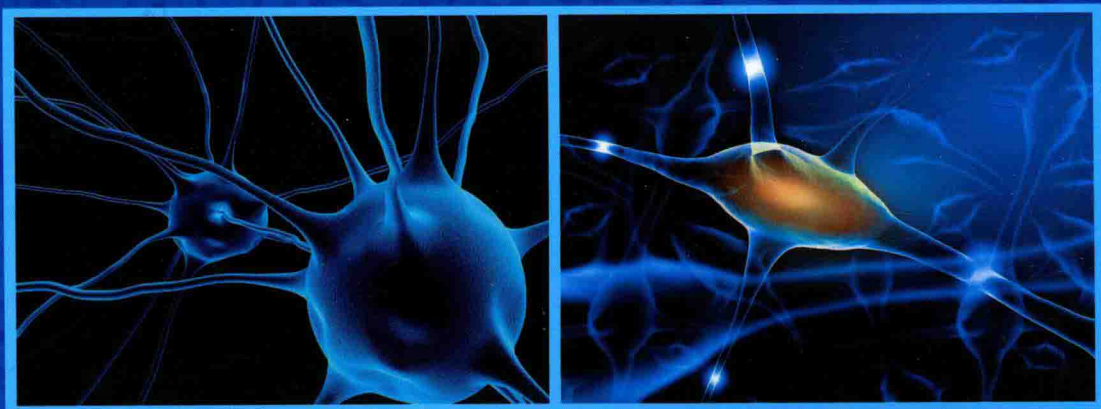


Zhouwei Shenjing Quesun Xiufu Cailiao
de Shengwu Zhizao yu Linchuang Pinggu

周围神经缺损修复材料 的生物制造与临床评估

朱庆棠 全大萍 顾立强 (主) (编)

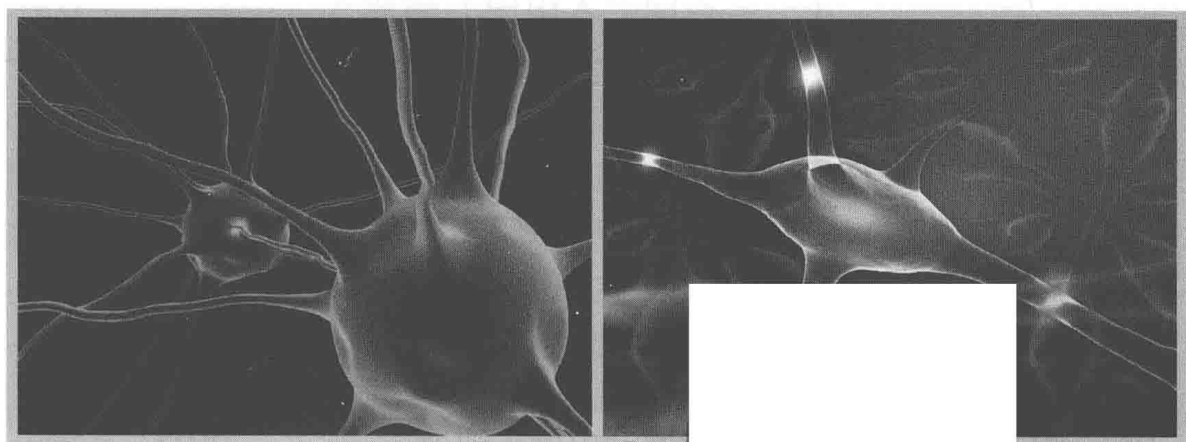


中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

Zhouwei Shenjing Quesun Xiufu Cailiao
de Shengwu Zhizao yu Linchuang Pinggu

周围神经缺损修复材料 的生物制造与临床评估

朱庆棠 全大萍 顾立强 (主) (编)



中山大學出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

周围神经缺损修复材料的生物制造与临床评估/朱庆棠, 全大萍, 顾立强主编. —广州: 中山大学出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 306 - 06388 - 5

I. ①周… II. ①朱… ②全… ③顾… III. ①周围神经系统疾病—生物材料—制造—研究 IV. ① R318.08

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 153526 号

出 版 人: 王天琪

策划编辑: 钟永源

责任编辑: 徐 劲 钟永源

封面设计: 林绵华

责任校对: 杨文泉

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84110771, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广州家联印刷有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 34.5 印张 861 千字

