

生物力学

Biomechanics

吴云鹏

(重庆大学教授,常务副校长,重庆市科协主席)

生物力学是近代力学一个新的分支,也是生物医学工程和生物技术的基础。

生物力学的兴起是认识生命运动规律和增进人类健康的需要,也是发展生物医学工程和生物化学工程等的需要。

据美国一个专门委员会的估计,2000年美国生物医学工程产业及生物化学工程产业的年产值均约为400~1000亿美元。

生物力学的内容可概括为以下几个方面:

1. 运用现代科学的基本理论以及分析、计算和实验方法,定量地研究生命现象的机理,揭示和论证生命运动的规律。

2. 应用现代科学的设计、计算和实验测试方法,结合有关的学科和技术,提供防病治病、保健康复、体育运动、安全防护等方面新的理论、方法和设备。

3. 利用生物体系(组织、细胞及其组分)的功能,通过以力学为基础的有关工程学科和技术运用,使生物化学工程(包括基因工程、细胞工程、酶工程、发酵工程等)研究取得的实验成果产业化,为社会提供产品或服务。

生物力学包括生物流体力学和生物固体力学两个分支。

一、生物流体力学

60~70年代,以冯元桢为代表的一批力学家和以钱煦为代表的一批生理学家,在软组织力学性质、肺循环(包括微循环)、血液流变特性、红细胞力学等方面的研究取得了突破性进展,并建立了独特的方法学体系,其特点是将力学、工程技术方法和解剖学、组织学、生理学的方法有机地结合起来,逐步形成了生物力学这门新兴边缘学科。在这一时期生物流体力学的进展主要有几个方面:

1. 肺循环力学的研究

60年代后期,对肺循环流体力学规律进行了系统的研究,如:

- (1) 从肺毛细血管组织入手,对各级肺血管组织形态进行定量的观测,获得进行力学分析所必需的几何数据。

- (2) 在符合生理学要求的条件下测定肺各级血管组织的力学性质。

- (3) 根据肺循环和肺血管组织的特点,建立肺血流的力学模型,并依据力学的基本原理,使之数学化,关键是肺毛细血流,片流模型的建立。

- (4) 在生理范围内提出边界条件并求解。

- (5) 模型实验及动物实验。

- (6) 将理论预测与动物试验的结果相比较,获得了相当一致的结果。

此研究是这一阶段生物力学成功的典范,同时也形成了生物力学独特的方法学规范。

2. 动脉粥样硬化病灶研究

病理研究表明,动脉粥样硬化斑块集中于血管的弯曲和分支部位,而这些地方血管壁的组织构造并无特异,但流场却十分复杂。经过研究后曾提出高剪应力损伤假说和低剪应力传质障碍假说。后来的研究则表明,血管内皮细胞的形态和功能与这些部位的流型密切相关。

3. 脉搏波的传播规律研究

这一研究以动脉硬化等疾病的早期无创诊断为目标。60~70年代中期,生物流体力学最热门的课题是通过考察血管和流动的各种非线性因素对脉搏波传播的影响,发现波动模式是多种多样的。对动脉系统中脉搏波传播的研究,得出了体动脉系统数值模型和脑血管系统数值模型,但要达到无创诊断目标,现有的脉搏波理论还远远不够。因此,生物流体力学与机体的环境因素、遗传、动脉壁内皮细胞、血浆低密度脂蛋白的关系等综合

研究成为重要课题。以此为核心的血液动力学也得到了发展。

4. 呼吸力学研究

呼吸力学的进展已经为医学作出了贡献,如尘肺早期诊断方法的建立,呼吸窘迫综合症、哮喘等疾病的治疗方法的改进等等。

60年代以来呼吸力学的进展有四:形态学参数的定量测定,气流阻力的分析和测定,呼气极限流量的发现和研究,小气道内气体的混合。

5. 红细胞变形和它在毛细血管、小血管(直径小于1毫米)内运动规律的研究

就红细胞变形而言,已测定了自然状态下人血红细胞(正常)的形态(双凹转体),并给出了解析表达;了解了红细胞的高度可变形性的原因,发展了多种观测红细胞膜变形性的方法;提出了红细胞膜的准静态本构关系。在小血管里,证明了血液流动中红细胞的群体行为和由此引起的异常效应机理,但无法用微极性流体表征此异常行为。

