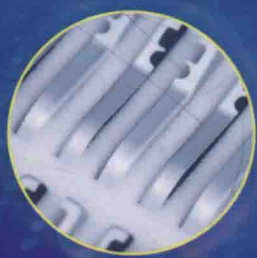


可降解金属

(下 册)

郑玉峰 秦 岭 杨 柯 等 著



科学出版社

可降解金属

(下册)

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。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、铅、银)、镁钇、镁锌稀土、镁钹锌基、镁(钆、镧、铈、镨)、铁基、锌基、大块非晶等可降解金属合金体系。

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. 下册 / 郑玉峰等著. —北京: 科学出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-03-050393-0

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 257573 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>

中国科学院印刷厂 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: 31 1/4

字数: 599 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

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。

戴起戎

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一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材料 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、铅、银)、镁钇、镁锌稀土、镁钽铌基、镁(钆、钪、铈、镱)、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

第三部分 代表性材料篇

第 14 章 纯镁	403
14.1 纯镁及其制备方法	403
14.2 力学性能	405
14.3 降解行为	408
14.4 细胞毒性与血液相容性	412
14.5 动物体内植入研究	413
参考文献	416
第 15 章 镁钙合金体系	419
15.1 组织调控	419
15.2 力学性能	428
15.2.1 Mg-Ca 二元合金	428
15.2.2 Mg-Ca 三元合金	430
15.2.3 冷热加工处理之后的 Mg-Ca 合金	432
15.3 降解行为	433
15.3.1 Mg-Ca 合金的降解	433
15.3.2 Mg-Ca 合金体外的降解机制	439
15.4 细胞毒性与血液相容性	441
15.5 在体动物实验	443
15.6 结论与展望	448
参考文献	448
第 16 章 镁锶合金体系	452
16.1 组织调控	452
16.2 力学性能	460
16.2.1 Mg-Sr 二元合金	460
16.2.2 Mg-Sr 系列三元合金	461

16.2.3 Mg-Sr 系列多元合金	463
16.3 降解行为	464
16.3.1 Mg-Sr 二元合金	464
16.3.2 Mg-Sr 系列三元合金	467
16.3.3 Mg-Sr 系列多元合金	468
16.4 细胞毒性与血液相容性	469
16.4.1 Mg-Sr 二元合金	469
16.4.2 Mg-Sr 系列三元合金	472
16.5 在体动物实验	474
16.6 结论与展望	478
参考文献	479
第 17 章 镁锌合金体系	483
17.1 组织调控	483
17.1.1 合金元素	483
17.1.2 加工方式	487
17.1.3 大塑性变形	489
17.2 力学性能	491
17.3 降解行为	493
17.3.1 电化学腐蚀降解行为	493
17.3.2 体外静态浸泡实验	495
17.3.3 体外动态腐蚀	499
17.3.4 Mg-Zn 合金在降解过程中的力学衰减	502
17.4 细胞毒性与血液相容性	503
17.4.1 L-929 细胞毒性	504
17.4.2 MC3T3-E1 细胞毒性	505
17.4.3 hBMSCs 细胞毒性	506
17.4.4 VSMC 细胞毒性	507
17.4.5 HUAEC 细胞毒性	507
17.4.6 MEBDECs 细胞毒性	508
17.4.7 溶血实验	509
17.5 在体动物实验	510
17.5.1 骨科植入动物在体实验	510
17.5.2 消化道植入动物在体实验	516
17.6 结论与展望	527
参考文献	527

第 18 章 镁锂合金体系	533
18.1 组织调控	534
18.1.1 合金化组织调控	534
18.1.2 塑性变形组织调控	536
18.1.3 热处理组织调控	544
18.2 力学性能	544
18.2.1 合金化对力学性能的影响	545
18.2.2 塑性变形对力学性能的影响	546
18.3 降解行为	548
18.3.1 合金元素对降解行为的影响	548
18.3.2 自然氧化膜对降解行为的影响	553
18.3.3 Li 元素对腐蚀产物膜的组成影响	558
18.3.4 晶粒度对双相 Mg-9Li-1Ca 合金降解行为的影响	561
18.3.5 表面涂层对 Mg-Li-Ca 合金降解行为的影响	566
18.4 细胞毒性与血液相容性	574
18.4.1 细胞毒性	574
18.4.2 血液相容性	577
18.5 在体动物实验	579
18.6 结论与展望	585
参考文献	586
第 19 章 镁锡合金体系	590
19.1 Mg-Sn 系合金的制备方法	590
19.1.1 熔炼工艺	590
19.1.2 加工工艺	591
19.1.3 热处理工艺	592
19.2 Mg-Sn 系合金的力学性能	593
19.2.1 Mg-Sn 二元合金的力学性能	593
19.2.2 Mg-Sn 多元合金的力学性能	594
19.3 Mg-Sn 系合金的降解行为	594
19.3.1 Mg-Sn 合金的降解行为研究	594
19.3.2 Mg-Sn-Mn 合金的降解行为研究	595
19.3.3 Mg-Sn-Ca 合金的降解行为研究	604
19.4 Mg-Sn 系合金的生物相容性	605
19.4.1 Mg-Sn 合金的细胞毒性和血液相容性	605
19.4.2 Mg-Sn-Mn 合金的细胞毒性和血液相容性	605

