

胫骨远端骨折的治疗策略及研究进展

贾 博^{1,2}

¹延安大学延安医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院创伤骨科一病区, 陕西 延安

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

摘 要

随着创伤骨科诊疗理念的不断发展, 胫骨远端骨折的治疗策略及相关研究取得了较大进展。由于胫骨远端解剖结构复杂、邻近踝关节且软组织条件较差, 其治疗需在恢复骨折稳定性的同时兼顾软组织保护及踝关节功能重建。本文系统综述了胫骨远端骨折的诊疗策略及研究进展。影像学与生物力学研究为骨折分型、术前评估和治疗决策提供了依据。不同手术策略的固定方式各有特点, 其中微创技术在保护软组织和减少并发症方面具有一定优势。规范化围手术期管理、并发症早期监测以及新型植入材料、个体化器械和数字化辅助技术的发展, 也为精准治疗提供了新的思路。总体而言, 个体化、微创化和精准化已成为胫骨远端骨折治疗的重要发展方向, 但仍需更多高质量研究为临床决策提供依据。

关键词

胫骨远端骨折, Pilon骨折, 内固定, 微创技术, 影像学, 生物力学

Treatment Strategies and Research Progress of Distal Tibial Fractures

Bo Jia^{1,2}

¹Yan'an Medical College, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Ward I, Department of Orthopedic Trauma, The Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: April 13, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

With the continuous advancement of trauma orthopedic concepts, considerable progress has been achieved in the treatment strategies and related research of distal tibial fractures. Because of the complex anatomy of the distal tibia, its proximity to the ankle joint, and the poor surrounding soft-tissue conditions, treatment should restore fracture stability while preserving soft tissue and reconstructing ankle function. This review systematically summarizes the treatment strategies and

research progress of distal tibial fractures. Imaging and biomechanical studies provide important support for fracture classification, preoperative assessment, and therapeutic decision-making. Different fixation methods have distinct characteristics, and minimally invasive techniques show certain advantages in soft-tissue protection and complication reduction. Meanwhile, standardized perioperative management, early monitoring of complications, and the development of novel implant materials, individualized instruments, and digital-assisted technologies have also provided new insights for precision treatment. In general, individualized, minimally invasive, and precise treatment has become an important trend in the management of distal tibial fractures, although more high-quality studies are still required to support clinical decision-making.

Keywords

Distal Tibial Fractures, Pilon Fractures, Internal Fixation, Minimally Invasive Techniques, Imaging, Biomechanics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 研究背景

胫骨远端骨折位于下肢承重轴线远端，局部软组织覆盖薄弱、血供相对较差，治疗过程中常面临复位困难、并发症较多及功能恢复受限等问题[1]。部分累及踝关节面的骨折，如 Pilon 骨折，常由高能量损伤所致，治疗难度更大[2]。目前常用治疗策略包括分期损伤控制与外固定、锁定钢板内固定、髓内钉固定及个体化重建等[1][3]。然而，最佳手术时机及术式选择仍存在一定争议，感染、畸形愈合及创伤后关节炎等并发症仍是临床关注的重点[2][4]。因此，系统梳理胫骨远端骨折的治疗策略及研究进展，对于优化临床决策和指导后续研究具有重要意义。

1.2. 研究意义

理论意义：本综述通过整合 CT/MRI 多模态影像对骨折形态及软骨/软组织损伤的识别，联合有限元与双轴加载等生物力学方法，系统阐明胫骨远端骨折的致伤机制、受力环境与塌陷演变规律，丰富了围踝/胫骨远端骨折的病理生物力学理论；同时引入患者特异化数字建模、3D 打印验证与材料学的评价框架，完善了从微观材料到宏观关节稳定性的多尺度研究方法，并为不同内固定与重建策略的疗效比较建立更规范的循证体系。

实际意义：在临床实践中，基于影像 - 力学 - 材料的综合证据，可优化手术时机与路径，指导在外固定、MIPO 与锁定板等术式间的个体化选择，并借助患者特异化器械提升复位与对线精度；新型多孔植入与表面改性有助于缺损重建与骨整合，配合规范的围手术期护理与康复，降低感染、延迟愈合、畸形愈合及创伤后关节炎、前踝撞击等并发症；同时推动影像 - 力学 - 材料 - 临床的标准化流程与数据平台建设，促进个性化诊疗与国产创新器械的转化应用，整体提升治疗质量与成本效益。

