

青壮年股骨颈骨折的内固定治疗进展

杨晓强¹, 薛继钊¹, 郑程¹, 毛金平², 吴志鹏², 何帮剑², 钟滢²

(1. 浙江中医药大学第一临床医学院, 浙江 杭州 310053;

2 浙江省中医院, 浙江 杭州 310006)

摘要 青壮年股骨颈骨折多为高能量损伤导致的不稳定型骨折, 常采用手术方法治疗, 术后容易出现骨折不愈合及股骨头坏死, 可严重影响患者的生活质量。内固定术治疗青壮年股骨颈骨折, 可以恢复髋关节功能、提高患者的生活质量, 但手术效果受手术时机、复位状态及固定方式等因素影响。本文从内固定术的关键环节、常用内固定方式及人工智能辅助技术 3 个方面, 对青壮年股骨颈骨折的内固定治疗进展进行了综述。

关键词 股骨颈骨折; 成年人; 骨折固定术, 内; 综述

股骨颈骨折临床较为常见, 老年患者多为骨质疏松性骨折, 青壮年患者多为高能量损伤引起的不稳定型骨折。青壮年股骨颈骨折多采用内固定术治疗, 常用术式包括空心螺钉、动力髋螺钉 (dynamic hip screw, DHS)、动力髁螺钉 (dynamic condylar screw, DCS)、股骨颈内固定系统 (femoral neck system, FNS)、股骨近端锁定钢板 (proximal femoral locking plates, PFLP)、经皮加压钢板 (percutaneous compression plate, PCCP)、内侧支撑钢板及髓内固定系统固定等。青壮年股骨颈骨折患者, 由于其下肢肌肉发达, 骨折断端存在高剪切力, 术中复位及固定较为困难, 术后骨折不愈合、内固定失败及二次手术的风险较高。股骨头的血供较为复杂, 股骨颈骨折内固定术中可因复位不良等造成股骨头的圆韧带动脉扭曲, 使股骨头血液供应受阻, 术后容易出现股骨头坏死等并发症^[1]。对青壮年股骨颈骨折的不同内固定方式进行分析 and 总结, 有助于医生根据患者的病情选择合适的内固定方式, 有利于提高疗效、减少并发症。本文就青壮年股骨颈骨折的内固定治疗进展综述如下。

1 内固定术治疗青壮年股骨颈骨折的关键环节

1.1 选择合适的手术时机 股骨颈骨折后, 受出血、炎症渗出等因素影响, 髋关节囊内压力升高, 使股骨头的血流动力学发生改变, 若早期手术减轻髋关节囊内高压, 可避免股骨头血供进一步受损。目前股骨颈

骨折的最佳手术时机尚无定论, 临床倾向于伤后 24 h 内手术。Papakostidis 等^[2]研究发现, 股骨颈骨折后超过 24 h 进行手术, 可使骨折不愈合的概率增高。Bukva 等^[3]研究发现, 股骨颈骨折后 12 h 内进行髋部减压术, 可以降低股骨头坏死的发生率, 有利于改善预后。Spence 等^[4]研究发现, 伤后 24 h 内手术的股骨颈骨折患者更容易出现股骨头坏死, 但认为造成这一结果的原因可能是混杂因素干扰了研究。

1.2 争取解剖复位 解剖复位是股骨颈骨折内固定术成功的前提, 熟练掌握颈干角、股骨距及 Ward 三角等解剖结构, 有利于术中良好复位^[5]。颈干角是股骨颈与股骨干内侧之间形成的夹角, 正常值为 120° ~ 140°^[6]。股骨距是从股骨颈后部延伸至股骨近端后内侧的松质骨, 在提供结构支撑和允许应力从股骨头分布至股骨近端方面具有重要作用^[7]。此外, 股骨距是否完整对植入物类型的选择也有影响^[7]。Ward 三角即股骨颈内抗压缩性骨小梁和抗张力性骨小梁交汇处, 属于低骨密度区域, Ward 三角骨小梁的变性与股骨颈骨折密切相关^[8]。复位效果是影响股骨颈骨折内固定术后骨质愈合的关键因素, 因此对于青壮年股骨颈骨折, 应争取解剖复位^[9-10]。

1.3 防止股骨头坏死 股骨头坏死是股骨颈骨折的常见并发症, 也是导致手术失败的重要原因之一。囊内型股骨颈骨折会形成囊内血肿, 关节囊内的压力随时间延长而升高, 可影响囊内动脉灌注及静脉回流, 使骨组织血液供应受阻, 从而引起股骨头坏死。Rawall 等^[11]研究发现, 股骨颈骨折后囊内压差 > 30 mm Hg (1 mm Hg = 0.133 kPa) 的患者股骨头坏死

