

骨水泥用于治疗老年肱骨近端骨折的研究进展

阿更增¹, 唐彩霞², 汪庚申^{3*}

¹武威市人民医院, 急诊科, 甘肃 武威

²武威市人民医院, 眼科, 甘肃 武威

³武威市人民医院, 骨科, 甘肃 武威

收稿日期: 2023年5月13日; 录用日期: 2023年6月7日; 发布日期: 2023年6月16日

摘要

肱骨近端骨折通常采用切开复位钢板内固定治疗。老年患者由于骨质疏松使得螺钉锚固困难, 这导致老年肱骨近端骨折患者的并发症发生率和翻修率仍然很高。事实上, 理想的内固定方式不仅要有足够的柔性来卸载骨-种植体界面的相互作用力, 而且要有足够的生物力学强度来减少骨折断端的移动。骨水泥与钢板和其他固定技术相结合, 已被提出作为骨质疏松性肱骨近端骨折治疗的替代方法。本文的目的是分析骨水泥在骨质疏松性肱骨近端骨折患者中的临床应用。

关键词

肱骨近端骨折, 骨水泥, 内固定

Research Progress in the Treatment of Proximal Humerus Fracture with Bone Cement in Elderly Patients

Gengzeng A¹, Caixia Tang², Gengshen Wang^{3*}

¹Department of Emergency, Wuwei People's Hospital, Wuwei Gansu

²Department of Ophthalmology, Wuwei People's Hospital, Wuwei Gansu

³Department of Orthopedics, Wuwei People's Hospital, Wuwei Gansu

Received: May 13th, 2023; accepted: Jun. 7th, 2023; published: Jun. 16th, 2023

Abstract

Proximal humerus fractures are usually treated with open reduction plates and internal fixation.

*通讯作者。

文章引用: 阿更增, 唐彩霞, 汪庚申. 骨水泥用于治疗老年肱骨近端骨折的研究进展[J]. 临床医学进展, 2023, 13(6): 9495-9501. DOI: 10.12677/acm.2023.1361329

The complication rate and revision rate in elderly patients with proximal femoral fractures remain high due to the difficulty of screw anchorage due to osteoporosis. In fact, the ideal internal fixation is not only flexible enough to release the forces at the bone-implant interface, but also biomechanical strong enough to reduce the movement of the fracture end. Bone cement, in combination with plates and other fixation techniques, has been proposed as an alternative treatment for osteoporotic proximal humerus fractures. The objective of this study was to analyze the clinical application of bone cement in patients with osteoporotic proximal humerus fractures.

Keywords

Proximal Humeral Fractures, Bone Cement, Internal Fixation

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

随着全球老年人口的快速增长, 肱骨近端骨折的发病率也在不断增加[1]。在老年人群中, 股骨近端骨折被认为是第四大常见住院原因, 占老年脆性骨折总发生率的三分之一[2]。

关于治疗骨质疏松性肱骨近端骨折的最佳固定策略尚未达成共识。既往研究中提出了不同的固定技术, 包括髓内钉、锁定钢板、钢丝张力带和关节置换术, 但理想的方法尚未确定[3] [4]。锁定钢板加螺钉固定被认为是最合适的固定方法, 特别是对于粉碎程度大的骨折患者, 但既往文献报道的并发症发生率仍高达 49% [5] [6] [7]。内固定松动率达 14%~22.2%, 翻修率高达 29% [8] [9]。螺钉穿出和肱骨头内翻塌陷是最常见的并发症[10]。

患者骨密度降低和缺乏内侧支撑是治疗失败的两个主要原因[11] [12]。低骨密度使得螺钉锚固困难, 此时内固定的稳定性、骨与内植物界面的生物力学效应并不稳定。Gardner 等人首先描述了缺乏内侧支撑与骨折固定后复位丧失之间的关系[13]。Jung 等人的研究同样认为获得内侧支持是预防骨折术后并发症的重要原因[14]。为了解决这些问题, 既往的临床和生物力学研究致力于寻找加强钢板固定的方法。自体骨和同种异体骨被用来增强骨质疏松性骨折后内侧支撑的强度从而达到加强固定的目的。尽管文献中报道了令人鼓舞的骨愈合率和良好的临床结果, 但诸多局限性限制了这些方法在临床上的广泛应用(自体骨相关并发症、其可获得性、同种异体骨的高成本) [15] [16]。基于此, 骨水泥与钢板和其他固定技术相结合, 已被用于作为骨质疏松性肱骨近端骨折增强术的替代治疗方法。

