可降解金属。换句话说,能发生降解的金属并不是全部都可以称为“可降解金属”,而是说只有100%可被机体降解,且其降解产物不会对宿主带来毒性危害的金属才是符合定义的“可降解金属”。从这个意义上讲,我们所给的第一个版本的可降解金属定义,已经是按照高标准的“可完全被人体吸收的医用金属”来定义的。也就是字面上我们用的是“biodegradable metals”,但其概念的核心内涵其实是“100% bioabsorbable metals”。这点请读者务必把握,即未来我们所研发的可降解金属应该是金字塔尖上的最高级的。按照这样的界定,正确的可降解金属设计思路应该是采用人体的生命必需元素作为合金组成元素(可以是金属,也可以是非金属),因为生命必需元素能够通过人体的新陈代谢调整其在体内的含量,避免在体内累积引发毒性。

有关“biodegradable”和“bioabsorbable”的叫法,到底哪个更合适,是作者纠结很久的问题。作者曾和ASTM委员会中负责起草标准的Byron Hayes先生讨论,他认为“absorbable metals”更合适(目前在起草的国际标准中采用的是absorbable metals的描述),他提及“可吸收”的叫法最早是基于缝合线等可被人体吸收的医疗

器械而采用的,未来希望延续到金属上。在目前的 ISO 和 ASTM 标准草案附录中,“absorbable metals”的定义是与我们在 MSER 文章中给出的“biodegradable metals”相近的。四川大学的千人计划学者王云兵教授在会议中曾提到,在美国 ASTM 委员会中他力推用 absorbable 这个单词还有个考虑是其首字母是 a,在名词排序时更容易排到前面。作者也曾和研究无机非金属生物材料的 Marc Bohner 教授讨论,“biodegradable metals”的叫法对他而言可以接受。实际上很多时候会看到的表述是“生物活性陶瓷又叫生物降解陶瓷,包括表面生物活性陶瓷和生物吸收性陶瓷”这样混为一谈的描述。再来看看“biodegradation”的定义:生物可降解是指材料在生物体内通过溶解、酶解、细胞吞噬等作用,在组织长入的过程中不断从体内排出,修复后的组织完全替代植入材料的位置,而材料在体内不存在残留的性质。同时,我们注意到不论生物陶瓷和玻璃,还是聚合物,实际上在测试性能的时候都是用的“体外降解性能测试”(in vitro degradation testing),而没有用到“吸收性能测试”的表述,因为吸收指的是机体的行为,是在材料发生降解之后机体对材料所排放到机体中的各类降解产物(固体残渣、离子和气体)的生物学反应。有的时候降解产物不能被机体直接吸收,但机体通过巨噬细胞等搬运走材料的降解产物固形物。综上所述,我们最终选择了“可降解金属”作为统一术语(因为它已经被广泛采用,并且降解特性是材料的属性,用 biodegradable 来修饰 metals 应该比用 bioabsorbable 更贴切,但实际上 biodegradable metals 的最高境界是“100% bioabsorbable”。

本书分为三个部分,上、下两册,共 27 章。上册包括:第一部分基础篇,共 5 章,重点介绍可降解金属的定义、分类、发展历史、研究方法、合金元素的生理学作用,以及可降解金属的新颖结构、可降解金属的表面改性方法;第二部分应用篇,共 8 章,重点介绍可降解金属医疗器械的加工与设计,可降解镁金属器械在骨科、心血管科、普外科等临床场合的应用,可降解镁合金吻合钉的设计与评价,镁营养添加剂与相关疾病的治疗与防护,含可降解镁金属粉末的骨组织工程支架设计与评价,可降解镁金属的生物功能探索。下册包括第三部分代表性材料篇,共 14 章,重点介绍纯镁、镁钙、镁锶、镁锌、镁锂、镁锡、镁(硅、锰、锆、银)、镁钇、镁锌稀土、镁钨、镁基(钆、镧、铈、镨)、铁基、锌基、大块非晶等可降解金属合金体系。

