

青壮年Pauwels III型股骨颈骨折内固定治疗的选择策略

成小松^{1,2}, 赵程锦^{2*}

¹延安大学医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院骨科, 陕西 延安

收稿日期: 2023年3月5日; 录用日期: 2023年3月29日; 发布日期: 2023年4月10日

摘要

青壮年Pauwels III型股骨颈骨折的治疗在骨科仍具有一定挑战, 骨折多由高能量损伤引起, 移位明显、创伤大, 术后股骨头坏死的发生率仍很高。内固定植入物在不断地创新与改进, 然而世界范围内仍无公认的“金标准”, 选择何种内固定植入物对减轻患者经济和疼痛是临床亟需解决的问题。本文对青壮年股骨颈骨折的分型、手术入路和内固定方法的选择等做一综述, 旨在为临床治疗此类骨折提供一些建议。

关键词

股骨颈骨折, 骨折固定术, 内, 青壮年

Selection Strategies for Internal Fixation of Pauwels Type III Femoral Neck Fractures in Young Adults

Xiaosong Cheng^{1,2}, Chengjin Zhao^{2*}

¹Medical School of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Department of Orthopaedic, Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: Mar. 5th, 2023; accepted: Mar. 29th, 2023; published: Apr. 10th, 2023

Abstract

The treatment of Pauwels type III femoral neck fractures in young adults is still a challenge in orthopedics. The fractures are mostly caused by high-energy injuries, with obvious displacement

*通讯作者。

and large trauma. The incidence of postoperative femoral head necrosis is still high. Internal fixation implants are constantly innovating and improving, but there is still no recognized “gold standard” worldwide. It is an urgent clinical problem to choose which internal fixation implant can relieve the patient’s economy and pain. This article reviews the classification of femoral neck fractures in young and middle-aged adults, the selection of surgical approaches and internal fixation methods, and aims to provide some suggestions for the clinical treatment of such fractures.

Keywords

Femoral Neck Fracture, Fracture Fixation, Internal, Young Adults

Copyright © 2023 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. 引言

股骨颈骨折在临床中常见, 占全身骨折的 3.6%, 占髋部骨折的 48%~54%, 大多发生于老年人, 多为骨质疏松性骨折, 以低能量损伤为主, 此类型首选关节置换术[1] [2]。近年来, 由于交通事故、坠落伤等高能量创伤频发, 青壮年发生股骨颈骨折的机会越来越多, 其骨折多为移位明显、成角较大、易损伤周围血供的不稳定型骨折, 多为 Pauwels III 型骨折, 首选骨折复位内固定治疗。由于股骨头的血供和特殊的形态解剖学, 股骨颈骨折后股骨头坏死的总体发病率仍然很高。有文献报道, 青壮年股骨颈骨折患者骨折不愈合率可达 9.3%, 股骨头缺血坏死达 14.3% [3]。还有其他并发症如骨不连、股骨颈短缩等。目前, 青壮年股骨颈骨折的治疗仍然是一项挑战, 本文就青壮年股骨颈骨折的分型、手术入路和内固定方法的选择等进行综述, 为临床医生选择合适内固定植入物治疗青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折提供参考。

