

髓芯减压保髋手术问题与进展^{*}

王敏¹ 雷寿斌²

(1. 陆军军医大学第二附属医院骨科, 重庆 400037; 2. 毕节市第三人民医院骨科, 贵州 毕节 551700)

【摘要】 早期股骨头坏死保髋治疗一直是临床面临的难题, 保髋治疗的主要目标是改善症状, 延缓塌陷, 推迟关节置换手术时间, 其中髓芯减压术仍然是目前保髋最常用的方法。本文就髓芯减压保髋手术问题与进展做一述评, 旨在提高外科医师对其系统性认知, 并为临床治疗提供一定的参考。

【关键词】 早期股骨头坏死; 保髋手术; 髓芯减压术

【中图分类号】 R68 **【文献标志码】** A **DOI:**10. 3969/j. issn. 1672-3511. 2023. 08. 001

Advances on hip core depression

WANG Min¹, LEI Shoubin²

(1. Department of Orthopedics, The Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China;

2. Department of Orthopedics, Bijie Third Hospital, Bijie 551700, Guizhou, China)

【Abstract】 The treatment of hip preservation for early femoral head necrosis has always been a difficult problem in clinic. The main objective of clinical treatment is to reduce symptoms, delay collapse and delay hip replacement surgery. Core decompression is still the most commonly used surgical method. This paper reviews the problems and progress of coxa preservation surgery with core decompression in order to improve the systematic cognition of surgeons and provide some reference for clinical treatment.

【Key words】 Early necrosis of femoral head; Hip preservation surgery; Core decompression

股骨头坏死(Osteonecrosis of the femoral head, ONFH)是一个世界性的难治性疾病,我国是 ONFH 患病人数最多的国家,且数量仍在增长^[1-2]。酗酒、激素及外伤是 ONFH 前 3 位的致病因素,所致 ONFH 占 90%以上^[2-3];ONFH 的病理机制是股骨头内血管内皮损伤以及脂肪栓塞导致股骨头内高压,这与 40 年前认识是一样的^[4]。由于 ONFH 研究技术较困难,

目前其分子生物学机理仍无进展^[5]。早期 ONFH 保髋治疗一直是临床面临的难题,保髋的主要目标是改善症状,延缓塌陷,推迟髋关节置换手术时间,其中髓芯减压术仍然是目前最常用的治疗方法。近些年出现许多改良髓芯减压术,包括多通道减压、自体或异体骨、带血管或不带血管骨移植,钽棒等新材料,辅助各种活性细胞、成骨活性蛋白等,但均遵循清除坏死骨、提供结构性支撑、促进骨再生的三大基本理论。对股骨头负重区提供结构性支撑,促进成骨是改良手术最重要的目标,但目前各种方法效果差异较大,本文就髓芯减压保髋手术问题的最新研究做一阐述。

1 髓芯减压术

股骨头内静脉回流受阻引起髓腔压力过大,从而导致股骨头坏死^[6],这是 70 年前 Phemister 发明并沿用至今的髓芯减压理论基础^[7]。1962 年法国医师 Arlet 和 Ficat 在对早期患者行股骨头骨组织活检时意外发现术后疼痛很快减轻,也因此从该活检术中衍生出治疗 ONFH 的方法,称为股骨头髓芯减压术。

基金项目:重庆市科卫联合项目(2020C069);毕节市科学技术项目(毕科合重大专项[2022]1号)

执行编委简介:王敏,陆军军医大学第二附属医院骨科教授,主任医师,博士生导师,从事关节外科、矫形外科、骨肿瘤外科临床工作近 30 年,主要研究领域为人工髋、膝关节置换术、骨关节外伤的治疗、骨肿瘤的外科治疗、矫形外科手术。承担并参与国家级、军队、省部级课题 10 余项,发表 SCI 论文 30 余篇,获批发明专利 10 余项。现任中国人民解放军第九届骨科专委会关节镜与运动医学分会战区学组委员、全军足踝外科专委会委员、全军肿瘤学组委员。E-mail:52solar@sina.cn

引用本文:王敏,雷寿斌. 髓芯减压保髋手术问题与进展[J]. 西部医学, 2023, 35(8): 1093-1097. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3511. 2023. 08. 001