基金项目: 国家自然科学基金项目 (82074469); 浙江省自然科学基金项目 (LY21H270008)

通讯作者: 钟滢 E-mail: zhongying@zcmu.edu.cn

率较高。关节囊切开减压术可缩短股骨头缺血时间,延缓股骨头坏死进程。股骨颈骨折内固定术前,可使用单光子发射计算机断层成像(single photon emission computed tomography, SPECT)技术评估股骨头的血液循环情况,有利于早期进行干预。SPECT 技术可以预测股骨颈骨折术后 3 个月发生股骨头坏死的可能性,但早期采用 SPECT 技术预测股骨头坏死的特异性较低^[12]。Watanabe 等^[13]通过测定股骨颈骨折患者的髓内氧张力来预测股骨头坏死的可能性,发现股骨头坏死患者不同部位的髓内氧张力存在差异,认为采用髓内氧张力来预测股骨头坏死具有操作简单、侵入性小等优点,而且该法有利于判断远期股骨头节段性塌陷的风险。股骨颈骨折内固定术中,应防止扭曲股骨头的圆韧带动脉等血管、谨慎植入内固定物,避免影响股骨头的血供。

2 青壮年股骨颈骨折的常用内固定方式

青壮年股骨颈骨折的内固定方式较多,不同内固定方式的优缺点及适用骨折类型见表 1。

2.1 空心螺钉固定 3 枚或 4 枚空心螺钉平行于股骨距固定,是青壮年股骨颈骨折最常用的内固定方式。空心螺钉经皮植入,具有创伤小、手术时间短等优点,有利于减少并发症。采用空心螺钉平行于股骨距固定,适用于骨折线与水平线夹角较小的股骨颈骨

折(如 Pauwels I 型),不适用于骨折线与水平线夹角较大的股骨颈骨折(如 Pauwels II 型和 III 型),容易因骨折不愈合而导致手术失败^[14]。采用空心螺钉平行于股骨距固定的失败原因,除了骨折端垂直剪切力较大外,还与拧紧螺钉时加剧了股骨头塌陷和增加了内翻应力等有关^[15]。

空心螺钉的植入方式较多,如 3 枚螺钉以倒三角形植入、2 枚螺钉平行于股骨颈联合 1 枚螺钉垂直于骨折线植入、3 枚螺钉以倒三角形联合 1 枚螺钉垂直于骨折线植入(即平行螺钉与垂直螺钉组合固定)等,其中以组合螺钉固定最为常见。Gümüştas 等^[16]研究发现,与其他常见螺钉植入方式相比,组合螺钉植入更具优势,可以在加压固定骨折端的同时对抗垂直剪切力。Guimarães 等^[17]研究发现,组合螺钉内固定治疗青壮年股骨颈骨折,可以良好维持复位状态。

2.2 DHS 固定 DHS 是一个角度固定的滑动加压系统,与空心螺钉固定相比,可以在抗旋的同时起到轴向加压固定作用。Bhandari 等^[18]研究发现, DHS 固定的生物力学强度优于多枚空心螺钉固定,可减少远期手术翻修的需要。Baitner 等^[19]研究发现, DHS 固定获得的生物力学强度与非平行空心螺钉固定相似,两者的固定效果均优于平行空心螺钉固定,但是对于垂直型股骨颈骨折, DHS 固定可增加骨折端的剪

表 1 不同内固定方式治疗股骨颈骨折的优缺点及适用骨折类型

内固定方式	优点	缺点	适用骨折类型
空心螺钉固定	创伤小,不容易破坏股骨头血供,手术时间短	治疗垂直型骨折可导致内固定失败,术后易出现骨折不愈合	Pauwels I 型
动力髋螺钉固定	在抗旋的同时起到轴向加压作用,带螺旋刀片螺钉可防止股骨颈短缩、螺钉退出及主钉切出	单独应用时抗旋能力差,创伤较大,手术操作难度高	Pauwels III 型及高度粉碎性骨折
动力髌螺钉固定	具有动态轴向加压作用	创伤较大,易造成骨质缺损和股骨头血供破坏,术后易出现骨折不愈合及股骨头坏死	Pauwels 角小于 50° 且无骨质缺损
股骨颈内固定系统固定	切口小,操作简单,植入物对软组织的刺激程度低	需要敲击植入螺栓,可加重骨折端分离移位	骨折端分离移位明显
股骨近端锁定钢板固定	固定强度高	创伤较大,限制了骨折端之间的微动,植入物易因应力集中而断裂	Pauwels III 型
经皮加压钢板固定	可经皮植入,切口小,具有滑动加压作用,可早期进行康复训练	术中视野暴露相对不足,手术操作难度高	闭合性损伤且骨折类型为 Garden II 型及以上或囊内型骨折
内侧支撑钢板固定	具有应力转化作用,可防止股骨头塌陷及骨折不愈合	手术时间长,术中出血量多	Pauwels III 型
髓内固定系统固定	抗旋能力强,可防止股骨头塌陷	易出现头钉漂移现象,术中出血量多,不适用于合并严重血液系统疾病者	骨折端无移位或轻度移位