2. 股骨颈骨折的分型

临床较常用的有股骨颈 Garden 分型、Pauwels 分型两种, 其他还有按解剖部位分型、AO/OTA 分型等。Garden 分型是按移位程度分为: I 型为不完全型或嵌插型骨折; II 型为完全型无移位型骨折; III 型为完全型骨折伴有部分移位; IV 型为完全型骨折并完全移位型骨折[4] [5]。Pauwels 分型更多的是从生物力学角度出发的一种分型方法, 根据 Pauwels 角(股骨颈远端骨折线与水平线之间的夹角)分为 Pauwels I 型($\leq 30^\circ$)外展型、Pauwels II 型($30^\circ \sim 50^\circ$)中间型、Pauwels III 型($\geq 50^\circ$)内收型骨折, Pauwels 角越大, 骨折越不稳定, 且术后更易出现各种并发症, 故可用于预测患者术后并发症发生率。根据骨折线的部位可分为 3 种类型: 头下型、经颈型、基底型股骨颈骨折。在 AO 分型中, 股骨颈骨折为 31-B, 细分为 31-B1、31-B2、31-B3, 分别是头下骨折无移位型、经颈型骨折、头下骨折伴移位型, 虽然全面详细, 由于非常复杂, 故在临床中应用较少, 多在学术交流、科学研究中应用[6]。Garden 分型在临床中应用广泛, 在临床中多用于老年股骨颈骨折患者, 但其概念提出较早, 且容易受到 X 线片拍摄角度和读片者的影响, 导致分型不准确。然而在临床中, 很难区分这 4 种类型的骨折, 因此, 有学者认为将股骨颈骨折分为非移位型(Garden I 型和 II 型)或移位型(Garden III 型和 IV 型)可能更加准确[7]。Pauwels 分型在临床工作中多应用于青壮年股骨颈骨折, 然而此种分型的准确性有待提高, 不同医师的评估结果可能出现不同的分型。这两种分型方法简单、易于接受, 目前临床中应用较广。

3. 手术入路的选择

目前常用的切开复位手术入路有: 一种是 Watson-Jones 入路, 暴露阔筋膜张肌和臀中肌间隙, “T”形切开头关节囊, 在直视下复位固定骨折断端; 一种是直接前侧入路, 即改良 Smith-Peterson 入路, 从缝匠肌和阔筋膜张肌的肌间隙进行暴露骨折断端, 此方法创伤小, 能更好的显露股骨颈, 还可保护旋股内动脉不被破坏[8]。虽然改良 Smith-Peterson 入路更具有优势, 但在具体手术操作中, 应该综合考虑选择手术入路方式。

4. 内固定方法的选择

股骨颈骨折的内固定选择应根据骨折的类型、患者的年龄和术后功能需求等方面综合决定。对于这类患者, 绝大多数更倾向于采用内固定手术治疗。目前治疗青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折最常用的内固定方式主要有: 多枚空心螺钉(cannulated screws, CS)固定、动力髋螺钉(dynamic hip screw, DHS)固定、内侧支撑钢板联合空心螺钉固定以及新近出现的股骨颈动力交叉钉系统(femoral neck system, FNS)等。虽然近年来内固定的类型在不断创新, 但采用哪种内固定效果最好、患者预后最佳, 目前尚未达成共识。

4.1. 空心加压螺钉固定

空心加压螺钉(cannulated compression screws, CCS)在青壮年股骨颈骨折中应用较多, 最常用的方式为倒“品”字形植入 3 枚空心螺钉固定股骨颈骨折, 其优势有动态滑动机制, 在术中切口小、创伤小, 操作简单, 不易损伤股骨头血供, 能促进愈合。位于远端的螺钉应在转子水平之上, 不然会导致外侧股骨干张力过大而引起医源性转子下骨折[9]。然而, 对于 Pauwels III 型股骨颈骨折, 其骨折线多近似 90 度, 骨折不稳定, 故倒“品”字形植入 3 枚空心螺钉固定的抗剪切力不足, 固定失败率仍可达 20%~48%, 且还可导致股骨颈短缩、骨不连及股骨头缺血坏死等并发症[3] [10]。然而也有研究表明, 正三角形结构植入 3 枚空心螺钉的固定效果更好, 在 Li [11]等的有限元分析则认为, 对于不稳定的股骨颈骨折, 由上方的一个半螺纹螺钉加下方的两个全螺纹螺钉组成的正三角形结构固定 Pauwels III 型股骨颈骨折时, 其所受的最大应力随轴向载荷作用增大而增大, 然而倒“品”字形结构则显示出相反结果。另外, 在过去的几年, 由 Filipov 和 Gueorguiev [12]提出了双平面和双支撑螺钉固定结构(biplane double-supported screw fixation, BDSF), 研究得出 BDSF 比倒“品”字放置的 3 枚空心螺钉具有更佳生物力学性能, 底部螺钉与冠状面内的骨干轴成较大的角度, 沿着股骨距和后皮质, 另外两个螺钉在不同的平面内形成双重支撑, 可以在骨折端保持轴向压缩应力, 同时抵抗扭转和剪切应力[13], BDSF 实现了最强结构固定支撑股骨颈后方皮质。在 Wang 等[14]的研究中, 用 BDSF 治疗了 43 例平均年龄在 38.9 岁的 Pauwels III 型股骨颈骨折, 平均随访了 38.7 个月, 42 例达到临床愈合, 股骨颈缩短 11 例, 内翻畸形 9 例, 股骨头缺血性坏死 3 例, 螺钉退钉 8 例, 总体取得满意的临床效果。另有学者认为 4 枚空心钉在股骨颈骨折中也能提高固定的强度。林焱斌等[15]人通过对比 4 种不同构型的 4 枚螺钉的生物力学分析得出, 4 枚螺钉治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折时, “双轴加压和双支撑构型”新构型的轴向压缩刚度 995.29 ± 34.16 (N/mm)、极限载荷 3225.33 ± 461.31 (N)皆大于另外三组($P < 0.05$), 具有更佳的生物力学优势。空心螺钉在股骨颈骨折中应用广泛, 不少学者在空心钉的数量、位置、排列方式等方面进行了不断探索, 使空心钉成为治疗股骨颈骨折的有效方法之一。