2. 胫骨远端骨折的诊疗与手术策略研究

2.1. 术前影像评估与分型

胫骨远端骨折的术前评估对骨折分型、手术入路选择及内固定方案制定具有重要意义。常规 X 线检

查可初步判断骨折部位、移位情况及踝关节受累程度，但对于关节面塌陷、骨块分离及干骺端粉碎程度的显示仍存在一定局限。相比之下，CT及三维重建能够更清晰地显示骨折线走行、关节面受累范围及骨缺损情况，因此在胫骨远端骨折尤其是 Pilon 骨折的术前评估中具有更高价值[2]。对于累及踝关节面的复杂骨折，CT 不仅有助于 AO 分型及损伤程度判断，也可为手术入路设计和内固定方式选择提供依据。相较而言，MRI 在胫骨远端骨折中的常规应用相对有限，其主要价值在于对韧带、软骨及周围软组织损伤的补充评估，但在多数病例中并非术前常规检查[2]。因此，现阶段胫骨远端骨折的术前影像学评估仍以 X 线联合 CT 检查为主，其中 CT 对复杂关节内骨折的诊断和手术规划意义更为突出[5]。

2.2. 手术时机与治疗策略选择

胫骨远端骨折的治疗目标在于恢复下肢力线、重建关节面平整性、获得稳定固定并尽可能减少软组织并发症。由于该部位软组织覆盖薄弱、血供条件相对较差，手术时机和固定方式的选择一直是临床关注的重点[2][5]。

对于软组织损伤较轻、骨折相对稳定的病例，可根据骨折类型选择切开复位内固定、微创经皮钢板内固定(MIPO)或髓内钉固定等方式。其中，钢板内固定有利于直视下复位及维持关节面稳定，适用于累及关节面或骨折粉碎较明显的病例；而髓内钉固定创伤相对较小，在部分关节外或远端骨干-干骺端骨折中具有一定优势，但其在远端骨块控制和力线维持方面仍存在一定局限[6]。

对于高能量损伤、软组织肿胀明显或伴有水疱的复杂胫骨远端骨折，尤其是 Pilon 骨折，临床上多主张采取分期治疗策略，即一期通过外固定架暂时维持长度、力线及软组织张力，待局部软组织条件改善后再行二期 definitive fixation，以降低感染及切口并发症风险[2][5]。

此外，是否同时固定腓骨骨折仍是胫骨远端骨折治疗中的一个重要争议点。支持腓骨固定的观点认为，固定腓骨有助于恢复下肢长度、纠正旋转及冠状位对线，并可为胫骨远端复位提供参考，尤其在伴明显腓骨移位或胫腓长度关系破坏的病例中具有一定价值[7]。相反，反对常规固定腓骨的观点则认为，部分病例中胫骨复位和稳定性恢复主要依赖胫骨本身的重建，额外固定腓骨可能增加手术切口、加重软组织干扰，甚至出现骨折不愈合、感染、畸形愈合及创伤后关节炎等并发症[8]。因此，腓骨固定不宜作为常规处理原则，而应结合骨折类型、腓骨骨折部位及移位程度、胫骨远端稳定性以及局部软组织条件进行选择应用。对于需要借助腓骨长度恢复来辅助胫骨对线重建的病例，可考虑固定腓骨；而对于软组织损伤明显、胫骨复位后整体稳定性已较满意的病例，则可谨慎评估其必要性。

2.3. Pilon 骨折微创与开放对比

Pilon 骨折多为累及胫骨远端关节面的复杂损伤，常伴有关节面粉碎及严重软组织损伤，因此治疗的重点在于在恢复关节面平整性和下肢力线的同时，尽可能降低软组织并发症风险[9][10]。现有研究认为，Pilon 骨折的治疗方式应结合骨折类型、粉碎程度及局部软组织条件进行个体化选择，其中微创治疗和开放复位内固定是临床常用的两类策略[9][11]。

