



生命科学前沿及应用生物技术

生物材料

——生物学与材料科学的交叉

(美) J. S. Temenoff A. G. Mikos 著

王元亮 等 译

Biomaterials:

The Intersection of Biology and Materials Science



科学出版社

生命科学前沿及应用生物技术大系·典藏版

生物材料

——生物学与材料科学的交叉

Biomaterials: The Intersection of Biology
and Materials Science

〔美〕 J. S. Temenoff 著
A. G. Mikos

王远亮等 译

科学出版社

北京

图字：01-2009-1833 号

内 容 简 介

应用生物技术大系和现代生命科学前沿系列图书分别被列为“十一五”和“十二五”国家重点图书出版规划项目。本丛书针对生命科学领域前沿重点发展方向以及应用生物技术领域的新成果、新思路、新方法和新技术，全面展示了其最新的发展动态，涵盖了基础理论和主要技术方法，呈现了新的概念与理论、技术，在更深层次上阐明了生命的本质规律，给人们提供了新的认识生命本质的手段，也为生物技术服务于人类开辟了新的途径。涉及领域包括生物医药、干细胞技术、工业微生物学、蛋白质及蛋白质组、系统生物学、合成生物学、生物材料、农业生物技术、环境生物技术、海洋生物技术、生物资源与安全等。

Simplified Chinese edition © copyright 2008 by PEARSON EDUCATION NORTH ASIA LIMITED and SCIENCE PRESS

Original English language title: Biomaterials: The Intersection of Biology and Materials Science, by J. S. Temenoff and A. G. Mikos, © copyright 2008

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao.

图书在版编目 (CIP) 数据

生命科学前沿及应用生物技术大系：典藏版/舒红兵等编著. —北京：科学出版社，2016

ISBN 978-7-03-047487-2

I. ①现… II. ①舒… III. ①生命科学—研究②生物工程—研究 IV. ①Q1-0②Q819

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 043876 号

责任编辑：王 静 李 悦

责任印制：张 伟 / 封面设计：刘新新

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张：2108

字数：49 985 000

定价：8900.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

译者名单

第1章	付春华	译	罗彦凤	王远亮	校
第2章	胡承波	译	罗彦凤	王远亮	校
第3章	黄美娜	译	罗彦凤	王远亮	校
第4章	黄美娜	译	罗彦凤	王远亮	校
第5章	付春华	译	蔡开勇	王远亮	校
第6章	鲜成玉	译	蔡开勇	王远亮	校
第7章	李永刚	译	蔡开勇	王远亮	校
第8章	张兵兵	译	蔡开勇	王远亮	校
第9章	向燕	译	唐丽灵	王远亮	校
第10章	胡燕	译	唐丽灵	王远亮	校
第11章	胡燕	译	唐丽灵	王远亮	校
第12章	高文娟	译	唐丽灵	王远亮	校
第13章	高文娟	译	王远亮	校	
第14章	向鸿照	译	王远亮	校	

译者的话

通常当我们想进入研究生物材料的领域时，仅能从文献资料中获取只言片语，因为相关的书籍大都深奥、专业，使初学者不易读懂。

近年来虽然出版了几本关于生物材料的书籍，但却缺乏入门书籍简单明了、涵盖全面的特点。现在终于找到了一本好的入门书籍，那就是科学出版社王静和李悦编辑推荐给我们的这本 *Biomaterials: The Intersection of Biology and Materials Science*，这是 Temenoff 和 Mikos 专门为本科生编写的教材。当我们拿到它时就爱不释手，因为它不仅简单明了、深入浅出、涵盖全面，而且介绍了材料学研究的前沿知识，真是好极了！所以我们非常愿意将它翻译成中文，并奉献给有志进入生物材料研究领域的读者们。相信这本书会对您大有裨益。

本书由王远亮教授、罗彦凤教授、蔡开勇教授、唐丽灵教授，博士生黄美娜、胡燕、付春华、李永刚、胡承波、高文娟、鲜成玉、张兵兵、向燕，以及博士后向鸿照共同翻译，并由上述诸位教授校阅，王远亮教授统稿。