4.2. 动力髋螺钉固定

多年来, 动力髋螺钉也是一种常用内固定选择, 许多学者对 DHS 装置的改进开展了相关研究。DHS 的主钉在套筒内滑动, 使骨折断端动态持续加压, 有利于骨折复位和愈合。同时结合角度稳定性, 在一

定程度避免内翻和塌陷的发生。但是 DHS 也有缺点, 如: 抗旋转性能差、应力集中造成主钉切割或断裂等。为了解决这一问题, 临床中会在 DHS 主钉上方增加 1 枚与主钉方向平行的防旋空心螺钉。Samsami 等[16]的一项有限元分析中得出, 在治疗年轻患者股骨颈骨折时, 动力髌螺钉加防旋钉是比空心螺钉和股骨近端锁定钢板技术更有效的选择, 可以提供更适当的力学环境, 促进骨折愈合。在 Zhu 等[17]回顾性分析 68 例采用 DHS 结合防旋钉治疗年轻患者移位型股骨颈骨折的临床疗效及生物力学分析中结果显示, 对于难以复位的移位型股骨颈骨折, DHS 联合防旋钉具有更好的力学支撑、更短的手术时间、更少的射线暴露、更高的 Harris 髋关节评分, 在年轻患者中将是一种有效的治疗方式。另外, 在 Jiang 等[18]的关于 Pauwels III 型股骨颈骨折不同内固定方法的有限元分析中, DHS 联合防旋螺钉或内侧支撑钢板都可以有效地减少骨折段的运动并分担 DHS 的剪切力, 并且 DHS 加 2 枚防旋钉具有显著降低内固定失败风险和增加股骨颈稳定的生物力学优势, 在具有较高固定要求的 Pauwels III 型股骨颈骨折的情况下, 使用 DHS 加 2 枚防旋钉可能是更有利的选择。在 Eic Ju Lim 等[19]的 Meta 分析结果显示, DHS 发生骨折不愈合的风险远低于空心钉固定, 特别是在垂直型股骨颈骨折患者中。近年来, 自体骨移植也为临床提供了一种新思路, 在 Li 等[20]的回顾性分析中, 报道了 DHS 联合腓骨移植可以缩短骨折的愈合时间、保护股骨头血运、降低骨折不愈合和股骨头坏死(osteonecrosis of the femoral head, ONFH)的发生率, 为 Pauwels III 型股骨颈骨折提供新的治疗方法。