对于软组织条件较差、高能量损伤或局部肿胀明显的患者，分期治疗联合微创固定具有较高应用价值。通常一期采用外固定架暂时维持长度和力线，待软组织肿胀消退后，再行有限切开复位结合经皮钢板或螺钉固定。相关研究表明，微创经皮钢板技术在减少软组织剥离、降低感染及切口并发症方面具有一定优势，同时能够获得较好的骨折愈合和功能恢复[12][13]。开放复位内固定能够在直视下更充分地处理关节面塌陷、骨块移位及干骺端缺损，对于关节面粉碎明显、需要精确重建的病例仍具有重要价值[10][11]。但开放手术往往需要较大范围的软组织显露，若手术时机选择不当，则可能增加切口坏死、感染及延迟愈合等并发症风险，因此其应用更依赖于术前评估、入路设计及软组织条件的综合判断[10][14]。总

体来看，微创与开放并非绝对对立，而是应根据具体病情合理取舍。

对于软组织损伤较重或高能量复杂损伤者，分期治疗及有限切开固定更符合“软组织优先”的原则；而对于软组织条件允许且关节面解剖重建要求较高的病例，开放复位内固定仍具有不可替代的作用[11]。因此，Pilon 骨折治疗应强调个体化决策，在保证复位质量和固定稳定性的同时，最大限度保护局部软组织和血供环境。

3. 围手术期管理与并发症的影像/生物力学评估

胫骨远端骨折围手术期管理的重点在于软组织保护、感染与血栓预防以及术后功能恢复。由于胫骨远端局部软组织覆盖薄弱、血供条件较差，围手术期处理是否规范将直接影响切口愈合、骨折愈合及术后功能恢复。临床上应重视术前软组织状态评估、疼痛控制、肿胀管理及术后早期康复训练，并根据患者具体情况制定个体化负重和功能锻炼方案，以降低感染、深静脉血栓及延迟愈合等并发症风险[8][10]。

胫骨远端骨折尤其是 Pilon 骨折术后并发症仍较常见，主要包括切口并发症、感染、骨折延迟愈合或不愈合、畸形愈合以及创伤后关节炎等[8][14]。相关研究表明，骨折类型复杂、软组织损伤严重、术式选择不当及围手术期处理不足，均可能增加术后并发症发生风险[8][14]。因此，在治疗过程中不仅要关注骨折复位与固定本身，还应重视软组织条件、手术时机及术后随访管理，从而尽可能减少不良结局的发生[10][14]。

影像学评估贯穿胫骨远端骨折的治疗全过程。术前 X 线及 CT 检查有助于明确骨折类型、关节面受累范围及移位情况；术后随访影像学检查则可用于评估骨折对位对线、内固定稳定性及关节面恢复情况，并为延迟愈合、畸形愈合及创伤后关节炎等并发症的早期识别提供依据[10]。对于部分术后持续疼痛或活动受限患者，影像学检查还有助于发现前踝撞击、关节退变等远期并发症。

生物力学研究为理解胫骨远端骨折术后并发症提供了补充依据。有限元分析显示，踝关节在背屈活动时前方局部接触应力的异常集中可能与前踝撞击及术后疼痛有关，提示临床在复位过程中应尽量恢复关节面平整性，减少局部台阶、骨赘或内固定物异常占位，以降低后期撞击征发生风险[15]。因此，围手术期管理应与影像学评估及生物力学认识相结合，在保证骨折稳定固定的同时，尽可能改善软组织环境和关节功能恢复。

4. 植入物材料与表面工程、增材制造及手术辅助技术

4.1. 钽基涂层与 TiO₂ 表面调控

胫骨远端骨折内固定的长期稳定性在很大程度上取决于植入物表面的骨整合与软组织相容性。针对这一点，钽基纳米晶涂层因优异的耐腐蚀性与生物惰性，在模拟生物环境中表现出稳定的钝化行为与良好生物相容性，有望在钛基内植物上作为促进骨结合的功能层[16]。与此同时，TiO₂ 氧化膜的厚度、晶相与微观粗糙度直接影响细胞黏附与软组织封闭，取自体内修复基台的回收研究显示，受控的 TiO₂ 特征可提升软组织相容性[17]，为胫骨远端周围软组织环境的炎症控制与界面稳定提供启示。多孔钛通过 3D 打印构建的孔径与连通性在宏-微结构层面提高骨长入与界面接触面积，也为涂层的机械嵌合作用提供基底[18]。在工艺层面，压电陶瓷驱动的纳米定位平台支持对涂层厚度与表面图案进行纳米尺度可控沉积与表征，有利于实现均匀、可重复的表面调控策略[19]。综合来看，将 3D 打印多孔钛的结构优势与钽基涂层的化学稳定性、以及 TiO₂ 表面特性优化相结合，有望加速骨-植入物界面成熟、降低感染与松动风险，从而改善胫骨远端骨折内固定的临床结局。