本书能够与您见面，应当感谢科学出版社编辑们的大力支持和帮助。

本书的翻译虽然由重庆大学从事生物材料研究的几位教授主持，但由于时间紧张，如有译文不妥之处，期望斧正。

译者

2008年11月7日

序

运用生物材料在过去 30 年中作为治疗疾病和减轻痛苦的有效方法已经引起了广泛的关注。现在治疗的重点不再是单一的传统方法，而是将生物材料与治疗方法相结合。生物材料已经在近 8000 种不同的医药器械中得到应用，其中包括骨骼的修复、心血管功能的恢复、器官的替代、组织或神经的修复等。尽管生物材料在医药方面已经产生了明显的影响，但进一步设计并开发更易于表征和检测性质的高分子材料、陶瓷和金属等有效的生物材料大有必要。该书许多内容涉及于此，并同时给出了一个如何解决这些问题的明确思维方式。

该书两位作者采用了一种新方法来解决上述的问题，即以简洁的方式对生物学所关注的问题进行了完整的描述，而不仅仅是从力学性质、结构或分子方面进行分析。

起初高分子生物材料仅用作支架材料，在临床应用中主要包括以下几类：醋酸纤维素制成的透析管，涤纶制成的血管移植材料，聚氨酯制备的人造心脏。然而由于这些材料在化学、物理以及生物学性能上的不足，限制了其进一步的临床应用。随着合成方法的进步，生物材料的性能不断获得改进，生物材料的生物相容性问题得到了解决，这在该书中有清晰的阐述。

设计具有特殊功能的生物材料引起了人们的兴趣。材料特殊性质的控制赋予材料特殊的功能以及合适的生物学响应，通过控制材料的结构特征，改变表面性质，以及采用仿生设计可以满足上述要求。仿生设计在生物材料的发展上已经获得广泛关注，特别是在药物投递、药物开发以及纳米技术等方面。应用蛋白质或类蛋白结构对材料进行表面及本体改性，可以使材料获得优异的性能。

该书是一本成功的教材，因为该书明确认识到生物材料具有非常广泛的应用价值。作者提出了生物材料用于生物医药领域的全新技术方法，并对细胞/材料和蛋白质/材料的相互影响进行了透彻讲解。读者阅读了第 12 章后，将了解免疫学及蛋白质/材料相互作用方面的知识。生物材料最重要的问题就是引起血栓的问题，这一问题在第 13 章中也有清楚的描述。

这是一本易于读者理解的基础性教材，将在生物材料的教学中占有重要地位。该书在介绍了大量知识的同时，弥补了生物材料科学领域的一些缺陷。Temenoff 教授和 Mikos 教授在这个领域做了大量的工作。

Nicholas A. Peppas, Sc. D.
Fletcher S. Pratt Chair of Chemical Engineering,
Biomedical Engineering, and Pharmacy
University of Texas at Austin

前 言

虽然本书命名为《生物材料：生物学与材料科学的交叉》，但实际上这个领域从多个不同方面进行多学科交叉，并已发展了近 50 年。其中包括材料科学、生物学、工程学，以及临床医学、商业和法规等，具有广阔的前景。从这一背景来看，生物材料的多学科性质是不可避免的。作为这个领域的专家，我们面临着特殊的挑战，我们必须培养具有较宽知识面的学生，设计并实现采用新的生物医疗器械来处理复杂问题。

基于这种考虑，我们编写了这本介绍生物材料基本概念及涵盖与之密切相关知识的教材，以适用于在大学工程类专业第二年或随后学习过程中的主修课程。基于读者考虑，本书以基本的化学和物理知识为主，不要求高深和更为复杂的数学概念，如不等式或任何细胞生物学等生物知识。

本书首先对生物材料领域进行了综述，然后分章介绍。第 1 章概述了基本的化学原理，这些原理的理解需要以第 2 章物质的结构为基础。第 3 章和第 4 章提供了更多关于生物材料主要种类（金属、陶瓷和聚合物）的物理和力学方面的性能。全书章节中，对材料进行了分类，每位读者可以针对材料的不同应用选择合适的知识去阅读。第 5 章和第 6 章，首先讨论了亚单元如何形成生物材料，然后阐述了这些材料的降解及加工处理的参数对其关键性质的影响，如材料的降解性、力学强度等。

