

# 告别“拆东墙补西墙”！生物陶瓷骨修复材料有望破解骨缺损治疗难题

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40902.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

告别“拆东墙补西墙”！生物陶瓷骨修复材料有望破解骨缺损治疗难题。

近日，上海交通大学医学院附属第六人民医院范存义教授团队在Frontiers of Medicine上发表了题为《生物陶瓷骨修复材料在免疫调节中的研究现状》（Current state of bioceramic bone repair materials in immune regulation: a review）的综述论文。文章立足全球每年约1.78亿例新发骨折的流行病学现状，对骨缺损的治疗难题进行了系统梳理。

传统自体骨移植虽被视为金标准，但面临供区资源有限、二次创伤和同种异体骨移植免疫排斥等长期未解的难题。面对我国人口老龄化加速和运动创伤高发的现实情况，开发兼具力学支撑与主动调控骨免疫微环境的人工骨材料，已成为再生医学领域的迫切需求。

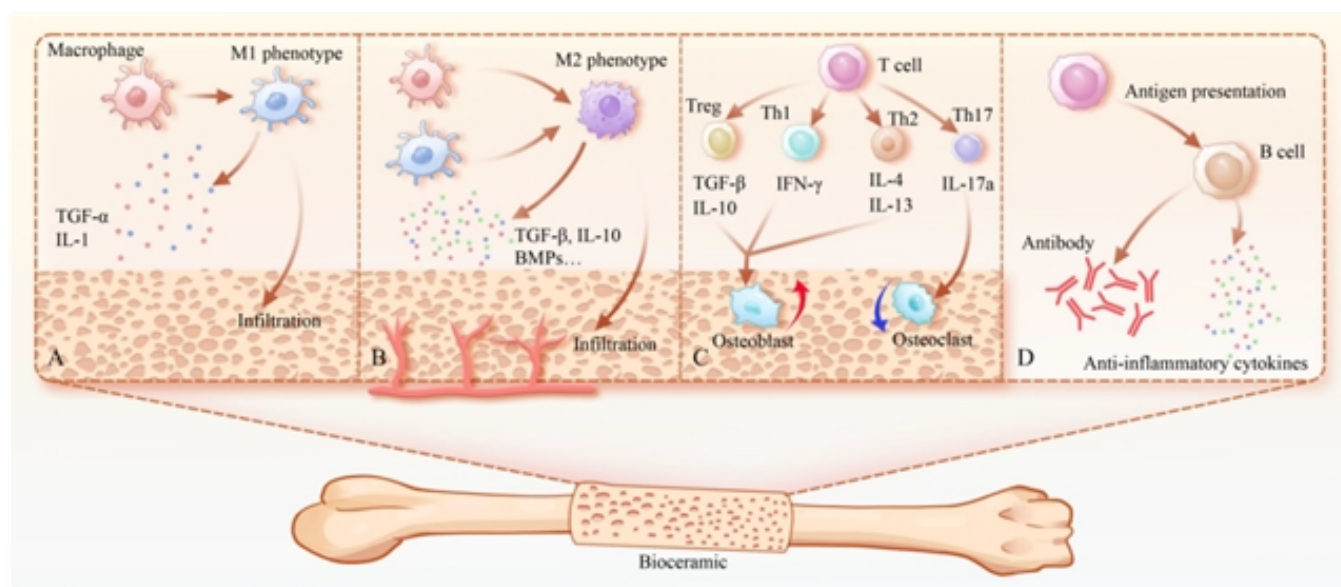


图1 生物陶瓷免疫调控机制示意图。（A）促炎性M1巨噬细胞；（B）抗炎性M2巨噬细胞；（C）T细胞亚群的不同免疫调节功能；（D）B细胞的免疫调节功能。

文章深入解析了骨愈合过程中免疫细胞的动态演化规律：早期M1型巨噬细胞主导的炎症反应虽为组织清创所必需，但过度或持久的活化会导致纤维性愈合失败；而M2型巨噬细胞分泌的IL-10（白细胞介素-10）和TGF-β（转化生长因子-β）等抗炎因子，则是启动成骨和血管再生的关键

开关。当前最大挑战在于，现有生物陶瓷产品的降解速率与骨再生周期不匹配，且缺乏主动调节免疫应答的能力——临床上如德国Cerasorb产品在随访期内仅16.3%完全吸收，而日本Osferion虽降解较快，但力学强度不足，无法满足承重部位需求。

此外，文章还系统性地提出了生物陶瓷免疫调节的多维度设计策略。通过精准调控材料的孔径（350  $\mu\text{m}$ 为促进成骨和血管生成的最佳尺寸）、表面粗糙度（可激活整合素-细胞骨架通路促进M2型极化）以及掺杂锶、锌、铜等活性离子，可以主动引导巨噬细胞向M2表型转化，同时抑制Th17细胞（辅助性T细胞17）介导的骨破坏。例如，硅酸钙生物陶瓷可通过释放硅离子，上调抑瘤素M表达，显著增强间充质干细胞（MSC）的成骨分化；而硒掺杂介孔生物活性玻璃则通过清除活性氧、调节巨噬细胞代谢，实现抗氧化增强的免疫重塑。此外，3D打印和静电纺丝等先进制备技术有望实现个性化、高孔隙率且力学性能优化的支架。