切力。Stacey 等^[20]研究发现,单独应用 DHS 固定时抗旋效果较差,可联合应用防旋螺钉 (derotational screw, DS) 固定,以克服 DHS 在设计上的缺陷,并通过提高内固定物的生物力学强度增加骨折端的稳定性,避免术后骨折端移位引起股骨头坏死。Kouvidis 等^[21]对比了 DHS 单钉植入和双钉植入的效果,发现双钉构造的植入物对股骨头内翻、塌陷和股骨颈旋转的抵抗力相对较强。DHS 固定失败与股骨颈短缩有关,DHS 联合 DS 固定失败与螺钉退出有关,多枚空心螺钉固定失败与股骨头内翻、股骨颈短缩有关^[22]。临床应根据患者的骨折类型选择合适的植入物,对于骨折端不稳定的 Pauwels III 型和严重粉碎性骨折,可通过 DHS 固定获得较强的稳定性以抵抗垂直剪切力^[20]。但 Stockton 等^[23]研究发现,DHS 固定较平行空心螺钉固定的股骨颈短缩程度大,认为 DHS 固定的轴向加压作用易导致股骨颈短缩,因此选择植入物前应考虑其是否会造成股骨颈短缩。

选择合适的植入物对股骨颈骨折的内固定治疗至关重要,可以降低手术失败率及二次翻修率。Sam-sami 等^[24]研究发现,与空心螺钉固定和 PFLP 固定相比,DHS 联合 DS 固定在植入物的整体坚固程度、股骨头的平均移位程度及骨折碎片的相对移位程度方面更具优势,认为 DHS 联合 DS 固定治疗垂直型股骨颈骨折可以获得良好的固定效果。Shehata 等^[25]对 DHS 固定与空心螺钉固定治疗股骨颈骨折的效果进行了 Meta 分析,发现空心螺钉组的术中出血量最少,其余指标无明显差异,但该研究纳入的病例并未区分骨折类型,研究结果可能存在偏倚。Razik 等^[26]研究发现,对于 Garden III 型和 IV 型股骨颈骨折,与单纯 DHS 固定或 DHS 联合空心螺钉固定相比,单纯空心螺钉固定更容易并发股骨头坏死。Hoshino 等^[27]研究发现,组合螺钉固定治疗青壮年股骨颈骨折,骨折不愈合率和股骨头坏死率高于 DHS 等固定。Siavashi 等^[28]研究发现,空心螺钉固定和 DHS 固定均对骨折端有加压作用,但两者维持解剖复位的程度不同,DHS 固定组随访期间未出现复位丢失和内固定失败,空心螺钉固定组的复位丢失和内固定失败率相对较高。DHS 固定的手术过程相对复杂,对术者的操作要求较高,但 DHS 固定的抗旋能力及稳定性等优于空心螺钉固定。对于骨折线与水平线夹角较大的 Pauwels III 型股骨颈骨折,若单纯采用 DHS 固定,骨折端