第 7 章和第 8 章解释了材料科学和生物学的关系，是本书的知识中心。这两章的关键技术是表面改性及其对蛋白质吸附的影响。第 9 章描述了细胞与生物材料上吸附蛋白质的相互作用。第 10 章和第 11 章中讨论了特定的细胞响应（急性炎症和伤口愈合）。第 12 章介绍了植入材料的生物学响应、免疫响应和超敏反应。第 13 章介绍了凝血作用。第 14 章介绍了感染、肿瘤发生以及病理学钙化。

全书 14 章可分成材料科学和生物学各 7 章，保证了两个方面的均衡介绍。交叉科学的精髓，也就是表征方法和存在争议的问题没有作为孤立的章节来介绍，而是贯穿全书。

21 世纪的生物材料学将面临更大的挑战，需要把更复杂的生物学知识融合到改进生物材料的设计中。我们相信在这些领域必将进行知识的交叉，希望本书能够为许多未来的生物材料科学家奠定一个有益的基础。

J. S. Temenoff

A. G. Mikos

致 谢

本书的发行和出版需要许多有才干的和有奉献精神的人热情支持。在这里，我们感谢几位坚持完成本书创作的人及其所属机构，他们的工作是必不可少的。Kurt Kasper 博士 (Rice University) 仔细地为每一章节做了总结，提供了贯穿全书的例题，编写了本书中的各种草图。Mark Sweigart 博士 (Rice University) 耐心地撰写了每章节结尾的问题，组织了本书中各个图的编写，规范化了所有的公式，使得本书的格式具有连贯性。Elizabeth Christensen 博士 (Rice University) 和 Michael Hacker 博士 (Rice University) 对本书图片的选择和参考文献等资料进行了整理。此外，我们还要感谢佐治亚州 Tech and Emory University 全体生物材料系成员在本书的准备过程中给予的反馈意见，特别是 Julia Babensee 博士和 Andres Garcia 博士，他们为章节末尾的例题做了贡献。

此外，我们要感谢生物材料领域的各位先驱，他们为本书提供了第一手资料。特别要深深地感谢 James M. Anderson 博士 (Case Western Reserve University)、Joel D. Bumgardner 博士 (University of Memphis)、Arnold I. Caplan 博士 (Case Western Reserve University)、Paul S. Engel 博士 (Rice University)、Jone A. Jansen 博士 (Radboud University Nijmegen Medical Center)、Rober Langer 博士 (Massachusetts Institute of Technology)、Nicholas A. Pappas 博士 (University of Texas at Austin)、Alan J. Rusell 博士 (University of Pittsburgh) 和 Frederick J. Schoen 博士 (Brigham and Women's Hospital) 为本书提供了详细的评述和建设性的意见。

我们还要感谢各位为本书的评述和发行做出贡献的人。特别感谢 Valeria Milam 博士 (Georgia Tech) 为本书校正，并提供了有价值的各种图表。感谢 Larry McIntire 博士和 Robert Nerem 博士为本书注释，也为本书的校正起到了推动和支持作用。感谢 Georgia Tech Introduction 春季生物材料班，2006 级下半学期和 2007 级春季班的讲师及学生在学习期间为本书所做的校正工作。我们感谢 Simon Young 博士 (Rice University) 和 Georgia Tech/Emory University 的 Johnna Temenoff 教授实验室的研究生为本书的最后定稿所做出的辛勤努力。

我们也要感谢另外几位为本书的出版工作做出贡献的人。Carol D. Lofton (Rice University) 确保了本书出版的版权问题。Georgia Tech/Emory University 生物医药工程系的全体成员为本书各种草图的准备以及版权争取做出了不懈努力。最后，我们感谢美术天才 Karen Ku，他创作了本书富有灵感性的封面。

J. S. Temenoff

A. G. Mikos

目 录

译者的话

序

前言

致谢

1. 生物医用材料	1
1.1 生物材料概述	1
1.1.1 重要的基本概念	1
1.1.2 生物材料学的发展历史和现状	2
1.1.3 发展方向	5
1.2 对生物材料的生物响应	6
1.3 生物材料制品测试与 FDA 许可	7
1.4 生物材料类型	7
1.4.1 金属材料	7
1.4.2 陶瓷材料	8
1.4.3 高分子材料	8
1.4.4 天然衍生和人工合成高分子材料	9
1.5 生物材料的加工	10
1.6 生物材料的重要性质	11
1.6.1 生物材料的降解特性	11
1.6.2 生物材料的表面性质	11
1.6.3 生物材料的本体性质	12
1.6.4 表征技术	13
1.7 化学原理	13
1.7.1 原子结构	13
1.7.2 原子模型	14
1.7.3 原子轨道	15
1.7.4 价电子与元素周期表	18
1.7.5 离子键	19
1.7.6 共价键	20
1.7.7 金属键	24
1.7.8 次级键	25
小结	25
习题	26
参考文献	27

