

---

# 3D打印高性能纳米片层共晶高熵合金

作者：writer 来源：爱科学

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/19493.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！*

3D打印高性能纳米片层共晶高熵合金。北京时间2022年8月3日晚23时，美国麻省大学（UMass-Amherst）陈文教授与佐治亚理工学院（Georgia Institute of Technology）朱廷教授团队合作在Nature期刊上发表了一篇题为Strong yet ductile nanolamellar high-entropy alloys by additive manufacturing的研究成果。

该成果首次报道了通过激光3D打印技术来制备具有高强韧力学性能及各向同性特征的双相纳米片层共晶高熵合金，并通过三维原子探针、原位中子衍射、晶体塑性有限元模拟等表征手段揭示了合金的强韧化机理。

论文通讯作者为陈文、朱廷；第一作者为任杰、张寅。其他合作单位包括美国德州农工大学（Texas AM University）、美国橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Laboratory）、美国莱斯大学（Rice University）、美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Laboratory）和美国加州大学洛杉矶分校（University of California, Los Angeles）。

选区激光熔化技术（Laser powder bed fusion, L-PBF）中极高的温度梯度和超快的冷却速率，可以有效地细化晶粒从而实现材料的高强度。目前L-PBF技术制备的纳米合金具有高强度但拉伸塑性低。材料强度和塑性的相互制衡（strength-ductility tradeoff）是材料科学中的普遍难题。通过将合金设计的焦点从相图的角落转移到中心，从而实现广阔的成分和相空间，高熵合金的出现为合金设计和材料开发提供了一种新的范式。特别地，作为一种有潜力的高熵合金，共晶高熵合金具有双相片层状异构组织，展示出比传统合金更优异的力学性能。传统铸造法制备的共晶片层组织在微米或亚微米尺度，严重限制了材料的强度。相反，纳米片层组织具有高强度但塑性较低。另外，纳米片层组织目前主要通过薄膜沉积和大塑性变形等方法制备，较强的织构会导致材料存在各向异性的力学行为，限制了高熵合金在实际生产中的应用。

因此，美国麻省大学陈文团队利用L-PBF技术制备出高性能的双相纳米片层AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金。该材料展示出优异的强塑性匹配能力（屈服强度>1.3 GPa，且均匀延伸率大于14%），优异的强塑性匹配能力明显优于目前公开报道的3D打印技术制备的其它合金。同时，利用原位中子衍射揭示了应力在不同晶面及FCC和BCC相中的实时分配情况及两相位错密度的演变。佐治亚理工学院朱廷团队开发了双相材料晶体塑性有限元模型，首次揭示了BCC纳米片层罕见的显著加工硬化行为。

多尺度非平衡态纳米片层组织实现强度塑性协同效应。激光选区熔化打印过程中的极高温度梯度和冷却速率使AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金形成了多尺度非平衡态组织：具有随机织构的微米尺

---

度共晶团 ( eutectic colony ) 中分布着BCC+FCC纳米片层结构 ( 平均片层间距 : ~215 nm ) , BCC片层中的调幅分解进一步导致纳米尺度化学异构。共晶团的随机晶体学取向和生长方向有助于实现材料的各向同性力学特性。