版次印次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 198.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

本书编委会

主 审：刘小林

主 编：朱庆棠 全大萍 顾立强

副 主 编：戚 剑 杨越雄 曾晨光

主编助理：林 焘 白 莹 杨建涛 王 涛

编 委：（按姓氏拼音排序）

白 莹（中山大学材料科学与工程学院）

陈诗浩（中山大学化学学院）

杜钊夷（中山大学化学学院）

方锦涛（中山大学附属第一医院）

冯文娟（中山大学化学学院）

顾立强（中山大学附属第一医院）

何 波（中山大学附属第一医院）

何彩凤（广州中大医疗器械有限公司）

何富林（中山大学附属第一医院）

何留民（暨南大学生命科学技术学院）

黄喜军（中山大学附属第一医院）

李 静（广州中大医疗器械有限公司）

林 焘（中山大学附属第一医院）

刘 强（中山大学工学院）

刘 晟（中山大学化学学院）

刘小林（中山大学附属第一医院）

陆 遥（中山大学数据科学与计算机学院）

彭邱亮（广州中大医疗器械有限公司）

戚 剑（中山大学附属第一医院）

强 娜（中山大学化学学院）

秦本刚 (中山大学附属第一医院)
邱 帅 (中山大学附属第一医院)
全大萍 (中山大学化学学院)
饶子龙 (中山大学化学学院)
孙秀敏 (中山大学化学学院)
王洪刚 (中山大学附属第一医院)
王晓莺 (中山大学化学学院)
王 涛 (中山大学附属第一医院)
吴泽佳 (中山大学化学学院)
徐毅炜 (中山大学化学学院)
闫立伟 (中山大学附属第一医院)
杨建涛 (中山大学附属第一医院)
杨习锋 (广州新诚生物科技有限公司)
杨越雄 (广州中大医疗器械有限公司)
姚 执 (中山大学附属第一医院)
袁汝恒 (中山大学附属第一医院)
曾晨光 (广州新诚生物科技有限公司)
翟 虹 (中山大学化学学院)
张 驰 (中山大学化学学院)
张 阳 (广州中大医疗器械有限公司)
郑灿镔 (中山大学附属第一医院)
钟映春 (广东工业大学自动化学院)
周 翔 (中山大学附属第一医院)
朱继翔 (中山大学化学学院)
朱庆棠 (中山大学附属第一医院)
朱 爽 (中山大学附属第一医院)
朱昭炜 (中山大学附属第一医院)
邹剑龙 (中山大学附属第一医院)

致 谢

本书从筹备、收集材料、编写到最终完成需感谢以下基金项目及实验室的资助。

基金项目

- [1] 国家重点研发计划 (2016YFC1101603, 2016YFC1100103)
- [2] 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划, 2012AA020507)
- [3] 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划, 2014CB542200)
- [4] 国家卫计委公益性行业科研专项项目 (201402016)
- [5] 国家自然科学基金 (81401804 31670986 51673220 5107378 U1134007 81572130)
- [6] 广东省前沿与关键技术创新专项基金 (2014B020227001 2014B050505008)
- [7] 广东省协同创新与平台环境建设基金 (2017A050501017 2015B090903060)
- [8] 广东省自然科学基金 - 重点 (2015A030311025)
- [9] 广东省公益研究与能力建设专项基金 (2014A020215008)
- [10] 广州市健康医疗协同创新重大专项 (201508020251)
- [11] 广州市科技计划项目 (201807010082 201704030041)
- [12] 广东省功能生物材料工程技术研究中心 (29000 - 18833241)
- [13] 广东省周围神经组织工程技术研究中心 (2015B090903060)
- [14] 广东省引进创新创业团队项目 (2013S086)
- [15] 中山大学 “985” 建设专项 (90035 - 3283312)
- [16] 中山大学 “三大建设” 功能生物医用材料大平台

实验室

- [1] 广东省软组织生物制造工程实验室
- [2] 广东省周围神经组织工程技术研究中心
- [3] 广东省功能生物材料工程技术研究中心
- [4] 广东省骨科重点实验室