本文的目的是分析骨替代物骨水泥在骨质疏松性肱骨近端骨折患者中的临床应用。

2. 人工骨替代物 - 骨水泥

用于增强生物力学强度的理想生物材料的性能应包括机械性能(空隙填充能力、结构支持和固定增强)和生物学性能(骨导电性、骨诱导性、成骨性)。然而, 在临床实践中, 没有一种生物材料能完全涵盖所有这些特征。治疗肱骨近端骨折时, 临床上使用的骨替代品主要是可注射的骨水泥, 不同的骨水泥类型在力学和生物学特性上各不相同[17] [18] [19]。如表 1 所示。

2.1. PMMA 骨水泥

PMMA 骨水泥即聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥, PMMA 骨水泥 20 世纪 30 年代首次被医生应用为牙科医

Table 1. Mechanical and biological characteristics of different types of cement
表 1. 不同类型骨水泥力学及生物学特性

| 骨水泥类型 | 抗压强度 | 密度 | 吸收时间 | 骨传导性 | 体温下凝结时间 |
|----------|------------|------------------------------|--------|------|------------|
| PMMA 骨水泥 | 85~110 MPa | 1.18 mg/mm ³ | - | 不传导 | 9~15 min |
| 磷酸钙骨水泥 | 36~66 MPa | 1.29~1.78 mg/mm ³ | 6月~10年 | 低 | 4.5~10 min |
| 硫酸钙骨水泥 | 10~40 MPa | ≈ 2 mg/mm ³ | 6周~3月 | 中 | 5~11 min |

用材料[20]。Kiaer 和 Haboush 两位学者分别在 1952 年和 1953 年报道了在股骨头置换术中应用 PMMA 骨水泥达到黏合骨与假体的工作[21] [22]。其在骨科手术的应用已有 70 余年的历史，帮助骨科医师成功开展人工关节置换、脊柱经皮穿刺椎体成形术(percutaneous vertebroplasty, PVP)、球囊扩张椎体后凸成形术(percutaneous kyphoplasty, PKP)等多种手术，临床效果明显[23]。传统认为 PMMA 骨水泥具有以下一系列的优点：① 优良的外形可塑性，在骨水泥凝固之前，操作者可以进行任意塑形；② 材料安全性能较好，在体内成形后不被人体降解和吸收；③ 化学结构稳定，力学性能得到认可。同时，PMMA 骨水泥也存在以下的一些缺点：① PMMA 在聚合阶段能达到 100℃ 的高温，这可能会导致骨和软骨坏死以及造成内固定物松动[24]。② 骨水泥渗漏可能带来的一定程度的细胞毒性。以及骨水泥在骨折部位的聚合导致骨愈合迟缓[25]。③ PMMA 骨水泥为生物惰性材料，与人体骨组织结合紧密性较差，容易引起假体松动[26]。④ PMMA 骨水泥成品的力学机械强度较大容易引起邻近椎体的骨折。⑤ PMMA 是生物惰性材料，不具有骨诱导特性，也不被骨整合和重吸收。