推荐阅读	27
2. 生物材料的化学结构	28
2.1 概述：键型与生物材料结构	28
2.2 金属的结构	28
2.2.1 晶体结构	28
2.2.2 晶系	32
2.2.3 晶体结构缺陷	36
2.2.4 固相扩散	39
2.3 陶瓷的结构	42
2.3.1 陶瓷的晶体结构	42
2.3.2 陶瓷晶体结构中的缺陷	46
2.4 聚合物的结构	48
2.4.1 一般结构	48
2.4.2 聚合物的合成	56
2.4.3 共聚物	59
2.4.4 聚合方法	60
2.4.5 聚合物的晶体结构和缺陷	61
2.5 材料表征技术	62
2.5.1 X射线衍射	63
2.5.2 紫外可见光谱 (UV-VIS)	67
2.5.3 红外光谱 (IR)	71
2.5.4 核磁共振光谱	76
2.5.5 质谱	80
2.5.6 高效液相色谱 (HPLC)；体积排阻色谱	82
小结	85
习题	86
参考文献	89
推荐阅读	89
3. 生物材料的物理性能	90
3.1 概述：从原子基团到本体材料	90
3.2 结晶性与线缺陷	90
3.2.1 位错	91
3.2.2 形变	94
3.3 结晶性与面缺陷	96
3.3.1 外表面	96
3.3.2 晶界	96
3.4 结晶性与体缺陷	98
3.5 结晶性与聚合物材料	99
3.5.1 聚合物的结晶度	99

3.5.2	聚合物结晶的折叠链模型	100
3.5.3	聚合物晶体中的缺陷	102
3.6	晶态和非晶体材料的热转变	103
3.6.1	黏性流动	103
3.6.2	热转变	103
3.7	热分析技术简介	107
3.7.1	示差扫描量热法	108
	小结	111
	习题	111
	参考文献	113
	推荐阅读	113
4.	生物材料的力学性能	114
4.1	概述: 力学测试模型	114
4.2	力学测试方法、结果与计算	114
4.2.1	拉伸及剪切性能	115
4.2.2	弯曲性能	131
4.2.3	与时间有关的力学性能	133
4.2.4	孔隙率及降解对材料力学性能的影响	142
4.3	断裂与破坏	143
4.3.1	塑性断裂与脆性断裂	143
4.3.2	聚合物的银纹	145
4.3.3	应力集中物	145
4.4	疲劳及疲劳试验	146
4.4.1	疲劳	146
4.4.2	疲劳试验	146
4.4.3	影响疲劳寿命的因素	147
4.5	改善力学性能的方法	148
4.6	力学分析技术	150
4.6.1	力学测试	150
	小结	151
	习题	153
	参考文献	155
	推荐阅读	155
5.	生物材料的降解	156
5.1	概述: 生物环境下的降解	156
5.2	金属和陶瓷的腐蚀/降解	157
5.2.1	腐蚀的基本因素	157
5.2.2	普尔贝图和钝化作用	161
5.2.3	加工参数的影响	162

5.2.4	力学环境的影响	164
5.2.5	生物环境的影响	164
5.2.6	腐蚀的控制方法	165
5.2.7	陶瓷降解	165
5.3	高分子材料的降解	166
5.3.1	高分子降解的主要方式	166
5.3.2	水解造成的链断裂	166
5.3.3	氧化造成的链断裂	167
5.3.4	其他降解方式	168
5.3.5	孔隙率的影响	169
5.4	生物可降解材料	169
5.4.1	生物降解陶瓷	169
5.4.2	生物降解聚合物	170
5.5	降解程度的测定方法	172
	小结	173
	习题	174
	参考文献	175
	推荐阅读	176
6.	生物材料的加工工艺	177
6.1	概述：生物材料加工的重要性	177
6.2	提高生物材料宏观性能的工艺	177
6.2.1	金属材料	177
6.2.2	陶瓷	180
6.2.3	高聚物	181
6.3	成型工艺	181
6.4	金属材料加工	182
6.4.1	模锻	182
6.4.2	金属铸造	183
6.4.3	粉末成型	184
6.4.4	金属快速加工成型工艺	185
6.4.5	金属焊接	186
6.4.6	机械加工	186
6.5	陶瓷加工技术	186
6.5.1	玻璃成型技术	186
6.5.2	陶瓷的铸造和烧结	187
6.5.3	陶瓷的粉末加工	188
6.5.4	陶瓷的快速制备	188
6.6	聚合物的加工	189
6.6.1	热塑性与热固性	189