《周围神经缺损修复材料的生物制造与临床评估》序

“东风露消息，万物有精神。”生物制造（biofabrication）技术的出现，有望突破某一疾病现有的瓶颈，给众多疾病和学科带来了福音。然而，生物制造技术并不是一个单一技术，而是多学科顶尖技术的集成。它需要多学科之间长时间的交流、彼此了解、取长补短，“操千曲而后晓声，观千剑而后识器”，才能实现临床上的突破，给患者带来希望。“海不辞水，故能成其大；山不辞土石，故能成其高”，中山大学科研团队以周围神经损伤为例，根据多年研究的经验，讲述生物制造技术的应用。集合了众多学科的研究经验，编写出这部拔萃超群、匠心独具的《周围神经缺损修复材料的生物制造与临床评估》珍贵著作。

“用尽登山力，方知走路难；若将世路比山路，世路更多千万盘”。这部专著始终以临床问题为导向，讲述实现生物制造仿生化神经修复材料所需要的技术，知道根据现有的生物制造技术和知识水平，实现构建出真正意义上具有生命的组织器官，这也是本书的意义所在。

“没有金刚钻，不揽瓷器活”，这部专著的重点，放在对细胞外基质框架结构的了解和仿生制造。通过对仿生化周围神经修复材料的生物制造的实践过程，这部专著提出“工程解剖学”和“工程生理学”两大理论体系的科学设想。这些创新驱动思维，“请君莫奏前朝曲，听唱新翻杨柳枝”，将有助于对生物制造技术的理解和实践。

“药灵丸不大，棋妙子无多”，这部专著还从生物制造的角度，总结了结构和内环境对于神经再生的重要性，提出神经再生的科学理论假说“水流灌注”学说和微结构“二级孔隙”的结构假设，将有助于材料的选择和设计。在讲述把实验室研究成果转化为临床产品、临床试验设计、多中心随访等思路，对临床医生、科研工作者、企业家和研究生，都具有启迪意义，能起到“一灯能除千年暗，一智能灭万年愚”。作为老校友，祝贺母校科研团队，江山代有人才出，并欣为之序。

中国工程院资深院士

南方医科大学教授 钟世镇

2018年夏于广州

序

周围神经损伤修复与功能重建是临床常见的疾病。尽管人类已进入 21 世纪，但神经再生仍然是重大的科学前沿热点和发展方向。中山大学以朱家恺、刘小林、朱庆棠、全大萍、顾立强等人为学术带头的研究团队，经几十年的基础与临床积累，在材料、工程、数字与信息、基础与临床等领域开展了一系列深入的创新性研究，并总结历史与综合进展，编写了《周围神经缺损修复材料的生物制造与临床评估》一书。

该书理论与技术系统丰富，基础与临床转化及临床评估规范有序，逻辑清晰，内容翔实，观点新颖，展示着当今该领域的进展与发展趋势，是宝贵的学术资源，具有很高的学术价值。我相信，该书的出版发行，将为推动我国周围神经损伤修复与功能重建的事业发展，发挥重要的知识贡献作用。

中国工程院院士

南通大学教授 顾晓松

2018-07-26

序

近几十年来，周围神经损伤与再生医学领域的临床与科研工作得到长足的发展，已成为神经科学中具有潜力的研究方向。中山大学周围神经损伤修复的临床与基础研究团队根据自己丰富的临床与科研经验，通力合作，各展所长，编写出《周围神经缺损修复材料的生物制造与临床评估》著作，是该团队在周围神经领域近 40 年曲折探索历程的全面总结。

本书不仅对周围神经损伤与再生的基本理论、周围神经微结构和微环境的基本特点和研究现状进行了系统阐述，还对周围神经修复材料生物制造与临床评估的现状、进展、临床转化、临床评估方法等进行了全面介绍，并在其中结合了作者团队大量宝贵的经验，具有较强的实用性。此外，本书还广泛吸收了国内外周围神经修复材料的生物制造的最新进展，使本书在理论上达到了较高的水平。所以，本书既可作为广大临床医生、研究生等临床与科研工作的使用工具书，又可作为全面了解周围神经修复材料生物制造相关理论的较好的参考书。

本书作者在完成日常繁重的临床和科研工作之余，共同发扬协作精神，完成一件极有意义的工作。我相信，本书的出版与发行，将进一步推进我国周围神经领域临床与科研向更高的水平发展。

顾瑛
2018.6.19.