既往有三项研究报告了 PMMA 骨水泥用于治疗老年骨质疏松性肱骨近端骨折。共涉及 96 例患者，平均年龄 75.86 岁(64~92 岁)，手术医师使用 PMMA 骨水泥旨在强化螺钉与骨接触面的把持力从而达到坚强固定的目的。在这三项研究中，术者用空心螺钉将骨折固定在钢板上，然后用注射器将 0.5~1 ml 的 PMMA 骨水泥通过空心螺钉注入。PMMA 在体温下凝结时间为 15 min，固化后抗压强度在 85 MPa 左右。Katthagen 等人[27]在 2018 年进行的研究前瞻性纳入了 24 例使用 PMMA 骨水泥强化的肱骨近端骨折的老年患者。作者将 24 名使用 PMMA 骨水泥强化的患者设置为强化组，将未使用 PMMA 骨水泥强化的 24 名患者设置为对照组，研究结果显示在对照组中，早期复位丢失的风险显著增加($p = 0.037$)，4 名患者(16.6%)在术后 6 个月内发生螺钉穿出。在强化组中，没有观察到螺钉穿出复位丢失等并发症，但有 2 例(8%)患者出现了生物学并发症(一例肱骨头缺血性坏死和一例骨不连)。术后 12 月，作者使用 CONSTANT 评分评定患者上肢功能，强化组的 CONSTAN 平均分为 72.9 ± 18.1 分，对照组的平均分为 73.0 ± 13.1 分，差异无统计学意义($p = 0.62$)。Siebenburger 等人[28]在 2019 年报道了一项回顾性研究，其中 55 名肱骨近端骨折患者单纯使用锁定钢板加螺钉治疗，39 例患者在锁定钢板加螺钉的基础上采用 PMMA 骨水泥强化治疗。强化组的平均 CONSTAN 分为 63.7 分，对照组的 CONSTAN 平均分为 62.6 分。在临床结果方面，对照组的总并发症发生率为 16.3%，强化组为 12.8% ($p = 0.086$)。复位丢失发生率为 10.9% 比 5.1% ($p = 0.074$)。然而，这些差异没有统计学意义。Hengg 等人[29]在一项多中心随机对照试验中，招募了 67 例 65 岁以上的不稳定骨质疏松性肱骨近端骨折患者。他们比较了未经强化的 PHILOS 钢板加螺钉(对照组，34 名患者)和经 PMMA 骨水泥强化的 PHILOS 钢板加螺钉(强化组，33 名患者)治疗肱骨近端骨折后第一年内机械故障的风险。总共有 9 名患者(13.4%)在治疗后的一年内出现机械故障(9 名复位丢失，4 名肱骨头嵌塞，1 名螺钉/钢板松动，5 名继发性螺钉穿出)。作者未发现两个研究组在机械故障发生率方面有统计学上的显著差异(强化组为 16.1%，对照组为 14.8%)。与对照组相比，强化组的相对危险度为 1.09 ($p = 1000$)。强化组的 CONSTAN 得分为 66.6 分，对照组为 64.4，差异无统计学意义($p = 0.665$)。此外，在 1

年的随访中, 各组之间的不良事件没有统计学上的显著差异。

2.2. 磷酸钙水泥

磷酸钙骨水泥是创伤外科中最常用的骨替代物, 主要用于填充干骺端骨空隙, 特别适用于胫骨平台骨折[30]。目前临床上主要采用将磷酸钙骨水泥直接置入肱骨头或通过空心螺钉进行骨螺钉界面的强化[31]。与 PMMA 骨水泥相比, 磷酸钙骨水泥的固化温度较低, 磷酸钙骨水泥可以在 6 个月到 10 年内被再吸收并被松质骨取代。相比于 PMMA 骨水泥, 磷酸钙水泥的潜在缺点之一是其抗压强度较低(36~66 MPa)。然而, 磷酸钙骨水泥已被广泛用于填补胫骨平台和椎体骨折的软骨下空隙, 即使患者在完全负重后也表现出了良好的抗压强度。考虑到肱骨近端不像胫骨近端、椎体那样受到轴向压缩载荷, 磷酸钙骨水泥被认为足以支撑肱骨干骺端骨折的力学稳定性[32]。值得注意的是由于磷酸钙缺乏骨传导性。因此, 应避免注射大量磷酸钙骨水泥。已免对骨愈合过程构成障碍。

两项研究报告了注射磷酸钙骨水泥强化治疗肱骨近端骨折的结果, 共 52 例患者, 平均年龄 64.1 岁(22~84 岁)。2003 年, Robinson 等人[33]用支撑钢板或空心螺钉加注射磷酸钙骨水泥强化术治疗了 25 例肱骨近端移位严重的骨折患者。术者采用的磷酸钙骨水泥符合材料抗压强度为 50 MPa, 是松质骨的 4~10 倍。术者首先复位骨折断端, 然后注射复合材料, 平均注射 8 ml (5~10 ml)。其固化时间比 PMMA 水泥(约 15 分钟)慢。然后用非锁定支撑钢板(11 例)或空心螺钉(14 例)固定骨折。手术全程是在透视下进行的, 以避免骨水泥发生软组织外渗。在术后 1 年的随访中, 无患者发生复位丢失, 无骨坏死、骨不愈合发生。术后 12 个月时, CONSTAN 平均得分为 80 分。Egol 等人[34]在 2012 年进行了另一项研究。研究共纳入了 92 例接受 PHILOS 钢板治疗的肱骨近端骨折患者(PHILOS Synthes, West Chester, PA, USA)。其中 27 例骨折患者用 10 ml 磷酸钙骨水泥进行了强化(磷酸钙骨水泥强化组), 29 例用同种异体松质骨片进行了强化(同种异体骨强化组), 36 例未进行任何强化(对照组)。结果显示磷酸钙骨水泥强化组未报告任何机械故障。相比之下, 同种异体松质骨强化组有 4 例(13.8%), 对照组有 7 例(19.4%)发生机械故障。组间比较有统计学意义($p = 0.02$)。此外, 磷酸钙骨水泥强化组发生一例深部感染。遗憾的是作者未进行功能评分、疼痛量表或活动范围评估。

