

骨力学

杨桂通 吴文周 编著

科学出版社

骨 力 学

楊桂通 吳文周 編著

科 学 出 版 社

1989

内 容 简 介

骨力学是生物力学的一个重要分支,研究骨和骨骼肌肉系统的力学问题,与骨科疾患、骨伤治疗、代用材料及康复医学等关系极为密切。本书系统地介绍了骨和骨骼的结构,以及它们的力学性质和受力后的瞬时效应及远期效应;骨的再造理论;关节及关节软骨的力学特性;骨力学的临床应用等,较全面地概括了该领域的基本理论和研究成果,内容丰富,简明扼要。

本书可供生物力学、生物医学工程学、生物医学研究工作、骨科医生,以及大专院校有关专业的师生、研究生参考。

骨 力 学

杨桂通 吴文周 编著

责任编辑 马素卿

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

北京市怀柔县黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年3月 第一版 开本: 787×1092 1/32

1989年3月第一次印刷 印张: 6 1/2

印数: 0001—1,620 字数: 146,000

ISBN7-03-001004-3/Q·155

定价: 5.30元

序 言

1978年中国科学院组织了全国的知名力学家和优秀的力学工作者制订了一个力学学科十年发展规划，生物力学以一个独立的分支学科列入其中。同时，中国力学会组织了一个全国性的生物力学专业组。1979年，著名美籍华人科学家冯元桢先生来华讲学，系统地传授了生物力学的最新发展，特别是他本人在开拓这一新领域方面的贡献，给我国培养了一批生物力学研究工作的中坚力量。嗣后，生物力学在中国便迅速发展起来，出现了像重庆大学、复旦大学、成都科技大学、华中理工大学、中国科学院力学研究所、北京大学、清华大学，以及太原工业大学等几个最早的生物力学的研究集体，并于1981年、1985年分别在上海、太原召开了两届全国生物力学学术会议；又于1983年、1986年分别在西安、石家庄召开了两届全国生物固体力学学术会议。由于生物力学这一边缘学科具有理论和实用价值，它已吸引了力学界、医务界、生物工程界的众多的研究者。

骨力学是生物力学的重要分支。尽管对骨的力学性质的研究已有上百年历史，但至今还不能说它已形成一个成熟的力学分支。把力学原理引进生物体、生物组织与器官是一件非常艰难的事，因为生物体的主要特点是有生命。有生命的活组织与无生命的工程材料的结构有根本的区别。骨力学就是要给出活体骨骼在受力状态下，骨细胞或不同层次、不同水平骨结构生命的变化，从而给出宏观的力学效应。目前这还只能是骨力学工作者的努力方向。我们期待着骨力学将成为一个有生命力的力学分支。在生物力学各分支中，骨力学有可能会首先突破这一难关。

近年来,我国骨力学的研究出现了可喜的现象.表现在研究人员的队伍有了很大发展,不少的研究成果已应用于临床;对骨力学基本理论的研究有了好的开端,例如基于骨的微观结构的骨的基本力学性质的研究、骨的本构关系的研究、骨动力学问题的研究,具有中国特色的中西医结合治疗骨伤问题的研究、骨的损伤、愈合与应力状态关系的研究,以及特殊环境下人体骨骼耐受性的研究等等.考虑到我国骨力学的研究仍处在初级阶段,骨力学研究者一部分来自工程力学界或理论力学界,一部分则来自医务界、生物工程界.本书旨在为这两部分的研究者提供一本能反映骨力学当前主要特征的参考书,因而本书的部分内容是专为力学兴趣较浓的研究者而写,一部分则为临床医生而写,大部分内容则希望对骨力学工作者和有关专业的大学生、研究生有参考价值,並希望通过这本书能把来自各方面的骨力学工作者的语言统一起来.