导 言

周围神经损伤与再生修复的研究，有记载的历史至少已有2个世纪以上。在这不算太长的历史时期里，一代代的学者潜心探索与研究，在周围神经的解剖学、组织学、生理学与病理学以及临床诊断、治疗、预后与重建方面，已建立起较为系统的理论基础与实践体系。分子生物学理论概念与技术手段的引入，又对其进行了新的充实。然而，临床的需求千变万化，传统的、经典的概念在日益复杂的临床需求前不得不面对一次又一次的检验与挑战。或许这是人们的认识水平随着现代诊断技术发展的提升而不断发现与周围神经损伤相关疾患的存在而需要进行甄别与处理，也可能同时是一些临床情况的处理在经典理论指导下难以取得医患双方满意的突破所致。

作为一个临床周围神经损伤修复的医生，在大多数情况下利用所掌握的经典理论体系与技术手段来指导临床工作是天经地义的。然而，复杂的临床需求，患者的无奈与失能的痛苦所渴望的需求，也迫使着医生们去探索更多其他的可能性。在此背景下，许多在特定情况下处于无奈的探索也获得了并非在预期内的期待，而慢慢衍变成部分临床处理的路径。其与经典理论与实践的差异，也可能会包括使用者在内的许多专家感到困惑，当然，会更激起他们的希望探索与补充理论体系的冲动。于是，许多新的研究设计、新的假设、新的证实手段也出现了。

最近，不到30年时间内，在再生医学愈来愈被人们认为可能是未来医学发展战略方向的大背景下，组织工程学等应运而生，并迅速与相关临床应用专业结合而被用来寻找突破口，材料学专家也潜心研究各种可能适用于再生医学领域的材料，社会各界投入了大量的资源与精力，在各方面也颇有建树。然而，在嗷嗷待哺的临床面前，这些似乎还是解不了“近渴”的“远水”。意识到这一问题的学术界感觉到了临床转化的重要性与迫切性，故呼唤“转化”的声音日益提升，并开始落实于规则的制定策略中。至于“转化”为什么这么艰难，牵涉生命科学奥妙破解客观过程的困难性，与人类所掌握技术手段的有限性。不少急功近利的行为更使事情本身复杂化。

中山大学周围神经损伤修复的临床与基础研究团队从事这一领域的研究，可以追溯到20世纪70年代。他们从显微外科的技艺着手，试图通过精

细的显微缝合外科技术来处理临床周围神经损伤，包括精细的外膜缝合、束膜与束组的缝合，增加对合神经近远端的匹配性以试图减少迷走神经的无效再生，从而提高神经的临床修复疗效。朱家恺教授就是我国从事周围神经显微外科的一代先驱之一。当然，不断的临床实践也让我们体会到，单凭精湛的外科技术要达到理想的神经修复效果还远远不够。周围神经损伤再生修复所牵涉的因素太多、太复杂，复杂到你只能选择其中某一支领域来进行有限的研究，以期为整个领域的进步做出些许贡献。于是，损伤性周围神经缺损的修复成了本团队重点研究领域之一，几十年来也历经了数代人在默默地探索着其中的规律，以期待能为临床患者提供卓有成效的服务。

本团队也像世界上从事这一领域研究的专家一样，曾尝试过同种异体、异种异体神经的移植，也寻找过各种类人体组织如肌肉、肌腱、羊膜、血管来桥接相应的神经缺损；也希望能提取某些可促进神经再生生长的体内成分来达到神奇的效果。此外，对神经显微结构的解剖学、组织学、病理学的观察，也曾使我们充满信心去获取相关的规律，能为临床服务。然而，尽管付出了许多努力，但仍无法应用于临床目的来处理病人。

直到 20 世纪 90 年代，瑞典著名周围神经显微外科专家 Lundborg 教授创造性地使用硅胶管在短距离内套接损伤断端，并提出了神经再生室的概念。而且在同一时间，组织工程学以支架材料与种子细胞、三维结构为核心概念的理论体系也开始形成，并且用于再生修复的基础与临床研究。本团队的刘小林医师带着困惑与求师指教的期待，赴瑞典 Lundborg 教授门下，潜心研究周围神经缺损性损伤修复的相关问题。