2.3. 硫酸钙骨水泥

硫酸钙骨水泥是另一种常见的骨替代物。硫酸钙骨水泥拥有很好的生物降解性、骨传导性, 但其抗压强度限制了其在骨科领域的应用范围。然而, 与磷酸钙骨水泥产品相比, 硫酸钙骨水泥注射复合材料也有几个潜在的特点, ① 凝固时间更短(2 至 5 分钟), ② 凝固硬化过程不产生大量热量, ③ 抗压强度更接近松质骨(10~40 MPa), ④ 其可在 6~12 周内完全吸收并被松质骨取代, 这就是为什么它们被认为具有良好的骨传导性。由于硫酸钙骨水泥的抗压强度较低, 其更类似于松质骨而不是皮质骨。因此, 它的使用仅限于填充骨空隙, 当骨折需要结构支撑时(内侧皮质缺乏性骨折)应避免使用。此外, 硫酸钙骨水泥降解迅速, 存在力学支撑效应丢失过快的风险, 无法持续提供机械支持直至骨愈合, 从而导致复位丢失, 内固定失败[35]。理想的骨替代物应不刺激周围的软组织。然而有报道显示硫酸钙骨水泥降解过程可能引起局部软组织的炎症反应[36]。

通过回顾既往的研究, 共有 3 项研究报道了硫酸钙骨水泥用于治疗骨质疏松性老年肱骨近端骨折的结果。共涉及 65 例患者接受治疗的患者。研究对象的平均年龄为 65.47 岁(63~86 岁)。Lee 和 Shin [37]在 2009 年发表的回顾性研究评估了 45 例经钢板固定治疗的肱骨近端骨折患者的放射学和临床结果。45 例患者中有 14 例患者采用注射性骨水泥强化治疗(强化组)。其余 31 例患者单纯采用钢板加螺钉固定无强化(对照组)。结果显示两组骨折均愈合。强化组中只有 1 名患者(7.1%)出现复位丢失, 而对照组有 4 名患

者(12.9%)出现复位丢失。功能结果评分显示强化组患者功能略好于对照组(30.2:28.9 分),但两组间无显著的统计学意义。刘等人[38]的回顾性对照研究得出了类似的结果。其报告了 50 例 60 岁以上的肱骨近端骨折患者,29 例患者采用硫酸钙骨水泥强化(强化组),21 例患者仅接受 PHILOS 钢板加螺钉固定无强化(对照组)。同样的两组患者骨折均愈合。但强化组相较于对照组可显著的降低内固定丢失率(1/29, 4.8% vs. 6/21, 28.6%) ($p < 0.05$)。术后 12 月随访时,两组患者功能结果无显著差异($p > 0.05$)。Somasundaram 等人[39]的研究报导了 22 例经硫酸钙骨水泥强化治疗的肱骨近端骨折。在至少 1 年的随访中,没有出现复位丢失,内固定失败报道。平均 DASH 功能评分为 16.18 分,平均 CONSTAN 功能评分为 64 分。