容易发生旋转,术后股骨头坏死风险较高,可采用 DHS 联合 DS 固定。

为了提高 DHS 固定治疗不稳定型股骨颈骨折的固定效果,临床研制出带螺旋形刀片的 DHS,即 DHS Blade,其可以通过刀片增加骨与植入物的接触面积,防止螺钉退出及主钉切出。Windolf 等^[29]借助不稳定型股骨颈骨折模型比较了 DHS Blade 与 DHS 的生物力学性能,发现 DHS Blade 的生物力学性能良好,且具有更强的固定效果及抗旋能力。Chen 等^[30]研究发现,采用 DHS Blade 固定不需要刮除额外的骨质,可以降低主钉切出的风险。对于开放性损伤且有骨质缺损或轻度骨质疏松的股骨颈骨折患者,可选择 DHS Blade 固定。DHS Blade 的螺旋刀片存在弹性形变的问题,可于植入刀片处进行预钻孔,增强刀片的固定作用^[31-32]。植入螺旋刀片处骨骼容易发生变形,可导致股骨颈短缩,而抗旋螺钉锚固装置可以降低股骨颈短缩的风险。Knobe 等^[33]研究发现,与单纯 DHS 固定和 DHS Blade 固定相比,抗旋螺钉锚固装置固定的生物力学强度较高,且不容易出现股骨颈短缩。Luo 等^[34]采用 DHS 固定联合自体骨移植治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折,术后髋关节功能恢复的优良率较高。对于垂直不稳定型股骨颈骨折,可采用 DHS 联合自体骨移植治疗,能够避免因骨质缺损引起的骨折不愈合,且可以增加骨折端的稳定性。Bliven 等^[35]从股骨头平均内翻、塌陷程度及下肢短缩距离方面,评估了 DHS、空心螺钉及锁定钢板联合弹簧螺钉系统固定治疗不稳定型股骨颈骨折的效果,结果显示锁定钢板联合弹簧螺钉系统固定的评价结果更好。Li 等^[36]研究发现,滑动加压解剖型股骨颈系统固定的生物力学强度优于 DHS 联合 DS 和单纯空心螺钉固定,可以良好维持骨折端的稳定性。

2.3 DCS 固定 DCS 固定最初用于治疗股骨远端骨折和股骨髁间骨折,近年来临床应用范围广泛。DCS 除了滑动螺钉与钢板的角度设计成 95° 外,其余设计与 DHS 类似。对于垂直型股骨颈骨折,因 DCS 滑动螺钉与骨折线接近垂直,理论上可以起到动态轴向加压的作用。Freitas 等^[37]通过对人工合成的股骨头顶端施加压力发现,试验组 (使用 DCS 固定的 Pauwels III 型股骨颈骨折模型) 和对照组 (未发生骨折的人工合成股骨头模型) 股骨头与股骨颈之间出现 5 mm 及 10 mm 断裂移位时的平均载荷无明显差别,

认为采用 DCS 固定治疗股骨颈骨折可以获得良好的稳定性;但该研究采用的是人工合成骨,未考虑不同人群间的差异。DCS 在植入时需要刮除大量骨质,容易引起骨质缺损和股骨头血供破坏,可增加骨折不愈合及股骨头坏死的风险。此外,单纯采用 DCS 固定治疗股骨颈骨折,抗旋能力较差。Singh 等^[38]研究发现,锁定加压钢板与 DCS 固定治疗股骨颈骨折,DCS 的固定强度相对较弱,术后容易发生股骨头内翻畸形。关于 DCS 固定治疗股骨颈骨折的生物力学研究目前相对少见,对于 Pauwels 角小于 50° 且无骨质缺损的股骨颈骨折患者可考虑选用该法。

2.4 FNS 固定 为了提高固定强度、减少并发症,临床研制出了 FNS 固定系统,该系统主要由钢板、锁定螺钉、螺栓及抗旋螺钉等构成,具有角度稳定性及相对微创等特点,对于分离移位明显的骨折端可以起到加压固定作用。FNS 固定较 DHS 固定操作简单、切口小,且允许动力棒在钉板套筒内滑动而不向外突出,可以减少植入物对软组织的激惹,有利于减轻患者术后局部疼痛症状。Stoffel 等^[39]研究发现,FNS 固定治疗股骨颈骨折,其骨折端的稳定性与 DHS 固定及 DHS Blade 固定相当,但优于空心螺钉固定。FNS 固定系统可以通过分叉的方头螺钉产生多轴向的支撑力,能够抵抗股骨头内翻旋转及防止股骨头塌陷,且固定效果受植入物质量的影响较小^[40]。研究表明,给予股骨头多轴向的支撑可以消除部分旋转应力^[21,41]。FNS 固定治疗股骨颈骨折,虽然创伤较小,可以最大限度维持解剖复位效果、保护股骨头血供,但也存在设计上的缺陷,如螺栓上没有螺纹,需要敲击植入,容易将骨块顶出加重骨折端分离移位。

2.5 PFLP 固定 PFLP 是相对较新的内固定植入物,其治疗垂直型股骨颈骨折的固定强度优于 DCS、DHS 及空心螺钉^[42]。PFLP 固定治疗股骨颈骨折的手术失败原因较多,与患者自身骨质较差、治疗依从性不足,或钢板放置不当、缺少支撑螺钉、骨折端加压不足等因素有关^[43]。PFLP 的近端螺钉与钢板结合处容易形成应力集中,术后过早进行负重训练可增加二次骨折的风险。Viberg 等^[44]研究发现,PFLP 固定治疗股骨颈骨折的手术失败率与其他内固定方式相近。Zhang 等^[45]研究发现,PFLP 固定治疗股骨颈骨折,其骨折不愈合率高于 DHS 联合空心螺钉固定、股骨头坏死率低于 DHS 联合空心螺钉固定。