当时，组织细胞化学萃取洗脱技术开始应用于实验室的相关研究。Lundborg 教授敏锐地察觉到其对周围神经的研究具有重大意义，故在其实验室开始了同种异体神经化学萃取脱细胞技术应用的研究。尽管当时仍以观察其免疫原性变化为目的，但在今天看来也仍为必不可少的研究阶段。在动物周围神经进行脱细胞处理后的电镜照片出现神奇的细胞外基底膜结构架构后，刘小林医生亦有了这种材料或许就是“众里寻她千百度，她却藏于灯火阑珊处”的感觉。鉴于当时的研究环境，他毅然回国组建相应实验室进行人同种异体神经的相应研究。经过多年的研发，也是充满酸甜苦辣心路的历程，在 2012 年，终于以“神桥”名称问世，一代同种异体脱细胞神经历尽千辛万苦走向了临床，许多患者开始受益。而从瑞典同一实验室流出的技术，2008 年在美国同样开发出了这类材料，并应用于临床，比我国早了 4 年。

在人体脱细胞神经材料的转化研究过程中，我们付出的艰辛换来了众多的经验与体会，尤其对“转化”二字的沉重与含金量有了刻骨铭心的感受。观今天创新转化研究方兴未艾，团队早就有意将我们的历程写成工具栏以期

能助那些像当初我们一样的待哺者，因为这里面牵涉我们临床医生、基础专业人员并不十分了解的要求与运作规律，以及企业家的智慧与经验，这就是本书撰写的目的之一。

在“神桥”应用过程中，又遇到了过去尚未涉足的新问题。从临床适应证的病理机制与神经生物学基础内涵，到评价临床疗效的客观标准、指标、影响因素及权重，细细嚼来，竟又是多少块难啃的硬骨头？而为更多的患者带来福音，就意味着用疗效更好的材料来修复这类损伤性缺损，并扩大临床适应证，不忘初心，再次成为团队砥砺前行的动力。

通过大量的研究发现，这里面又渗透了其他学科的知识，尤其是工科、理科、计算机科学和材料科学的知识。幸运的是，付出的艰辛与努力终于让我们看到了曙光，本团队系列研究的许多重大发现、理论推理与实践，具有相当重大的意义，尤其是凝结着又一代人多科学智慧与汗水的结晶，体现着多种现代最新的综合技术、在结构内环境上双重仿生的“神桥”二代。人工仿生与生物制造产品已呼之欲出，即将进入临床前动物实验。这里面，我们又有太多的感受与体会，许多方面我们甚至是由游弋于本研究领域无人区而开展的开创性工作。对神经微结构的研究分析，我们不但建立了独特的技术手段，又分析出了微结构的特点与规律，并能用数字模型的逻辑来证实与简化；计算机专家的卓越劳动，使之可转化为提供生物3D打印的控制语言；材料学专家的杰出贡献，使得具有神经内环境元素、生物相容性、对神经再生生长成熟安全有效、可应用于生物3D打印的“生物墨水”横空出世；工程机械专家的努力，使得适合打印神经类框架材料软组织的生物3D打印机械装备的关键技术取得突破。这一切都为“神桥”二代的问世奠定了较为扎实的技术基础。而医科团队对神经损伤修复与神经再生的生物学研究，对提取结构与内环境元素之规律与特点进行重构生物制造，提出神经再生的科学理论假说——“水流灌注”学说与构成神经微结构特点的“二级孔隙”结构假设，则奠定了新一代材料的生物学等方面的逻辑合理性。“神桥”一代关于神经修复材料的临床使用，甚至是周围神经损伤临床修复的疗效的合理评估体系，使我们对即将到来的临床前动物实验研究和多中心临床试验研究满怀信心。

