

---

# 无惧裂纹 新型鱼骨结构“如鱼得水”

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/15302.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！*

无惧裂纹 新型鱼骨结构“如鱼得水”。

不起眼的小裂纹，往往是造成大工程部件过早断裂失效，引发安全事故的祸根。因此，在传统理念中，人造延展性材料是难以宽容裂纹的，但这也伴随着令人失望的低拉伸塑性。如何让裂纹与性能化敌为友，提高材料塑性，一直是科研人员难以化解的矛盾。

在8月20日发表在《科学》的一项研究中，上海大学教授钟云波团队和北京科技大学教授王沿东团队等合作，通过一种新型共晶高熵合金材料解决了这一矛盾，研究发现当这种材料被可控的凝固成类似鱼骨的多级共晶结构时，高密度裂纹不仅不会恶化性能，反而可以作为一种有效的应变补偿者去改善材料塑性。

钟云波在接受《中国科学报》采访时表示，这种结构和机理可以应用于跨海大桥、高层建筑、核电、火电、航空航天、大型钢构件等领域的结构材料，有望极大地改善其服役安全性。

## 从畏惧裂纹到控制裂纹

在以往人们的认知中，裂纹犹如恶性的导火索，它们灾难性的生长、扩展，极易触发材料的整体提前断裂，因而终止了材料后续的可变形能力和可塑性加工性。要保证工程部件的安全性，通常需要将裂纹扼杀在摇篮里。

该论文的第一作者、上海大学博士生时培建告诉《中国科学报》，绝大多数工程部件的异常断裂失效，例如大桥钢结构的断裂、建筑物钢结构的坍塌、雪灾中电力支架的崩塌等，都是由于所用结构材料中微裂纹的产生以及随后的不可控扩展造成。

---

材料中出现的微裂纹，在应力作用下将快速扩展成宏观裂纹，最终触发工程部件的过早失效，对人类的生命财产安全带来巨大威胁。他解释道，即使原始材料中没有裂纹，但当局部形变能力被耗尽时，裂纹将不可避免地产生，问题的关键在于裂纹的扩展是否可控。

如果让裂纹的生长维持在可控的范围内，即使产生高密度裂纹，但又能防止它们聚合长大，这样就能保证材料不但不失效，还能弥补材料塑性。博士一年级时，在钟云波的指导下，时培建就开始思考如何直面裂纹，并且控制它，利用它。

然而，控制叛逆的裂纹并不容易。在人造延展性材料中宽容裂纹是违反直觉的，因为这些裂纹通常萌生于局部严重塑性变形区域，而此处的组织结构通常不具备持续的应变硬化能力，因此，这些裂纹的传播无法被及时有效地缓冲和控制住。

虽然有些金属复合材料表现出裂纹宽容能力，但也只能帮助材料获得有限的额外拉伸塑性。总的来说，在人造材料中，裂纹宽容辅助的整体延伸率往往没有我们期待那样高。时培建说。

## 如鱼得水的结构

通过将近三年的探索，钟云波团队最终在一种新型的共晶高熵合金材料中，找到了解决广泛的裂纹产生与高的拉伸塑性之间相冲突的办法。

他们通过采用独特的凝固组织控制手段，没有将共晶层片组织设计成常见的单向排列结构，而是将共晶高熵合金材料中均匀的结构设计凝固成类似鱼骨的多级共晶层片结构。结果表明，在不牺牲强度的情况下，这种共晶鱼骨高熵材料获得了优异的断裂韧性，特别是其延伸率达到了前所未有的50%，是传统铸态共晶材料的3倍。

共晶高熵合金是新兴的一类多主元的天然复合材料，具有自由排列的异质层片结构，FCC层片（软性相）和BCC层片（硬性相）交替共生。独特的组织结构是提升合金材料性能的最重要手段之一，而常规的微结构控制工艺已经很难取得更大进步，采用极端的制备工艺来控制合金材料的组织结构，已成为冶金和材料等领域的前沿热点。钟云波表示。

---

为此，研究团队率先提出了超常冶金和超常制备的思路，即综合利用冶金学和材料学的相关知识，引入外场、变重力、快速凝固、极端制备等条件，以探索制备更高性能的结构和功能材料。