Roth 等^[8]归纳总结 159 个研究后认为髓芯减压术可以有效治疗面积小于 30% 的股骨头坏死,并写入德国股骨头坏死治疗指南;但是在临床实践中发现,髓芯减压术成功率并不是很高,单纯的髓芯减压效果并不理想,原因是骨再生困难、定位不准、清除不彻底、适应症窄、容易骨折等。随着人工关节外科技术的发展,中晚期股骨头坏死的治疗方法基本被髋关节置换替代,而早期股骨头坏死由于患者往往较年轻,活动量大,失败风险高,仍然积极寻求保髋治疗,改进髓芯减压术是目前研究最多的方向之一。

2 改良的髓芯减压术

2.1 减压通道直径与数量 单一隧道减压既要植骨又要植入不吸收或不易吸收的支撑物,植骨量和支撑强度也互相矛盾,因此出现多隧道髓芯减压方法,比如将传统的单通道减压改为创伤更小的多通道减压;髓芯减压术根据针的粗细不同可分为直径 3~4 mm 细针和直径 8~10 mm 粗针进行钻孔减压。Mont^[9]发现多隧道减压可以解决单通道定位不准问题,试用多通道(蜂巢式)髓芯钻孔减压术,用 3 mm 钻减压治疗 45 例患者,2 年后 70% 的患者 HHS 评分在良好以上。Moon 等^[10]在此基础上植入直径 5 mm 的火柴棒样异体骨,虽然植入困难,容易撤断,但有效率达到了 68.1%。Yue 等^[11]为解决单一隧道既植骨又植支撑物的矛盾,改单一骨隧道为双隧道,植骨和支撑(n-HA/PA66,纳米羟基磷灰石聚酰胺-66 棒)分别在各自的隧道完成,认为不用彻底清除坏死骨组织(极具争议的观点),因为余下的坏死骨有助于避免头的塌陷,但是两个 10 mm 直径的骨隧道对头颈的创伤依然很大。Song 等^[12]认为多通道减压形成蜂窝状的通道结构,各通道间保留壁样支撑结构,预防减压后局部塌陷,这是多通道减压的另一个优势。何国忠等^[13]也报道双孔径减压在两孔间有骨性组织相连接,较单通道大孔径减压对股骨颈生物力学性能影响小,证明多通道比大直径单通道手术骨折风险更小。

2.2 数字化技术 有研究引进数字化技术解决辅助髓芯减压术针对术中定位不准确、反复透视、增加手术时间及术中出血量的问题^[14]。郭晓忠^[15]利用 CT 导航辅助技术对 39 个股骨头坏死精准髓芯减压,而 Kerimaa 等^[16]则利用 MRI 导航术中定位股骨头坏死,认为术中确定坏死边缘更有优势。陈冬冬等^[17]应用 3D 打印定位模块保证减压的准确性,提高 ARCO II 期非创伤性股骨头坏死的疗效,但是该方法需要开放手术放置 3D 模块,创伤仍然很大。Wang 等^[18]应用增强现实技术开发了一套术中导航系统,该手术系统可以直观显示手术区域的解剖情况。但是这些技

术不能解决导针手工操作的不便和误差,因此 Bi 等^[19]利于 TiRobotTM 机器人代替医师植入导针、减压等工作,可以避免人工操作带来的位置偏移。Theopold 等^[20]不仅应用导航技术,同时辅助髋关节镜进行多通道髓芯减压,能够比较彻底地清除坏死组织并充分植骨,术中需要做关节镜切口。数字化技术确实给手术定位带来更高的精准性,可操作性也强,但更重要的坏死病灶精准刮除工作并无进展,存在很多技术上的难题,比如定位后如何在狭小的空间内刮除坏死组织,如何在狭小的空间内有效植骨等,部分专利试图解决该问题,但是由于操作上的问题,临床均未广泛使用。

髓芯减压术可以获得短期的疼痛缓解或影像上的某些再生现象,但长期的结果并不令人满意。Liu 等^[21]发现多通道髓芯减压方法不能扭转股骨头坏死接受全髋置换的命运,和未干预患者相比,10 年随访发现股骨头的存活率分别为 67.5 和 60.9%,该研究发现多通道减压患者中有 21.4% 的患者最终进行了关节置换,未做治疗干预组有 18.9% 的患者进行了关节置换术,不管坏死量大于或小于 30%,也不论患者是否做多通道减压术,最后做关节置换的比例无著差异,甚至推迟全髋置换手术的时间优势也无差异。Yoon 等^[22]通过网络 Meta 分析法也发现同样结果,随访期内关节置换比例以及股骨头塌陷进程并未得到改善。有研究认为目前某些研究统计学方法科学性不强,早期小面积的股骨头坏死并不需要外科干预自然会好转,其术后好转不是髓芯减压的结果而是自然病程却统计在髓芯减压的成功率上,因此,小面积头坏死早期髓芯减压手术是否合理仍有待讨论^[23]。