4.2. 多孔钛支架与增材制造

针对胫骨远端骨折需要同时满足关节下骨小梁支撑与快速骨结合的特点，增材制造的多孔钛支架被

用于在个性化几何约束下实现力学 - 生物学双重匹配。冯辰栋(2017) [18]系统提出以孔径、孔隙率与连通性为核心的设计 - 制造一体化流程, 指出梯度孔隙与类小梁拓扑可在不显著提高弹性模量的前提下提升疲劳强度, 并通过选区熔化工艺窗口控制成形缺陷, 从而适配胫骨远端复杂载荷环境。为进一步优化界面反应, Wheelis 等(2017) [17]对钛氧化膜在愈合基台上的特性与软组织相容性进行表征, 提示受控 TiO_2 膜厚与化学态有助于形成稳定软组织封闭, 类比于胫骨远端植入环境, 表面氧化调控可提升支架早期固定与抗感染屏障。在耐腐蚀与生物活性层面, 刘林林(2017) [16]证实钽基纳米晶涂层在模拟生物环境中具有更优的电化学稳定性与生物相容性, 提示在多孔钛支架表面沉积钽基涂层可在不破坏孔隙连通的前提下增强成骨诱导与耐蚀性。此外, 为保证细长支柱与微米尺度孔道在打印与后处理中的几何保真度, 温志杰(2017) [19]提出的压电陶瓷驱动纳米定位平台提供亚微米级定位与闭环控制思路, 可用于粉床扫描校准与均匀涂覆工艺, 从而降低尺寸偏差并提升表面改性一致性。综合上述, 基于结构 - 表面协同的多孔钛支架与增材制造策略, 为胫骨远端骨折的个体化内固定与骨缺损重建提供了具有工程可实现性的路径。

4.3. 纳米定位与力觉手术辅助

在胫骨远端骨折的复位与内固定中, 狭小骨道与邻近关节面使导针入路与螺钉走行对微米级精度尤为敏感。基于压电陶瓷的纳米定位平台具备高分辨率与快速响应, 可在导向套、复位钳及机械臂末端实现亚微米级微调, 并通过迟滞补偿提升重复定位精度, 从而显著降低导针偏差与关节软骨穿透风险[19]。不同于仅依赖影像导航的几何对准, 纳米定位结合力觉阈值设定可在骨皮质穿破前识别特征力信号, 实现“可感知”的精准入路。

力觉辅助手术不仅依赖控制算法, 还取决于植入物与组织界面的力学 - 表面特性。多孔钛经设计并 3D 打印的孔隙与粗糙度可调, 既匹配胫骨远端相对低模量皮质骨, 又在螺钉/板植入时提供稳定的摩擦 - 扭矩反馈, 有助于设定最佳压缩并避免皮质穿破, 同时为患者定制导向器提供可靠触觉基准[18]。钽基纳米晶涂层在模拟体液中的耐蚀性与生物活性提升早期界面稳定性与抗微动能力, 使力反馈信号更清晰、阈值更可预测[16]。此外, 稳定的氧化钛层与软组织相容性的关联提示表面化学与能量可影响器械 - 软组织接触的剪切阈值, 为力觉阈值设定与并发症预防提供依据[17]。