起初，研究团队通过控制轧制和热处理的方法，实现了共晶高熵合金中的异质微层片遗传和优良强塑性。随后，他们又提出了一个新的设想，如果将共晶高熵合金中的双相异质层片，在凝固过程中就对其进行控制，形成定向生长的多级层片结构，能否提升材料的性能呢？

为了验证这一设想，他们采用了独特的定向凝固设备——超常凝固制备，通过对热流、拉速、温度梯度、过热度、合金成分等多因素的调控，发现当材料形成常见的单向排列细层片结构时，材料的性能并没有得到大幅提升，而当材料结构被可控地凝固成鱼骨状的层片结构时，共晶高熵合金却显现出独特的多级裂纹缓冲能力，因而带来了显著的性能改善。

在共晶高熵合金中，多级鱼骨状的共晶结构设计倾向于在拉伸变形时触发高密度裂纹的产生，然而，结构诱导的多级裂纹缓冲阻止了裂纹在~25%的巨大应变范围内发生灾难性的长大和破坏。时培建解释道，因此，在这种结构中，高密度的裂纹不但没有恶化延伸率，反而作为一种有效的增塑策略，补偿了变形能力差的片层的有限拉伸塑性。

钟云波表示，这种仿生鱼骨结构以及伴生的强裂纹缓冲效应，对设计高延伸率的多级结构材料以及开发具有优良断裂韧性的有色合金材料、特殊钢材料、复合材料、新型骨替代生物材料等均具有很好的指导作用。此外，这种仿生的微结构设计方法和理念对于指导更广泛的共晶型高熵以及传统合金的性能改善也具有显著的实际意义。

## 大科学装置助攻

实际上，制备出高性能的结构和功能材料后，还有一个关键环节，就是解释其强化机制及其伴生的多级裂纹缓冲效应。然而，这种定向凝固的共晶鱼骨材料涉及材料学、仿生学、凝固学等多学科，要想探明其背后机理，并非易事。

王沿东告诉《中国科学报》，高熵合金中BCC层片的裂纹形成与特殊相变密切相关。这种相变不同于传统相变，常见的技术难以解析，只能通过大科学装置来识别。

---

但即使利用大科学装置，研究共晶鱼骨材料也极具挑战。这种材料接近于单晶体，相较于多晶体和粉末等，单晶体相变与应力研究是最困难的。因为探测器是二维的，而单晶体好比是三维立体的‘导仪球’，要想通过二维探测器获得‘导仪球’上每个倒易衍射点的信息，就必须转动试样，而且整个试样转动还必须做到全覆盖。王沿东说。

然而，并非导仪球上所有衍射点的信息都是有效的，判断抓取哪些点是开展研究的关键。早在20多年前，王沿东就开始从事基于同步辐射源的高能x射线与中子衍射应用金属材料结构与微结构分析与表征研究，凭借丰富的经验，仅在美国阿贡国家实验室开展了3次实验后，他们就获得了该材料所需的数据信息。

获取数据后更大的挑战是分析数据。多晶体的每个衍射环上都有数据，而单晶体可利用的数据却很少，利用少量数据去推算应力信息是非常困难的。王沿东说，为此，他们改进了分析方法，通过在单晶体里取特定方向的点来准确估算材料的应力。

经过近半年的数据分析，他们最终探明了所研究材料中两相的变形和断裂机制及其应力配分，研究表明，定向凝固材料拉伸塑性的显著提高归因于其多级的鱼骨结构和形变诱导特殊相变带来的强裂纹缓冲效应。

钟云波表示，目前，这种结构和机理已经在高强高导铜合金、工模具钢等传统材料中进行了很好地推广应用，未来将在更多的材料中进行探索尝试。

在他看来，对于新兴的合金材料和结构，一方面需要不断优化改良其性能，另一方面需要在更多其它方面进行深入研究，揭示更多潜在的有趣特征，例如抗氢脆性能、耐腐蚀性能、高温性能等，并根据这些性能特征综合评估其应用领域和服役场景。（来源：中国科学报田瑞颖）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1126/science.abf6986>

版权声明：凡本网注明来源：中国科学报、科学网、科学新闻杂志的所有作品，网站转载，请在正文上方注明来源和作者，且不得对内容作实质性改动；微信公众号、头条号等新媒体平台，转载请联系授权。邮箱：shouquan@stimes.cn。

作者：钟云波等 来源：《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](http://www.iikx.com)转发