4.3. 内侧支撑钢板联合空心螺钉固定

Kunapuli 等[21]的生物力学分析中得出内侧支撑钢板联合 3 枚空心螺钉可显著提高垂直剪切型股骨颈骨折的固定强度。在 Alaettin Özer 等[22]用有限元分析比较了 3 枚空心螺钉、DHS 联合防旋钉、股骨近端锁定钢板、3 枚空心螺钉联合内侧支撑板四组固定装置治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折中得出, 在不同矢状面骨折线下, 3 枚空心钉联合内侧支撑板比其它三组表现出更好的生物力学性能。Li 等[23]的有限元分析中, 与空心螺钉相比, 内侧支撑钢板在股骨及应力分布、应力峰值和 Z 轴位移方面的固定更加稳定, 增加内侧支撑板能获得更好的内侧支撑稳定性, 因为它完全符合股骨颈现有的解剖结构。Ma 和 Liu 等[24]的研究中, 回顾性分析比较了 69 例不稳定型股骨颈骨折患者使用多枚空心螺钉和联合内侧支撑钢板疗效, 作者观察到内侧支撑钢板联合空心钉组在 3 个月和 6 个月时的效果更好, 之后结果相似, 这组并发症较少, 没有明显的血供中断, 显示出内侧支撑钢板联合空心钉是一种较好的固定方式。从生物力学上看, 股骨颈内侧支撑钢板联合空心钉固定无疑是一种较为牢靠的固定方式, 但目前无长期随访表明其 ONFH 的发生率是否会增加。

4.4. 股骨颈内固定系统固定

近年来出现的股骨颈动力交叉钉系统(FNS), 结合了现有不同内固定的优点, 具有微创植入、角稳定性强、减少骨破坏等优点。Stoffel 等[25]通过对比 FNS、DHS 和空心钉在固定 Pauwels III 型股骨颈骨折的生物力学稳定性的研究中得出 FNS 相比于 3 枚空心螺钉具有更高的整体结构稳定性, 相比于 DHS 具有更强的抗旋性, 创伤破坏更小, 是治疗不稳定的股骨颈骨折的有效替代方案。Schopper 等[26]学者的力学试验也显示 FNS 具有更好的抗内翻性能以及能维持颈干角稳定。范智荣等[27]通过有限元分析研究了股骨颈内固定系统技术在治疗不稳定性 Pauwels III 型股骨颈骨折的生物力学效应, 并与正、倒三角形空心螺钉装置进行比较, 发现 FNS 的轴向和旋转稳定性优于传统的空心钉, FNS 在治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折中显示出更低的应力、更小的位移、更优的生物力学稳定性, 可以作为临床治疗不稳定性股骨颈骨折的一种新选择。然而, 也有研究结果表明, 相比于 CCS、BDSF 和内侧支撑板联合空心螺钉, FNS 的稳定性更弱、位移更大、刚度更弱[28]。Amit Davidson 等[29]的临床研究得出, FNS 将是青壮年股骨颈骨折的一种安全

治疗选择, 再次手术率和并发症情况相比于其他植入物较低。在 Marcel Niemann 等[30]的一篇回顾性研究中, 通过比较 FNS 和 DHS 治疗 31 例股骨颈骨折患者的疗效得出, FNS 是一种非常有效的股骨颈骨折外科治疗固定系统, 它可以显著缩短手术时间, 从而潜在地减少手术相关的风险和并发症。目前, FNS 在临床中的应用逐步增加, 从生物力学方面, FNS 是治疗青壮年股骨颈骨折的选择之一, 然而短期疗效及并发症等方面的临床研究尚少, 还需要进一步的临床研究和长期随访来验证 FNS 的有效性。

