

扩髓灌注抽吸系统临床应用的研究进展

王 晗^{1,2}, 刘 相², 王超丽³, 吴 斌², 王国梁², 张云飞^{2*}

¹西安医学院研究生院, 陕西 西安

²空军军医大学第二附属医院骨科, 陕西 西安

³空军军医大学药学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月17日

摘 要

骨缺损是指骨骼结构的不完整, 这种不完整性往往会导致骨骼无法正常连接, 进而引发延迟愈合, 甚至出现不愈合的现象, 同时还会造成肢体功能的障碍, 影响患者的日常生活和活动能力。针对骨缺损的治疗, 临床上通常会选择自体骨移植作为首选方案。自体骨移植因其良好的生物相容性和成骨能力, 被广泛应用于骨缺损的修复中。而扩髓灌注抽吸系统作为一种新兴的自体骨移植技术, 近年来受到了国内外众多学者的广泛关注和研究。该系统通过特殊的扩髓和灌注抽吸过程, 能够有效地获取更多高质量的骨移植材料, 并减少手术创伤。我们将对扩髓灌注抽吸系统进行全面综述, 期望为该技术在临床实践中的应用提供科学、系统的参考依据。

关键词

骨缺损, 骨不连, 骨髓炎, 骨折内固定, 扩髓灌注抽吸, RIA

Research Advances in Clinical Application of the Reamer-Irrigator-Aspirator

Han Wang^{1,2}, Xiang Liu², Chaoli Wang³, Bin Wu², Guoliang Wang², Yunfei Zhang^{2*}

¹Graduate School, Xi'an Medical University, Xi'an Shaanxi

²Department of Orthopedics, The Second Affiliated Hospital of Air Force Medical University, Xi'an Shaanxi

³School of Pharmacy, Air Force Medical University, Xi'an Shaanxi

Received: September 16, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 17, 2025

Abstract

Bone defect refers to an incomplete bone structure, which often prevents normal osseous continuity,

*通讯作者。

文章引用: 王晗, 刘相, 王超丽, 吴斌, 王国梁, 张云飞. 扩髓灌注抽吸系统临床应用的研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(10): 1832-1841. DOI: 10.12677/acm.2025.15102952

leading to delayed union or even nonunion. Consequently, it may result in functional impairment of the affected limb, adversely impacting the patient's daily life and mobility. For the treatment of bone defects, autologous bone grafting is generally considered the clinical gold standard. Due to its excellent biocompatibility and osteogenic capacity, it is widely employed in the reconstruction of bone defects. As an emerging technique for autologous bone grafting, the reamer-irrigator-aspirator system has garnered significant attention and has been the subject of extensive research among scholars worldwide in recent years. This system facilitates the effective harvest of a greater quantity of high-quality bone graft material through its specialized reaming and simultaneous irrigation-aspiration process, while simultaneously minimizing surgical trauma. This paper aims to provide a comprehensive review of the reamer-irrigator-aspirator system, with the expectation of offering a scientific and systematic reference for its application in clinical practice.

Keywords

Bone Defect, Nonunion, Osteomyelitis, Internal Fixation of Fractures, Reamer-Irrigator-Aspirator System, RIA

Copyright © 2025 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

骨缺损的修复是骨科领域长期面临的重大挑战，常见于骨折相关创伤，感染性疾病，骨肿瘤，先天性因素，严重时会导致肢体畸形，延迟愈合或不愈合以及功能障碍等。对于骨缺损移植修复常用的技术包含有机玻璃，硫酸钙，磷酸钙，金属假体和天然生物材料等[1]-[5]，但是这些治疗手段中都存在一定弊端，那就是无法理想满足 Giannoudis 报告的骨缺损修复的钻石理论(成骨性、骨诱导性以及骨传导性) [6] (图1)。金属假体存在应力遮挡效应和生物惰性，硫酸钙与磷酸钙作为植入物的机械强度不足以及缺乏适当

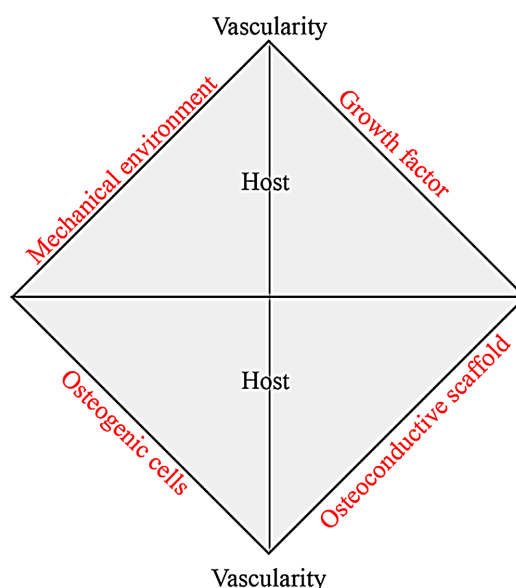


Figure 1. Diamond concept

图 1. 钻石理论

的细胞迁移和新组织形成的孔隙度等问题[4][7]。自体髂骨植骨(Iliac crest bone graft, ICBG)因为同时具有成骨性、骨诱导性以及骨传导性被认为是骨缺损移植修复的金标准[8]。然而其存在供骨量有限、供区创伤性大、疼痛、感染和外观改变等缺点[9]。扩髓-灌注-抽吸系统(Reamer-Irrigator-Aspirator, RIA)最初开发为同时扩髓和抽吸的系统,可以降低髓内压力和产热,以防止脂肪栓塞和热坏死的发生,用来作为扩髓内固定术扩髓期间降低髓内压力的替代系统。随着人们对 RIA 的进一步研究,发现它能够获取富含生物活性因子的自体骨移植、减少供区并发症以及能够采集更多骨移植等优点[10]-[13]。因此 RIA 系统也被越来越多地使用在骨再生领域[14][15]。虽然大量的研究显示 RIA 可应用于骨科疾病的治疗,但是对其技术规范、适应症选择、长期安全性仍存在争议,亟需系统性证据支持。本文通过综述 RIA 的技术原理、生物学基础、临床应用现状及争议,旨在为 RIA 治疗骨缺损提供理论依据,并展望 RIA 技术治疗骨缺损的未来趋势。