80年代以来,生物流体力学的发展趋势是宏观与微观相结合,力学方法与生化方法相结合,分析与综合相结合,力学过程与生命运动直接相结合。而器官循环力学(器官微循环为其核心),细胞力学和应力与生长的关系的研究则是当前生物流体力学的前沿。分子生物力学则刚露苗头。

对未来10~20年之内生物流体力学的发展可作以下估计。

1. 心、脑血管系统流体动力学的研究依然是一个主要领域

(1) 整个器官流动规律的研究:心脏泵功能—冠脉循环—心肌收缩之间的准确的定量关系,脑血管组织的几何参数,力学性质的定量观测和脑血流动力学模型的建立。关键是有关的测量技术。

(2) 动脉粥样硬化和血栓形成的流体动力学因素的研究及血管弯曲,分枝,狭窄等部位流场特征和流体动力的观测和分析。

(3) 微循环力学一些基本问题的研究,包括:小动脉的自律运动与区域微循环的调节,其中关键是血管平滑肌的收缩规律;对血细胞,尤其是白细胞与毛细血管内皮细胞的作用的研究;对跨壁物质运输(各种类型)、组织间质物质运输,以及两者的耦合作用的研究。

(4) 其他体力学特性和动力学分析,如胆汁、淋巴、子宫颈液、唾液粘液等。

(5) 力学分析与系统综合相结合,发展心血管系统疾病的无创诊断技术。

2. 细胞力学将成为未来十年内生物力学最活跃的领导

(1) 研究流体动力对细胞生长、结构、功能代

谢的影响,这不仅是了解动脉粥样硬化机理的需要,而且将对生物化学工程的发展起重大作用。

(2) 研究细胞间的相互作用(机械的,物理的,化学的,以及它们的综合)。

(3) 研究细胞生长过程中在周围介质里引起的应力,以及介质应力对细胞生长过程的影响。

(4) 研究细胞、受精卵在分裂和增殖过程中的变形和运动。

(5) 以分子为基础的细胞和细胞膜力学性质的研究。

3. 分子生物力学的研究将是未来生物力学的一个新的生长点

(1) 生物大分子(如酶)的结构、功能和所受应力的关系,即生物大分子应力耐受阈值的确定,是直接为生物化学工程服务的,在医学上也有潜在的应用前景。

(2) 抗体/抗原相互作用的力学和动力学规律——新的生物大分子模型。

(3) DNA转录、复制、修补过程中双螺旋结构解旋——恢复过程中的力学规律。

4. 绿色植物的生理流动的研究 包括植物体内水的运输(蒸腾流)和糖的传输(易位流),叶的呼吸和蒸发等。

5. 生物化学工程流体力学的研究

(1) 生物反应器流体力学及其对生物制品和生物学特性的影响。

(2) 生物反应器内气-液,液-固两相的传质和传热问题。

(3) 细胞——基底表面的相互作用的研究,这将为基底表面的设计提供依据。

(4) 剪应力工程方法生产的植物和动物细胞在剪应力作用下的稳定性。

(5) 微重力连续流式电泳分离流体力学问题。

二、生物固体力学

生物固体力学包括骨力学、软组织生物力学、关节力学、脊柱力学、齿力学、创伤力学、矫形力学、运动生物力学、皮肤力学、血管力学等。

生物固体力学近年来已从定性研究发展到用先进技术进行定量分析;对生物结构的认识也从宏观发展到微观,再进一步到微观;实验技术从离体发展到在体;分析方法是弹性发展到粘弹性,再进一步到热粘弹性。

1. 骨力学

以往的骨力学研究,主要在静态低载荷状态即非生理状态下进行,对动态下的力学响应以及动态模型的研究不多,故仍有许多问题尚待探索。

当前的研究方向是建立骨重建力学模型(其出发点是把骨看作由细胞、固相基质和间质液构成的复合材料,并具有完善的各个构件的几何参数和本构方程),研究骨生长的机理,以及弄清楚骨折愈合和应力的关系(如中医小夹板治疗骨折的机理在于小夹板使创伤部位应力分布有可能在早期活动过程中逐步调整,使之比较接近于生理状态)。