本书主编为郑玉峰(北京大学),规划了本书的结构框架并组织了本书的撰写,副主编为秦岭(香港中文大学)和杨柯(中国科学院金属研究所)。本书编写人员如下(按章节顺序):第 1 章杨柯、谭丽丽(中国科学院金属研究所);第 2 章 2.1 节谢鑫荟、王佳力、秦岭(香港中文大学、东南大学);2.2 节许建坤、张翼峰、秦岭、滕斌、任培根(香港中文大学、中国科学院深圳先进技术研究院);2.3 节王佳力、田立、秦岭(香港中文大学);第 3 章 3.1、3.2 节张翼峰、许建坤、秦岭(香港中文大学);3.3 节李健、任培根(中国科学院深圳先进技术研究院);第 4 章顾雪楠(北京航空航天

大学);第5章成艳(北京大学);第6章杨柯、谭丽丽、万鹏(中国科学院金属研究所);第7章赵德伟(大连大学);第8章奚廷斐、甄珍(北京大学);第9章曲新华、李扬、吴传龙(上海交通大学);第10章白晶、曹键、储成林(东南大学、北京大学人民医院);第11章王佳力、杨智均、秦岭(香港中文大学、香港浸会大学);第12章赖毓霄、李烨、李龙、秦岭(中国科学院深圳先进技术研究院、香港中文大学);第13章杨柯、谭丽丽、任玲、曲新华(中国科学院金属研究所、上海交通大学);第14章杨柯、谭丽丽、于晓明(中国科学院金属研究所);第15章郑玉峰、吴远浩(北京大学);第16章郑玉峰、吴远浩(北京大学);第17章张小农、赵常利(上海交通大学);第18章曾荣昌(山东科技大学);第19章李莉、李珍(哈尔滨工程大学);第20章张二林(东北大学);第21章彭秋明(燕山大学);第22章关绍康、王俊、朱世杰、王利国(郑州大学);第23章袁广银(上海交通大学);第24章顾雪楠(北京航空航天大学);第25章郑玉峰、黄涛(北京大学);第26章郑玉峰、李华芳(北京大学);第27章郑玉峰、李华芳(北京大学)。作者热情高涨地努力去把最精彩的内容奉献给读者,但由于人数众多,在各章的内容衔接和写作风格统一方面,难免有不完善或不妥之处,还请读者见谅。

最后,感谢哈尔滨工业大学赵连城院士和中国科学院上海硅酸盐研究所丁传贤院士推荐本书申报中国科学院科学出版基金,还要感谢国家重点基础研究发展计划课题(2012CB619102)、国家杰出青年科学基金项目(51225101)、国家自然科学基金重点项目(51431002)、生物可降解镁合金及相关植入器件创新研发团队(广东省科技计划项目编号 201001C0104669453)对本书出版的支持。

郑玉峰

2016年5月4日于燕园

目 录

序一
序二
前言

第一部分 基础篇

第 1 章 绪论	3
1.1 生物可降解金属的定义和分类	3
1.2 可降解金属的研究发展历史简述	6
1.3 可降解金属的降解机理	13
1.3.1 一般性降解机制	13
1.3.2 环境因素对金属生物降解行为的影响	15
1.3.3 力学性能随降解时间的衰退	21
1.4 可降解金属的临床应用与未来发展	27
参考文献	29
第 2 章 可降解金属的研究方法	36
2.1 体外降解行为及力学性能评价	36
2.1.1 体外降解行为评价	36
2.1.2 力学性能评价	40
2.2 体外细胞学影响	41
2.2.1 体外实验设计的原则	41
2.2.2 研究现状	42
2.2.3 技术路线及方法	44
2.2.4 结果分析	49
2.2.5 亟待解决的关键问题:建立起与动物体内实验关联性	49
2.2.6 镁与破骨细胞	51
2.3 体内动物模型与评估	55
2.3.1 界面螺钉在兔前十字交叉韧带重建模型中的应用	55
2.3.2 动物模型建立	56
2.3.3 评估手段	57
2.3.4 模型的局限性	63