19.5 Mg-Sn 系合金的动物实验研究	606
19.5.1 Mg-Sn-Mn 系合金动物植入实验方法	606
19.5.2 Mg-Sn-Mn 系合金动物植入实验结果	607
19.5.3 Mg-Sn-Mn 系合金动物血管内植入实验研究	612
19.6 结论与展望	615
参考文献	616
第 20 章 镁(硅、锰、锆、银)合金体系	619
20.1 Mg-Si 体系	619
20.1.1 Si 的作用	619
20.1.2 组织调控	620
20.1.3 力学性能	625
20.1.4 降解行为	628
20.1.5 细胞毒性与血液相容性	630
20.2 Mg-Mn 体系	633
20.2.1 Mn 的作用	633
20.2.2 组织调控	633
20.2.3 力学性能	636
20.2.4 降解行为	638
20.2.5 细胞毒性与血液相容性	641
20.2.6 在体动物实验	642
20.3 Mg-Zr 体系	648
20.4 Mg-Ag 体系	649
20.5 结论与展望	650
参考文献	650
第 21 章 镁钇系合金	653
21.1 Mg-Y 系合金的制备方法	653
21.1.1 熔炼工艺	653
21.1.2 加工工艺	655
21.1.3 Mg-Y 系合金热处理工艺	657
21.1.4 小结	658
21.2 Mg-Y 系合金的力学性能	658
21.2.1 Mg-Y 系合金的力学性能	658
21.2.2 小结	659
21.3 Mg-Y 系合金的降解行为	659
21.3.1 Mg-Y 系合金的降解行为	659

21.3.2 提高 Mg-Y 系合金耐蚀性的途径	661
21.3.3 小结	671
21.4 Mg-Y 系合金的细胞毒性和细胞相容性	671
21.4.1 Mg-Y 合金的细胞毒性和细胞相容性	672
21.4.2 Mg-Y-Zn 合金的细胞毒性和细胞相容性	672
21.4.3 Mg-Y-Sc 合金的细胞毒性和细胞相容性	672
21.4.4 Mg-Y-Ca-Zr 合金的细胞毒性和细胞相容性	673
21.4.5 Mg-Y-Zn-Zr 合金的细胞毒性和细胞相容性	674
21.4.6 Mg-Y-RE-Zr 合金的细胞毒性和细胞相容性	675
21.4.7 小结	675
21.5 Mg-Y 系合金的体内实验	676
21.5.1 Mg-Y 系合金在骨科方面的实验研究	676
21.5.2 Mg-Y 系合金在血管移植方面的实验研究	678
21.5.3 Mg-Y 系合金在整形外科方面的实验研究	680
21.5.4 小结	681
21.6 结论与展望	682
参考文献	682
第 22 章 镁锌稀土合金体系	687
22.1 合金设计理念	687
22.2 组织调控	690
22.2.1 通过改变合金成分进行组织调控	690
22.2.2 通过加工工艺进行组织调控	694
22.3 力学性能	701
22.4 降解行为	702
22.5 表面改性	704
22.5.1 磁控溅射法制备无定形氧化钛薄膜	704
22.5.2 溶剂热法制备片状纳米结构 TiO_2 薄膜	706
22.5.3 TiO_2 药物涂层的制备与药物释放	709
22.6 细胞毒性与血液相容性	712
22.6.1 溶血率和凝血时间测试	712
22.6.2 血小板黏附测试	712
22.6.3 内皮细胞生长形貌观察	713
22.6.4 MTT 细胞增殖与细胞毒性评价	713
22.7 动物实验	715
22.8 结论与展望	716