3 结构支撑

减压后结构性支撑材料是否坚强是髓芯减压术成功与否的重要因素,改良支撑材料也较多,目前的支撑材料主要有骨、合金材料、合成材料等。

3.1 骨移植 1949 年 Phemister 首先报道了髓芯减压加上腓骨移植重建的方法,该方法至今已 70 余年,减压后骨隧道骨移植包括自体、异体骨移植,游离骨块或带血管蒂,成功率在 80% 左右。目前成功率最高的是 Feng 等^[24]报道的一组病例,大转子肌骨瓣,随访 9.2 年,成功率高达 92.9%。Yildiz 等^[25]报道的成功率最低,4.4 年随访结果仅为 71%;而病例数最多的是 Zhao 团队,共 2190 例患者纳入研究,平均 12 年随访,成功率为 82%^[26]。带血管腓骨以及大转子肌骨瓣是目前应用最多的血管重建方法,Ünal 等^[27]报道 26 例带血管腓骨患者 7.6 年以后有 21 例 HHS 评分大于 80。

但是 Xie 等^[28]认为血管重建骨移植手术创伤大, 难度高, 骨坏死区仍然需要额外植骨填补; 术后血管再通率与移植骨转归证据不足, 血循环是否再建立不清, 同时不融合、退棒、感染、坏死情况多有报道, 供体侧容易出现并发症, 比如骨折、腓长屈肌挛缩、腓总神经损伤、步态异常等等, 高达 13%~20%^[29]。Kerimaa 等^[16]对 36 例标准髓芯减压和 40 例辅助腓骨植骨患者 53.5 个月的随访发现, 影像上两者无差异, 无论是从自体髂骨、粗隆间、或其他部位取出的松质骨, 其自带的成骨细胞就算全部成活, 其数量和质量也并不是以修复局部坏死灶, 局部短期支撑, 爬行替代等作用有限, 血循环重建证据不足, 面临极大吸收降解失效的风险^[30]。因此不管是否带血管蒂, 自体或者异体, 目前临床效果仍具争议, 并未形成共识。

3.2 钽金属材料 钽棒具有足够的支撑强度和良好的皮质骨弹性模量, 同时还具有骨小梁结构, 利于骨形成, 并具有很好的抑菌性能成为植入材料研究的新方向。目前髓芯减压联合钽棒植入的临床疗效结果各异, Onggo 等^[31]对 550 例钽棒植入患者的 Meta 分析发现, 钽棒术后临床效果满意, 3.1 年随访期 HHS 评分术后平均提高 30.4%, 77.9% 的患者影像表现稳定, 随访期内 15.8% 的患者进行了髋置换, 而单纯髓芯减压是 34%, 如果钽棒加植骨是 18%^[32]; 但是 Zhang 等^[33]对 42 例 52 个髋钽棒植入患者 85.7 个月的随访发现, 46.2% 患者进行了全髋置换, 长期效果并不满意; Ma 等^[34]对 104 例 ARCO II~III 级股骨头坏死患者髓芯减压加钽棒, 平均随访 43 个月发现成功率仅 53%; 且有研究表明, 钽棒植入后增加了患者后期行全髋关节置换的并发症, 即使仔细取出钽棒也会有金属碎屑残留周围组织中, 增加了骨溶解的风险^[35]。目前钽棒不作为早期股骨头坏死保髋治疗的首选, 无临床证据说明钽棒可以扩大应用到 ARCO II~III 级股骨头坏死的保髋治疗。

3.3 膨胀材料 除了支撑棒, 另外还有膨胀材料也在同期研究中。王岩团队研发的 Ni-Ti 记忆合金网球植入支撑方法已经有 25 年历史, 需要开放手术植入, 创伤较大^[36]。Yu 等^[37]发明的伞状网球可以经髓芯减压通道置入, 而不需要开放切口置入, 大小与头减压洞相匹配。Lin 等^[38]应用一种灯笼样螺钉, 类似于 DHS, 是减压、钢板、支撑三结合的发明, 结合自体骨移植, 1.5 年观察结果显示 88% 的患者影像结果好于对照组。杨德金等^[39]设计的多孔钛金属笼 (AVN CAGE) 微孔结构提供骨长入界面, 宏观小孔提供减压和成骨通道, 空腔内可植骨、防退钉、不影响后期髋置换手术, 1.5 年随访保髋成功率 (未接受 THA) 为

