

# 不稳定性股骨颈骨折内固定方式生物力学研究进展

任伟志 徐炜

**摘要** Pauwels Ⅲ型股骨颈骨折为不稳定性骨折,骨折断端之间存在较大剪切力,对内固定要求较高,且术后常出现缺血性坏死、骨不连等并发症。治疗不稳定性股骨颈骨折的内固定方式有多种,常用的倒三角形空心螺钉及滑动髋螺钉固定可能效果欠佳。近年,新的内固定方式不断出现,其中离轴螺钉及添加内侧支撑钢板等方式显示出较优的生物力学稳定性。目前,对于不稳定性股骨颈骨折内固定方式的选择尚无定论。该文就不稳定性股骨颈骨折不同内固定方式的特点及生物力学性能的研究进展进行综述,以期为临床实践提供依据。

**关键词** 股骨颈骨折;不稳定;内固定;生物力学

**DOI:** 10.3969/j.issn.1673-7083.2021.05.009

股骨颈骨折是髋关节创伤中常见骨折之一。对于股骨颈骨折,当骨折断端存在较大剪切力时临床倾向于使用 Pauwels 分型指导治疗,该分型首次自生物力学视角对股骨颈骨折进行分类。近年有学者发现,髋部骨折时腿部处于不同位置,因此仅凭术前 X 线摄片测量两条线(即远端骨折线和水平线)得出的 Pauwels 角具有易变性<sup>[1]</sup>。为此,Wang 等<sup>[2]</sup>将 Pauwels 角重新定义为股骨轴垂线与远端骨折线的夹角。Pauwels 角 $\geq 50^\circ$ 时为 Pauwels Ⅲ型骨折,即不稳定性股骨颈骨折。此时,骨折端剪切力占主导,可产生较大内翻应力,使骨折端容易出现移位及内翻塌陷<sup>[1]</sup>,因而术后常出现缺血性坏死、骨不连等并发症<sup>[3]</sup>。对于此类骨折,内固定方式的选择尤为重要。

目前,不稳定性股骨颈骨折内固定方式有多种,但何种方式具有更好的生物力学优势及远期预后,学者们仍在不断探讨。我们对不同内固定方式的特点以及生物力学性能进行相关综述,以期为临床治疗选择提供参考。

## 1 空心加压螺钉系统

### 1.1 空心钉内固定

在采用空心钉内固定时,临床医生对于螺钉置入数量一直存有争议。有学者基于保护股骨头血运的角度认为,螺钉置入数量与位置的差异可影响股

骨颈内的血运系统,在保证坚强内固定的前提下,尽量减少置入螺钉数量可显著降低股骨头坏死发生风险<sup>[4]</sup>。以往有学者提出,3 枚空心螺钉较 2 枚螺钉仅在弯曲刚度上具有优势,因而可能不需要添加第 3 枚螺钉。但是 Maurer 等<sup>[5]</sup>进行的生物力学研究表明,3 枚空心螺钉较 2 枚螺钉具有更强的生物力学稳定性,以及较强的抗旋转能力。当然,螺钉也不是越多越稳定。研究发现,增加第 4 枚螺钉并不能提供生物力学益处,反而可能对股骨颈侧壁产生影响<sup>[6]</sup>。

空心螺钉置入时与股骨干的成角应为多少也存在争议,多数学者认为此值约为  $135^\circ$ 。有研究发现,空心螺钉置入角度为  $150^\circ$  较  $135^\circ$  和  $145^\circ$  有更大的弯曲刚度,但不同置入角度的轴向刚度、疲劳试验以及失效试验结果并无统计学差异<sup>[7]</sup>。Stacey 等<sup>[8]</sup>的研究显示,3 枚空心钉相互平行且垂直于骨折线时可对骨折断端提供最大压力。故平行于股骨颈轴线方向置钉(置入角度为  $135^\circ$ )的方式,虽操作简单、学习周期短,但可能不完全符合解剖学及生物力学原理。而置入时采用较低的进钉点,使空心螺钉尽可能沿压力侧骨小梁分布,可能具有更优的生物力学性能。

既往研究结果大多认为,紧贴股骨颈皮质边缘的等腰倒三角形螺钉构型具有生物力学优势<sup>[9]</sup>,然而 Filipov 等<sup>[10]</sup>提出采用双平面、双支撑的“F”形置钉法。传统的空心钉入口通常位于大转子及其附近较薄的骨皮质处,而“F”形空心钉高角度置钉法可