5. 生物力学与方法学在骨科构型优化和精准化手术中的应用

5.1. 个体化对线与导航/PSI

个体化对线与导航/PSI 旨在将患者解剖与力学特征融入术前 - 术中决策, 以提升胫骨远端对线与内固定构型的精准性。Stegman (2017) [20]在全髌领域证实, 基于患者影像定制导板的 PSI 可显著提高构件放置的一致性并减少位置离群, 为胫骨远端骨折提供了可借鉴路径: 通过 CT 重建设计导向孔与板位, 术中快速实现远端段的个体化复位与螺钉角度控制。Seyed Vosoughi (2017) [21]的有限元研究表明, 截骨参数与构型细节直接影响节段应力分布与并发症风险, 提示在胫骨远端对线矫正中应将应力约束纳入导航与 PSI 的目标函数, 以避免内植物应力集中与邻近关节负荷异常。Meek (2017) [22]强调双轴加载会改变对缺损结构的评估结论, 提示踝 - 胫复合体需在多轴负荷下进行功能化评估, 导航系统应结合多轴力学模拟校核对线与固定稳定性。Pechanec (2018) [23]通过三维构型模型的评估与优化, 验证了在真实边界条件下迭代优化参数的价值, 提示胫骨远端术前三维规划可同步优化螺钉走行、植入物尺寸与软组织路径, 降低肌腱冲突与皮肤刺激风险。

5.2. 有限元与构型应力优化

有限元(FE)结合构型应力优化为骨科内植物与术式的个体化设计提供了定量依据。Stegman 等(2017)

[20]基于全髌置换的患者特异性导板(PSI)证明,利用个体形态建立术前虚拟力学目标,并以器械几何反向约束植入体位,可降低位置离散、改善应力分布,这一思路同样适用于围骨折内固定的构型约束。Seyed Vosoughi 等(2017) [21]通过脊柱截骨的 FE 分析揭示构型中的高应力集中区,并以杆径、材料、螺钉密度与辅棒等参数化迭代实现峰值应力缓解,提示多参数耦合优化是降低失效风险的关键。Meek 等(2017) [22]指出单轴载荷低估了缺陷结构的失效风险,双轴(弯-扭)加载更能暴露临界区域,强调 FE 边界条件与载荷路径的生理真实性对评估构型安全裕度至关重要。Pechanec 等(2018) [23]在肌腱三维构件的评估与优化中表明,非线性材料本构、纤维取向与网格尺度的协同校准可提升模型预测性,为骨-软组织-内植物复合体的应力传递模拟提供方法学范式。综合来看,上述证据支持以患者特异建模、真实多轴加载与参数化设计为核心的构型应力优化流程,用于指导长骨远端复杂构型的精准化手术决策。

5.3. 多轴载荷与骨-软组织评估

针对胫骨远端骨折的构型优化与精准化手术,核心在于将多轴载荷条件纳入骨-软组织一体化评估框架。单轴测试往往低估结构在交变剪-压-扭联合作用下的失效风险,而双轴/多轴加载更能揭示缺损背景下的真实力学弱点与稳定性边界。Meek (2017) [22]通过双轴加载研究指出,缺损结构在复合载荷下表现出与单轴情境不同的损伤演化与评估偏差,提示在胫骨远端钢板-螺钉构型验证中应采用多轴加载以避免安全裕度被高估。

在方法学上,有限元可作为多轴载荷耦合与软组织边界条件量化的纽带。Vosoughi (2017) [21]基于脊柱截骨的有限元分析显示,通过参数化构型与应力再分配评估,可前瞻性识别高风险区域并优化方案以缓解术后力学并发症。迁移至胫骨远端,可利用多轴载荷驱动的有限元模型对不同螺钉角度、密度与钢板位置进行灵敏度分析,平衡骨折端刚度与应力遮挡,减轻皮质骨与韧带附着部的二次过载。

精准化执行层面,患者特异性导板可将规划的多轴受力线与软组织通道约束转化为术中可复现的导向信息。Stegman (2017) [20]在全髌置换中验证了患者特异性器械对对线与位置精度的提升,这一理念可用于胫骨远端的螺钉走廊与钢板就位导航,在保护肌腱血管束的同时,使固定顺应多轴受力路径。此外,软组织建模是实现骨-软组织协同评估的关键。Pechanec (2018) [23]通过优化肌腱三维构建模型,强调了材料各向异性与几何构型对整体力学响应的决定作用,提示在胫骨远端评估中应将踝侧副韧带与胫腓联合等软组织的力学约束纳入边界条件,以更贴合功能负荷的真实分配。

综合来看,基于多轴加载的实验范式、参数化有限元评估、患者特异性导板引导与软组织三维建模的整合流程,可为胫骨远端骨折提供从规划到实施的一体化力学证据链,提升构型稳健性与功能重建的可靠性。