2.6 PCCP 固定 PCCP 主要由锁定钢板、颈部螺钉和骨干部螺钉组成,可以经皮植入,具有切口较小等优点,能最大程度减少股骨颈周围软组织的损伤。徐可林等^[46]研究发现,PCCP 固定治疗股骨颈骨折,术后骨折愈合时间早于空心螺钉固定。殷渠东等^[47]研究发现,PCCP 固定治疗移位明显的股骨颈骨折,在维持骨折端稳定性及滑动加压方面优于空心螺钉固定,可早期进行康复训练,有利于降低骨折不愈合及股骨头坏死的发生率。Zhu 等^[48]采用 PCCP 固定治疗股骨颈骨折患者 74 例,术后所有患者骨折均愈合,2 例出现股骨头坏死。Arirachakaran 等^[49]研究发现,PCCP 固定治疗股骨颈骨折可缩短手术时间,且并发症发生率较低。对于闭合性损伤且骨折类型为 Garden II 型及以上或囊内型股骨颈骨折患者,采用 PCCP 固定治疗,远期髋关节功能评分优良率较高^[50]。关于 PCCP 固定治疗股骨颈骨折的疗效,目前尚缺乏大样本的随机对照试验验证。

2.7 内侧支撑钢板固定 空心螺钉、DHS 及 DCS 固定治疗股骨颈骨折,均不能为股骨颈下内侧提供可以消除垂直剪切力的支撑。近年来,股骨颈内侧支撑的问题逐渐受到临床重视。内侧支撑钢板具有抗滑功能,且能为股骨颈提供有效支撑,可以为骨折愈合创造良好的环境。内侧支撑钢板固定治疗股骨颈骨折,在植入 2 枚平行螺钉后,于股骨近端内侧植入 1 块支撑钢板,可通过钢板的支撑作用将骨折断端间的垂直剪切力转化为有利于骨折愈合的压应力,可在一定程度上防止青壮年患者术后出现内固定失败^[51]。内侧支撑钢板的应力转化作用,有利于预防垂直型股骨颈骨折内固定术后股骨头塌陷及骨折不愈合等并发症。Ye 等^[52]对 28 例 60 岁以下的 Pauwels III 型股骨颈骨折患者行内侧支撑钢板联合空心螺钉固定治疗,并进行了平均 13.6 个月的随访,结果 3 例患者出现内固定失败,至末次随访时均未出现股骨头坏死;该研究结果表明,内侧支撑钢板联合空心螺钉固定治疗股骨颈骨折的并发症较少,但其远期疗效有待进一步研究。

Filipov^[53]提出了 F 型空心螺钉固定治疗股骨颈骨折,即 3 颗螺钉、双支撑点、双平面固定法,其中 1 颗螺钉倾斜角度大,与另外 2 颗螺钉处于不同的平面且植入位置更低。Tianye 等^[54]研究发现,内侧支撑钢板联合 F 型空心螺钉固定治疗股骨颈骨折,在骨

折端移位程度方面优于传统空心螺钉固定、空心螺钉联合内侧钢板固定。Galal 等^[55-56]研究发现, F 型空心螺钉固定治疗股骨颈骨折, 可使骨折端紧密结合, 术后股骨颈短缩发生率较低。内侧支撑钢板的植入位置至关重要, 若植入位置不当可破坏股骨头血供, 造成股骨头坏死; 股骨头的血液供应主要依靠旋股外侧动脉等, 术中将内侧支撑钢板放置在股骨颈前内侧可避免损伤旋股外侧动脉^[57]。术者的操作技术可影响术后股骨头坏死的发生率, 因此术中应谨慎操作。

2.8 髓内固定系统固定 髓内固定系统的固定装置较多, 主要包括重建钉及股骨近端防旋髓内钉 (proximal femoral nail antirotation, PFNA) 等。重建钉有 2 枚头钉, 抗旋能力较强, 还可防止股骨头塌陷。重建钉固定治疗股骨颈骨折容易出现头钉漂移现象 (Z 效应), 即 2 枚螺钉发生反向移位, 因此无法维持解剖复位状态。Helwig 等^[58]通过体外模型实验研究发现, 2 枚螺钉彼此相对移动是内固定失败的主要原因; 但该研究采用的模型材料均为松质骨, 未考虑不同骨密度的问题。PFNA 固定治疗股骨颈骨折, 螺旋刀片可以压实松质骨, 能够增强抗旋和抗股骨头塌陷的能力^[59]。Foss 等^[60]研究发现, 髓内固定系统治疗股骨颈骨折的出血量是髓外固定系统的 3 倍, 由此认为术前应评估股骨头的血供情况、对于股骨头血供明显破坏者不宜采用该法治疗、合并严重血液系统疾病者应慎用该法治疗。