3. 小结

在过去的几十年里,生物工程材料专家一直致力于寻找新的生物学材料去解决临床医师所遇到的临床难题。PMMA 骨水泥在骨科和创伤外科中广泛应用于改善骨质疏松患者骨折固定的生物力学不足的问题。特别是在改善螺钉与骨质接触面的强度方面具有良好的生物力学和临床效果。与非强化固定技术相比,在机械并发症的发生率,如螺钉穿出、钢板松动或骨折复位丢失中优势显著。接受 PMMA 强化术的患者中并发症普遍较低(从 0%到 16%不等)。然而,Hengg 等人进行的唯一一项随机对照试验并未显示出 PMMA 骨水泥强化钢板与非强化钢板固定之间存在统计学上的显著差异,尽管两组均取得了优异的临床结果。与 PMMA 骨水泥相比,磷酸钙骨水泥的主要优点是达到固化时的温度较低,因此骨和软骨坏死的风险较低。在唯一报道的回顾性对比研究中,磷酸钙骨水泥强化加钢板固定的患者机械故障率明显低于非强化钢板固定和松质骨强化钢板固定。同样的,硫酸钙骨水泥复合材料的使用有利于经钢板固定的肱骨近端骨折患者。硫酸钙骨水泥具有骨传导活性——它被吸收并慢慢被松质骨所取代。在接受硫酸钙骨水泥强化的患者中,总的机械并发症发生率为 4.8%至 7.1%,而在未强化的肱骨近端骨折患者中,机械故障率为 12.9%至 28.6%。磷酸钙骨水泥和硫酸钙骨水泥之间存在两个主要区别。一方面,硫酸钙骨水泥的抗压强度低于磷酸钙水泥。另一方面,硫酸钙骨水泥在 4 周到 6 个月不等的时间内被完全吸收,而磷酸钙骨水泥的吸收可以持续 10 年以上。因此,磷酸钙骨水泥缺乏骨传导特性,而硫酸钙骨水泥的快速吸收可能导致固定缺乏机械支持、局部软组织 PH 改变和组织炎症反应等。

总之,现有证据支持 PMMA、磷酸钙和硫酸钙水泥强化术用于治疗老年骨质疏松性肱骨近端骨折的有效性,当与传统的钢板加螺钉固定技术相结合时,其优势明显,并未显示出明显的生物学潜在风险,值得在临床上进一步推广。

参考文献

- [1] Patel, A.H., Wilder, J.H., Ofa, S.A., et al. (2022) Trending a Decade of Proximal Humerus Fracture Management in Older Adults. *JSES International*, **6**, 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.jseint.2021.08.006>
- [2] Rudran, B., Little, C., Duff, A., Poon, H. and Tang, Q. (2022) Proximal Humerus Fractures: Anatomy, Diagnosis and Management. *British Journal of Hospital Medicine*, **83**, 1-10. <https://doi.org/10.12968/hmed.2021.0554>
- [3] Blazejak, M., Hofmann-Fliri, L., Büchler, L., Gueorguiev, B. and Windolf, M. (2013) *In Vitro* Temperature Evaluation during Cement Augmentation of Proximal Humerus Plate Screw Tips. *Injury*, **44**, 1321-1326. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.04.028>
- [4] Brunner, F., Sommer, C., Bahrs, C., et al. (2009) Open Reduction and Internal Fixation of Proximal Humerus Fractures Using a Proximal Humeral Locked Plate: A Prospective Multicenter Analysis. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **23**, 163-172. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e3181920e5b>
- [5] Gupta, A.K., Harris, J.D., Erickson, B.J., et al. (2015) Surgical Management of Complex Proximal Humerus Fractures—a Systematic Review of 92 Studies Including 4500 Patients. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **29**, 54-59. <https://doi.org/10.1097/BOT.0000000000000229>
- [6] Sproul, R.C., Iyengar, J.J., Devcic, Z. and Feeley, B.T. (2011) A Systematic Review of Locking Plate Fixation of Proximal Humerus Fractures. *Injury*, **42**, 408-413. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2010.11.058>