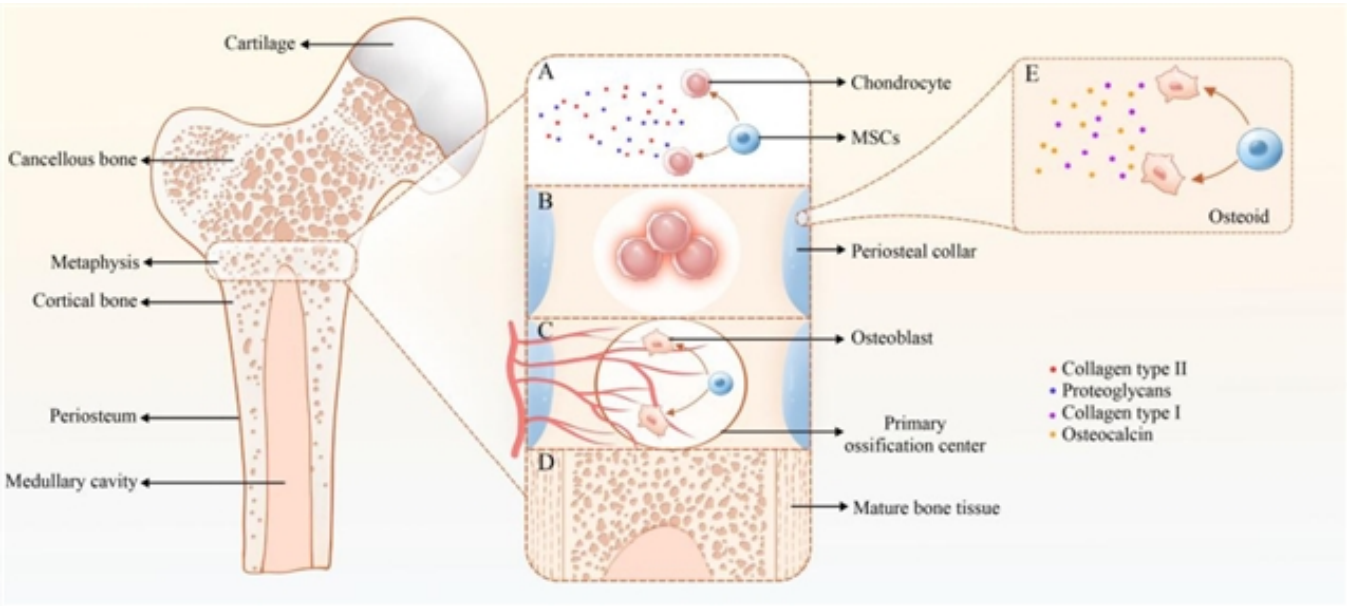


图2 软骨内成骨与膜内成骨过程。（A）MSC聚集并分化为软骨细胞，建立软骨模型；（B）骨膜袖套形成与软骨细胞成熟；（C）MSC分化为成骨细胞，血管侵入，形成初级骨化中心；（D）成骨细胞与破骨细胞协同重塑并形成成熟骨组织；（E）膜内成骨形成类骨质。

文章的突破性意义在于，它指明了骨修复材料从被动填充向主动调控转型的技术路径。近年来，我国将再生医学列为战略性前沿领域，该成果呼应了高端医疗器械国产化的国家战略。当前，进口产品如NovaBone和BonAlive占据国内高端骨填充市场主要份额，但其力学强度偏低和降解速率不可控的特性限制了其在创伤骨科大段骨缺损中的应用。通过融合免疫调节功能与人工智能辅助的个性化设计，未来生物陶瓷有望突破力学强度-生物活性-降解匹配的不可能三角，为解决数千万骨折患者的骨不连和感染性骨缺损等临床顽疾提供新方案。

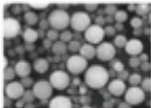
| Material                       |                                                                                     | Classification         | Properties                                                                             |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |    | Bioinert ceramics      | Very hard, superior resistance to wear, greater strength                               |
| ZrO <sub>2</sub>               |    | Bioinert ceramics      | Higher modulus of elasticity, higher toughness, superior resistance to wear            |
| SiC                            |    | Bioinert ceramics      | Excellent mechanical properties, chemical stability, good biocompatibility             |
| Hydroxyapatite                 |    | Bioactive ceramics     | Superior biocompatibility, exhibits stability in physiological environments            |
| Silicate                       |   | Bioactive ceramics     | Superior biocompatibility, promote the proliferation and differentiation of bone cells |
| Bioactive glass                |  | Bioactive ceramics     | Superior biocompatibility, osteoconductivity, osteoinductivity                         |
| Tricalcium phosphate           |  | Biodegradable ceramics | Superior biocompatibility, osteoconductivity, osteoinductivity                         |
| Calcium sulfate                |  | Biodegradable ceramics | Superior biocompatibility, easy to shape and operate, convenient for surgical use      |

图3 生物陶瓷材料的特性。

文章最后提出了三大前沿方向：基于患者免疫表型的人工智能定制化支架、融合4D打印的可变形多功能材料，以及干预免疫代谢重编程的智能响应系统。这些方向一旦实现临床转化，将推动骨组织工程从结构替代迈向功能再生的范式革命。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fmd/EN/10.1007/s11684-025-1179-6>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：范存义等 来源：《医学科学》

---

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发