3 青壮年股骨颈骨折内固定术的人工智能辅助技术

随着人工智能技术的发展, 智能导航技术在医疗领域的应用逐渐增多, 并从 2D 平面向 3D 成像发展, 因此放置植入物的准确性较以往增强^[61]。传统的内固定手术多在 X 线等仪器辅助下进行定位操作, 对术者的技术要求较高, 而导航机器人可以解决定位这一问题。Hamelinck 等^[62]研究发现, 在导航机器人辅助下行螺钉固定治疗股骨颈骨折, 可以准确定位植入角度, 有利于简化手术操作过程、缩短手术时间、降低出血量、减少医务人员及患者的辐射损伤。Wan 等^[63-64]研究发现, 在机器人辅助下行经皮空心螺钉固定治疗股骨颈骨折, 可实现准确定位, 有利于提高手术效率及患者术后康复率。导航机器人也存在局限性: 术前准备时间较长; 示踪剂对人体有一定影响; 骨骼的弹性形变可能会造成导针偏转^[65]。人工智能

技术虽然在医疗领域有较大的应用前景, 但仍需完善相关配套设备。

4 小 结

青壮年股骨颈骨折的内固定治疗理念在不断更新, 新型植入物也不断增多。内固定术治疗青壮年股骨颈骨折的目的是保留患者的劳动能力、改善其生活质量, 防止骨折不愈合及股骨头坏死。青壮年股骨颈骨折的内固定方式较多, 各有优缺点, 临床应根据患者的骨折类型等选择合适的固定方式。早期手术、解剖复位及坚强内固定是青壮年股骨颈骨折的治疗共识, 但目前青壮年股骨颈骨折尚无最佳治疗方式, 未来需通过大样本、多中心的随机对照临床试验进一步探究。

参考文献

- [1] SLOBOGEAN G P, SPRAGUE S A, SCOTT T, et al. Complications following young femoral neck fractures [J]. Injury, 2015, 46(3): 484-491.
- [2] PPAKOSTIDIS C, PANAGIOTOPOULOS A, PICCIOLI A, et al. Timing of internal fixation of femoral neck fractures. A systematic review and meta-analysis of the final outcome [J]. Injury, 2015, 46(3): 459-466.
- [3] BUKVA B, ABRAMOVIC D, VRGOC G, et al. Femoral neck fractures in children and the role of early hip decompression in final outcome [J]. Injury, 2015, 46 (Suppl 6): S44 - S47.
- [4] SPENCE D, DIMAURO J P, MILLER P E, et al. Osteonecrosis after femoral neck fractures in children and adolescents: analysis of risk factors [J]. J Pediatr Orthop, 2016, 36(2): 111-116.
- [5] PANTELI M, RODHAM P, GIANNODIS P V. Biomechanical rationale for implant choices in femoral neck fracture fixation in the non-elderly [J]. Injury, 2015, 46(3): 445-452.
- [6] GILLIGAN I, CHANDRAPPAK S, MAHAKKANUKRAUH P. Femoral neck - shaft angle in humans: variation relating to climate, clothing, lifestyle, sex, age and side [J]. J Anat, 2013, 223(2): 133-151.
- [7] COLLIN P G, D'ANTONI A V, LOUKAS M, et al. Hip fractures in the elderly: a clinical anatomy review [J]. Clin Anat, 2017, 30(1): 89-97.
- [8] SHIVJI F S, GREEN V L, FORWARD D P. Anatomy, classification and treatment of intracapsular hip fractures [J]. Br J Hosp Med (Lond), 2015, 76(5): 290-295.
- [9] CRIST B D, EASTMAN J, LEE M, et al. Femoral neck fractures in young patients [J]. Instr Course Lect, 2018, 67:

- 37 – 49.
- [10] HALVORSON J. Reduction techniques for young femoral neck fractures[J]. J Orthop Trauma, 2019, 33 (Suppl 1) : S12 – S19.
- [11] RAWALL S, BALI K, UPENDRA B, et al. Displaced femoral neck fractures in the young: significance of posterior comminution and raised intracapsular pressure [J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2012, 132 (1) : 73 – 79.
- [12] KIM J W, RYU J S, BAEK S, et al. The timing of bone SPECT to predict osteonecrosis after internal fixation of femur neck fractures [J]. J Orthop Sci, 2017, 22 (3) : 457 – 462.
- [13] WATANABE Y, TERASHIMA Y, TAKENAKA N, et al. Prediction of avascular necrosis of the femoral head by measuring intramedullary oxygen tension after femoral neck fracture [J]. J Orthop Trauma, 2007, 21 (7) : 456 – 461.
- [14] LIPORACE F, GAINES R, COLLINGE C, et al. Results of internal fixation of Pauwels type – 3 vertical femoral neck fractures [J]. J Bone Joint Surg Am, 2008, 90 (8) : 1654 – 1659.
- [15] SHEN M, WANG C, CHEN H, et al. An update on the Pauwels classification [J]. J Orthop Surg Res, 2016, 11 (1) : 161.
- [16] GÜMÜSTAS S A, TOSUN H B, AGIR I, et al. Influence of number and orientation of screws on stability in the internal fixation of unstable femoral neck fractures [J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2014, 48 (6) : 673 – 678.
- [17] GUIMARÃES J A M, ROCHA L R, NORONHA ROCHA T H, et al. Vertical femoral neck fractures in young adults: a closed fixation strategy using a transverse cancellous lag screw [J]. Injury, 2017, 48 (Suppl 4) : S10 – S16.
- [18] BHANDARI M, TORNETTA P 3rd, HANSON B, et al. Optimal internal fixation for femoral neck fractures: multiple screws or sliding hip screws? [J]. J Orthop Trauma, 2009, 23 (6) : 403 – 407.
- [19] BAITNER A C, MAURER S G, HICKEY D G, et al. Vertical shear fractures of the femoral neck. A biomechanical study [J]. Clin Orthop Relat Res, 1999 (367) : 300 – 305.
- [20] STACEY S C, RENNINGER C H, 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.
- [21] KOUVIDIS G K, SOMMERS M B, GIANNOUDIS P V, et al. Comparison of migration behavior between single and dual lag screw implants for intertrochanteric fracture fixation [J]. J Orthop Surg Res, 2009, 4 : 16.
- [22] STOCKTON D J, DUA K, O'BRIEN P J, et al. Failure patterns of femoral neck fracture fixation in young patients [J]. Orthopedics, 2019, 42 (4) : e376 – e380.
- [23] STOCKTON D J, LEFAIVRE K A, DEAKIN D E, et al. Incidence, magnitude, and predictors of shortening in young femoral neck fractures [J]. J Orthop Trauma, 2015, 29 (9) : e293 – e298.
- [24] 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.
- [25] SHEHATA M S A, ABOELNAS M M, ABDULKARIM A N, et al. Sliding hip screws versus cancellous screws for femoral neck fractures: a systematic review and meta – analysis [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2019, 29 (7) : 1383 – 1393.
- [26] RAZIK F, ALEXOPOULOS A S, EL – OSTA B, et al. Time to internal fixation of femoral neck fractures in patients under sixty years—does this matter in the development of osteonecrosis of femoral head? [J]. Int Orthop, 2012, 36 (10) : 2127 – 2132.
- [27] HOSHINO C M, CHRISTIAN M W, O'TOOLE R V, et al. Fixation of displaced femoral neck fractures in young adults: Fixed – angle devices or Pauwel screws? [J]. Injury, 2016, 47 (8) : 1676 – 1684.
- [28] SIAVASHI B, AALIREZAEI A, MOOSAVI M, et al. A comparative study between multiple cannulated screws and dynamic hip screw for fixation of femoral neck fracture in adults [J]. Int Orthop, 2015, 39 (10) : 2069 – 2071.
- [29] WINDOLF M, BRAUNSTEIN V, DUTOIT C, et al. Is a helical shaped implant a superior alternative to the Dynamic Hip Screw for unstable femoral neck fractures? A biomechanical investigation [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2009, 24 (1) : 59 – 64.
- [30] CHEN C, YU L, TANG X, et al. Dynamic hip system blade versus cannulated compression screw for the treatment of femoral neck fractures: A retrospective study [J]. Acta Orthop Traumatol Turc, 2017, 51 (5) : 381 – 387.
- [31] WINDOLF M, MUTHS R, BRAUNSTEIN V, et al. Quantification of cancellous bone – compaction due to DHS Blade insertion and influence upon cut – out resistance [J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2009, 24 (1) : 53 – 58.
- [32] WÄHNERT D, GUDUSHAURI P, SCHIUMA D, et al. Does cancellous bone compaction due to insertion of a blade implant influence the cut – out resistance? A biomechanical