2. RIA 系统的技术原理与创新性

RIA 系统拥有扩髓、灌注和抽吸三种功能,其中主要包含了扩髓钻头,传动轴和过滤网收集器(图 2)。扩髓头由 12 mm 以 0.5 mm 逐级递增,最大为 19 mm。扩髓时按照术前影像学评估的股骨髓腔尺寸来选择扩髓钻尺寸,通常采用不超过髓腔狭部直径 2.5 mm 的钻头[16][17],之后采用逐级扩髓的方式来扩髓。传动轴由塑料管包裹,并且传动轴内部为中空,灌注液(生理盐水)从传动轴内部流入髓腔,灌注液的流动能很好地降低扩髓过程中因为摩擦力而产生的热量,更好地规避了热坏死的发生[18]。相反骨髓和骨碎屑被从塑料管与传动轴之间抽出,这一步骤采用了负压抽吸的方式不仅能够将骨移植抽出,而且有效降低了扩髓产生的压力,减小了脂肪栓塞发生的风险[18]。最终,在过滤网的筛选作用下,骨移植成功滤入收集器当中。在整个扩髓过程中应重复进行推进和收回动作,保证 RIA 灌注引流量的最大化,并且应该经常使用 X 线透视,严格使导丝居中,确保扩髓钻头在髓腔内也处于居中状态,防止骨皮质穿孔与骨折的发生。