2. 软组织力学

人体是由软组织和骨骼等部分组成的,过去对软组织的工作大都集中于一般软组织研究,对于病理状态下的软组织的研究不多,所作的工作也局限于了解软组织的力学特性与其构造和微观结构的关系,但仅仅是静态的。近来开始重视在体情况下高应力损伤的动力学响应及其理论研究,以及生理状态下的重建过程依赖活体所受的应力及细胞功能的研究。

皮肤力学研究也做了许多工作,包括个别肢体到全身的力学特性的研究,这些研究的成果已广泛用于人体肌肉的疲劳恢复,运动生理学,创伤和美容等方面。

其他如损伤机理、愈合机理的研究,人工代替物移植等也将成为生物力学的重要研究内容。

撞击是一种典型的损伤情况。这种状态下的生物力学响应的测量是非常复杂的,它包括大量的几何参数,材料的非线性,复杂的表面结构和边界条件,高粘弹性结构等。因此要了解损伤机理是非常困难的,需做大量的工作,其它机理的研究也存在同样的问题。

今后总的方向是利用生物力学和其他学科的知识(特别是与生命学科有关的知识),在细胞、组织、器官等基本层次上进行深入研究。这些知识包括神经损伤的生物力学,高应变率下软组织和骨的损伤机理,神经—肌肉控制力学和机器人力学,生长与应力、电效应的关系,半月板和椎间盘的生物力学,关节力的在体测量,用于人体测量的试验假人,永久性全关节置换等。

我国生物固体力学的研究比国外起步要晚十多年,始于70年代末。近十年来发展比较快,在以下一些领域,已取得一定成果。

(1) 骨及软组织的力学特性及不同应力条件下骨组织重建等。

(2) 中医治疗骨伤、骨折和骨病的研究等。

(3) 各种体育运动技术研究及运动后快速有效恢复体力等。

(4) 牙组织材料的力学性质研究及牙齿正畸的力学分析和义齿的受力分析等。

(5) 创伤力学研究,如在冲击载荷下人体某些组织的响应及在高加速度下的脊柱动力响应

等。

(6) 人工器官(如人工心瓣,人工关节等)和医用仪器设备(如牙齿合力计等)的研制。

三、发展战略设想

1. 生物流体力学的发展战略

我国生物流体力学的科研队伍当前的具体情况是,受过双重训练的“第二代”尚未成长,而第一代又以“客串”居多,过于重视力学本身。同时,我国研究经费有限,测试技术落后,在相当一部分前沿领域内无力与国外竞争。因而必须有选择地重点支持若干个“点”,以便在有限领域内做出较为显著的成果,取得相应的国际学术地位。据此,下列课题应在今后10~20年内给予重点支持:

(1) 应力(介质应力、流体动力等)对细胞生长、构造、代谢和功能的影响,它既是细胞力学和生长与应力的关系的结合点,也是力学与生物化学的结合点,而且和动脉粥样硬化的病理机理及生物化学工程技术等有密切的关系。

(2) 运用中国的传统医学和血液动力学和血液流变学结合,发展心脑血管疾病的无创诊断技术。

(3) 开展人工心瓣动力学、体育运动生物学以及在农业、畜牧、食品等方面有重大经济效益和社会效益的基础应用研究。

(4) 开展生物化学、流体力学研究,为解决生物化学工程技术设备落后问题奠定基础。

(5) 器官血液循环力学及体液力学的研究应根据可能找冷门,填补国际上的空白。

(6) 开展微循环力学的研究。

2. 生物固体力学发展战略初步设想

我国与国外在生物固体力学方面有一定差距,应该结合我国国情,在一些有特色的方面集中财力和人力联合攻关,以期在总体上接近或赶上世界水平,在某些方面力争处于领先水平。

近期的重点攻关项目是:

(1) 人体对撞击的耐受性;

(2) 高应变率下骨和软组织的响应和损伤机理,以及波动在软组织中传输规律的研究;

(3) 韧带、半月板、椎间盘的材质多效应耦合与本构模型;

(4) 在体测试手段;

(5) 骨、软组织的生长、愈合与应力的关系;

(6) 神经—肌肉控制力学;

(7) 运动生物力学;

(8) 生物材料的生命现象。

(责任编辑 刘先曙)