6. 结论

6.1. 研究现状的总结

当前关于胫骨远端骨折的研究已经从单纯追求骨折愈合逐步转向兼顾力线恢复、关节面重建、软组织保护及功能恢复的综合治疗模式。现有研究表明,术前影像学评估,尤其是 X 线联合 CT 及三维重建,对于明确骨折类型、判断关节面受累范围及制定手术方案具有重要意义;在此基础上,切开复位内固定、微创经皮钢板内固定、髓内钉固定及分期治疗等策略各有适应证,临床需根据骨折类型、软组织条件及患者整体情况进行个体化选择。

对于累及关节面的复杂胫骨远端骨折,尤其是 Pilon 骨折,治疗难点主要在于如何在恢复关节面平整性和下肢力线的同时,尽可能减少软组织并发症。近年来,分期治疗、微创固定及软组织优先的理念逐渐得到重视,在高能量损伤及软组织条件较差的病例中显示出较好的应用价值。与此同时,开放复位内

固定在关节面精确重建方面仍具有重要作用。当前胫骨远端骨折的治疗已形成以术前精准评估、个体化术式选择和围手术期综合管理为核心的基本共识。

围手术期管理、术后随访及并发症防控在整体治疗中同样重要。感染、延迟愈合、不愈合、畸形愈合及创伤后关节炎等仍是影响预后的主要因素。影像学评估可贯穿治疗全过程，而生物力学研究则为理解复位质量、内固定稳定性及前踝撞击等远期并发症提供了补充依据。与此同时，新型植入材料、3D 打印、多孔结构设计及个体化辅助技术的发展，也为胫骨远端骨折的精准治疗提供了新的思路。

6.2. 研究趋势与前景

胫骨远端骨折的研究虽然仍将朝着精准化、微创化和个体化方向发展，但从当前临床应用基础和可推广性来看，基于 CT 及三维重建的术前精准评估、结合软组织条件的分期治疗策略，以及有限切开/微创固定技术的优化应用，仍是最接近临床转化、也最具现实意义的方向。尤其对于高能量损伤及软组织条件较差的复杂胫骨远端骨折，上述策略能够更直接地服务于手术时机判断、入路设计、复位方式选择及并发症风险控制，因此比单纯依赖新材料或高端工程技术更具近期临床价值。

从当前研究和临床实践来看，最需要突破的关键问题，仍是如何在复杂关节内骨折尤其是 Pilon 骨折中，兼顾关节面解剖重建、下肢力线恢复、固定稳定性以及软组织保护。开放复位内固定在关节面精确重建方面仍具有重要作用，而分期治疗和微创固定在降低感染、切口并发症和软组织损伤方面具有明显优势。如何根据骨折类型、粉碎程度和软组织条件，在“复位质量”与“软组织安全”之间实现更合理的平衡，仍是当前治疗决策中最核心、也最现实的临床难题。

个体化导板、3D 打印辅助、有限元分析、新型多孔植入物及表面工程等技术，虽然为复杂骨折治疗提供了新的工程学和方法学支持，但目前更多仍处于辅助优化和转化探索阶段。其未来价值不在于替代现有基本治疗原则，而在于提升复杂病例中的术前规划精度、复位执行一致性、植入物界面稳定性及并发症风险预测能力。未来研究更应关注这些技术能否在真实临床场景中转化为可重复、可验证的结局改善，而不仅仅停留在理论可行性或实验室性能层面。

6.3. 对今后研究的建议

为推动胫骨远端骨折诊治的循证化与精准化，未来应进一步加强高质量临床证据的积累，尽可能开展多中心、前瞻性研究，并统一骨折愈合、关节面恢复、对线情况、并发症发生率及功能评分等主要结局指标，以提高不同研究之间的可比性。与此同时，应更加重视分层研究思路，结合骨折类型、能量损伤水平及软组织条件，进一步明确不同治疗策略的适用范围，尤其应聚焦复杂胫骨远端骨折中复位质量与软组织保护之间平衡这一关键问题。影像学、数字化技术及生物力学方法可作为临床研究的重要补充。未来可重点评估术前精准影像分析、个体化辅助技术及固定构型优化在改善复位质量、降低并发症和促进功能恢复中的实际价值，从而推动相关技术由理论探索逐步走向临床应用。