4.5. 其它内固定

除上述内固定方式外, 相关文献还报道了其他内固定方式, 如股骨近端锁定钢板固定、髓内固定等。Bliven 等人[31]采用 30 例新鲜股骨标本分析比较了股骨近端锁定钢板、滑动髋螺钉与倒三角形空心螺钉固定 Pauwels III 型股骨颈骨折的生物力学特性, 结果表明, 近端锁定钢板的生物力学性能优于倒三角形空心钉, 与滑动髋螺钉相近。在 AlaettinÖzer 等[22]的有限元分析中, 与空心螺钉相比, 股骨近端锁定钢板能减少颈部缩短或内翻移位; 与 DHS 联合空心钉相比, 股骨近端锁定钢板矢状面前后骨折线的垂直和旋转位移更小。复杂的股骨近端骨折由于骨折形态的复杂性和骨折位移使得很难获得良好的复位和稳定的固定。Berkes 等[32]的临床研究中, 用股骨近端锁定钢板固定治疗 18 例股骨颈骨折患者时, 有 7 例 (36.9%) 发生了内固定失败, 其中 5 例需要全髋关节置换。然而, 在 Wang 等[33]的临床研究中, 回顾性分析了 45 例采用股骨近端锁定钢板治疗非老年不稳定型股骨颈骨折患者的疗效, 股骨近端锁定钢板具有固定牢固、防止股骨颈短缩、预防髋外翻畸形等方面的优势。Rupprecht 等[34]研究 Inter Tan 髓内钉系统、3 枚空心钉、DHS 在 Pauwels III 型股骨颈骨折的尸体股骨生物力学分析中, 与 DHS 和空心螺钉相比, Inter Tan 髓内钉具有更小的骨折移位, Inter Tan 髓内钉具有更高的轴向压缩稳定性。髓内钉多用于合并转子间或转子下骨折, 在单纯股骨颈骨折中应用较少。在 Wang 和 Yang 等[35]的研究中, 将 FNS、Inter Tan 髓内钉和三枚空心螺钉治疗不稳定型 Pauwels III 型股骨颈骨折进行生物力学比较, 在轴向刚度和 A-P 弯曲刚度方面, Inter Tan 髓内钉优于 FNS 和 3 枚空心螺钉。

5. 小结与展望

近年来, 由于交通事故、坠落伤等高能创伤频发, 青壮年发生股骨颈骨折的机会越来越多, 内固定植入物也在不断创新和改进, 但尚未在全世界范围内达成共识, 青壮年 Pauwels III 型股骨颈骨折的治疗仍是骨科领域的一个挑战。对于青壮年股骨颈骨折临床大多采用生物力学角度出发的 Pauwels 分型法, 其简便易记, 还可预测术后并发症发生率。对于内固定的选择, 空心钉和 DHS 已在临床中应用多年, 空心钉创伤更小, 却术后透视次数增加; DHS 有更强的力学优势, 却损伤更大, 术后 ONFH 更高。FNS 和内侧支撑钢板联合空心螺钉固定也是有效的固定方式, FNS 具有微创植入、角稳定性强及损伤小等优点, 然而目前尚没有在临床广泛普及。因此, 对于青壮年股骨颈骨折的治疗, 需要进一步剖析其生物力学特点, 要兼备微创植入和坚强固定两方面, 选择合适的内固定, 才能获得满意的临床疗效, 有利于术后功能康复。

参考文献

- [1] Bhandari, M. and Swiontkowski, M. (2017) Management of Acute Hip Fracture. *The New England Journal of Medicine*, **377**, 2053-2062. <https://doi.org/10.1056/NEJMcp1611090>
- [2] 张长青, 张英泽, 余斌, 等. 成人股骨颈骨折诊治指南[J]. 中华创伤骨科杂志, 2018, 20(11): 921-928.
- [3] Slobogean, G.P., Sprague, S.A., Scott, T. and Bhandari, M. (2015) Complications Following Young Femoral Neck Fractures. *Injury*, **46**, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.10.010>
- [4] Garden, R.S. (1961) Low-Angle Fixation in Fractures of the Femoral Neck. *The Journal of Bone and Joint Surgery British*, **43-B**, 647-663. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.43B4.647>