98%, 包括 9 例 ARCO III A 期病例, 均好于 Auréan 等^[40]总结的成功率。从理论上讲, 这类膨胀材料具有头复原等优点, 适用范围大, 可用于头完全塌陷的患者, 但临床应用发现失败率依然较高, 骨再生修复能力不强, 可能和手术创伤大, 骨微循环难以建立有关。这种试图通过物理方法复原股骨头形态的方法, 远期效果依然难以令人满意, 膨胀形成的空腔内如果不能骨再生, 髓巨大的负重压力会直接导致手术失败。

3.4 其他材料 除钽金属外, 还有其他金属材料制成的支撑棒或棒样结构, Wang 等^[41]用金属钛通过 3D 技术, 按照骨小梁结构打印钛棒作为支撑材料; Katiella^[42]用镁棒作为支撑材料, 结合骨形态蛋白取得一定临床效果, 但总体效果都缺乏根本的提升; 张庆胜等^[43]利于羟基磷灰石制作髋金属笼; Yue 等^[11]采用纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 支撑棒双通道治疗股骨头坏死, 这种材料结合有机结合了生物相容性和强度, 而且取出时不会残留金属碎屑; 陈冬冬等^[17]等用 β -磷酸三钙 (生物陶瓷棒) 支撑治疗 ARCO II 期股骨头坏死, 认为具有良好的机械性能和生物相容性, 其降解时间和骨形成时间相吻合; Li 等^[44]用有限元方法研究证明生物陶瓷棒在头坏死体积少于 15%、塌陷深度小于 2 mm 的情况下能提供足够的支撑和坏死区结构稳定; Lu 等^[45]证明该材料可以引导大转子和股骨颈部位丰富的血运到股骨头区域。这些材料的研发拓展了股骨头早期坏死保髋治疗的思路, 但目前临床效果仍然不尽如意, 提升效果不显著, 骨再生和微循环的建立还缺乏足够的证据。

4 小结

髓芯减压术依然是目前可行的一种保髋治疗方法, 但其疗效不稳定, 成功率不高, 面临的临床问题仍然很多。数字技术辅助坏死区域定位是比较成熟的技术, 但是需要配合新型坏死组织清除工具的开发才能取得新的成功。目前支撑材料的问题是支撑点与坏死面接触面小, 需要进一步的理论支持。当代技术已经做到材料结构仿生和材料强度仿生, 结合骨诱导、血管再生因子、干细胞等可以促进骨再生, 但是局部微循环的建立仍然是一个难题, 导致骨再生效果不理想, 需要进一步的研究。因此, 髓芯减压保髋手术需要进一步的研究和改进, 以解决目前面临的临床问题, 提高治疗效果和成功率。

【参考文献】

- [1] MONT M A, SALEM H S, PIUZZI N S, *et al.* Nontraumatic Osteonecrosis of the Femoral Head: Where Do We Stand Today?: A 5-Year Update[J]. J Bone Joint Surg Am, 2020, 102