以使远端2枚空心钉入口移至股骨干较厚的骨皮质内,从而使螺钉形成坚固的悬臂梁结构<sup>[10]</sup>。Lin等<sup>[11]</sup>对此进行了研究,他们对不稳定性股骨颈骨折患者分别使用“F”形与传统倒三角形空心钉固定,通过构建有限元模型比较两种置钉法的生物力学特性。他们发现,“F”形置钉可明显降低股骨距区域的压力,将载荷转移到近端股骨干的皮质骨,较传统空心加压螺钉系统具有一定的生物力学优势。

目前,临床医生主要使用单头部分螺纹空心钉对骨折进行滑动加压。近年,不同螺纹类型空心钉逐渐应用于股骨颈骨折治疗中。Liu等<sup>[12]</sup>通过生物力学研究发现,使用普通空心螺钉固定内侧皮质缺损的股骨颈骨折,可导致内固定装置刚度降低、骨折位移增大,生物力学稳定性不佳。他们对传统的正三角形空心螺钉内固定系统进行改良,将远端2枚部分螺纹空心钉换成全螺纹无头空心钉。结果显示,改良后的内固定方式对后内侧皮质缺损的股骨颈骨折具有更优的生物力学稳定性。同时有学者发现,此种内固定方式应用于Pauwels角为 $70^{\circ}$ 的不稳定性股骨颈骨折中,也具有明显的生物力学优势<sup>[13]</sup>。Zhang等<sup>[14]</sup>对3枚双头螺纹空心钉固定不稳定性股骨颈骨折的生物力学性能进行研究,他们发现,此种内固定方式较采用3枚传统空心螺钉有更优的生物力学稳定性。

## 1.2 离轴螺钉

有文献报道,采用倒三角形空心加压螺钉固定不稳定性股骨颈骨折,术后骨折复位失效率达 $20\%\sim 48\%$ <sup>[15]</sup>。为了提高空心加压螺钉的固定强度,有学者提出“离轴螺钉”概念,即将1枚空心钉尽可能与骨折线垂直放置,这样可在一定程度上抵抗垂直剪切力。Johnson等<sup>[16]</sup>比较了倒三角形空心螺钉与2枚空心螺钉联合1枚单皮质离轴螺钉(仅穿过股骨粗隆区的单皮质离轴空心螺钉)固定的生物力学性能。结果显示,两种固定方法的轴向刚度与失效负荷均无统计学差异,表明生物力学强度相似。近年,有学者提出将离轴螺钉穿入股骨距区域的密质骨,形成离轴的双皮质固定。Kuan等<sup>[17]</sup>对3枚空心钉、2枚空心钉联合单皮质离轴螺钉、2枚空心钉联合双皮质离轴螺钉(即螺钉自股骨粗隆区穿过股骨距)3种方法固定不稳定性股骨颈骨折的生物力学特性进行比较,结果显示:3组的轴向刚度值分别为 $856.5\text{ N/mm}$ 、 $936\text{ N/mm}$ 、 $1\,340\text{ N/mm}$ ,破坏负荷分别为 $2\,612.7\text{ N}$ 、 $2\,508.8\text{ N}$ 、 $3\,706\text{ N}$ ,骨折端

位移分别为 $0.41\text{ mm}$ 、 $0.83\text{ mm}$ 、 $0.36\text{ mm}$ 。上述研究提示,传统空心螺钉联合双皮质离轴螺钉固定具有一定的生物力学优势。

## 2 钢板螺钉结合内固定系统

### 2.1 滑动髁螺钉

滑动髁螺钉(DHS)由1枚拉力螺钉与带套筒的侧方钢板组成,在骨折复位与愈合过程中,拉力螺钉对骨折断端起滑动加压作用。Aminian等<sup>[18]</sup>开展研究比较倒三角形空心钉与DHS的生物力学稳定性,他们发现使用DHS具有更大的轴向刚度值。Samsami等<sup>[19]</sup>进行的生物力学研究表明,使用DHS联合1枚防旋螺钉较使用倒三角形空心钉具有更强的生物力学稳定性,可以有效抵抗股骨头的翻转和旋转。另一项研究也有同样结论<sup>[20]</sup>。然而,Kemker等<sup>[21]</sup>进行的生物力学研究则显示,使用DHS结合1枚防旋螺钉与使用倒三角形空心钉的生物力学性能相似,而单独使用DHS则刚度最小,骨折端位移最大。