- [5] Kazley, J.M., Banerjee, S., Abousayed, M.M. and Rosenbaum, A.J. (2018) Classifications in Brief: Garden Classification of Femoral Neck Fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **476**, 441-445. <https://doi.org/10.1007/s11999-000000000000066>
- [6] Song, H.K., Lee, J.J., Oh, H.C. and Yang, K.H. (2013) Clinical Implication of Subgrouping in Valgus Femoral Neck Fractures: Comparison of 31-B1.1 with 31-B1.2 Fractures Using the OTA/AO Classification. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **27**, 677-682. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e31828e18c5>
- [7] Florschutz, A.V., Langford, J.R., Haidukewych, G.J. and Koval, K.J. (2015) Femoral Neck Fractures: Current Management. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, 121-129. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000291>
- [8] Lichstein, P.M., Kleimeyer, J.P., Githens, M., et al. (2018) Does the Watson-Jones or Modified Smith-Petersen Approach Provide Superior Exposure for Femoral Neck Fracture Fixation? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, **476**, 1468-1476. <https://doi.org/10.1097/01.blo.0000533627.07650.bb>
- [9] Kloen, P., Rubel, I.F., Lyden, J.P. and Helfet, D.L. (2003) Subtrochanteric Fracture after Cannulated Screw Fixation of Femoral Neck Fractures: A Report of Four Cases. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **17**, 225-229. <https://doi.org/10.1097/00005131-200303000-00013>
- [10] Panteli, M., Rodham, P. and Giannoudis, P.V. (2015) Biomechanical Rationale for Implant Choices in Femoral Neck Fracture Fixation in the Non-Elderly. *Injury*, **46**, 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.12.031>
- [11] Li, J., Wang, M., Zhou, J., et al. (2020) Finite Element Analysis of Different Screw Constructs in the Treatment of Unstable Femoral Neck Fractures. *Injury*, **51**, 995-1003. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.02.075>
- [12] Filipov, O. and Gueorguiev, B. (2015) Unique Stability of Femoral Neck Fractures Treated with the Novel Biplane Double-Supported Screw Fixation Method: A Biomechanical Cadaver Study. *Injury*, **46**, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2014.11.013>
- [13] Filipov, O.B. (2019) Biplane Double-Supported Screw Fixation of Femoral Neck Fractures: Surgical Technique and Surgical Notes. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **27**, e507-e515. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-17-00117>
- [14] Wang, F., Liu, Y. and Zhang, C. (2018) Effectiveness of F-Shaped Screw Fixation Technique in Treatment of Pauwels type III Femoral Neck Fractures. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, **32**, 1417-1420.
- [15] 林焱斌, 余光书, 钟志辉, 等. 新构型四枚空心钉固定极不稳定型股骨颈骨折生物力学分析[J]. 中华创伤骨科杂志, 2019, 21(2): 160-165.
- [16] Samsami, S., Augat, P. and Rouhi, G. (2019) Stability of Femoral Neck Fracture Fixation: A Finite Element Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **233**, 892-900. <https://doi.org/10.1177/0954411919856138>
- [17] Zhu, J., Li, Y., Zhang, Y. and Cheng, X.D. (2022) Clinical Outcome and Biomechanical Analysis of Dynamic Hip Screw Combined with Derotation Screw in Treating Displaced Femoral Neck Fractures Based on Different Reduction Qualities in Young Patients (≤ 65 Years of Age). *BioMed Research International*, **2022**, Article ID: 9505667. <https://doi.org/10.1155/2022/9505667>
- [18] Jiang, X., Liang, K., Du, G., et al. (2022) Biomechanical Evaluation of Different Internal Fixation Methods Based on Finite Element Analysis for Pauwels Type III Femoral Neck Fracture. *Injury*, **53**, 3115-3123. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.08.038>
- [19] Lim, E.J., Shon, H.C., Cho, J.W., et al. (2021) Dynamic Hip Screw versus Cannulated Cancellous Screw in Pauwels Type II or Type III Femoral Neck Fracture: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Personalized Medicine*, **11**, Article 1017. <https://doi.org/10.3390/jpm11101017>
- [20] Li, Z., Zhang, X., Li, Z., et al. (2020) Comparative Study of Pauwels Type III Femoral Neck Fractures Managed by Short Dynamic Hip Screw with Fibula Bone Graft or Cannulated Screws in Young Adults. *Annals of Translational Medicine*, **8**, Article ID: 681. <https://doi.org/10.21037/atm-19-3344>
- [21] Kunapuli, S.C., Schramski, M.J., Lee, A.S., et al. (2015) Biomechanical Analysis of Augmented Plate Fixation for the Treatment of Vertical Shear Femoral Neck Fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, 144-150. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000205>
- [22] Özer, A., Öner, K., Okutan, A.E. and Ayas, M.S. (2022) Comparative Finite Element Analysis of Four Different Internal Fixation Implants for Pauwels Type III Femoral Neck Fractures in Various Fracture Angles in the Sagittal Plane. *Joint Diseases and Related Surgery*, **33**, 352-358. <https://doi.org/10.52312/jdrs.2022.676>
- [23] Li, J., Yin, P., Zhang, L., et al. (2019) Medial Anatomical Buttress Plate in Treating Displaced Femoral Neck Fracture a Finite Element Analysis. *Injury*, **50**, 1895-1900. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2019.08.024>
- [24] Ma, C., Liu, Y., Liu, J., et al. (2022) The Role of the Medial Buttress Plate in the Treatment of Pauwels Type II and III Femoral Neck Fracture in Nonelderly Patients: A Retrospective Study and Preliminary Results. *BMC Musculoskeletal*