- (12):1084-1099.
- [2] LARSON E, JONES L C, GOODMAN S B, *et al.* Early-stage osteonecrosis of the femoral head: where are we and where are we going in year 2018? [J]. *Int Orthop*, 2018, 42 (7): 1723-1728.
 - [3] LESPASIO M J, SODHI N, MONT M A. Osteonecrosis of the Hip: A Primer[J]. *Perm J*, 2019, 23:18-100.
 - [4] KAWAI K, TAMAKI A, HIROHATA K. Steroid-induced accumulation of lipid in the osteocytes of the rabbit femoral head. A histochemical and electron microscopic study[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1985, 67(5):755-763.
 - [5] LIAO W, NING Y, XU H J, *et al.* BMSC-derived exosomes carrying microRNA-122-5p promote proliferation of osteoblasts in osteonecrosis of the femoral head[J]. *Clin Sci (Lond)*, 2019, 133(18):1955-1975.
 - [6] WANG Y, LI Y, MAO K, *et al.* Alcohol-induced adipogenesis in bone and marrow: a possible mechanism for osteonecrosis[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2003, (410):213-224.
 - [7] PHEMISTER D B. Treatment of the necrotic head of the femur in adults[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1949, 31A(1):55-66.
 - [8] ROTH A, BECKMANN J, BOHNDORF K, *et al.* S3-Guide-line non-traumatic adult femoral head necrosis[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2016, 136(2):165-174.
 - [9] MONT M A, RAGLAND P S, ETIENNE G. Core decompression of the femoral head for osteonecrosis using percutaneous multiple small-diameter drilling [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2004, (429):131-138.
 - [10] MOON J K, YOON J Y, KIM C H, *et al.* Multiple drilling and multiple matchstick-like bone allografts for large osteonecrotic lesions in the femoral head: an average 3-year follow-up study [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2020, 140(11):1655-1663.
 - [11] YUE J, GUO X, WANG R, *et al.* Preliminary report of the outcomes and indications of single approach, double-channel core decompression with structural bone support and bone grafting for osteonecrosis of the femoral head[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2022, 23(1):198. doi: 10.1186/s12891-022-05149-4.
 - [12] SONG W S, YOO J J, KIM Y M, *et al.* Results of multiple drilling compared with those of conventional methods of core decompression[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2007, 454:139-146.
 - [13] 何国忠, 庞清江, 陈先军, 等. 股骨头钻孔减压对股骨头生物力学影响的实验研究[J]. *现代实用医学*, 2013, 25(10):1109-1111.
 - [14] BECKMANN J, TINGART M, PERLICK L, *et al.* Navigated drilling for femoral head necrosis. Experimental and clinical results[J]. *Orthopade*, 2007, 36(5):458-465.
 - [15] 郭晓忠, 岳聚安, 李兵. 导航技术在股骨头坏死减压植骨中的应用研究[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2022, 15(6):411-416.
 - [16] KERIMAA P, VÄÄNÄNEN M, OJALA R, *et al.* MRI-guidance in percutaneous core decompression of osteonecrosis of the femoral head[J]. *Eur Radiol*, 2016, 26(4):1180-1185.
 - [17] 陈冬冬, 郝阳泉, 张高魁, 等. 3D打印导航模板辅助髓芯减压植骨治疗 ARCO II 期非创伤性股骨头坏死[J]. *中国组织工程研究*, 2020, 24 (27): 4322-4327.
 - [18] WANG Q, WANG Q, DING R, *et al.* Augmented Reality Navigation-Guided Core Decompression for Osteonecrosis of Femoral Head [J]. *J Vis Exp*, 2022, (182). doi: 10.3791/63806.
 - [19] BI B, ZHANG S, ZHAO Y. The effect of robot-navigation-assisted core decompression on early stage osteonecrosis of the femoral head[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1):375. doi: 10.1186/s13018-019-1437-x.
 - [20] THEOPOLD J, ARMONIES S, PIEROH P, *et al.* Nontraumatic avascular necrosis of the femoral head : Arthroscopic and navigation-supported core decompression [J]. *Oper Orthop Traumatol*, 2020, 32(2):107-115.
 - [21] LIU Z, YANG X, LI Y, ZENG W N, *et al.* Multiple drilling is not effective in reducing the rate of conversion to Total hip Arthroplasty in early-stage nontraumatic osteonecrosis of the femoral head: a case-control comparative study with a natural course [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22 (1):535. doi: 10.1186/s12891-021-04418-y.
 - [22] YOON B H, LEE Y K, KIM K C, *et al.* No differences in the efficacy among various core decompression modalities and non-operative treatment: a network meta-analysis[J]. *Int Orthop*, 2018, 42(12):2737-2743.
 - [23] JAGADALE V S, CHENG E Y. Causes of Pain in Early and Advanced Stage Osteonecrosis[M/OL]//KOO K H, MONT M A, JONES L C. Osteonecrosis[M]. Berlin: Heidelberg, 2014: 165-171. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35767-1_21.
 - [24] FENG W, CHEN J, WU K, *et al.* A comparative study of cortico-cancellous iliac bone graft with or without the combination of vascularized greater trochanter flap for the management of femoral head osteonecrosis: a minimum 6 years follow-up[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1):298. doi: 10.1186/s12891-019-2613-1.
 - [25] YILDIZ C, ERDEM Y, KOCA K. Lightbulb technique for the treatment of osteonecrosis of the femoral head[J]. *Hip Int*, 2018, 28(3):272-277.
 - [26] ZHAO D, XIE H, XU Y, *et al.* Management of osteonecrosis of the femoral head with pedicled iliac bone flap transfer: A multi-center study of 2190 patients[J]. *Microsurgery*, 2017, 37 (8): 896-901.
 - [27] ÜNAL M B, CANSÜ E, PARMAKSI ZOĞLU F, *et al.* Treatment of osteonecrosis of the femoral head with free vascularized fibular grafting: results of 7.6-year follow-up[J]. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 2016, 50(3):323-329.
 - [28] XIE H, WANG B, TIAN S, *et al.* Retrospective Long-Term Follow-Up Survival Analysis of the Management of Osteonecrosis of the Femoral Head With Pedicled Vascularized Iliac Bone Graft Transfer[J]. *J Arthroplasty*, 2019, 34(8):1585-1592.
 - [29] HOUDEK M T, BAYNE C O, BISHOP A T, *et al.* The outcome and complications of vascularised fibular grafts[J]. *Bone Joint J*, 2017, 99-B(1):134-138.
 - [30] HERNIGOU P, BEAUJEAN F, LAMBOTTE J C. Decrease in the mesenchymal stem-cell pool in the proximal femur in corticosteroid-induced osteonecrosis[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1999, 81 (2):349-355.