本书是在作者们通力合作的基础上完成的.吴文周撰写了第二、三、四、五、六、七章,杨桂通撰写了第一章,並负责全书的构思、规划,以及修整、定稿工作.本书在写作过程中,得到了西北建筑工程学院孙家驹同志和西安医学院耿介同志的热情帮助;山东工业大学白详教授审阅了书稿,提出了宝贵意见,作者向他们表示衷心的感谢.本书作者的有关研究工作得到了国家自然科学基金会和山西省科学基金会的资助,在此一并表示感谢.

由于我们水平有限,错谬之处在所难免,敬请批评指正.

作者

1987年6月28日于太原工业大学

目 录

序 言

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 生物力学与骨力学	(1)
§ 1.2 研究骨力学的方法	(2)
§ 1.3 骨力学发展概况	(3)
第二章 骨和骨路的结构	(6)
§ 2.1 骨的结构	(6)
§ 2.2 骨髓的形状和结构	(18)
第三章 骨材料的力学性质	(33)
§ 3.1 概述	(33)
§ 3.2 哈佛氏系统的力学性质	(34)
§ 3.3 密质骨的基本力学性质	(39)
§ 3.4 密质骨的非各向同性性质	(44)
§ 3.5 密质骨——一种复合材料	(46)
§ 3.6 粘弹性理论的基本概念	(51)
§ 3.7 密质骨的时间相关性与动态特性	(58)
§ 3.8 松质骨的力学性质	(71)
第四章 骨的再造理论	(76)
§ 4.1 骨是一种反馈系统	(76)
§ 4.2 骨功能适应性的压电效应解释	(79)
§ 4.3 骨的表面再造假说	(81)
§ 4.4 长骨骨干表面再造理论	(83)
第五章 关节软骨的力学特性	(95)
§ 5.1 关节软骨的超微结构	(95)
§ 5.2 关节软骨的粘弹性行为	(98)
§ 5.3 关节软骨的二相混合物模型	(104)

§ 5.4	滑液关节的摩擦与磨损.....	(112)
第六章	人体关节力学	(119)
§ 6.1	研究关节力学的一般方法.....	(119)
§ 6.2	踝关节力学.....	(128)
§ 6.3	膝关节力学.....	(136)
§ 6.4	髋关节力学.....	(146)
§ 6.5	上肢关节.....	(149)
§ 6.6	指关节力学.....	(152)
§ 6.7	大头颈运动分析.....	(159)
第七章	骨力学的临床应用	(171)
§ 7.1	膝关节病的力学分析.....	(171)
§ 7.2	人工关节.....	(177)
§ 7.3	治疗股骨复式骨折的外固定装置.....	(183)
§ 7.4	可被吸收的内固定板.....	(184)
§ 7.5	用在体撞击试验法检查骨质疏松.....	(187)
参考文献		(191)

第一章 绪 论

§1.1 生物力学与骨力学

生物力学是介於生物学与力学间的边缘学科.它研究生物体及其组织、器官的生长、运动和变化规律的力学问题.生物力学有着非常广泛的研究领域.它不仅涉及到组织学、解剖学、生理学及病理学等医学的各个分支,並且和刚体力学、固体力学、流体力学和流变学等力学分支紧密相关.从长远效果来看,生物力学由于其对生命科学的重大贡献而将产生不可估量的社会效益.就有关人体的生物力学而论,生物力学将帮助我们了解人体及其脏器的正常功能,以及在外力作用下各种效应的发生与发展规律,预示器官、肢体等的进一步变化,从而提供人工控制方法与预防措施.由此可见,生物力学将不仅为诊断学、内科学与外科修复术等提供新技术的理论依据,同时也将为人类更健康地生活提供指导原则.

目前生物力学的研究重点在于对人体生命科学的基本认识,从力学角度揭示生命的奥秘,从而设法对疾病和意外损伤采取相应的治疗和处理.另一个重要的目的在于从对生物运动与变化的规律寻求自然界普遍存在的客观规律,从认识自然到改造自然.仿生学的研究就是基于这个目的.