### 2.2 股骨近端锁定钢板

股骨近端锁定钢板在临床应用中较为常见。使用时将股骨近端锁定钢板置于近端股骨外侧,钢板近端以3枚锁定螺钉置入股骨颈内,钢板远端再固定1~2枚皮质螺钉。这种内固定方式兼顾钢板稳定性与空心钉的微创性,可形成整体更好的骨折端固定。Samsami等<sup>[22]</sup>的研究表明,对于PauwelsⅢ型股骨颈骨折,股骨近端锁定钢板固定的生物力学稳定性优于倒三角形空心钉。Kalsbeek等<sup>[23]</sup>的研究表明,股骨近端锁定钢板用于治疗不稳定性股骨颈骨折,不仅愈合率高、并发症少,而且患者关节功能恢复良好。这些研究显示,股骨近端锁定钢板用于固定PauwelsⅢ型股骨颈骨折具有优秀的生物力学稳定性。然而也有学者指出,恰因为股骨近端锁定钢板与螺钉形成刚性固定,在人体内尤其是骨质疏松患者中,骨折的刚性固定在承受连续应力时可导致内植物对骨折断端不断切割,发生微骨折,进而出现内固定失效,骨折不愈合<sup>[24]</sup>。

### 2.3 股骨颈内侧支撑钢板内固定

PauwelsⅢ型股骨颈骨折患者的骨折断端存在巨大剪切力,因此需采用一种可有效抵抗剪切力的内固定方式。Mir等<sup>[25]</sup>提出在股骨颈内侧增加1块支撑钢板以抵消剪切力,同时还可将剪切趋势转化为对骨折断端的加压。近年,空心螺钉结合内侧支撑钢板固定治疗股骨颈骨折的手术方式逐渐被应

用,其在抵抗剪切应力的同时保留了空心加压螺钉出色的抗旋能力。生物力学研究显示,对于 Pauwels III型股骨颈骨折,采用加固内侧支撑钢板的离轴螺钉固定较单纯离轴螺钉固定,骨折断端移位更小、轴向刚度值更大、抗旋性能更强<sup>[26]</sup>。Kunapuli等<sup>[27]</sup>分别使用倒三角形空心钉、DHS、3枚空心钉联合内侧支撑钢板、DHS联合内侧支撑钢板4种方式行内固定,比较不同固定方式的生物力学性能。他们发现,联合内侧支撑钢板加固的方式较未联合加固方式的破坏负荷平均增加83%(2 409N对4 417N)。Lin等<sup>[11]</sup>开展生物力学研究,采用“F”形空心钉、倒三角形空心钉、以及二者分别加固内侧支撑钢板的4种固定方法,并对其施加相同载荷。结果显示,加固钢板组骨折断端移位明显小于不加固组。虽然上述研究显示添加内侧支撑钢板具有较优的生物力学稳定性,但也有文献报道添加后可能影响股骨头血液供应<sup>[28-29]</sup>。

### 3 其他内固定方式

不稳定性股骨颈骨折存在较特殊的生物力学因素,随着生物力学研究的深入,不断有新的内固定方式出现。Saglam等<sup>[29]</sup>发明了1种新的内固定方式,即微创滑动抗旋转加压髋螺钉。其由1枚尾部有锁定孔的空心拉力螺钉及配套的联锁螺钉组成,可在股骨颈内形成1个抗旋转刀片。生物力学研究显示,对于不稳定性股骨颈骨折,这种固定方式的轴向刚度和抗旋刚度均高于倒三角形空心钉。

股骨颈骨折对血运的破坏往往是导致各种并发症的关键因素,使用“海森别针”在减少手术创伤的同时可提供相对稳定的支撑。Brattgjerd等<sup>[30]</sup>对“海森别针”进行改进,在其尾端增加1个尾帽板,使其可以锁定于钢板内。生物力学研究显示,改良的“海森别针”,其刚度、扭矩、破坏能量分别为“海森别针”的12倍、19.3倍、19.9倍。