- [31] ONGGO J R, NAMBIAR M, ONGGO J D, *et al.* Outcome of tantalum rod insertion in the treatment of osteonecrosis of the femoral head with minimum follow-up of 1 year: a meta-analysis and systematic review[J]. *J Hip Preserv Surg*, 2020,7(2):329-339.
- [32] HUA K C, YANG X G, FENG J T, *et al.* The efficacy and safety of core decompression for the treatment of femoral head necrosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019,14(1):306. doi: 10.1186/s13018-019-1359-7.
- [33] ZHANG Y, CHEN W, YANG Z, *et al.* Porous tantalum implant for treatment of early-stage osteonecrosis of the femoral head: a minimum 5-year follow-up study[J]. *BMC Surg*, 2021, 21(1):360. doi: 10.1186/s12893-021-01352-7.
- [34] MA J, SUN W, GAO F, *et al.* Porous Tantalum Implant in Treating Osteonecrosis of the Femoral Head: Still a Viable Option? [J]. *Sci Rep*, 2016,6:28227. doi: 10.1038/srep28227.
- [35] LOHMANN C H, SINGH G, WILLERT H G, *et al.* Metallic debris from metal-on-metal total hip arthroplasty regulates periprosthetic tissues[J]. *World J Orthop*, 2014,5(5):660-666.
- [36] 柴伟,王岩,王志刚,等. 记忆合金网球治疗成人股骨头缺血性坏死[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2008,22(2):239-241.
- [37] YU X, JIANG W, PAN Q, *et al.* Umbrella-shaped, memory alloy femoral head support device for treatment of avascular osteonecrosis of the femoral head[J]. *Int Orthop*, 2013,37(7):1225-1232.
- [38] LIN D, WANG L, YU Z, *et al.* Lantern-shaped screw loaded with autologous bone for treating osteonecrosis of the femoral head[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2018,19(1):318. doi: 10.1186/s12891-018-2243-z.
- [39] 杨德金,郭邵逸,邓旺,等. 多孔钛金属笼(AVN CAGE)保髋治疗早期股骨头坏死的短期疗效[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2022,15(6):417-423.
- [40] AURÉAN J C, VILLAIN B, BÉGUÉ T. What is the rate of patients undergoing a total hip arthroplasty after core decompression and insertion of a tantalum rod in osteonecrosis of the femoral head: a systematic review[J]. *Int Orthop*, 2018,42(7):1631-1638.
- [41] WANG C, XIE Q, YANG L, *et al.* A 3D printed porous titanium alloy rod with biogenic lamellar configuration for treatment of the early-stage femoral head osteonecrosis in sheep [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2020,106:103738. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103738.
- [42] KATIELLA K A, YANRU Z, HUI Z. Magnesium alloy transfected BMSCs-BMP-2 composite in repair of femoral head necrosis with assessment of visceral organs[J]. *Springerplus*, 2016,5(1):1857. doi: 10.1186/s40064-016-3472-y.
- [43] 张庆胜,闫广辉,靳宪辉,等. 髓芯减压植骨结合髂金骨笼置入治疗早期非创伤性股骨头坏死的短期疗效观察[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2017,14(1):36-38.
- [44] LI B, HU R, SUN L, *et al.* A CARE-compliant article: Biomechanics of treating early-stage femoral-head osteonecrosis by using a β -tricalcium phosphate bioceramic rod system: a 3-dimensional finite-element analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(25):e10808. doi: 10.1097/MD.00000000000010808.
- [45] LU Y, LU X, LI M, *et al.* Minimally invasive treatment for osteonecrosis of the femoral head with angioconductive bioceramic rod[J]. *Int Orthop*, 2018,42(7):1567-1573.
- (收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-07-07;编辑:黎仕娟)