生物力学问题是非常复杂的综合性问题,目前人们对它的了解还很少.对生物力学问题的研究一般需要具备多方面的知识.例如对血液流动问题的研究,我们不仅要深入了解流体力学、血液流变学,而且要了解血管的力学特性、血液的成分、凝血机制、红细胞力学和软组织流变学等等.由此

可见,摆在生物力学工作者面前的是大量的、有现实意义的、需要进行深入基础研究的任务。

骨力学是生物力学的重要分支,它研究骨和骨骼体系的力学问题.骨骼在生物体内占有非常重要的地位.以人体为例,骨骼是人体赖以生存和运动的支柱,没有合理的骨骼结构,人体不可能完成如此精巧的运动。

骨的组织结构十分复杂.对这种生物材料力学问题的研究,无疑是具有理论意义的.因为它不仅使我们能认识骨的力学特性,而且由此将对力学学科的发展及新材料的研究等产生影响.骨和骨骼是有生命的,所以对这种具有特殊组织结构生命体的研究,实际上是开拓了一个崭新的学科领域.人们希望知道外界作用(包括力、电、磁、热等的作用)对活的骨细胞、骨单位等的力学效应,从而进一步揭示生命的奥秘。

如上所述,骨力学研究骨组织和骨骼结构在外界作用下的力学特性,研究骨在受力后的瞬时效应和远期效应,研究骨的生长和吸收等规律.因此,骨力学对骨科疾患、骨伤治疗、代用材料及康复学等有着重要的临床应用.目前在这些方面的应用研究很活跃,其中不少是很有成效的。

§1.2 研究骨力学的方法

骨力学的研究对象是作为生物体支架的骨及骨骼系统,目前主要是人体各类骨及骨骼.研究骨力学问题,目前仍然必须依照连续体力学的传统理论和方法.就是说,在充分了解骨组织结构的基础上,将骨抽象为一种模型化了的工程材料.在某些情况下可把它粗糙地看作理想弹性体,有时则看作粘弹性体或其他力学模型.它可以是各向同性的、横观各

向同性的、正交各向异性的、两相或多相复杂形式的复合材料。在什么条件下，取哪种材料性质的模型，是研究骨力学首先要解决的问题。取定了上面指出的几种材料的力学模型后，骨的本构关系就不难确定（虽然有些类型的本构关系可能相当复杂）。当然，建立真实骨的本构关系是一个非常困难的问题。最大的难点在于，目前还无法把有生命的组织的本构关系用精确的数学方式表达出来。关于活体组织本构关系的研究尚未见到任何可靠的报道。而在本构方程中反映“生命”，却正是生物力学工作者最关心的课题。近年来有些研究报道，试图建立骨内应力与生长、再造的关系，便是为达到这一目的的初步尝试。可以认为，建立活骨本构方程是骨力学的重要任务之一。

骨力学另一方面的任务是掌握各种骨骼系统在外力作用下的行为和响应规律，并将它应用于实际。例如对头颈损伤力学机制的研究，骨骼受碰撞时的响应，人体的振动和抗冲击能力等。从而为外科创伤的预防及加速创伤愈合过程、人工置换材料的研制、人体对加速度的耐受性等临床问题提供理论依据。

综上所述，研究骨力学的方法是将力学原理应用于作为特殊生物材料的骨和骨骼系统。其目的是指导健康人的活动，减少疾患，加速康复，造福于人类。

§1.3 骨力学发展概况

早在一百多年前，人们已对骨骼的力学特性做了不少的实验研究。G. Wertheim于1846年用当时的先进测量技术测量了骨的弹性性质，并给出了一个非线性的应力-应变关系方程。此外，他还完成了一系列关于动物静脉、神经和肌