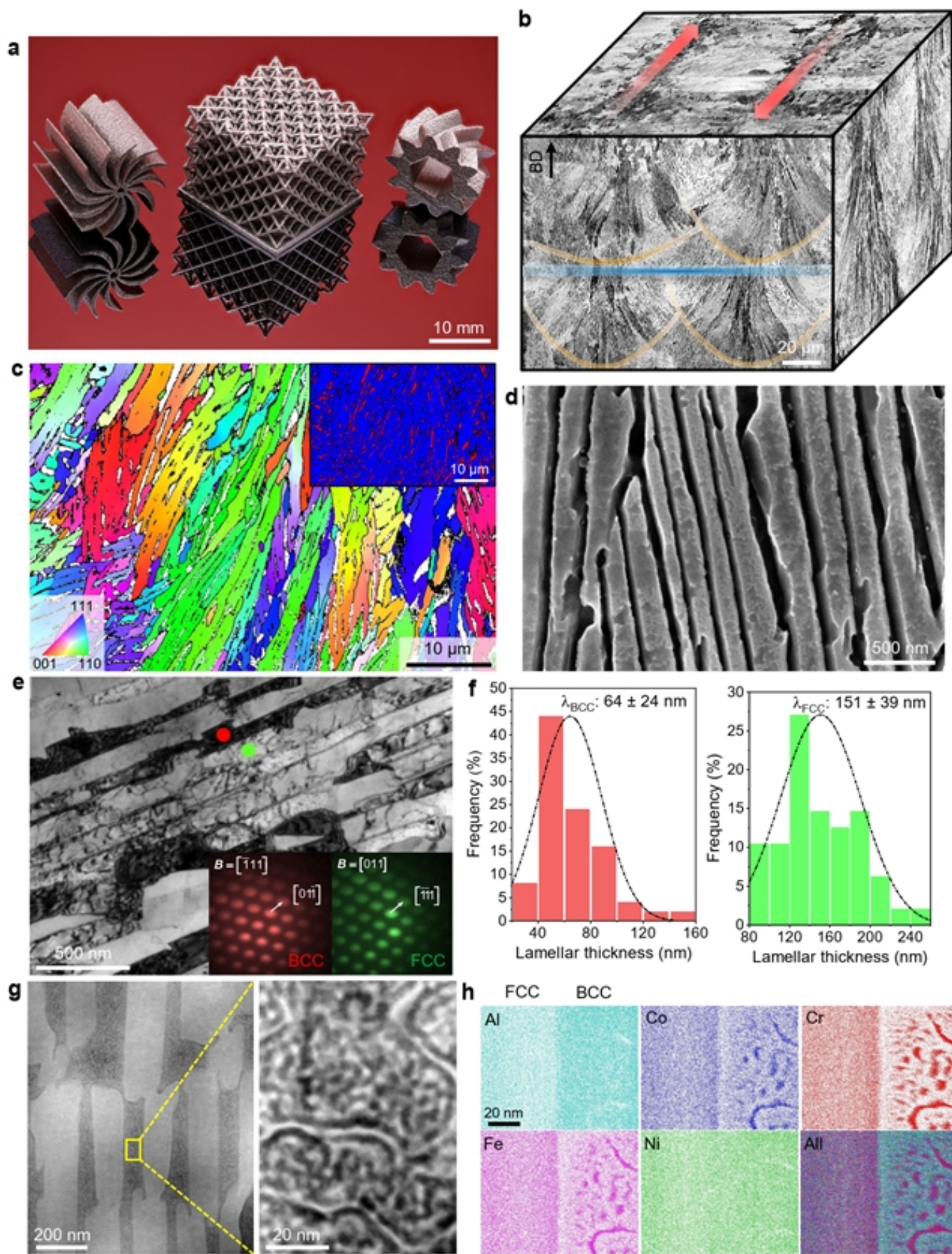


图1 : AM

AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>的多尺度非平衡态组织表征。光学显微组织像和EBSD结果表明共晶团（eutectic colony）具有随机结构（random texture）。HAADF和APT表征证实了BCC纳米片层中的化学调幅（chemical modulation）。

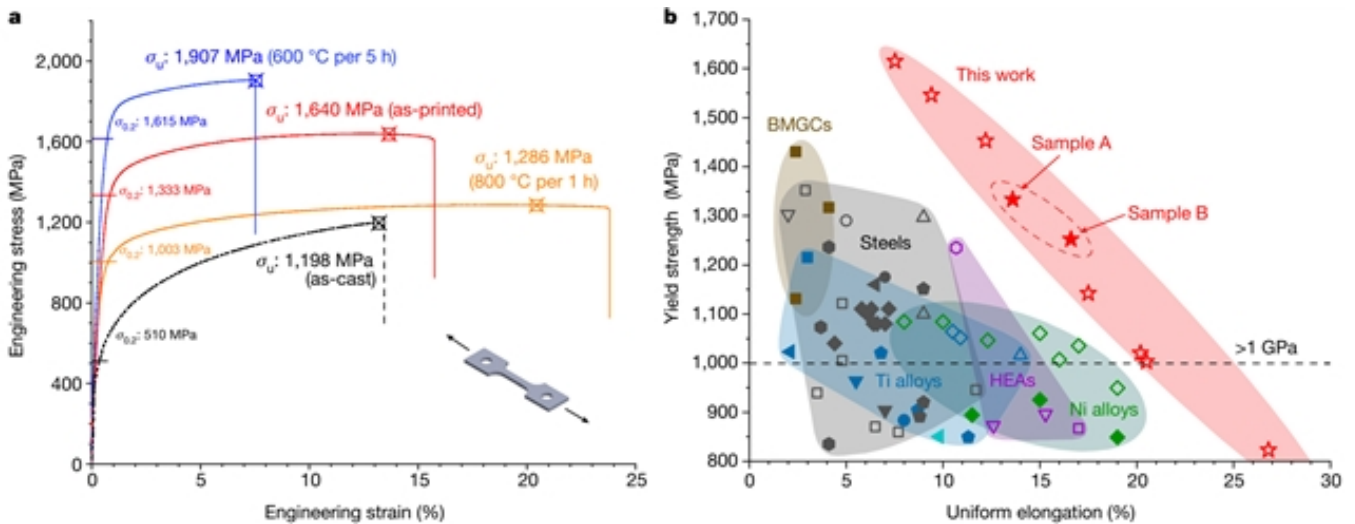


图2：（a）AM AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>的拉伸力学性能。（b）图中红色五角星代表本研究的结果，实心标志代表材料打印态性能，空心标志代表材料热处理态性能。