- [7] Matassi, F., Angeloni, R., Carulli, C., *et al.* (2012) Locking Plate and Fibular Allograft Augmentation in Unstable Fractures of Proximal Humerus. *Injury*, **43**, 1939-1942. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2012.08.004>
- [8] Sanders, R.J., Thissen, L.G., Teepen, J.C., van Kampen, A. and Jaarsma, R.L. (2011) Locking Plate versus Nonsurgical Treatment for Proximal Humeral Fractures: Better Midterm Outcome with Nonsurgical Treatment. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **20**, 1118-1124. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.01.025>
- [9] Schliemann, B., Siemoneit, J., Theisen, C.C., Weimann, K.A. and Raschke, M.J. (2012) Complex Fractures of the Proximal Humerus in the Elderly—Outcome and Complications after Locking Plate Fixation. *Musculoskeletal Surgery*, **96**, 3-11. <https://doi.org/10.1007/s12306-012-0181-8>
- [10] Thanasas, C., Kontakis, G., Angoules, A., *et al.* (2009) Treatment of Proximal Humerus Fractures with Locking Plates: A Systematic Review. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **18**, 837-844. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2009.06.004>
- [11] Higgins, J.P., Thompson, S.G., Deeks, J.J., *et al.* (2003) Measuring Inconsistency in Meta-Analyses. *BMJ*, **327**, 557-560. <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>
- [12] Kwisda, S., Imiolyzyk, J.P., Imiolyzyk, T., *et al.* (2023) A Standardized Operative Protocol for Fixation of Proximal Humeral Fractures Using a Locking Plate to Minimize Surgery-Related Complications. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 1216. <https://doi.org/10.3390/jcm12031216>
- [13] Gardner, M.J., Weil, Y., Barker, J.U., *et al.* (2007) The Importance of Medial Support in Locked Plating of Proximal Humerus Fractures. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **21**, 185-191. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e3180333094>
- [14] Jung, W.B., Moon, E.S., Kim, S.-K., Kovacevic, D. and Kim, M.-S. (2013) Does Medial Support Decrease Major Complications of Unstable Proximal Humerus Fractures Treated with Locking Plate? *BMC Musculoskeletal Disorders*, **14**, Article No. 102. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-14-102>
- [15] Röderer, G., Scol, A., Schmölz, W., *et al.* (2013) Biomechanical *in Vitro* Assessment of Screw Augmentation in Locked Plating of Proximal Humerus Fractures. *Injury*, **44**, 1327-1332. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2013.05.008>
- [16] Saltzman, B.M., Erickson, B.J., Harris, J.D., Gupta, A.K., Mighell, M. and Romeo, A.A. (2016) Fibular Strut Graft Augmentation for Open Reduction and Internal Fixation of Proximal Humerus Fractures: A Systematic Review and the Authors' Preferred Surgical Technique. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, **4**. <https://doi.org/10.1177/2325967116656829>
- [17] Roberts, T.T. and Rosenbaum, A.J. (2012) Bone Grafts, Bone Substitutes and Orthobiologics: The Bridge between Basic Science and Clinical Advancements in Fracture Healing. *Organogenesis*, **8**, 114-124. <https://doi.org/10.4161/org.23306>
- [18] Boger, A., Bohner, M., Heini, P., Verrier, S. and Schneider, E. (2008) Properties of an Injectable Low Modulus PMMA Bone Cement for Osteoporotic Bone. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **86**, 474-482. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31044>
- [19] Van Lieshout, E.M., Van kralingen, G.H., El-Massoudi, Y., *et al.* (2011) Microstructure and Biomechanical Characteristics of Bone Substitutes for Trauma and Orthopaedic Surgery. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **12**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-12-34>
- [20] Jaebon, T. (2010) Polymethylmethacrylate: Properties and Contemporary Uses in Orthopaedics. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **18**, 297-305. <https://doi.org/10.5435/00124635-201005000-00006>
- [21] Kiaer, S. (1952) Hip Arthroplasty with Acrylic Prosthesis. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, **22**, 126-140. <https://doi.org/10.3109/17453675208989000>
- [22] Haboush, E.J. (1953) A New Operation for Arthroplasty of the Hip Based on Biomechanics, Photoelasticity, Fast-Setting Dental Acrylic and Other Considerations. *Bulletin of the Hospital for Joint Diseases*, **14**, 242-277.
- [23] Gold, M.H. and Sadick, N.S. (2018) Optimizing Outcomes with Polymethylmethacrylate Fillers. *Journal of Cosmetic Dermatology*, **17**, 298-304. <https://doi.org/10.1111/jocd.12539>
- [24] Lewis, G. (2017) Properties of Nanofiller-Loaded Poly (Methyl Methacrylate) Bone Cement Composites for Orthopedic Applications: A Review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **105**, 1260-1284. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33643>
- [25] Hoess, A., López, A., Engqvist, H., Ott, M.K. and Persson, C. (2016) Comparison of a Quasi-Dynamic and a Static Extraction Method for the Cytotoxic Evaluation of Acrylic Bone Cements. *Materials Science & Engineering: C*, **62**, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.01.048>
- [26] Persson, C., Robert, E., Carlsson, E., *et al.* (2015) The Effect of Unsaturated Fatty Acid and Triglyceride Oil Addition on the Mechanical and Antibacterial Properties of Acrylic Bone Cements. *Journal of Biomaterials Applications*, **30**, 279-289. <https://doi.org/10.1177/0885328215581316>
- [27] Kathagen, J.C., Lutz, O., Voigt, C., *et al.* (2018) Cement Augmentation of Humeral Head Screws Reduces Early Implant-Related Complications after locked Plating of Proximal Humeral Fractures. *Obere Extremität*, **13**, 123-129.