腱等软组织的实验研究。

在 19 世纪,继 Wertheim 之后,有一些生理学家对生物组织进行了一系列的实验研究工作。W. M. Wundt (1858)、A. W. Volkmann (1859) 等都做过生物材料的力学试验。W. Roux (1895) 和以后的 F. Pauwels (1948) 等人研究了骨的形状、构造,认为松质骨的构造符合最优结构原理,由此给出了骨的构造与其功能相适应的原则,即骨骼自然进化的趋向是用最少的材料(最轻的重量)来承受最大的外部作用,自然地满足最优化原则。

J. Wolff (1884) 提出了一个重要的假说,即认为在体骨将随其所受的应力和应变而改变。后人常称之为 Wolff 原理,并一直试图从各个角度对它加以证实。

本世纪 50 年代以来, F. G. Evans、山田等人对骨的力学特性进行了大量的、系统的实验研究,给出了一系列有价值的常用数据。

近年来对骨的研究已逐渐深化。深田荣一 (1953) 最早发现骨的压电效应。R. O. Becker 和 D. G. Marray 发现电场能激活骨细胞中的蛋白质络合体。毛照宪研究了关节软骨在受压时呈现应力松弛现象,并提出了一个二相混合物理理论模型。

R. S. Lakes 和 J. C. Katz 对骨的粘弹性行为进行了仔细的实验研究,探讨了骨应力松弛的机理,建造了骨的非线性粘弹性本构方程。

目前,对于骨的动力特性及骨作为一种有生命的组织的微观力学效应等研究得还较少。R. W. Smith 等 (1965) 做过骨的动力特性测量。R. C. Tennyson, W. Goldsmith 和 J. L. Lewis (1972, 1973) 用分离式霍普金森杆 (Split Hopkinson Bar) 技术研究了牛骨的动力粘弹性特性,

並用线性粘弹性模型作描述.他们还发现,当应力水平达到一定程度以后,骨呈现明显的塑性性质.但从总的情况来看,骨动力学问题的研究还不够深入,而从临床和实际应用的角度来看,骨动力学的研究具有更为重要的意义.

骨力学在医学上的应用有着广阔的前景.如所周知,骨的再造原理、骨生长与应力关系的理论等,对于矫形外科、骨伤的治疗、防护和辅助器具(头盔、安全座椅、轮椅等)的设计等许多方面都有重要的作用.国外在这些方面的研究工作是很很多的.我国不少医疗、保健部门与研究单位也取得了许多可喜的成果,特别是在中西医结合治疗骨伤方面的研究和应用,收到了令人注目的效果.

第二章 骨和骨骼的结构

§2.1 骨的结构

研究骨的结构是一个比较复杂的问题,首先要明确在哪个水平上的骨组织是我们所要研究的对象:“骨”。

通常可以在四个层次上讨论骨的结构,即分子水平的骨;板状骨和编织骨;大块编织骨、初级板状骨、哈佛氏系统和层性骨;密质骨和松质骨.图2.1表示由最低层次的骨——分子水平的骨构造最高水平的骨——密质骨和松质骨的四个结构层次。

1. 分子水平的骨

在最低水平,骨可看成是复合材料.它由大体上平行排列的胶原纤维充填以极致密的磷酸钙而形成(图2.1最上图).它还含有水和某些还不清楚的无定形多糖和蛋白质,在许多类型的骨中还含有活细胞和血管。

胶原是一种构造蛋白,或许在一切多细胞动物中都能找到它,但只有在脊椎动物中,胶原才能完全转变成矿质化的骨骼结构.在脊椎动物的皮肤、腱、韧带、血管、软骨、基膜和结缔组织中,含有未矿质化的胶原.不同组织的胶原有不同的氨基酸成分.皮肤、肌腱、齿质和骨的胶原有相同的氨基酸成分.蛋白质分子“滋养胶原”由三条长度一样的多肽链所组成,其中两条的氨基酸成分相同,另一条不同.这三条链以左三旋方式扭结在一起.滋养胶原分子以头尾交联方式结合形成胶原微纤维.滋养胶原分子长为260nm,它们互相交联的长度约为分子长度的四分之一.许多滋养胶原分子结合在一起形成胶原微纤维时,有周律为67nm的间隙。