2.3.5 模型的改进	64
参考文献	65
第3章 可降解金属的骨生理学作用	72
3.1 镁与骨组织.....	72
3.1.1 镁在人体中的吸收方式	72
3.1.2 镁与骨组织代谢.....	74
3.1.3 镁在骨矿化过程中的作用	77
3.2 元素 Fe	80
3.2.1 铁与骨代谢	80
3.2.2 铁代谢与遗传性疾病	83
3.2.3 铁代谢与神经系统疾病	84
3.2.4 铁代谢与其他系统疾病	84
3.3 元素 Zn	85
3.3.1 锌与骨代谢	85
3.3.2 锌代谢与神经系统疾病	86
3.3.3 锌代谢与其他组织系统疾病	87
3.4 元素 Sr	88
3.4.1 锶与骨代谢	88
3.4.2 锶代谢与心血管疾病	89
3.4.3 锶代谢与其他组织系统疾病	90
3.5 元素 Si	90
3.5.1 硅与骨代谢	90
3.5.2 硅代谢与其他组织系统疾病	91
3.6 稀土元素.....	92
3.6.1 稀土元素与骨代谢.....	92
3.6.2 稀土代谢与其他组织、器官.....	94
3.7 总结与展望.....	95
参考文献	96
第4章 可降解金属的新颖结构.....	104
4.1 可降解金属的复合化	104
4.1.1 可降解镁基复合材料	104
4.1.2 可降解铁基复合材料	114
4.2 可降解金属的多孔化	116
4.2.1 可降解多孔合金的制备工艺和结构特征	117
4.2.2 可降解多孔镁的性能	119

4.2.3 可降解多孔铁的性能	121
4.3 可降解金属的纳米化	122
4.3.1 可降解金属的纳米化制备工艺	123
4.3.2 可降解超细晶镁合金	125
4.3.3 可降解超细晶铁	129
4.4 可降解金属的薄膜化	129
4.4.1 可降解金属薄膜制备工艺	130
4.4.2 可降解镁薄膜	130
4.4.3 可降解铁薄膜	131
4.5 3D 打印技术在可降解金属中的应用	132
4.6 展望	133
参考文献	134
第5章 可降解金属表面改性	142
5.1 化学转化膜层	143
5.1.1 氟化处理膜层	143
5.1.2 磷酸盐化学转化膜层	148
5.1.3 植酸转化膜层	149
5.1.4 其他化学转化膜层	150
5.2 镁及镁合金微弧氧化	150
5.2.1 镁及镁合金微弧氧化机理	151
5.2.2 镁及镁合金微弧氧化膜层特点	153
5.2.3 影响镁及镁合金微弧氧化膜的主要因素	156
5.2.4 微弧氧化镁合金的体内外腐蚀行为	164
5.3 生物活性陶瓷涂层	167
5.3.1 钙磷涂层	167
5.3.2 其他生物活性涂层	181
5.4 聚合物涂层	182
5.4.1 聚乳酸类涂层	183
5.4.2 PCL 膜层	186
5.4.3 壳聚糖及其复合涂层	188
5.4.4 PVAc 膜层	190
5.4.5 海藻酸及其复合膜层	191
5.4.6 PEI 及其复合膜层	192
5.4.7 其他聚合物涂层	194
5.5 其他涂层	195

5.6 可降解镁合金心血管植入物的表面改性	195
5.6.1 气体等离子体表面改性	196
5.6.2 可降解聚合物膜层	200
5.7 展望	205
参考文献	205

