

骨小梁形态与生物力学研究综述

李丛伊¹ 王绍飞² 谢治炎³ 唐 炜^{4*}

1. 大连医科大学 辽宁 大连 116000

2. 瓦房店市中心医院 辽宁 大连 116300

3. 大连医科大学附属第二医院 辽宁 大连 116000

4. 大连医科大学 辽宁 大连 116000

摘 要: 骨小梁是位于骨皮质内层和两端的不规则骨质结构,在力的支撑和传递方面具有重要意义。本文结合国内外相关文献,从骨小梁形态与生物力学的特征、研究技术进展、治疗策略等方面进行综述。

关键词: 骨小梁;形态学特征;生物力学特征;研究技术进展;治疗方法

骨小梁是位于骨皮质内层和两端的不规则骨质结构,在干骺端丰富,在骨干相对较少。骨小梁顺应最大应力和张应力排列,相互交错构成疏松的海绵状结构,称骨松质。近年来,随着骨质疏松、骨关节应力重建等研究的不断深入,骨小梁的重要性日益凸显。

1 骨小梁形态与生物力学特征

1.1 形态学特征

骨小梁具有复杂的微观结构,通常是具有一定长度、间隔一定距离的板状或杆状小梁集合而成,形成不规则的立体网状结构,称骨松质,呈海绵样,配布于骨内^[1]。骨小梁作为一种骨内结构,与骨的形成相关,基于骨形态的多样性,其解剖学特征在不同部位的骨中也有所不同。

从发育角度来看,骨小梁在骨的形成过程中亦很重要。在膜内成骨的过程中,骨化中心建立时,膜中央区域的细胞会分化为成骨细胞,分泌类骨质并钙化形成原始骨小梁,接下来骨化从中心向四周放射状扩展,形成板层状骨密质和网状骨松质^[5]。而在软骨内成骨的过程中,骨小梁在初级骨化中心形成时开始出现,此时骨干中央软骨钙化,血管穿入,破骨细胞、成骨细胞和间充质细胞也随之而来,破骨细胞吸收退化的软骨组织形成与软骨雏形长轴方向较为一致的隧道,成骨细胞则贴附于软骨基质表面,形成过渡型骨小梁,为以钙化软骨基质为中轴、表面包绕新生骨组织的条索状结构^[5]。

1.2 骨小梁的生物力学特征

骨小梁的生物力学性能与其结构基础密切相关,二者之间存在相互作用,对骨小梁生物力学性能的研究有助于深入理解骨的力学性能和生理病理机制。骨的力学

适应性理论主要包含两大核心学说:一个是Wolff定律,即骨组织通过增加手里区域的骨密度实现形态重塑^[6];另一个是力学稳态系统,由Frost提出,他认为骨组织具有一定的应变阈值范围,局部应变超过阈值上限可激活骨吸收,低于阈值下限则可抑制骨形成^[7]。

在对不同解剖位置骨小梁的研究中,发现其微观结构和组成会随年龄和部位而变化,且与生物力学性能相关。从宏观角度,骨小梁形态影响着骨的整体力学性能。例如在对椎体骨强度的研究中,虽然骨量对骨强度的变异性解释占比最大,但小梁的形态同样重要,通过对12对椎体的研究,在垂直方向加载时,骨体积分数是强度的最强个体决定因素,加入平均杆长度和相对板骨体积分数后,决定系数提高;在前后方向加载时,加入平均杆体积和相对杆骨体积分数后,决定系数亦提高,说明小梁形态对骨强度有重要贡献^[8]。

2 骨小梁形态和生物力学研究方法进展

2.1 形态研究的历史发展

生物塑化技术的出现使对骨小梁的整体观察成为可能,它通过真空过程,使用高分子多聚物作为塑化剂对生物标本进行渗透,取代生物体内的脂质和水分,经过聚合硬化,形成具有一定硬度和弹性的塑化标本^[11]。基于P45生物塑化技术的膝关节临床解剖学研究提出,尽管传统观点认为,腓骨不直接参与膝关节的构成,其承重能力有限,但经P45塑化切片观察发现,胫骨外侧髁后外侧密集分布纵行、粗大骨小梁,可能与费膝腓关节出的拱梁结构有关,腓骨作为该拱梁的力学支点,对胫骨平台外侧部的应力传递起重要作用^[12]。