Zhang等<sup>[31]</sup>设计了膨胀空心螺钉,其内可置入1枚较小规格的配套螺钉,配套螺钉使膨胀空心螺钉前端分开,形成2个半螺纹钉来抓住股骨头。他们将这种膨胀空心螺钉与空心螺钉进行生物力学性能比较,结果显示相同数量膨胀空心螺钉的稳定性明显高于空心螺钉,且2枚膨胀空心螺钉与3枚空心加压螺钉的破坏负荷相当。Stoffel等<sup>[32]</sup>提出股骨颈动力交叉钉系统,经研究表明,其生物力学性能优于空心螺钉,较DHS有更强的抗旋作用,并有相对微创治疗的优势。

### 4 总结

综上所述,不稳定性股骨颈骨折的内固定方式多样,不同方式各具优点和局限性。目前选择内固定方式时仅从生物力学角度进行比较,而在临床应用中不得不考虑手术操作对股骨颈血运的影响,使用时必须兼顾手术创伤对股骨颈血供影响与内植物稳定性之间的平衡。近年,越来越多具有生物力学优势的内固定方式出现,但何种方式可实现坚强内固定并达到良好的远期预后尚无定论,未来仍需开展更多临床研究进行论证。

### 参考文献

- [1] Shen M, Wang C, Chen H, et al. An update on the Pauwels classification[J]. J Orthop Surg Res, 2016, 11(1): 161.
- [2] Wang SH, Yang JJ, Shen HC, et al. Using a modified Pauwels method to predict the outcome of femoral neck fracture in relatively young patients[J]. Injury, 2015, 46(10): 1969-1974.
- [3] Xu DF, Bi FG, Ma CY, et al. A systematic review of undisplaced femoral neck fracture treatments for patients over 65 years of age, with a focus on union rates and avascular necrosis[J]. J Orthop Surg Res, 2017, 12(1): 28.
- [4] Zhao D, Qiu X, Wang B, et al. Epiphyseal arterial network and inferior retinacular artery seem critical to femoral head perfusion in adults with femoral neck fractures[J]. Clin Orthop Relat Res, 2017, 475(8): 2011-2023.
- [5] Maurer SG, Wright KE, Kummer FJ, et al. Two or three screws for fixation of femoral neck fractures?[J]. Am J Orthop (Belle Mead NJ), 2003, 32(9): 438-442.
- [6] Panteli M, Rodham P, Giannoudis PV. Biomechanical rationale for implant choices in femoral neck fracture fixation in the non-elderly[J]. Injury, 2015, 46(3): 445-452.
- [7] Walker E, Mukherjee DP, Ogden AL, et al. A biomechanical study of simulated femoral neck fracture fixation by cannulated screws: effects of placement angle and number of screws[J]. Am J Orthop (Belle Mead NJ), 2007, 36(12): 680-684.
- [8] Stacey SC, Renninger CH, Hak D, et al. Tips and tricks for ORIF of displaced femoral neck fractures in the young adult patient[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2016, 26(4): 355-363.
- [9] Li J, Wang M, Zhou J, et al. Optimum configuration of cannulated compression screws for the fixation of unstable femoral neck fractures: finite element analysis evaluation[J]. Biomed Res Int, 2018, 2018: 1271762.
- [10] Filipov O, Gueorguiev B. Unique stability of femoral neck fractures treated with the novel biplane double-supported screw fixation method: a biomechanical cadaver study[J]. Injury, 2015, 46(2): 218-226.