第二部分 应用篇

第6章 可降解金属植入医疗器械的加工与设计	227
6.1 可降解金属的原材料半成品	227
6.1.1 镁合金	227
6.1.2 铁合金	227
6.2 可降解镁合金植入器械的加工	229
6.2.1 镁合金的机械加工	229
6.2.2 镁合金的挤压加工	230
6.2.3 镁合金的拉拔加工	232
6.2.4 镁合金的轧制	235
6.2.5 镁合金心血管支架的激光加工成型	240
6.3 可降解镁合金植入器械的消毒	240
6.3.1 镁合金消毒过程	240
6.3.2 辐照灭菌的影响因素	245
6.4 可降解金属器械的有限元分析与优化结构设计	246
6.4.1 有限元分析研究现状	246
6.4.2 骨钉、骨板的有限元分析	246
6.4.3 心血管支架的有限元分析	251
参考文献	256
第7章 可降解镁金属在骨科的临床应用研究	261
7.1 可降解镁金属在股骨头坏死保头治疗中的临床应用研究	263
7.2 可降解镁金属在股骨颈骨折治疗中的临床应用研究	264
7.3 可降解镁金属在髌臼缺损治疗中的临床应用研究	265
7.4 小结和展望	266
参考文献	266
第8章 可降解镁金属在心血管中的临床应用	268
8.1 可降解镁金属裸支架在心血管中的临床应用	269
8.2 可降解镁金属药物洗脱支架在心血管中的临床应用	270
8.3 可降解镁金属支架在其他血管中的临床应用	271

8.4 可降解镁金属作为介入器械的应用展望	272
参考文献	274
第9章 可降解金属在普外科的应用	276
9.1 可降解金属在外科缝扎和血管吻合的应用	276
9.2 可降解金属在血管和神经吻合的应用	280
9.3 可降解金属在胃肠外科的应用	283
9.4 可降解金属在肝胆外科的应用	285
9.5 可降解金属在血管瘤治疗的应用	285
9.6 小结和展望	286
参考文献	287
第10章 可降解镁金属吻合钉的设计与验证	289
10.1 可降解镁金属吻合钉的结构设计与加工制造	289
10.1.1 胃肠吻合技术及吻合器的发展	289
10.1.2 胃肠吻合器的工作原理与分类	291
10.1.3 胃肠吻合器的优点与现阶段存在的不足	292
10.1.4 可降解镁金属胃肠吻合钉的思路提出及其面临的挑战	293
10.1.5 可降解镁金属胃肠吻合钉的结构设计	295
10.1.6 可降解镁金属胃肠吻合钉的加工制造	296
10.2 可降解镁金属吻合钉的体外评价	307
10.2.1 可降解镁金属吻合钉用细丝材的体外降解行为	308
10.2.2 可降解镁金属吻合钉用细丝材的表面改性及体外降解行为	311
10.2.3 可降解镁金属吻合钉体外降解性能及生物相容性评价	321
10.3 可降解镁金属吻合钉的体内评价	327
10.3.1 可降解镁合金吻合钉用于动物胃肠吻合手术的可行性研究	327
10.3.2 可降解镁合金吻合钉的降解对吻合口局部及动物安全性影响	334
10.4 展望	339
参考文献	340
第11章 镁营养添加剂与相关疾病的防治与治疗	343
11.1 镁与骨质疏松	344
11.2 镁与神经系统	346
11.3 镁与肌肉系统	346
11.4 镁与糖尿病	346
11.5 总结	347
参考文献	347

第 12 章 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架材料的设计与评价	349
12.1 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架结构设计及三维打印工艺	350
12.1.1 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的结构设计	350
12.1.2 可降解镁金属粉末的预处理	353
12.1.3 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的 3D 打印工艺	354
12.2 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的体外评价	354
12.2.1 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的材料学分析	355
12.2.2 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的体外生物学检测 ..	357
12.3 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的动物体内评价	361
12.3.1 体内研究背景简介	361
12.3.2 动物模型的构建	362
12.3.3 含可降解镁金属粉末的多孔活性复合骨修复支架的体内成骨性能评价	364
12.4 总结与展望	366
参考文献	366
第 13 章 可降解镁金属的生物功能探索	370
13.1 促进成骨功能	371
13.2 抑制骨质疏松功能	376
13.3 抗菌功能	382
13.4 抑制肿瘤功能	393
13.5 展望	397
参考文献	397

第一部分

基 础 篇