- study[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2010, 25 (10): 1053 – 1057.
- [33] KNOBE M, ALTGASSEN S, MAIER K J, et al. Screw – blade fixation systems in Pauwels three femoral neck fractures: a biomechanical evaluation [J]. Int Orthop, 2018, 42(2): 409 – 418.
- [34] LUO D, ZOU W, HE Y, et al. Modified dynamic hip screw loaded with autologous bone graft for treating Pauwels type-3 vertical femoral neck fractures [J]. Injury, 2017, 48 (7): 1579 – 1583.
- [35] BLIVEN E, SANDRIESSER S, AUGAT P, et al. Biomechanical evaluation of locked plating fixation for unstable femoral neck fractures[J]. Bone Joint Res, 2020, 9(6): 314 – 321.
- [36] LI J, ZHAO Z, YIN P, et al. Comparison of three different internal fixation implants in treatment of femoral neck fracture – a finite element analysis [J]. J Orthop Surg Res, 2019, 14(1): 76.
- [37] FREITAS A, MACIEL R A, LIMA R DE A, et al. Mechanical analysis of femoral neck fracture fixation with dynamic condylar screw in synthetic bone [J]. Acta Ortop Bras, 2014, 22(5): 264 – 268.
- [38] SINGH A K, RASTOGI A, SINGH V. Biomechanical comparison of dynamic condylar screw and locking compression plate fixation in unstable distal femoral fractures: An in vitro study[J]. Indian J Orthop, 2013, 47(6): 615 – 620.
- [39] 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.
- [40] SCHOPPER C, ZDERIC I, MENZE J, et al. Higher stability and more predictive fixation with the Femoral Neck System versus Hansson Pins in femoral neck fractures Pauwels II [J]. J Orthop Translat, 2020, 24: 88 – 95.
- [41] SANTONI B G, NAYAK A N, COOPER S A, et al. Comparison of femoral head rotation and varus collapse between a single lag screw and integrated dual screw intertrochanteric hip fracture fixation device using a cadaveric hemi – pelvis biomechanical model [J]. J Orthop Trauma, 2016, 30(4): 164 – 169.
- [42] AMINIAN A, GAO F, FEDORIW W W, et al. Vertically oriented femoral neck fractures: mechanical analysis of four fixation techniques [J]. J Orthop Trauma, 2007, 21 (8): 544 – 548.
- [43] GLASSNER P J, TEJWANI N C. Failure of proximal femoral locking compression plate: a case series [J]. J Orthop Trauma, 2011, 25(2): 76 – 83.
- [44] VIBERG B, RASMUSSEN K M V, OVERGAARD S, et al. Poor relation between biomechanical and clinical studies for the proximal femoral locking compression plate [J]. Acta Orthop, 2017, 88(4): 427 – 433.
- [45] ZHANG Y L, CHEN S, AI Z S, et al. Osteonecrosis of the femoral head, nonunion and potential risk factors in Pauwels grade – 3 femoral neck fractures: A retrospective cohort study [J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(24): e3706.
- [46] 徐可林, 刘宇, 王建伟, 等. 经皮加压钢板固定治疗股骨颈骨折的疗效研究 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2020, 34(11): 1364 – 1368.
- [47] 殷渠东, 顾三军, 王建兵, 等. 经皮加压钢板治疗移位型股骨颈骨折的前瞻性随机对照研究 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2016, 30(8): 951 – 955.
- [48] ZHU F, LIU G, SHAO H G, et al. Treatment of femoral neck fracture with percutaneous compression plate: preliminary results in 74 patients [J]. Orthop Surg, 2015, 7(2): 132 – 137.
- [49] ARIRACHAKARAN A, AMPHANSAP T, THANINDRATARN P, et al. Comparative outcome of PFNA, Gamma nails, PCCP, Medoff plate, LISS and dynamic hip screws for fixation in elderly trochanteric fractures: a systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2017, 27(7): 937 – 952.
- [50] 李英周, 叶锋, 万蕾, 等. 改良经皮加压钢板治疗 Pauwels III 型股骨颈骨折的疗效分析 [J]. 中国骨伤, 2018, 31(2): 120 – 123.
- [51] 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.
- [52] YE Y, CHEN K, TIAN K, et al. Medial buttress plate augmentation of cannulated screw fixation in vertically unstable femoral neck fractures: Surgical technique and preliminary results [J]. Injury, 2017, 48(10): 2189 – 2193.
- [53] 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.
- [54] TIANYE L, 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.