- [11] Lin T, Peng Y, Jingli X, et al. Finite element analysis of different internal fixation methods for the treatment of Pauwels type Ⅲ femoral neck fracture [J]. Biomed Pharmacother, 2019, 112: 108658.
- [12] Liu J, Zhang B, Yin B, et al. Biomechanical evaluation of the modified cannulated screws fixation of unstable femoral neck fracture with comminuted posteromedial cortex[J]. Biomed Res Int, 2019, 2019: 2584151.
- [13] Zhang B, Liu J, Zhu Y, et al. A new configuration of cannulated screw fixation in the treatment of vertical femoral neck fractures[J]. Int Orthop, 2018, 42(8): 1949-1955.
- [14] Zhang Y, Yan C, Zhang L, et al. Comparison of ordinary cannulated compression screw and double-head cannulated compression screw fixation in vertical femoral neck fractures [J]. Biomed Res Int, 2020, 2020: 2814548.
- [15] Filipov O. Biplane double-supported screw fixation (F-technique): a method of screw fixation at osteoporotic fractures of the femoral neck [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2011, 21(7): 539-543.
- [16] Johnson JP, Borenstein TR, Waryasz GR, et al. Vertically oriented femoral neck fractures: a biomechanical comparison of 3 fixation constructs[J]. J Orthop Trauma, 2017, 31(7): 363-368.
- [17] Kuan FC, Hsu KL, Lin CL, et al. Biomechanical properties of off-axis screw in Pauwels Ⅲ femoral neck fracture fixation: bicortical screw construct is superior to unicortical screw construct[J]. Injury, 2019, 50(11): 1889-1894.
- [18] Aminian A, Gao F, Fedoriv WW, et al. Vertically oriented femoral neck fractures: mechanical analysis of four fixation techniques[J]. J Orthop Trauma, 2007, 21(8): 544-548.
- [19] Samsami S, Saberi S, Sadighi S, et al. Comparison of three fixation methods for femoral neck fracture in young adults: experimental and numerical investigations [J]. J Med Biol Eng, 2015, 35(5): 566-579.
- [20] Chan DS. Femoral neck fractures in young patients: state of the art [J]. J Orthop Trauma, 2019, 33( Suppl 1): S7-S11.
- [21] Kemker B, Magone K, Owen J, et al. A sliding hip screw augmented with 2 screws is biomechanically similar to an inverted triad of cannulated screws in repair of a Pauwels type-Ⅲ fracture[J]. Injury, 2017, 48(8): 1743-1748.
- [22] Samsami S, Saberi S, Bagheri N, et al. Interfragmentary motion assessment for three different fixation techniques of femoral neck fractures in young adults[J]. Biomed Mater Eng, 2016, 27(4): 389-404.
- [23] Kalsbeek JH, van Walsum A, Vroemen J, et al. Displaced femoral neck fractures in patients 60 years of age or younger: results of internal fixation with the dynamic locking blade plate[J]. Bone Joint J, 2018, 100B(4): 443-449.
- [24] Wazen RM, Currey JA, Guo H, et al. Micromotion-induced strain fields influence early stages of repair at bone-implant interfaces[J]. Acta Biomater, 2013, 9(5): 6663-6674.
- [25] Mir H, Collinge C. Application of a medial buttress plate may prevent many treatment failures seen after fixation of vertical femoral neck fractures in young adults [J]. Med Hypotheses, 2015, 84(5): 429-433.
- [26] Giordano V, Alves DD, Paes RP, et al. The role of the medial plate for Pauwels type Ⅲ femoral neck fracture: a comparative mechanical study using two fixations with cannulated screws[J]. J Exp Orthop, 2019, 6(1): 18.
- [27] Kunapuli SC, Schramski MJ, Lee AS, et al. Biomechanical analysis of augmented plate fixation for the treatment of vertical shear femoral neck fractures[J]. J Orthop Trauma, 2015, 29(3): 144-150.
- [28] Putnam SM, Collinge CA, Gardner MJ, et al. Vascular anatomy of the medial femoral neck and implications for surface plate fixation[J]. J Orthop Trauma, 2019, 33(3): 111-115.
- [29] Sağlam N, Küçükdemir F, Kivircim H, et al. Biomechanical comparison of antirotator compression hip screw and cannulated screw fixations in the femoral neck fractures[J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2014, 48(2): 196-201.
- [30] Brattgjerd JE, Loferer M, Niratisairak S, et al. Increased torsional stability by a novel femoral neck locking plate. The role of plate design and pin configuration in a synthetic bone block model[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2018, 55: 28-35.
- [31] Zhang Y, Tian L, Yan Y, et al. Biomechanical evaluation of the expansive cannulated screw for fixation of femoral neck fractures[J]. Injury, 2011, 42(11): 1372-1376.
- [32] Stoffel K, Zderic I, Gras F, et al. Biomechanical evaluation of the femoral neck system in unstable pauwels Ⅲ femoral neck fractures: a comparison with the dynamic hip screw and cannulated screws[J]. J Orthop Trauma, 2017, 31(3): 131-137.

(收稿日期:2021-05-10)

(本文编辑:杨晓娟)