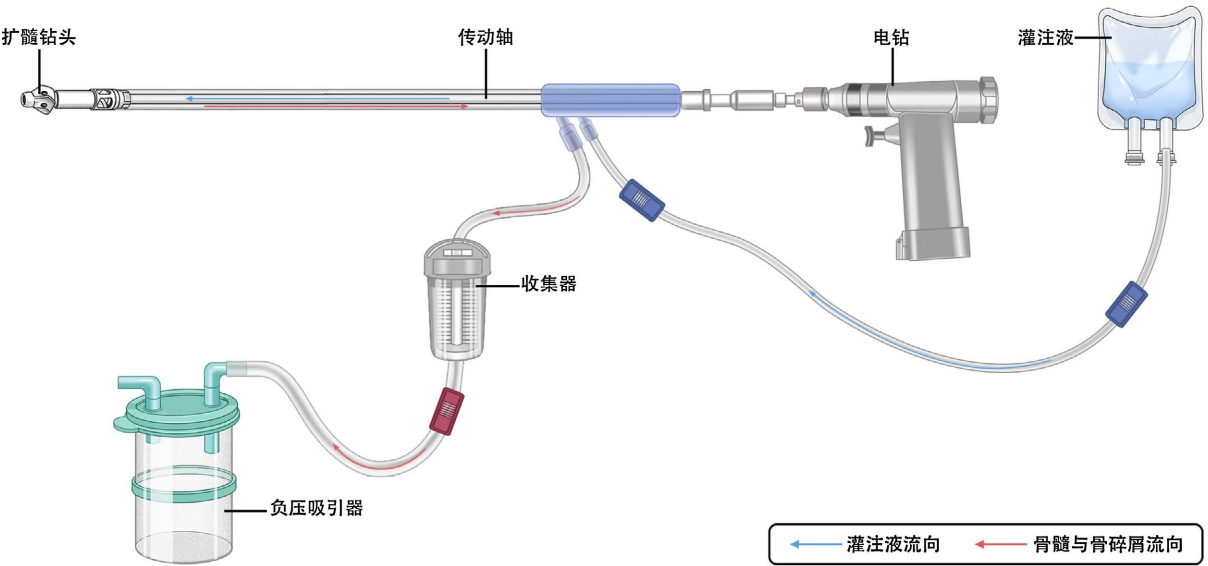


Figure 2. RIA system
图 2. RIA 系统

3. 移植物的生物学特性

RIA 技术获取的骨移植(骨碎屑与骨髓液混合物)不仅满足了钻石理论,而且通过灌注和抽吸,减少

了扩髓过程中的热损伤,更好地保留了骨移植植物中的干细胞和生物因子的活性。在 G. Schmidmaier 等人的研究定量了 8 种生长因子,发现 7 种生长因子中的 5 种(TGF- β 1、IGF-I、FGFa、PDGFbb 和 BMP-2)的量在从髓内扩髓碎屑中获得的样品中的浓度高于从髂嵴中获得的样品,其中 RIA 碎屑中的 TGF- β 1、BMP-2、PDGFbb、FGFa 和 IGF-I 的量分别是髂嵴 3.5 倍、3 倍、2.9 倍、2.1 倍和 1.6 倍,而髂嵴中只有 FGFb 和 VEGF 的量是高于扩髓碎屑的[19]。研究证明,BMP-2 不仅可促进体内成骨细胞分化和骨缺损的成骨[20],还能够通过上调 PGC-1 α 增强线粒体活性,进而促进间充质干细胞(Mesenchymal Stem Cells, MSCs)的成骨分化[21]。IGF-I 可通过控制 Ca^{2+} 反应诱导成骨分化,当使用 IGF-I 进行短期治疗时可提高骨髓细胞的增殖和分化能力[22] [23]。而且通过 RIA 技术得到的 MSCs 比通过 ICBG 获得的 MSCs 拥有更高的成骨分化能力,这也表明了 RIA 技术获取的骨移植植物拥有更高的骨再生效率[24]。除此之外,RIA 液体也有一定的促进骨愈合能力。Häusner 等人报道了,RIA 液体对巨噬细胞有很强的 M2-巨噬细胞表型诱导作用。并且在 RIA 液体的刺激下,外周血单核细胞和骨髓单核细胞产生的抗炎 T 细胞亚群能够增加。证实了 RIA 液体中的细胞因子和蛋白质含量具有强大的免疫调节和血管生成特性[10]。该证据不仅表明了 RIA 液体在调节免疫反应和促进血管生成方面具有巨大的治疗潜力,能够应用于骨缺损的治疗,同样也解释了 RIA 获取的骨移植植物的骨愈合特性。RIA 最终获取的骨移植植物为多孔结构的三维支架构成的松质骨,可以为新骨的生成提供传导性,虽然刚开始提供的结构支撑较差,但是随着新骨成型,便可以提供结构支撑。总之,RIA 获取的骨移植植物中,生物活性因子诱导干细胞向骨组织细胞分化,有益于骨缺损的修复,并且松质骨的骨传导性更加快了这一过程。

4. RIA 的临床应用现状

4.1. 适应症

目前 RIA 系统在临床中主要应用于骨缺损、骨髓炎以及髓内钉固定领域。

4.1.1. 骨缺损

相关研究显示,使用 RIA 获取的骨移植植物在临床应用中表现出可靠的成骨效能[14] [25]。随着肥胖人群的逐渐增多以及接受双侧髋关节置换术的患者数量持续增长,RIA 正逐渐发展成为 ICBG 的重要替代方案。对于 RIA 技术能够提供更多的骨移植植物以及有效减少因髂骨取骨而带来的供区部位相关并发症方面,van de Wall 等报道了,RIA 技术治疗骨不连可显著避免供区慢性疼痛(RIA 0% vs ICBG 14.2%),并降低感染风险(RIA 1.0% vs ICBG 5.9%),且异质性低($I^2 = 0\%$) [25]。尽管两者骨愈合率无显著差异(RIA 88.5% vs ICBG 83.7%),但 RIA 的微创性与高供体容量(约为 $37.7 \pm 12.9 \text{ cm}^3$)使其成为优选方案,这能够极大地减轻患者因大量取骨而产生的痛苦,促进患者术后恢复[11] [25]。我们团队报道了一位肱骨远端骨缺损 4 cm 的患者,在使用 RIA 技术获取左侧股骨骨髓并进行骨移植后,患者的植骨区域愈合以及患肢功能恢复良好。证实了 RIA 在骨缺损的治疗中提供了更多高质量的自体骨,与骨粒植骨相比,骨泥植骨具有更好的可塑性,成骨质量更高[14]。

4.1.2. 骨髓炎

在一项包含 72 例下肢创伤后骨髓炎(post-traumatic osteomyelitis, PTOM)患者的单中心回顾性研究中,研究者通过长期随访详细记录了诊疗过程及预后转归。其中部分患者接受了 RIA 治疗,结果显示,RIA 组患者的感染复发率显著低于未使用 RIA 的对照组(6% vs 20%, $p = 0.04$),下肢功能量表(lower extremity functional scale, LEFS)评分(69.6 vs 52.8, $p = 0.02$)及生存质量指数(EQ-5D-3L) (0.883 vs 0.604, $p = 0.04$)均显著更优。这一证据表明,RIA 技术在 PTOM 治疗中具有双重临床价值,既能有效控制感染复发,又能促进患者功能康复并改善生存质量,尤其适用于 Cierny-Mader III/IV 型感染、开放性骨折术后髓内感染及

感染性骨不连等复杂病例[26]。

4.1.3. 髓内钉固定

对于长骨骨折行髓内钉固定的患者，RIA 可以通过同步扩髓、冲洗与吸引，可显著降低由扩髓而导致的髓内压并减少脂肪栓塞风险。一例肥胖儿童的双侧股骨骨折病例显示，采用 RIA 辅助固定后未发生脂肪栓塞综合征，并且术后 1 年骨折愈合良好。该技术可以清除约 80% 的扩髓碎屑及大颗粒脂肪，将髓内压峰值从传统扩髓的 45 mmHg 降至 22 mmHg，从而减少栓塞源进入体循环。虽然缺乏高级别随机对照研究证据，但现有研究提示了其在双侧骨折、肥胖等高危人群中具有重要应用价值[27]。

4.2. 风险评估、预防策略与处理预案

RIA 系统引入临床之后，凭借比 ICBG 更少的并发症，以及能获取更多高质量骨移植物的特点，很快就受到了骨科医生的认可和采用。但随着临床中将 RIA 系统应用于骨缺损、骨髓炎以及髓内钉固定等疾病时，他的相关风险也引起了广泛的关注。这些风险一旦出现，不仅可能导致手术失败，严重时还会危及患者生命，从而抵消其相较于传统技术的优势。