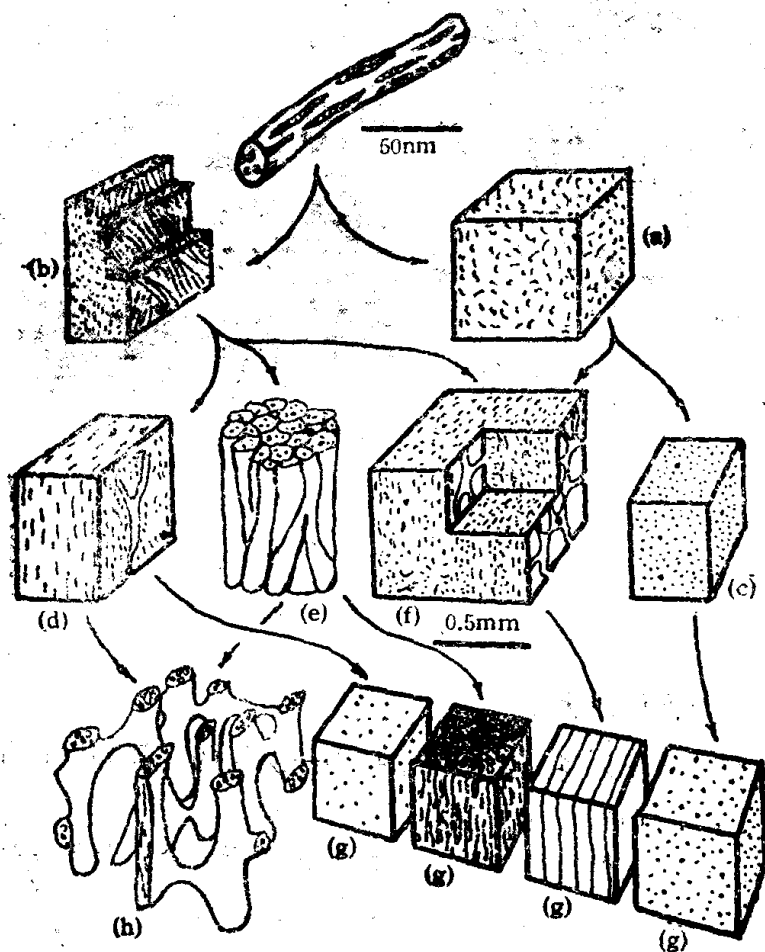


图2.1 骨结构的四个层次 (Currey, 1984)

最后，由胶原微纤维集合成胶原纤维。图 2.2 左图示人股骨中胶原纤维，右图是大白鼠胫骨中的胶原纤维。

在完全矿质化的骨中，围绕胶原纤维的是骨盐。对于骨矿质，无论是对它的化学成分还是对它的形态都还有争议。但有一点是公认的，即骨矿质的某些成分是磷酸钙的转态，叫做羟基磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ 。它有结晶状态。

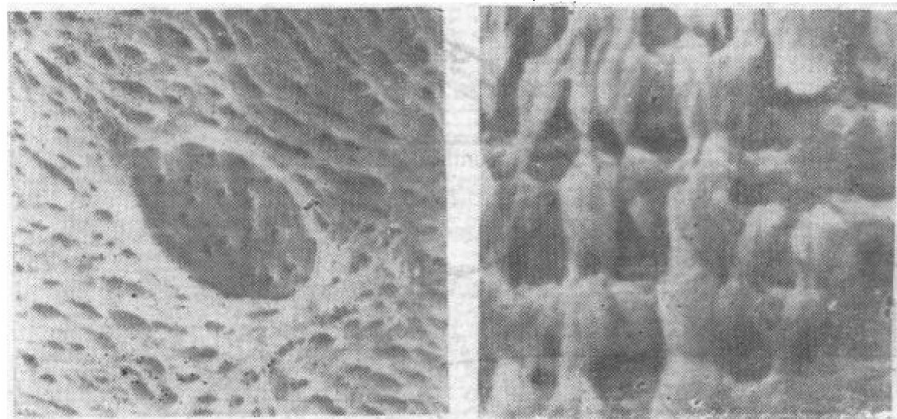


图2.2 骨中的胶原纤维 (Bourne, 1972)