所有这些，使得团队成员怀着兴奋和虔诚的心情，期待与同行们分享，并真诚希望得到同行们的指正，为了共同的梦想来提升我们的工作，这就是本书初成的目的之二。

我们在研究中有一个深刻的感受，就是生命的奥秘。我们甚至无法用现有的知识去解释一些生命中最简单的现象。我们在再生医学、生物制造研究领域的点滴工作，还根本谈不上生命构造所需的深度与精度。探索生命、复

制生命将是一个艰辛的过程。大量的技术积累与基础生物学、基础医学知识的积累,或许才可能出现质的突破。以周围神经为样本的相关研究,目前仅停留在对细胞外基质框架结构的了解与简单仿生模拟,并未涉及其内容如神经组织细胞、神经元轴突的内涵。故距离完整解决神经缺损修复临床问题,应该还有相当长的路要走。在这里需要强调的是我们的建议,重视工程解剖学与工程生理学的知识积累。因为在当前,我们对软组织构建与构效关系的规律来源于组织学知识和大体解剖、局部解剖、显微解剖学知识,这些知识体系并没有告诉我们进行人工工程组装与生物制造的结构特点、材料特点、功能细胞的时空分布与界面状态、与全身各组织系统的连接道路与位置关系。我们将这些再生医学中组织或器官生物制造替代材料所不可缺少的“模板”,称之为“工程解剖学”知识。可以想象,再生医学、生物制造的起飞,有赖于工程解剖学与工程生理学研究技术手段的突破和量变到质变提升作为前提。这也就是笔者们认为,目前再生医学与生物制造领域研究尚不能很好解决仿生问题,转化为临床应用的关键知识掣肘之一。故以此书内容呼唤“工程解剖学”与“工程生理学”春天的来临,这就是本书撰写的目的之三。

目 录

第一编 周围神经损伤与修复基础

责任主编：朱庆棠

第一章 周围神经解剖学特点与周围神经再生过程	何富林 (2)
第一节 周围神经系统解剖与功能	(2)
一、周围神经系统	(2)
二、周围神经系统功能	(6)
第二节 周围神经干结构与组成	(7)
一、神经纤维	(7)
二、神经束	(9)
三、神经鞘膜	(10)
四、周围神经的血供和微循环	(11)
第三节 周围神经损伤与再生	(14)
一、周围神经损伤	(14)
二、周围神经再生	(20)
第二章 周围神经缺损的流行病学特点与修复的临床意义	邱 帅 (28)
第一节 周围神经缺损的流行病学特点	(28)
一、周围神经缺损的概念	(28)
二、周围神经缺损性疾病的流行病学特征	(28)
三、周围神经缺损性疾病的的影响	(29)
四、周围神经缺损的疾病谱变化带来的影响	(30)
第二节 周围神经缺损修复的临床方法	(30)
一、周围神经缺损的修复方法及其适应证	(30)
二、周围神经缺损修复材料的临床适应证	(32)
第三章 周围神经缺损修复材料的研究进展	邱 帅 (34)
第一节 理想的周围神经缺损修复材料	(34)
第二节 周围神经缺损修复材料研究进展	(35)
一、神经组织	(35)
二、非生物材料	(37)
三、生物材料	(39)

第三节 周围神经缺损修复材料的设计原则与要求	(39)
一、周围神经缺损修复材料的一般设计原则与要求	(39)
二、周围神经缺损修复材料三维结构与微环境双重仿生设计原则	(40)
参考文献	(42)

第二编 周围神经微结构、微环境的研究与仿生设计

责任主编：戚 剑

第一章 周围神经微结构研究现状	闫立伟 (52)
一、神经伴行血管	(54)
二、神经节段血管	(54)
三、神经外膜血管	(55)
四、神经束间血管网	(55)
五、神经束内微血管网	(55)
第二章 周围神经微环境概述	邹剑龙 (57)
第一节 物理结构微环境	(57)
第二节 生化微环境	(58)
一、神经营养因子	(58)
二、与神经再生相关的激素	(60)
三、炎症因子	(61)
四、细胞外基质成分	(63)
第三节 周围神经损伤后的细胞微环境改变	(68)
第三章 周围神经的血供特点及结构基础	朱昭炜 何 波 (69)
第一节 周围神经血供的观察发展史	(69)
一、一维研究	(69)
二、二维研究	(70)
三、三维研究	(71)
四、四维研究	(72)
第二节 周围神经的血供特点	(73)
一、神经干的血供来源	(73)
二、神经干营养血管的供血方式	(75)
三、神经干内微循环的特点	(77)
第三节 周围神经内微循环障碍对神经内部结构的影响	(78)
第四节 适度血管再生对神经再生的影响	(79)
第四章 周围神经微结构获取相关技术及二维图像的获取	姚 执 袁汝恒 (84)
第一节 手绘解剖图谱	(84)
第二节 组织学切片染色	(86)
一、苏木精-伊红染色	(86)