4.2.1. 骨皮质穿孔与骨折

骨皮质穿孔与骨折是使用 RIA 取骨时较为常见的术中并发症之一，该并发症主要发生在股骨、胫骨等长骨采集的部位，导致该并发症的原因是扩髓过程中机械力对骨皮质的意外破坏。该并发症的发生机制主要与髓腔解剖特征和操作技术精度密切相关，当扩髓头直径超过髓腔生理内径或扩髓轨迹偏离导针预设轴线时，扩髓器与骨皮质的直接接触导致了局部应力集中，尤其在骨质疏松患者或股骨过度弯曲的解剖个体中，骨皮质的抗剪切强度显著下降，穿孔风险进一步升高。临床研究显示，骨皮质穿孔的发生率在不同人群中存在差异。在日本患者使用 RIA 的临床研究中，Niikura 等回顾性分析 42 例病例后发现，该操作伴有骨皮质穿孔的并发症。在术后常规 CT 扫描中观察到，骨皮质穿孔的发生率为 11.9%，不过所有患者均未出现相关症状，穿孔位置多位于股骨远端干骺端的前内侧。此外，术后股骨骨折的发生率为 2.4%。该病例为一名接受多次 RIA 手术的患者，术后因跳跃导致骨折，回顾时发现了该患者存在小的皮质穿孔[28]。这提示在临床应用 RIA 时，骨髓腔较小的人群可能更容易发生骨皮质穿孔或骨折的风险，对于该类人群应选择直径较小的扩髓钻头，并且术中应严格监测加以预防。Laubach 等人通过 Meta 分析发现，在纳入的 1834 例使用 RIA 系统的手术中，骨皮质穿孔是较为突出的并发症之一，发生率为 1.9%，在 RIA 系统的临床应用中，骨皮质穿孔与骨折的发生率要高于其他并发症，这是需要重点留意的问题。另外，采用 RIA 取骨后，也有可能出现骨折情况，其发生率为 0.7%。相关研究者指出，这类骨折的发生或许与手术操作、RIA 系统对骨结构产生的影响等多种因素有关[29]。因此，在临床使用 RIA 系统时，必须严格遵循个体化治疗的原则。要依据患者的解剖学特点和生物力学特性，选用合适直径的扩髓钻头，同时还得借助术前 CT 三维重建和术中影像学监测等方式来做好预防工作。

4.2.2. 脂肪栓塞综合征

脂肪栓塞综合征(Fat Embolism Syndrome, FES)是 RIA 最为凶险的并发症，FES 发生于扩髓过程中骨髓腔内脂肪细胞破裂，脂滴经破损的静脉窦进入循环系统，导致了全身性炎症反应与微血管栓塞。虽然设计 RIA 的目的是扩髓时降低髓内压力，减少 FES 的发生可能，并且极少有相关研究报道在临床使用 RIA 过程中患者出现 FES，但是从其原理不难得出，这种风险是有发生的可能。Markus Laubach 等研究者通过建立绵羊体内实验模型，系统评估了髓内骨移植的获取操作中 FES 的发生特征。研究数据显示，采用 RIA 技术的实验组绵羊表现出良好的手术耐受性，术后观察期内无实验动物死亡。通过 Gurd 试验能够发现脂肪颗粒的静脉内渗漏，但未引发系统性病理改变[30]。这一发现表明，RIA 技术相关的 FES 事

件主要局限于亚临床水平，但在临床使用的过程中应该警惕这种风险发生的可能。

4.2.3. 失血

使用 RIA 扩髓的过程中由于股骨髓腔的血供丰富，高速旋转的扩髓钻头可以直接损伤血管结构，导致术中患者出血过多，并且冲洗液的稀释作用可能掩盖术中即时出血量，导致术后迟发性血肿形成。这直接增加了患者输血的可能性。Martella 等人的研究表明，RIA 组在失血量和输血率上均高于 ICBG 组，RIA 组估计失血量为(388 ± 368) mL，ICBG 组为(286 ± 344) mL [31]。该研究的结果提示，RIA 在手术中存在较高的失血量和输血率风险，尽管在该报道中输血发生率低于以往报道，但临床应用时仍需谨慎评估，特别是对于存在贫血或出血风险因素的患者，应充分考虑并告知患者相关风险。

4.2.4. 扩髓钻头断裂

使用 RIA 扩髓操作中会发生设备断裂的可能，其中扩髓钻头断裂是少见的并发症，其发生机制主要与机械应力集中和扩髓钻头的材料疲劳积累密切相关。Vetter 等人报道了一例 RIA 系统扩髓钻头断裂的病例，该患者在扩髓过程中发生异常，透视显示钻头碎片残留于股骨髓腔及髁间区域，术中未能取出，最终于 3 周后通过二次手术在透视引导下用新钻头松动碎片并以长钳成功取出[32]。从危险因素来看，设备层面，扩髓钻头重复使用导致的抗疲劳性能下降是潜在诱因；操作层面，术者施加过高的轴向推力或选择与髓腔解剖不匹配的扩髓头，会显著加剧扭转应力的传导，从而引发扩髓钻头的结构性失效。尽管此类断裂事件发生率极低，但其后果可能导致手术中断或二次干预，因此需通过规范操作流程与设备维护策略进行系统性防控。

4.2.5. RIA 手术风险防控体系

针对上述 RIA 系统相关风险，临床医生需要构建“术前 - 术中 - 术后”的监测与防控体系，最大限度降低风险的发生概率、减轻风险的危害：术前需全面评估患者个体情况与手术条件，排查高危因素、完善手术方案；术中应当精准把控操作细节，强化实时监测，及时识别风险信号；术后需持续随访患者恢复状态，密切监测并发症发生的迹象。通过对手术全流程实施系统化、精细化管控，实现对潜在风险的早期识别与前瞻性干预；一旦风险事件发生，可迅速启动标准化处理预案，有效降低风险对手术进程的干扰，进而保障手术操作安全性，改善患者术后恢复效果及长期预后(表 1)。