总体而言，未来研究仍需围绕高质量证据积累、规范化评价体系建立及新技术临床转化持续推进，以进一步提高胫骨远端骨折的治疗效果和预后水平。

参考文献

- [1] 李欢, 沈忆新. 胫骨远端骨折的治疗进展[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2007, 4(4): 30-32, 36.
- [2] 张宪高, 张一, 王志强. 胫骨远端 Pilon 骨折手术入路研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2021, 14(4): 303-309.
- [3] 国家卫生健康委办公厅. Pilon 骨折切开复位内固定术加速康复临床路径 (2023 年版) [EB/OL]. https://www.nhc.gov.cn/yzygj/c100068/202310/ff33d2cc3ac6488ab8083fbd6f9c59c1/files/1732871293454_55181.pdf, 2026-03-18.

- [4] 薛晓乐, 张学斌. Pilon 骨折多元化分析与诊疗进展[J]. 临床医学进展, 2023, 13(8): 12522-12526.
- [5] 李超, 康锦, 李永乐, 等. 胫骨 Pilon 骨折患者不同手术疗法的效果对比[J]. 世界临床医学, 2017, 11(10): 20.
- [6] 王春江, 李丽萍. 胫骨远端髓内钉联合 LCP 内固定治疗胫骨远端骨折的疗效及安全性分析[J]. 黑龙江医药, 2021, 34(1): 196-198.
- [7] 刘百奇, 丁秀娟, 车德鑫, 韩健, 徐东辉. 腓骨骨折固定对胫骨远端骨折手术疗效的影响[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2018, 33(12): 1315-1317.
- [8] 于小奎, 赵勇, 申才佳. 胫骨远端骨折内固定术后骨折不愈合的影响因素分析[J]. 创伤外科杂志, 2022, 24(5): 366-368.
- [9] 刘莅彤, 郝健华. 经皮微创锁定钢板内固定治疗 35 例 Pilon 骨折疗效分析[J]. 解放军医学院学报, 2013, 34(10): 1041-1042, 1091.
- [10] 蔡平原, 陈升浩, 李克乾, 等. 高能量 Pilon 骨折的分期治疗策略[J]. 临床急诊杂志, 2013, 14(12): 588-591.
- [11] 汪子嘉, 高仕长. Pilon 骨折的治疗进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 1249-1257.
- [12] 赵银必, 何劲, 周忠华. III型 Pilon 骨折 2 种治疗方式的比较[J]. 实用临床医药杂志, 2010, 14(21): 40-42.
- [13] 曾石远. 前外侧有限切开结合内侧微创锁定板接骨术治疗 Pilon 骨折 18 例分析[J]. 外科研究与新技术(中英文), 2016, 5(1): 38-40.
- [14] 钱锦锋, 黄伟, 曾忠友. Pilon 骨折术后并发症的发生率与相关因素分析[J]. 中华全科医学, 2023, 21(3): 417-419, 508.
- [15] 徐志庆. 前踝撞击征发生机制的生物力学有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽医科大学, 2017.
- [16] 刘林林. 钽基纳米晶涂层在模拟生物环境下的性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [17] Wheelis, S.E. (2017) Investigation of Titanium Oxide Characteristics on Healing Abutments: Retrieval Characterization and Soft-Tissue Compatibility. Master's Thesis, The University of Texas.
- [18] 冯辰栋. 多孔钛骨科植入物设计及 3D 打印制作技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [19] 温志杰. 压电陶瓷驱动纳米定位平台的设计、分析与应用[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [20] Stegman, J. (2017) Patient-Specific Instruments for Total Hip Arthroplasty. Ph.D. Thesis, University of Cincinnati.
- [21] Seyed Vosoughi, A. (2017) Mitigating the Biomechanical Complications Following Pedicle Subtraction Osteotomy: A Finite Element Analysis. Master's Thesis, The University of Toledo.
- [22] Meek, C. (2017) The Influence of Biaxial Loading on the Assessment of Structures with Defects. Ph.D. Thesis, The University of Manchester.
- [23] Pechanec, M.Y., Lee-Barthel, A., Baar, K. and Mienaltowski, M.J. (2018) Evaluation and Optimization of a Three-Dimensional Construct Model for Equine Superficial Digital Flexor Tendon. *Journal of Equine Veterinary Science*, **71**, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2018.10.011>