二、尼氏染色法	(87)
三、髓鞘染色	(88)
四、神经纤维染色	(89)
五、三色染色法	(90)
六、乙酰胆碱酯酶组织化学法	(90)
七、髓鞘复染方法	(97)
八、胆碱乙酰转移酶免疫组化染色	(105)
九、碳酸酐酶染色	(105)
十、免疫组化	(107)
十一、周围神经断面二维全景图像获取方法	(107)
第三节 影像学	(110)
一、超声	(110)
二、X 线及 CT 检查	(111)
三、磁共振成像	(112)
四、显微 CT	(113)
五、显微 MRI	(114)
第四节 超微结构	(118)
一、透射电镜与扫描电镜分析	(118)
二、激光共聚焦	(119)
第五章 周围神经二维图像的分割方法	钟映春 陆 遥 (122)
第一节 周围神经组织切片的图像分割研究	钟映春 (122)
一、问题的提出	(122)
二、周围神经组织切片的图像分割算法	(123)
三、结论	(128)
第二节 图像分割模型及其算法	陆 遥 (129)
一、基础知识	(129)
二、图像分割模型及其算法的介绍	(130)
三、GGVF snake 模型	(131)
四、深度学习	(136)
第六章 周围神经三维重建技术	姚 执 闫立伟 (142)
第一节 三维重建技术手段	(142)
第二节 三维重建关键技术问题	(146)
一、定位问题	(146)
二、图像的变形问题	(147)
三、数据输入方法	(148)
四、图像分割技术	(148)
第三节 周围神经三维重建应用案例及应用体会	(149)
一、颈部与臂丛神经三维重建与可视化研究	(149)
二、盆底与腰骶丛神经三维重建与可视化研究	(150)

三、神经干功能束（组）三维重建与可视化研究	(151)
第七章 周围神经微结构功能分区及生物学特点分析	闫立伟 姚 执 (153)
第一节 周围神经微结构功能分区概念	(153)
第二节 I 区的结构及其生物学特点	(155)
第三节 II 区的结构及其生物学特点	(157)
第四节 III 区的结构及其生物学特点	(159)
第五节 IV 区的结构及其生物学特点	(161)
第八章 应用生物制造数字化模型设计方案	闫立伟 刘 强 (165)
第一节 生物制造数字化模型设计的整体思路	(165)
第二节 周围神经损伤性缺损修复材料生物制造模型的初步设计	(166)
第九章 微环境已知元素的仿生探索	周 翔 (170)
第一节 微环境已知元素综述	(170)
一、神经再生微环境定义	(170)
二、微环境中有利于神经再生的因素	(170)
第二节 适用于“神桥”的仿生探索	(174)
一、筛选适用于“神桥”的已知元素的方法探索	(174)
二、依替福嗪复合“神桥”改善局部微环境的仿生探索	(177)
参考文献	(192)

第三编 周围神经缺损的修复材料与生物制造

责任主编：全大萍

第一章 周围神经缺损修复材料研究	瞿 虹 王晓莺
张 娜 何留民 朱继翔 杨习锋 冯文娟 梁丽全 刘 晟 (202)	
第一节 合成材料	瞿 虹 王晓莺 强 娜 何留民 (202)
一、不可降解的高分子材料	(202)
二、可降解的高分子材料	(205)
第二节 天然材料	朱继翔 (225)
一、概述	(225)
二、天然多糖类材料	(225)
三、天然蛋白质类材料	(230)
第三节 动物源性材料	杨习锋 冯文娟 梁丽全 刘 晟 (235)
一、概述	(235)
二、不同组织来源的脱细胞支架	(236)
三、脱细胞周围神经基质水凝胶	(245)