6.6.2	聚合物成型	189
6.6.3	聚合物浇铸	191
6.6.4	聚合物的快速制备	192
6.7	加工提高生物相容性	193
6.7.1	消毒	193
6.7.2	天然材料的固定	194
小结		195
习题		195
参考文献		196
推荐阅读		196
7.	生物材料的表面特性	197
7.1	概述：表面化学和生物学概念	197
7.1.1	蛋白质吸附和生物相容性	197
7.1.2	调控蛋白质的表面特性	198
7.2	物理化学表面改性技术	199
7.2.1	表面改性技术简介	199
7.2.2	物理化学表面涂层：共价表面涂层	200
7.2.3	物理化学表面涂层：非共价表面涂层	206
7.2.4	无覆盖层的物理化学表面改性方法	208
7.2.5	表面改性的激光方法	210
7.3	生物表面改性技术	210
7.3.1	共价生物涂层	211
7.3.2	非共价生物涂层	213
7.3.3	固定化酶	213
7.4	表面性质和降解	214
7.5	表面图形化技术	214
7.6	表面表征技术	216
7.6.1	接触角分析	216
7.6.2	光学显微镜方法	220
7.6.3	化学分析电子能谱 (ESCA) 或 X 射线光电子能谱 (XPS)	222
7.6.4	衰减全反射傅里叶变换红外光谱 (ATR-FTIR)	225
7.6.5	二次离子质谱 (SIMS)	226
7.6.6	电镜：透射电镜 (TEM) 和扫描电子显微镜 (SEM)	228
7.6.7	扫描探针显微镜：原子力显微镜 (AFM)	231
小结		234
习题		235
参考文献		237
推荐阅读		238

8. 蛋白质与生物材料的相互作用	239
8.1 概述：蛋白质吸附作用的热力学	239
8.1.1 吉布斯自由能与蛋白质吸附	239
8.1.2 控制蛋白质吸附的系统特性	241
8.2 蛋白质结构	243
8.2.1 氨基酸化学	243
8.2.2 一级结构	243
8.2.3 二级结构	243
8.2.4 三级结构	248
8.2.5 四级结构	249
8.3 蛋白质传输和吸附动力学	249
8.3.1 传输到表面	250
8.3.2 吸附动力学	251
8.4 蛋白质吸附的可逆性	252
8.4.1 可逆和不可逆结合	252
8.4.2 解吸附和交换	252
8.5 蛋白质类型、数量的分析技术	255
8.5.1 高效液相色谱 (HPLC)：亲和色谱	255
8.5.2 比色法	260
8.5.3 荧光分析	261
8.5.4 酶联免疫分析 (ELISA)	262
8.5.5 免疫印迹杂交	262
小结	264
习题	264
参考文献	265
推荐阅读	266
9. 细胞与生物材料的相互作用	267
9.1 概述：细胞——表面相互作用及细胞功能	267
9.2 细胞结构	268
9.2.1 细胞膜	269
9.2.2 细胞骨架	270
9.2.3 线粒体	270
9.2.4 细胞核	270
9.2.5 内质网	274
9.2.6 囊泡	274
9.2.7 膜受体及细胞接触	275
9.3 细胞外环境	278
9.3.1 胶原	278
9.3.2 弹性蛋白	280