Table 1. RIA system risk prevention and handling checklist
表 1. RIA 系统风险预防与处理检查清单

检查项目分类	具体检查内容
术前评估与准备	1. 完成患者骨骼影像学检查(X 线、CT)，明确解剖结构和骨质情况
	2. 评估患者 FES 高危因素(老年、骨质疏松、长骨干骨折等)
	3. 检查患者血常规、凝血功能，评估失血风险，备好同型血液制品
	4. 确认扩髓钻头等器械质量合格，无裂纹、磨损、变形，与驱动装置匹配
	5. 手术医生接受 RIA 系统操作专业培训，熟悉并发症预防要点
术中预防措施	1. 骨皮质穿孔预防：术中使用 C 臂机实时监测操作，控制钻孔/扩髓力度和速度
	2. FES 预防：操作轻柔，避免过度挤压骨折端，高危患者使用抗凝药物
	3. 失血预防：采用止血带(适用时)、结扎/电凝止血，使用止血材料控制渗血
	4. 扩髓钻头断裂预防：检查钻头连接牢固性，根据骨质调整转速和压力，观察运行状态
	5. 术中实时监测患者血压、心率、血氧饱和度，估算失血量

续表

术中并发症处理	1. 骨皮质穿孔：已明确穿孔程度，采取填充、内固定等针对性处理措施
	2. FES：出现症状后立即停止手术，给予吸氧、激素等治疗，启动多学科会诊
	3. 失血：根据失血量补充液体和血液制品，采取有效止血措施，抗休克治疗
	4. 扩髓钻头断裂：明确断裂位置，采用合适器械取出或制定后续取出方案，确认无残留
术后监测与随访	1. 术后监测患者生命体征、血常规、凝血功能、影像学检查(排查残留/移位)
	2. 观察患者是否出现术后并发症(如感染、疼痛、神经血管损伤)
	3. 对暂时保留断裂钻头的患者，制定定期随访计划，监测碎片情况
	4. 记录手术并发症发生情况、处理过程和结果

5. 争议焦点

RIA 在骨缺损、骨不连以及骨髓炎等疾病的治疗中有较高的临床价值，但是他的应用仍然存在较多争议。

安全性方面：脂肪颗粒入血风险需要引起高度重视，特别是对心肺功能不全的患者更应该严格评估手术指征[30]。目前没有相关的指南指出单次取骨量的安全上限，需要结合患者骨密度以及髓腔直径大小进行个体化评估，避免过度取骨影响骨再生能力。

技术操作方面：RIA 系统对扩髓速度、负压强度的关键参数没有统一标准，经验不足的临床医生可能会因为操作不当而导致患者的骨皮质穿孔和医源性骨折，但是得益于相对较短的学习曲线，临床医生可以较快地掌握核心技术[33]。

经济效益分析：部分研究认为 RIA 系统的成本较高并且耗时较长，然而一项随机对照研究报道了 RIA 的手术时间短于 ICBG，特别是与 PICBG(Posterior Iliac Crest Bone Graft)相比，可以通过缩短手术时间有效抵消设备成本，使 RIA 取骨的花费少于 ICBG，但是整体经济效益仍需更多的临床数据支持[11] [34]。

术式的选择：RIA 采取的标准术式是股骨近端顺行入路，但存在偏心扩孔导致的医源性骨折风险。近年来有学者尝试采用股骨远端的逆行入路，该术式可以通过更同心的扩髓轨迹和优化的髓腔减压效果，可降低骨折风险并减少髓周软组织损伤，但其远期的并发症及潜在的风险仍需更多的循证医学证据支持[35] [36]。

6. RIA 与 Masquelet 技术的协同

近年来，RIA 系统与 Masquelet 技术(膜诱导技术)的协同应用为长段骨缺损修复提供了新范式。二者的协同效应主要体现在生物材料优化、微环境调控与感染控制强化三个维度。其中 Masquelet 技术通过植入聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)骨水泥间隔物，诱导生成富含生长因子、高度血管化的生物膜，促进 MSCs 成骨分化，为骨移植营造良好环境[37]。第二阶段取出 PMMA 水泥间隔物并植入通过 RIA 获取的自体骨，可以实现骨缺损修复，在长骨节段性骨缺损治疗中效果显著。多项临床研究证实了二者联合应用的有效性。Maruccia 等用 Masquelet 技术联合 RIA 自体骨移植治疗 11 例下肢骨缺损患者，术后显示所有患者均骨愈合，功能结局良好[38]。我们团队报道的 1 例左肱骨远端骨缺损患者，经膜诱导联合 RIA 技术修复后，骨移植区域愈合佳，肘关节功能改善明显[14]。不过，联合技术也存在一些问题。RIA 技术所存在的问题主要是前面所述的并发症。而 Masquelet 技术，目前对于如何优化膜的血管化、固定方式选择、一期与二期手术间隔时间以及抗生素在水泥间隔物中的应用等问题仍存在争议[39]。但整体而言 RIA 系统与 Masquelet 技术的联合应用在骨缺损的修复中结合了二者的优势，能够为骨科医