- <https://doi.org/10.1007/s11678-018-0440-x>
- [28] Siebenbürger, G., Helfen, T., Biermann, N., *et al.* (2019) Screw-Tip Augmentation versus Standard Locked Plating of Displaced Proximal Humeral Fractures: A Retrospective Comparative Cohort Study. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **28**, 1326-1333. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2018.12.001>
- [29] Hengg, C., Nijs, S., Klopfer, T., *et al.* (2019) Cement Augmentation of the Proximal Humerus Internal Locking System in Elderly Patients: A Multicenter Randomized Controlled Trial. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **139**, 927-942. <https://doi.org/10.1007/s00402-019-03142-6>
- [30] Pokhvashev, D., Knox, R., Herring, M., *et al.* (2023) Comparison of Fibula Strut and Calcium Phosphate Cement Augmentation of the Medial Buttress in 2-Part Proximal Humerus Fractures Reconstruction: A Biomechanical Study. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology: Orthopedie Traumatologie*, **33**, 67-72. <https://doi.org/10.1007/s00590-021-03147-1>
- [31] Verona, M., Marongiu, G., Cardoni, G., Piras, N., Frigau, L. and Capone, A. (2019) Arthroscopically Assisted Reduction and Internal Fixation (ARIF) versus Open Reduction and Internal Fixation (ORIF) for Lateral Tibial Plateau Fractures: A Comparative Retrospective Study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **14**, Article No. 155. <https://doi.org/10.1186/s13018-019-1186-x>
- [32] Ferguson, J., Diefenbeck, M. and McNally, M. (2017) Ceramic Biocomposites as Biodegradable Antibiotic Carriers in the Treatment of Bone Infections. *Journal of Bone and Joint Infection*, **2**, 38-51. <https://doi.org/10.7150/jbji.17234>
- [33] Robinson, C.M. and Page, R.S. (2003) Severely Impacted Valgus Proximal Humeral Fractures. Results of Operative Treatment. *The Journal of Bone and Joint Surgery American Volume*, **85**, 1647-1655. <https://doi.org/10.2106/00004623-200309000-00001>
- [34] Egol, K.A., Sugi, M.T., Ong, C.C., *et al.* (2012) Fracture Site Augmentation with Calcium Phosphate Cement Reduces Screw Penetration after Open Reduction-Internal Fixation of Proximal Humeral Fractures. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **21**, 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.09.017>
- [35] Cao, K., Liu, G., Li, H., *et al.* (2022) Mechanical Properties and Microstructure of Calcium Sulfate Whisker-Reinforced Cement-Based Composites. *Materials*, **15**, Article 847. <https://doi.org/10.3390/ma15030947>
- [36] Marongiu, G., Podda, D., Mastio, M., *et al.* (2019) Long-Term Results of Isolated Acetabular Revisions with Reinforcement Rings: A 10- to 15-Year Follow-Up. *Hip International*, **29**, 385-392. <https://doi.org/10.1177/1120700018802750>
- [37] Lee, C.W. and Shin, S.J. (2009) Prognostic Factors for Unstable Proximal Humeral Fractures Treated with Locking-Plate Fixation. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **18**, 83-88. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2008.06.014>
- [38] Liu, Z.Z., Zhang, G.M. and Ge, T. (2011) Use of a Proximal Humeral Internal Locking System Enhanced by Injectable Graft for Minimally Invasive Treatment of Osteoporotic Proximal Humeral Fractures in Elderly Patients. *Orthopaedic Surgery*, **3**, 253-258. <https://doi.org/10.1111/j.1757-7861.2011.00150.x>
- [39] Somasundaram, K., Huber, C.P., Babu, V., *et al.* (2013) Proximal Humeral Fractures: The Role of Calcium Sulphate Augmentation and Extended Deltoid Splitting Approach in Internal Fixation Using Locking Plates. *Injury*, **44**, 481-487. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2012.10.030>