对其形状尚有争议，一般认为它是针状，但也有人认为它是板状。磷灰石结晶很小，只有 4nm 长，其长轴方向与胶原纤维方向平行。

2. 编织骨和板状骨

就哺乳动物来说，比分子水平高一层次的骨是编织骨和板状骨[图2.1(a)和(b)]。

编织骨生成得很快，在胎儿骨中和骨折愈合的骨痂中可发现大量的编织骨。图 2.3 是用微 X 光摄影术拍得的足月胎儿股骨骨皮质的照片，可以看到，除哈佛氏系统外，有大片的编织骨。编织骨中也含有骨细胞和血管，球形骨细胞拘禁在骨陷窝中，它们通过骨小管相连，最终与血管相通。和板状骨不同，编织骨中血管周围有很大空穴。编织骨有比板状骨较高的非晶体磷酸钙百分比，其矿质成分与有机成分之比也较高。图 2.4 示人骨折后骨痂的切片，编织骨与板状骨混在一起。箭头示编织骨中大的骨陷窝。

编织骨中的胶原是直径约为 $0.1\mu\text{m}$ 的细丝状，其排列方向是随机的，磷灰石晶体的方向也不都沿胶原纤维的方向。

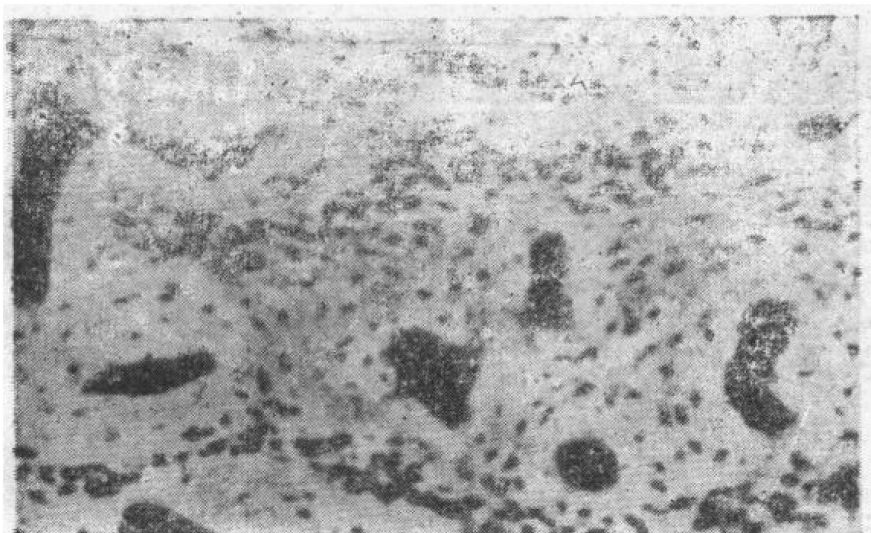


图2.3 胎儿骨中的编织骨 (Vaughan, 1970)

