
金属材料强度-断裂韧性定量模型研究获新进展

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40216.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！

金属材料强度-断裂韧性定量模型研究获新进展。强度、塑性和断裂韧性是金属结构材料安全服役的核心力学性能。然而，在绝大多数金属材料中，强度的提高往往伴随着塑性或断裂韧性的降低，形成普遍存在的强度-塑性和强度-断裂韧性制约关系。如何理解这些性能之间的内在物理关联，并建立能够描述和预测其变化规律的定量模型，是材料科学与工程领域长期关注的重要科学问题。

2025年，中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心材料疲劳与断裂研究部张哲峰研究团队李孝滔博士发表题为 Trade-off model for strength-ductility relationship of metallic materials 的研究论文 (Acta Materialia, 2025, 289: 120942. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2025.120942>)，提出了基于位错塞积机制的金属材料强度-塑性定量关系模型。该模型揭示了金属材料强度与塑性之间普遍存在反比型关系的内在原因，指出单纯通过晶粒尺寸调控通常难以实现强度与塑性的同步提升，并进一步提出了改善强塑协同的可能策略。该工作为理解金属材料强度-塑性制约机制及合金优化设计提供了新的理论基础。

在此基础上，李孝滔博士在金属材料强度-断裂韧性制约关系方面取得新的进展。考虑到断裂韧性反映材料抵抗裂纹扩展的能力，对于宏观均质金属材料，裂纹尖端塑性变形引起的裂纹钝化是主要的增韧机制，裂纹钝化能够降低裂纹尖端应力集中程度，从而提高材料的断裂韧性，如图1。从裂纹尖端钝化增韧机制出发，考虑裂纹尖端位错发射、位错塞积及其对裂纹尖端几何形貌和最大应力的影响，建立了金属材料强度 (σ_b) 与平面应变断裂韧性 (K_{IC}) 之间的定量关系模型，如下：

$$K_{IC} = \frac{C}{\sigma_b - \sigma_0}, \text{ 其中 } C \approx 0.15 n_{slip} M \sqrt{\mu^3 (1-\nu)(1+\nu)^4 E_c}$$

式中， μ 是剪切模量， ν 是泊松比， E_c 是位错塞积的临界应变能密度， M 是泰勒因子， n_{slip} 是裂纹尖端激活的滑移面数量， σ_0 是位错滑移本征阻力。

该模型表明，随着金属材料强度提高，裂纹尖端塑性变形和位错活动能力受到抑制，裂纹尖端钝化程度降低，进而导致断裂韧性下降，形成强度-断裂韧性之间的反比型关系。理论分析进一步表明，对于以裂纹钝化为主要增韧机制的同一合金成分，不同微结构状态下的强度和断裂韧性并非任意变化，而是近似分布在同一条强度-断裂韧性关系曲线上。这一结果说明，单纯依靠微结构细化通常难以同时提高强度和断裂韧性。要实现强韧协同优化，一方面需要在裂纹尖端钝化增韧之外引入其他增韧机制，另一方面需要从合金成分设计出发，提升材料本征的强度-断裂韧性

协同能力。为验证模型的适用性，研发团队系统收集了多种钢和钛合金的抗拉强度与平面应变断裂韧性实验数据，并与理论模型进行了对比验证，如图2所示。结果表明，该模型能够较好描述不同合金体系及不同热处理/微结构状态下强度与断裂韧性之间的定量关系，体现出其在典型工程金属材料中的适用性。

研究进一步表明，模型中的关键参数与合金成分密切相关，因此，可用于评估不同合金体系的强韧协同潜力。基于该定量模型，研发团队进一步提出了强度-断裂韧性协同因子，用于定量评价不同合金成分的强韧性能综合水平，如图3所示。利用该方法，仅需少量强度和断裂韧性实验数据，即可快速建立某一合金体系的强度-断裂韧性关系曲线，并进一步评估其强韧协同潜力。这为合金成分筛选和高强高韧金属材料设计提供了新的理论工具，有望结合机器学习加速高性能结构金属材料的研发。

上述研究工作得到中国科学院先导专项项目(XdB1420000)、国家自然科学基金创新研究群体项目(52321001)、重大项目(52494932)、重点项目(52130002)及青年科学基金项目(52401122)资助。(来源：中国科学院金属研究所)

相关论文信息：<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2026.122374>

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：张哲峰等 来源：《材料学报》

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