生治疗复杂的骨缺损提供有力的工具。在临床治疗中, 医生需要充分了解该联合技术的优缺点, 严格地了解手术适应症, 合理的规划手术方案, 在围手术期密切的关注患者情况, 积极预防和处理可能出现的并发症, 确保手术的成功和患者的良好预后。未来需要更多的临床研究和基础研究优化该联合技术, 提高骨缺损修复的效果和质量。

7. 结论与展望

在骨缺损修复与重建领域, RIA 系统作为一种创新的自体骨获取技术, 其临床应用价值是值得肯定的。和传统的 ICBG 相比, RIA 技术有不少突出之处。它采用微创操作, 能明显减少供区出现并发症的可能, 同时还能获取更优质的骨移植物, 有助于增强骨诱导作用和促进成骨分化。在治疗骨缺损与骨不连时, RIA 技术在骨愈合率方面和 ICBG 相似, 但在供骨量以及活性因子含量上更有优势。这表明了 RIA 技术更适合应用于大段骨缺损的修复。此外, RIA 技术和 Masquelet 技术的联合使用, 还能通过调节生物膜微环境以及促进自体骨整合, 为大段骨缺损的修复提供更为理想的方案。不过, RIA 可能会造成骨皮质穿孔、医源性骨折甚至引发 FES。因此对于存在骨质疏松或具有脂肪栓塞高危风险的人群, 应被列为 RIA 系统的禁忌使用对象。

目前 RIA 的临床应用仍然存在骨皮质穿孔、脂肪栓塞以及操作标准化不足等问题。并且用 RIA 获取的骨移植物是一种泥状骨, 在对骨缺损、骨不连的治疗中呈现出机械强度偏低, 支撑能力不足的特点。此外, 缺少 RIA 用于骨缺损治疗的多中心, 大样本量的临床研究。未来, 应基于目前对 RIA 系统的相关研究并开展大量临床研究, 建立 RIA 操作指南, 明确扩髓速度、负压强度和取骨量的安全阈值等关键参数以及更为合适的术式, 降低相关并发症发生的风险。在此基础上, 探索 RIA 与 3D 打印仿生支架的联合应用, 构建具有骨传导、骨诱导以及机械支撑功能的骨缺损修复体系, 减少 RIA 获取的骨移植物在大段骨缺损应用中的骨吸收以及解决骨移植物机械强度低, 支撑能力不足的问题[40]-[42]。同时进一步研究 RIA 液体在骨缺损治疗中的相关机制, 可考虑将其开发为新型生物制剂, 或与 RIA 获取的骨移植物联合使用, 推动骨再生医学的发展。随着对 RIA 系统的不断探索, 其有望成为复杂骨缺损修复与重建的关键核心技术, 为实现个体化与精准化治疗方案提供坚实的理论基础与实践操作支持。

参考文献

- [1] Cyphert, E.L., Kanagasagar, N., Zhang, N., Learn, G.D. and von Recum, H.A. (2022) PMMA Bone Cement Composite Functions as an Adjuvant Chemotherapeutic Platform for Localized and Multi-Window Release during Bone Reconstruction. *Macromolecular Bioscience*, **22**, e2100415. <https://doi.org/10.1002/mabi.202100415>
- [2] Huang, Q., Xu, Y., Lu, Y., Ren, C., Liu, L., Li, M., et al. (2022) Acute Shortening and Re-Lengthening versus Antibiotic Calcium Sulfate-Loaded Bone Transport for the Management of Large Segmental Tibial Defects after Trauma. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **17**, Article No. 219. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03109-1>
- [3] Bohner, M., Santoni, B.L.G. and Döbelin, N. (2020) β -Tricalcium Phosphate for Bone Substitution: Synthesis and Properties. *Acta Biomaterialia*, **113**, 23-41. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.06.022>
- [4] Fan, L., Chen, S., Yang, M., Liu, Y. and Liu, J. (2024) Metallic Materials for Bone Repair. *Advanced Healthcare Materials*, **13**, e2302132. <https://doi.org/10.1002/adhm.202302132>
- [5] Dec, P., Modrzejewski, A. and Pawlik, A. (2022) Existing and Novel Biomaterials for Bone Tissue Engineering. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article 529. <https://doi.org/10.3390/ijms24010529>
- [6] Giannoudis, P.V., Einhorn, T.A. and Marsh, D. (2007) Fracture Healing: The Diamond Concept. *Injury*, **38**, S3-S6. [https://doi.org/10.1016/s0020-1383\(08\)70003-2](https://doi.org/10.1016/s0020-1383(08)70003-2)
- [7] Lun, D., Li, S., Li, N., Mou, L., Li, H., Zhu, W., et al. (2024) Limitations and Modifications in the Clinical Application of Calcium Sulfate. *Frontiers in Surgery*, **11**, Article ID: 1278421. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1278421>
- [8] Chinnaasami, H., Dey, M.K. and Devireddy, R. (2023) Three-Dimensional Scaffolds for Bone Tissue Engineering. *Bio-engineering*, **10**, Article 759. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10070759>
- [9] Pokharel, R.K., Paudel, S. and Lakhey, R.B. (2022) Iliac Crest Bone Graft Harvesting: Modified Technique for