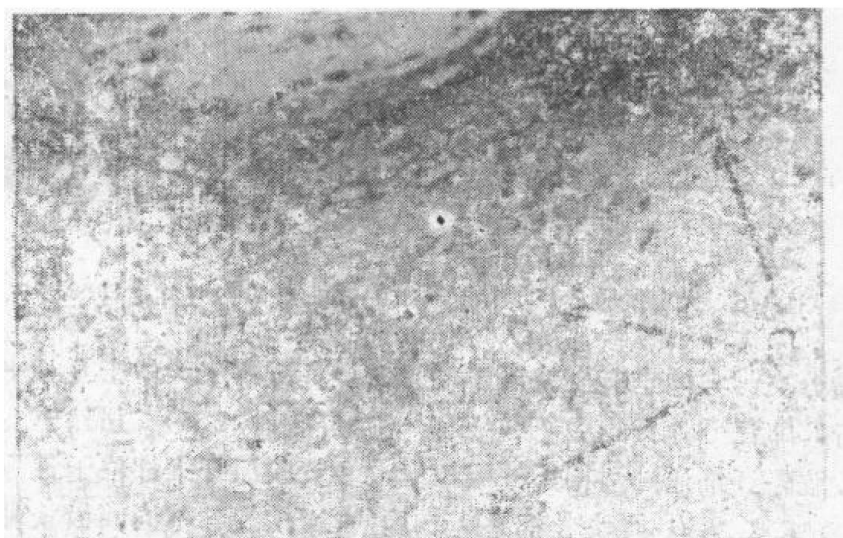


图2.4 骨痂中的编织骨 (Vaughan, 1970)

板状骨的生成速度比编织骨要慢得多。胶原在板状骨中形成直径为 $2-3\mu\text{m}$ 的纤维束。它们排列成整齐的层形，叫做骨板。骨板厚约 $5\mu\text{m}$ 。在一片骨板中，虽然胶原纤维束有

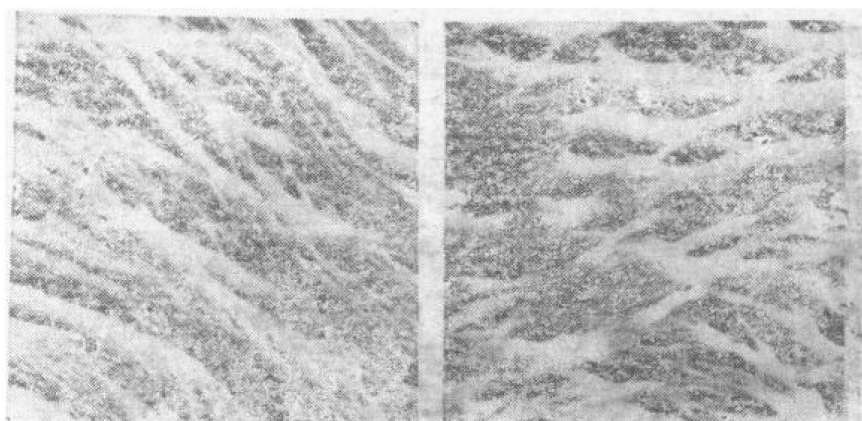


图2.5 左：大白鼠胫骨中的胶原纤维
右：兔肩胛骨中的胶原纤维 (Bourne, 1972)

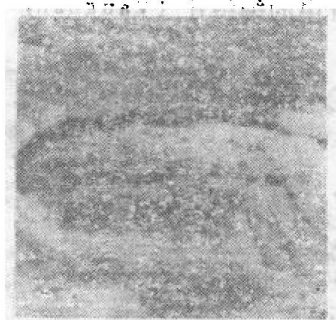


图2.6 大白鼠胫骨，示骨陷窝中的骨细胞 (Bourne, 1972)

横分支，方向也有变化，但一般来说，各纤维束大体上互相平行，即任一骨板的胶原纤维有一主方向（图2.5）。虽然有少数胶原纤维通过两相邻骨板，但大多数胶原纤维都位于骨板中。哺乳动物的各类骨都是有细胞的，和编织骨不同，板状骨的细胞是扁球形，位于直径约为 $0.2\mu\text{m}$ 的骨陷窝内（图2.6），其短轴方向和骨板短轴方向一致。在长骨中，骨板顺长骨纵向伸展，並排成环形。血管的走向基本上也沿长度方向，它们不是垂直地穿过骨板。板状骨的最终矿化程度要比编织骨低。