更精确的骨小梁识别和分析则常用CT进行。不同组织吸收CT的X射线后衰减得到不同的CT值,依据CT值可对诸如骨质疏松或代谢性骨病进行定量评估。在定量CT

通讯作者: 唐炜, 通讯邮箱: tangwei2025062025@163.com

基础上又逐渐衍生出定量CT和高分辨率外周骨定量CT。前者使分别测量皮质骨和松质骨的体积骨密度成为可能,为OP诊断共识指南的建立奠定了基础^[15]。后者精确度可达80 μ m级,对骨体积比、骨小梁厚度、骨小梁间距和骨小梁数量等结构参数有更精确的测定^[16]。随着科学技术的发展与进步,显微CT被应用于骨小梁相关研究。显微CT的X射线照射样品后,通过探测器记录透射的X射线强度分布,利用计算机算法可对样品的三维内部结构进行重构,从而实现对骨小梁非侵入性的、高分辨率的和全方位的三维图像构建,分辨率可达微米级^[17]。

超声波的速度和能量在通过骨组织时会发生改变和衰减,根据速度和能量差异可间接得到骨结构的差异,从而获得对应部位骨小梁的结构信息^[18]。然而骨质疏松等疾病的诊断标准并不适用于QUS的诊断,其技术也存在增加骨折风险的质疑,导致其临床应用受限^[19]。高分辨磁共振成像主要受限于扫描精度相对显微CT低、扫描时间相对其他方法长、活体扫描磁感应强度不宜过高,但是成像技术和重建技术的改进使高分辨磁共振成像仍是一种具有潜力的研究方法^[20]。

2.2 生物力学研究方法的演变

伽利略在1638年即发现了骨形态与所承载荷之间的关系。19世纪时,Wolff定律被提出,其认为活体对机械应力总是以对它最有力的结构反应产生形态改变来适应,骨小梁的机构与功能相适应,小梁的排列方式是所处部位与所承载荷强度共同作用下形成的最优效果^[6]。在微观结构分析方面,高分辨率透射电子显微镜被用于分析骨小梁中磷灰石晶体的形状和取向,发现其与板层骨存在差异,为理解骨小梁的纳米结构与生物力学关系提供了依据。

2.3 骨小梁形态与生物力学的综合研究方法

综合研究方法结合多种技术,以更全面地理解骨小梁形态与生物力学。常将先进的成像技术与力学分析相结合,如通过 μ CT获取骨小梁的微观结构图像,再利用FEA模拟其力学性能。在对近端股骨的研究中,通过CT扫描获取骨小梁结构参数,结合DXA测量的骨量,利用FEA评估其生物力学强度,发现结合后的参数能更准确地预测股骨强度,在多元回归模型中,结构参数与DXA参数结合,调整后的决定系数优于单独使用DXA参数的预测效果。

3 骨小梁形态与生物力学的治疗策略

3.1 骨小梁的流行病学研究

骨小梁形态在不同人群和生理病理状态下存在差异。在年龄相关方面,研究表明随着年龄增长,骨小梁

会发生变化。通过对不同年龄段人群的研究发现,年龄相关的骨小梁变化包括骨体积分数、小梁数量和连接密度的降低,以及小梁间距的增加。

在疾病相关方面,不同疾病对骨小梁形态有不同影响。例如,在对骨质疏松和骨关节炎患者的研究中,骨质疏松患者的骨小梁表现为骨体积分数、小梁数量降低,小梁间距增大,而骨关节炎患者的骨小梁结构相对较好,如在对31例髌部骨折(HF)患者和42例髌骨关节炎(HOA)患者的研究中,HOA组的骨体积分数、小梁数量和骨密度高于HF组,且HOA组的小梁间距低于HF组。

3.2 形态异常的干预措施

针对骨小梁形态异常,有多种干预措施。在药物治疗方面,一些药物可影响骨小梁的形态和结构。在物理治疗和其他方面,低水平辐射在鼠实验中显示出对骨小梁形态的影响。研究发现,4.4 cGy剂量的复杂次级铁离子辐射场照射成年小鼠一年后,与年龄匹配的对照组相比,小鼠股骨远端干骺端的小梁骨增加51%,小梁骨体积分数增加56%,小梁数量增加16%,小梁间距减少17%,且在远端骨骺也有类似但程度稍低的变化,提示低水平辐射可能对骨小梁有长期增强作用,而非最初假设的损害作用。

3.3 生物力学在病理机制研究和治疗中的作用

在结构和力学层面,骨小梁的微观结构变化会影响其生物力学性能。如在骨质疏松等疾病中,骨小梁结构发生改变,表现为小梁变薄、连接性降低等,从而降低骨的强度。在对牛小梁骨样本的研究中,通过诱导损伤并评估其剪切力学性能,发现损伤和结构变化会降低骨的剪切模量、剪切屈服应力、极限剪切应力和破坏能量,且在人类骨的典型骨体积分数范围内,强度和韧性对体积分数降低的敏感性远高于诱导的机械损伤。