参考文献	717
第 23 章 镁钕锌基医用镁合金	720
23.1 合金设计	720
23.1.1 合金元素 Zn 对镁基面层错能的影响计算	721
23.1.2 合金元素 Nd 对镁的基面层错能的影响计算	725
23.2 组织结构调控	726
23.3 力学性能	730
23.3.1 适用于骨内固定器械用高强度中等塑性镁合金 JDBM-1	730
23.3.2 适于血管支架用中等强度高塑性镁合金 JDBM-2	731
23.4 降解行为	732
23.5 JDBM 的表面改性	734
23.5.1 化学沉积法	735
23.5.2 阳极氧化	736
23.5.3 具有生物活性的 Ca-P 涂层	737
23.6 JDBM 的生物相容性	738
23.6.1 细胞毒性	738
23.6.2 碱性磷酸酶 ALP 检测	740
23.6.3 溶血率	741
23.6.4 血小板黏附实验	742
23.6.5 JDBM 医用镁合金的广谱抗菌功效	742
23.7 JDBM 系列医用镁合金的动物实验	747
23.7.1 骨内植物材料的动物植入实验	747
23.7.2 JDBM-2 镁合金血管支架的植入实验	749
23.8 结论与展望	751
参考文献	751
第 24 章 镁其他稀土元素(钆、镝、钬、铈)合金体系	754
24.1 Mg-Gd 合金体系	754
24.1.1 Gd 的毒性	754
24.1.2 Mg-Gd 基合金的显微组织	755
24.1.3 Mg-Gd 合金的力学性能	757
24.1.4 Mg-Gd 系合金的腐蚀降解与细胞毒性	759
24.2 Mg-Dy 合金体系	763
24.2.1 Dy 的毒性	763
24.2.2 Mg-Dy 基合金的显微组织和力学性能	763
24.2.3 Mg-Dy 基合金的腐蚀降解和细胞相容性	766

24.3 Mg-La 和 Mg-Ce 合金体系	770
24.3.1 La 和 Ce 的毒性	770
24.3.2 Mg-La 和 Mg-Ce 基合金的力学性能和腐蚀降解	771
24.3.3 Mg-La 和 Mg-Ce 基合金的细胞毒性和动物实验	778
24.4 结论与展望	781
参考文献	782
第 25 章 铁基可降解金属体系	788
25.1 纯铁	788
25.1.1 纯铁的力学性能	788
25.1.2 铁的代谢及毒性	789
25.1.3 纯铁的基本性质	792
25.1.4 纯铁在生理环境中的降解行为	793
25.1.5 体外生物相容性研究	795
25.1.6 体内动物实验	796
25.2 铁基合金	802
25.3 铁基复合材料	808
25.3.1 纯铁与金属的复合	808
25.3.2 纯铁与非金属的复合	810
25.3.3 Fe-X 复合材料的体外生物相容性研究	811
25.4 铁基可降解金属的表面改性	813
25.4.1 增强生物相容性为目的的表面改性	813
25.4.2 调控降解为目的的表面图案化	814
25.5 铁基可降解金属的新颖制造方法	815
25.5.1 电铸法	815
25.5.2 纳米晶化	816
25.5.3 3D 打印技术	818
25.6 结论与展望	820
参考文献	822
第 26 章 锌基可降解金属体系	826
26.1 纯锌	826
26.2 锌基二元合金	827
26.2.1 锌基二元合金的组织结构	828
26.2.2 锌基二元合金的力学性能	829
26.2.3 锌基二元合金的腐蚀性能	830
26.2.4 锌基二元合金的生物相容性	833

26.3 锌基三元合金	836
26.3.1 锌基三元合金的力学性能	836
26.3.2 锌基三元合金的腐蚀性能	839
26.3.3 锌基三元合金的生物相容性	840
26.4 锌基复合材料	841
26.4.1 Zn-XMg1Ca 复合材料	841
26.4.2 Zn-XHA 复合材料	843
26.4.3 Zn-ZnO 复合材料	846
26.4.4 Zn-纳米金刚石复合材料	847
26.5 结论与展望	847
参考文献	848
第 27 章 大块非晶合金可降解金属体系	850
27.1 Mg 基大块非晶合金	851
27.1.1 镁基大块非晶合金的力学性能	851
27.1.2 镁基大块非晶合金的腐蚀性能	852
27.1.3 镁基大块非晶合金的生物相容性	855
27.2 Ca 基大块非晶合金	860
27.2.1 钙基大块非晶合金的力学性能	860
27.2.2 钙基大块非晶合金的腐蚀性能	861
27.2.3 钙基大块非晶合金的生物相容性	863
27.3 Zn 基大块非晶合金	869
27.4 Sr 基大块非晶合金	870
27.5 结论与展望	873
参考文献	875