9.3.3	蛋白聚糖	280
9.3.4	糖蛋白	282
9.3.5	其他 ECM 成分	283
9.3.6	基质重塑	284
9.3.7	ECM 分子在生物材料中应用	285
9.4	细胞与环境的相互作用——影响细胞功能	285
9.4.1	细胞存活	286
9.4.2	细胞增殖	286
9.4.3	细胞分化	288
9.4.4	蛋白质合成	290
9.5	黏附、铺展和迁移的模型	296
9.5.1	基本的黏附模型：DLVO 理论	296
9.5.2	DLVO 原理的局限和其他模型	297
9.5.3	细胞铺展和迁移模型	298
9.6	技术：测定细胞与材料相互作用影响的试验	301
9.6.1	细胞毒性试验	302
9.6.2	黏附/铺展试验	303
9.6.3	迁移试验	304
9.6.4	DNA 和 RNA 试验	306
9.6.5	蛋白质试验：免疫染色	308
	小结	309
	习题	310
	参考文献	312
	推荐阅读	313
10.	生物材料植入体与急性炎症	314
10.1	概述：固有性免疫及获得性免疫反应	314
10.1.1	白细胞的特征	315
10.1.2	固有性免疫的来源	316
10.2	炎症的临床症状及其起因	316
10.3	组织巨噬细胞及中性粒细胞的作用	317
10.3.1	中性粒细胞的迁移	317
10.3.2	中性粒细胞的作用	317
10.4	其他白细胞的作用	320
10.4.1	单核细胞/巨噬细胞	320
10.4.2	巨噬细胞的作用	320
10.4.3	其他的粒细胞	322
10.5	急性炎症的终止	322
10.6	技术：炎症反应的体外检测	323
10.6.1	白细胞的检测	323

10.6.2 其他检测	325
小结	325
习题	326
参考文献	326
推荐阅读	326
11. 伤口愈合和生物材料	328
11.1 概述：肉芽组织的形成	328
11.2 异物反应	330
11.3 纤维囊的形成	331
11.4 慢性炎症	332
11.5 炎症消退的 4 种类型	333
11.6 修复与再生：皮肤伤口愈合	333
11.6.1 皮肤修复	333
11.6.2 皮肤再生	335
11.7 技术：体内检测炎症反应	336
11.7.1 对动物模型发展的考虑	337
11.7.2 评价的方法	339
小结	340
习题	341
参考文献	342
推荐阅读	343
12. 生物材料的免疫反应	344
12.1 概述：获得性免疫概述	344
12.2 抗原呈递和淋巴细胞的成熟	345
12.2.1 主要的组织相容性复合体 (MHC) 分子	345
12.2.2 淋巴细胞的成熟	348
12.2.3 克隆种群的活化和形成	349
12.3 B 细胞和抗体	350
12.3.1 B 细胞的类型	350
12.3.2 抗体的特征	350
12.4 T 细胞	353
12.4.1 T 细胞的类型	353
12.4.2 辅助 T 细胞 (T_h)	353
12.4.3 细胞毒性 T 细胞 (T_c)	354
12.5 补体系统	354
12.5.1 经典途径	354
12.5.2 旁路途径	356
12.5.3 膜攻击复合物	357
12.5.4 补体系统的调节	357

12.5.5 补体系统的作用	358
12.6 对生物材料的不良免疫反应	358
12.6.1 对生物材料的先天性和获得性免疫反应对比	359
12.6.2 超敏反应	359
12.7 技术：免疫反应检测	362
12.7.1 体外检测	362
12.7.2 体内检测	363
小结	364
习题	365
参考文献	365
推荐阅读	366
13. 生物材料和血栓	367
13.1 概述：止血	367
13.2 血小板的作用	367
13.2.1 血小板的特征和功能	367
13.2.2 血小板活化	368
13.3 凝血级联反应	369
13.3.1 内源性途径	370
13.3.2 外源性途径	371
13.3.3 共同途径	371
13.4 抗凝血的意义	373
13.5 血管内皮的作用	374
13.6 血液相容性实验	375
13.6.1 一般检测	375
13.6.2 离体评估	375
13.6.3 在体评估	376
小结	377
习题	378
参考文献	380
推荐阅读	380
14. 生物材料植入体内引起的感染、肿瘤、钙化反应	381
14.1 概述：生物材料植入对生物体的影响	381
14.2 感染	381
14.2.1 常见的病原体和感染的类型	382
14.2.2 感染的步骤	382
14.2.3 细菌和生物材料的表面性质、基质的性质	383
14.2.4 细菌吸附中的选择性与非选择性作用	386
14.2.5 总结植入感染情况	387
14.3 细菌感染的检测	388