3.4 形态与生物力学的综合治疗方案

综合治疗方案结合多种手段,以更有效地治疗骨小梁相关疾病。在对患有多发性骨髓瘤的患者研究中,使用临床CT—基于有限元分析(CT-FEM)评估不同药物对骨小梁微结构和生物力学的影响,发现lenalidomide治疗组与bortezomib治疗组相比,在治疗后lenalidomide组的骨小梁数量、破坏载荷和刚度增加,而bortezomib组这些参数降低,且在lenalidomide组中,对化疗的反应与破坏载荷和刚度的增加呈正相关,表明结合药物治疗与CT-FEM评估可更好地指导治疗决策。

参考文献

[1]祝晓忠,梅炯,倪明,等.股骨近端骨小梁结构的大体解剖和影像重建分析[J].中国修复重建外科杂志,2019,

33(10):1254-1259.

[2]李海艳,黎萌,杜心如.股骨头颈压力骨小梁与股骨颈后内侧骨皮质及股骨距移行处的形态学观察及临床意义[J].中国临床解剖学杂志,2025,43(01):1-8.

[3]胡晓帆,王宏宇,孙凡,等.从骨微结构角度探寻骨质疏松症的病情演变[J].中国骨质疏松杂志,2024,30(12):1838-1841.

[4]曲福楠,孙传锋,段闪闪,等.神经生长因子联合DPSCs对糖尿病牙种植大鼠骨小梁及血管生成的影响[J].中国老年学杂志,2024,44(19):4816-4820.

[5]田佳庆,刘良燕,彭鹏,等.基于“成骨-成血管”理论探讨全身振动疗法治疗激素性股骨头坏死的效果及作用机制[J].中医正骨,2024,36(09):59-68+82.

[6]赵媛媛,雷建锋.MicroCT检测小鼠骨微结构指标受标本通量影响的方案设计[J].实验技术与管理,2024,41(09):35-40.

[7]门玉涛,汤绍灿,陈炜,等.基于三周期极小曲面法骨小梁支架的设计与性能研究[J].生物医学工程学杂志,2024,41(03):584-594.

[8]张凤珍,孙瑞芬,李梓瑜,等.Micro-CT分析跟骨内骨小梁分布及结构特征[J].中国组织工程研究,2024,28(24):3885-3889.

[9]张艺海,商鹏,马奔原,等.径向梯度三周期极小曲面骨小梁支架结构设计与力学性能分析[J].中国组织工程研究,2024,28(05):741-746.

[10]李琨,张少杰,史君,等.下颈椎椎弓根的显微形态学特征[J].中国组织工程研究,2024,28(12):1890-1894.

[11]张甜,李亮,费紫嫣,等.IDEAL-IQ联合Micro-CT定

量评估兔1型糖尿病骨髓脂肪含量和骨小梁微结构相关性的研究[J].磁共振成像,2023,14(05):145-149+160.

[12]李晶,任晓琦,乔玮,等.一种新型可塑形骨填充材料的制备及骨修复能力研究[J].中国修复重建外科杂志,2023,37(03):302-307.

[13]杜娟,黄蒙恩,李思敏,等.基于HR-pQCT的绝经女性在体骨小梁局部特异性研究[J].应用力学学报,2024,41(06):1411-1417.

[14]徐光华,刘鸿宇,张立夫,等.跆拳道运动对跟骨骨皮质厚度与骨小梁应力分布的影响[J].中国组织工程研究,2021,25(35):5582-5587.

[15]曹熠炜,何思渊,周平,等.基于SE-DenseVoxNet的骨小梁模量预测方法[J].中国医疗器械杂志,2021,45(01):6-10.

[16]李晨杰,吕林蔚,宋阳,等.预紧力作用下钛合金人工假体界面骨小梁形态参数测量与统计分析[J].中国组织工程研究,2021,25(04):516-520.

[17]李静静,陆育章,吴春征,等.人和猪肋骨组织形态学结构特征及其鉴别[J].中国刑警学院学报,2020,(04):110-114.

[18]陈伟,严亮.骨小梁假体与S-ROM假体在初次全髋关节置换术中的应用比较[J].中国现代手术学杂志,2020,24(03):199-203.

[19]雷青,陈松,陈立,等.3D打印导板结合3D打印个体化金属骨小梁假体治疗肱骨干骨肿瘤二例[J].临床外科杂志,2020,28(04):393-395.

[20]段玮轩,程亮亮,赵德伟.激素性股骨头坏死与股骨颈骨折患者股骨头内骨小梁形态学对比研究[J].中华损伤与修复杂志(电子版),2020,15(02):84-89.