- Reduction of Complications. *Journal of Nepal Medical Association*, **60**, 325-328. <https://doi.org/10.31729/jnma.7086>
- [10] Häusner, S., Kolb, A., Übelmesser, K., Hölscher-Doht, S., Jordan, M.C., Jauković, A., *et al.* (2025) It Is Not Waste If It Is Therapy: Cellular, Secretory and Functional Properties of Reamer-Irrigator-Aspirator (Ria)-Derived Autologous Bone Grafts. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, **26**, Article No. 21. <https://doi.org/10.1186/s10195-025-00835-0>
 - [11] Dawson, J., Kiner, D., Gardner, W., Swafford, R. and Nowotarski, P.J. (2014) The Reamer-Irrigator-Aspirator as a Device for Harvesting Bone Graft Compared with Iliac Crest Bone Graft. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **28**, 584-590. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000086>
 - [12] Laubach, M., Bessot, A., McGovern, J., Saifzadeh, S., Gospos, J., Segina, D.N., *et al.* (2023) An *in Vivo* Study to Investigate an Original Intramedullary Bone Graft Harvesting Technology. *European Journal of Medical Research*, **28**, Article No. 349. <https://doi.org/10.1186/s40001-023-01328-8>
 - [13] Sawauchi, K., Fukui, T., Oe, K., Kumabe, Y., Oda, T., Yoshikawa, R., *et al.* (2022) Low-Intensity Pulsed Ultrasound Promotes Osteogenic Differentiation of Reamer-Irrigator-Aspirator Graft-Derived Cells *in Vitro*. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **48**, 313-322. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.10.006>
 - [14] Wang, G., Zhu, Z., Lu, S., Wang, L., Gao, H., Fu, C., *et al.* (2023) A Case Report of Membrane Induction Combined with RIA Technique for the Repair of Distal Humerus Segmentary Bone Defect. *Frontiers in Endocrinology*, **14**, Article ID: 1150029. <https://doi.org/10.3389/fendo.2023.1150029>
 - [15] Nitai, K., Eran, K. and Yaniv, K. (2022) Radial Diaphysis Infected Non-Union Treated with Combination of Masquelet Technique and Autologous Bone Grafting Harvested by RIA: A Case Report. *Trauma Case Reports*, **39**, Article 100621. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2022.100621>
 - [16] Schmitz, N., Gehweiler, D., Wähnert, D., Zderic, I., Grünwald, L., Richards, G., *et al.* (2020) Influence of the Reamer-Irrigator-Aspirator Diameter on Femoral Bone Strength and Amount of Harvested Bone Graft—A Biomechanical Cadaveric Study. *Injury*, **51**, 2846-2850. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2020.09.057>
 - [17] Gehweiler, D., Schmitz, N., Gueorguiev, B., Zderic, I., Grünwald, L., Richards, G., *et al.* (2021) 3D Geometry of Femoral Reaming for Bone Graft Harvesting. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 17153. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95983-8>
 - [18] Giannoudis, P.V., Tzioupis, C. and Green, J. (2009) Surgical Techniques: How I Do It? the Reamer/Irrigator/Aspirator (RIA) System. *Injury*, **40**, 1231-1236. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2009.07.070>
 - [19] Schmidmaier, G., Herrmann, S., Green, J., Weber, T., Scharfenberger, A., Haas, N.P., *et al.* (2006) Quantitative Assessment of Growth Factors in Reaming Aspirate, Iliac Crest, and Platelet Preparation. *Bone*, **39**, 1156-1163. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2006.05.023>
 - [20] Zhou, L., Wang, J. and Mu, W. (2023) BMP-2 Promotes Fracture Healing by Facilitating Osteoblast Differentiation and Bone Defect Osteogenesis. *American Journal of Translational Research*, **15**, 6751-6759.
 - [21] Li, Y., Fu, G., Gong, Y., *et al.* (2022) BMP-2 Promotes Osteogenic Differentiation of Mesenchymal Stem Cells by Enhancing Mitochondrial Activity. *Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions*, **22**, 123-131.
 - [22] Wu, L., Zhang, G., Guo, C. and Pan, Y. (2020) Intracellular Ca²⁺ Signaling Mediates IGF-1-Induced Osteogenic Differentiation in Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, **527**, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.04.048>
 - [23] de Oliveira, G.P., de Andrade, D.C., Nascimento, A.L.R., Cortez, E., de Carvalho, S.N., Stumbo, A.C., *et al.* (2021) Insulin-Like Growth Factor-1 Short-Period Therapy Stimulates Bone Marrow Cells in Obese Swiss Mice. *Cell and Tissue Research*, **384**, 721-734. <https://doi.org/10.1007/s00441-020-03357-9>
 - [24] Toosi, S., Naderi-Meshkin, H., Kalalinia, F., *et al.* (2016) Comparative Characteristics of Mesenchymal Stem Cells derived from Reamer-Irrigator-Aspirator, Iliac Crest Bone Marrow, and Adipose Tissue. *Cellular and Molecular Biology*, **62**, 68-74.
 - [25] van de Wall, B.J.M., Beeres, F.J.P., Rompen, I.F., Link, B.C., Babst, R., Schoeneberg, C., *et al.* (2022) RIA versus Iliac Crest Bone Graft Harvesting: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Injury*, **53**, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.10.002>
 - [26] Rodham, P., Panteli, M., Qin, C., Harwood, P. and Giannoudis, P.V. (2023) Long-Term Outcomes of Lower Limb Post-Traumatic Osteomyelitis. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, **49**, 539-549. <https://doi.org/10.1007/s00068-022-02104-9>
 - [27] Jacobson, E., Schieve, B.C., Klahs, K.J., Macias, R.A., Abdelgawad, A. and Thabet, A.M. (2024) Reamer Irrigator Aspirator (RIA) Reduces Risk of Fat Embolism in Bilateral Pediatric Femur Shaft Fractures: A Case Report. *Journal of Surgical Case Reports*, **2024**, rjae042. <https://doi.org/10.1093/jscr/rjae042>
 - [28] Niikura, T., Oe, K., Fukui, T., Hayashi, S., Matsumoto, T., Matsushita, T., *et al.* (2021) Clinical Experience of the Use of Reamer Irrigator Aspirator in Japanese Patients: A Report of the First 42 Cases. *Journal of Orthopaedic Science*, **26**, 459-465. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2020.04.004>