- Disorders*, **23**, Article No. 100. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05056-8>
- [25] Stoffel, K., Zderic, I., Gras, F., *et al.* (2017) Biomechanical Evaluation of the Femoral Neck System in Unstable Pauwels III Femoral Neck Fractures: A Comparison with the Dynamic Hip Screw and Cannulated Screws. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **31**, 131-137. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000739>
- [26] Schopper, C., Zderic, I., Menze, J., *et al.* (2020) Higher Stability and More Predictive Fixation with the Femoral Neck System versus Hansson Pins in Femoral Neck Fractures Pauwels II. *Journal of Orthopaedic Translation*, **24**, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2020.06.002>
- [27] 范智荣, 苏海涛, 周霖, 等. 新型股骨颈内固定系统治疗不稳定性股骨颈骨折的有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(15): 2321-2328.
- [28] Xia, Y., Zhang, W., Hu, H., *et al.* (2021) Biomechanical Study of Two Alternative Methods for the Treatment of Vertical Femoral Neck Fractures—A Finite Element Analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, **211**, Article ID: 106409. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106409>
- [29] Davidson, A., Blum, S., Harats, E., *et al.* (2022) Neck of Femur Fractures Treated with the Femoral Neck System: Outcomes of One Hundred and Two Patients and Literature Review. *International Orthopaedics*, **46**, 2105-2115. <https://doi.org/10.1007/s00264-022-05414-0>
- [30] Niemann, M., Braun, K.F., Ahmad, S.S., *et al.* (2022) Comparing Perioperative Outcome Measures of the Dynamic Hip Screw and the Femoral Neck System. *Medicina*, **58**, Article 352. <https://doi.org/10.3390/medicina58030352>
- [31] Bliven, E., Sandriesser, S., Augat, P., von Rueden, C. and Hackl, S. (2020) Biomechanical Evaluation of Locked Plating Fixation for Unstable Femoral Neck Fractures. *Bone & Joint Research*, **9**, 314-321. <https://doi.org/10.1302/2046-3758.96.BJR-2019-0331.R1>
- [32] Berkes, M.B., Little, M.T., Lazaro, L.E., *et al.* (2012) Catastrophic Failure after Open Reduction Internal Fixation of Femoral Neck Fractures with a Novel Locking Plate Implant. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **26**, e170-e176. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e31823b4cd1>
- [33] Wang, G., Tang, Y., Wang, B. and Yang, H.L. (2019) Minimally Invasive Open Reduction Combined with Proximal Femoral Hollow Locking Plate in the Treatment of Pauwels Type III Femoral Neck Fracture. *Journal of International Medical Research*, **47**, 3050-3060. <https://doi.org/10.1177/0300060519850962>
- [34] Rupperecht, M., Grossterlinden, L., Ruecker, A.H., *et al.* (2011) A Comparative Biomechanical Analysis of Fixation Devices for Unstable Femoral Neck Fractures: The Intertan Versus Cannulated Screws or a Dynamic Hip Screw. *The Journal of Trauma: Injury, Infection and Critical Care*, **71**, 625-634. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31820e86e6>
- [35] Wang, Z., Yang, Y., Feng, G., *et al.* (2022) Biomechanical Comparison of the Femoral Neck System Versus Intertan Nail and Three Cannulated Screws for Unstable Pauwels Type III Femoral Neck Fracture. *BioMedical Engineering OnLine*, **21**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1186/s12938-022-01006-6>