- [29] Laubach, M., Weimer, L.P., Bläsius, F.M., Hildebrand, F., Kobbe, P. and Hutmacher, D.W. (2022) Complications Associated Using the Reamer-Irrigator-Aspirator (RIA) System: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **143**, 3823-3843. <https://doi.org/10.1007/s00402-022-04621-z>
- [30] Laubach, M., Bessot, A., Saifzadeh, S., Savi, F.M., Hildebrand, F., Bock, N., *et al.* (2024) In Vivo Study to Assess Fat Embolism Resulting from the Reamer-Irrigator-Aspirator 2 System Compared to a Novel Aspirator-Based Concept for Intramedullary Bone Graft Harvesting. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, **144**, 1535-1546. <https://doi.org/10.1007/s00402-024-05220-w>
- [31] Martella, A., Schumaier, A.P., Sirignano, M.N., Sagi, H.C., Wyrick, J.D. and Archdeacon, M.T. (2022) Reamer Irrigator Aspirator versus Iliac Crest Bone Grafting and Proximal Tibial Curettage: Is There a Difference in Blood Loss and Transfusion Rates? *Journal of Orthopaedic Trauma*, **36**, 163-166. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000002256>
- [32] Vetter, P., Hübner, C., Heining, S., Hierholzer, C. and Pape, H. (2024) Secondary Removal of Intramedullary Metal Debris from a Defective Reamer-Irrigator-Aspirator (RIA) Reamer Head: A Case Report. *Trauma Case Reports*, **54**, Article 101112. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2024.101112>
- [33] Oliva, F., Migliorini, F., Cuozzo, F., Torsiello, E., Hildebrand, F. and Maffulli, N. (2021) Outcomes and Complications of the Reamer Irrigator Aspirator versus Traditional Iliac Crest Bone Graft Harvesting: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, **22**, Article No. 50. <https://doi.org/10.1186/s10195-021-00612-9>
- [34] Dehghan, N. and Schemitsch, E.H. (2017) Extended Applications of the Reamer-Irrigator-Aspirator (RIA) System. *Injury*, **48**, S47-S51. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2017.04.025>
- [35] Kelly, M., Schuck, J., Gardner, A. and Newman, J. (2025) Autologous Bone Graft Harvest Technique Using Reamer-Irrigator-Aspirator for 2-Stage Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arthroscopy Techniques*, **14**, Article 103236. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2024.103236>
- [36] Bidolegui, F., Pereira, S., Irigoyen, C. and Pires, R.E. (2022) Safety and Efficacy of a Novel Retrograde Route for Femoral Bone Graft Harvesting by Reamer-Irrigator-Aspirator: A Pilot Study on 24 Patients. *Patient Safety in Surgery*, **16**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/s13037-021-00315-4>
- [37] Mathieu, L., Mourtialon, R., Durand, M., de Rousiers, A., de l'Escalopier, N. and Collombet, J. (2022) Masquelet Technique in Military Practice: Specificities and Future Directions for Combat-Related Bone Defect Reconstruction. *Military Medical Research*, **9**, Article No. 48. <https://doi.org/10.1186/s40779-022-00411-1>
- [38] Maruccia, M., Vicenti, G., Carrozzo, M., Caizzi, G., Di Summa, P.G., Moretti, B., *et al.* (2022) The Free Tissue Transfer-Masquelet-Reamer-Irrigator-Aspirator Bone Graft Orthoplastic Approach for Lower Extremity Reconstruction. *Plastic & Reconstructive Surgery*, **149**, 1203e-1208e. <https://doi.org/10.1097/prs.00000000000009133>
- [39] Fung, B., Hoit, G., Schemitsch, E., Godbout, C. and Nauth, A. (2020) The Induced Membrane Technique for the Management of Long Bone Defects. *The Bone & Joint Journal*, **102**, 1723-1734. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.102b12.bjj-2020-1125.r1>
- [40] Hübner, C.T., Veenstra, A., Klingebiel, F.K., Bayer, T., Landre, V., Heining, S., *et al.* (2025) Use of Personalized Graft Cage and RIA Bone Graft in a Case of Acute Infection Following a Grade 2 Open Tibial Shaft Fracture: A New Option for Bone Grafting in Patients with Critical Size Segmental Bone Defects. *Journal of Surgical Case Reports*, **2025**, rjaf493. <https://doi.org/10.1093/jscr/rjaf493>
- [41] Kobbe, P., Laubach, M., Hutmacher, D.W., Alabdulrahman, H., Sellei, R.M. and Hildebrand, F. (2020) Convergence of Scaffold-Guided Bone Regeneration and RIA Bone Grafting for the Treatment of a Critical-Sized Bone Defect of the Femoral Shaft. *European Journal of Medical Research*, **25**, Article No. 70. <https://doi.org/10.1186/s40001-020-00471-w>
- [42] Laubach, M., Suresh, S., Herath, B., Wille, M., Delbrück, H., Alabdulrahman, H., *et al.* (2022) Clinical Translation of a Patient-Specific Scaffold-Guided Bone Regeneration Concept in Four Cases with Large Long Bone Defects. *Journal of Orthopaedic Translation*, **34**, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.04.004>