BCC纳米片层罕见的显著加工硬化行为有助于提高材料的塑性。传统BCC纳米金属由于缺乏应变硬化行为而展现出有限的塑性。在这项研究中采用原位中子衍射、双相晶体塑性有限元模拟及透射电镜等手段均证明BCC纳米片层比FCC纳米片层具有更高的位错密度增殖速率及加工硬化速率。变形过程中FCC片层及半共格片层界面的约束、具有不同取向的相邻共晶团及共晶团界面的约束，以及BCC片层中的纳米尺度化学异构都有助于提高BCC纳米片层的应变硬化能力，从而提高材料的塑性。

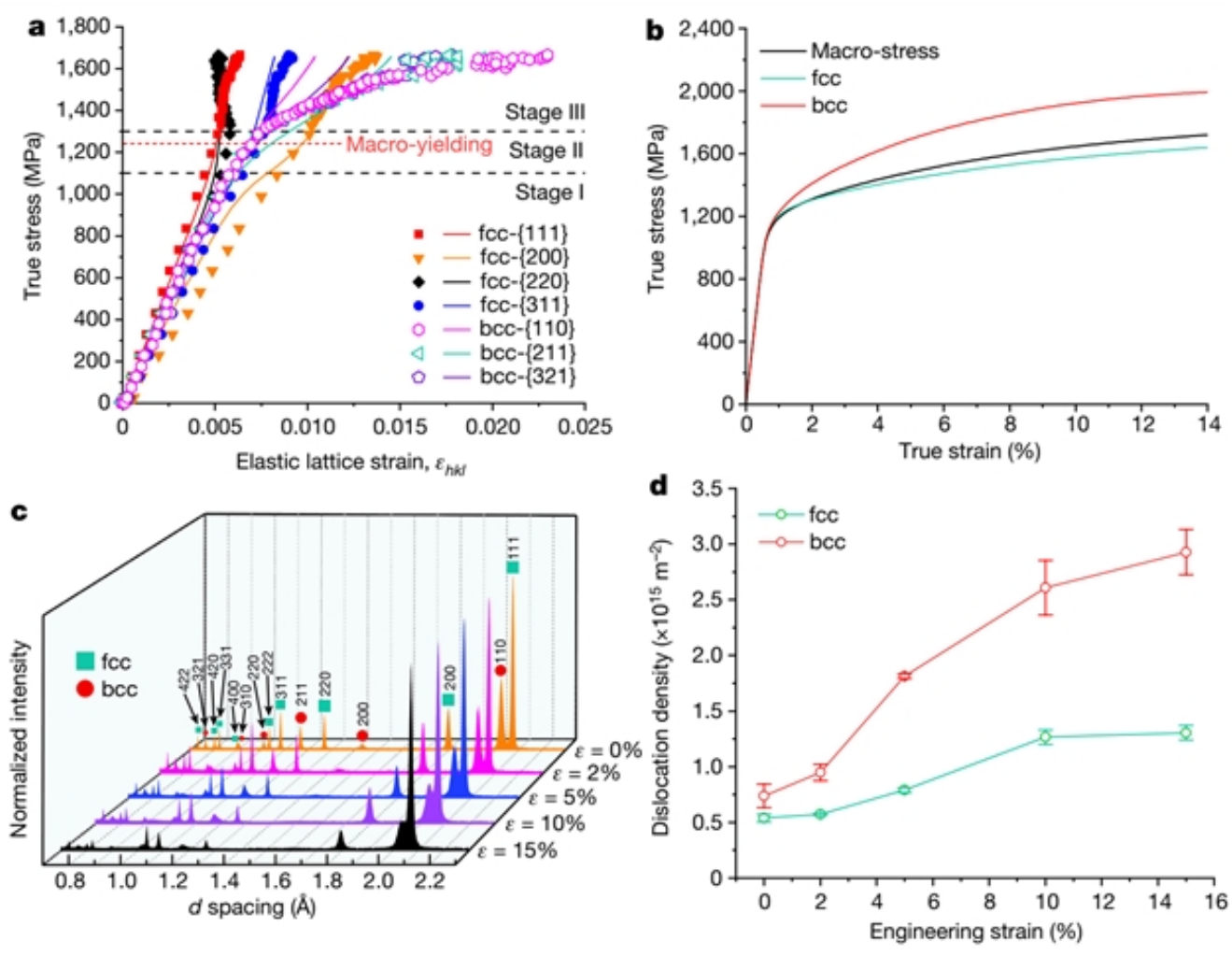
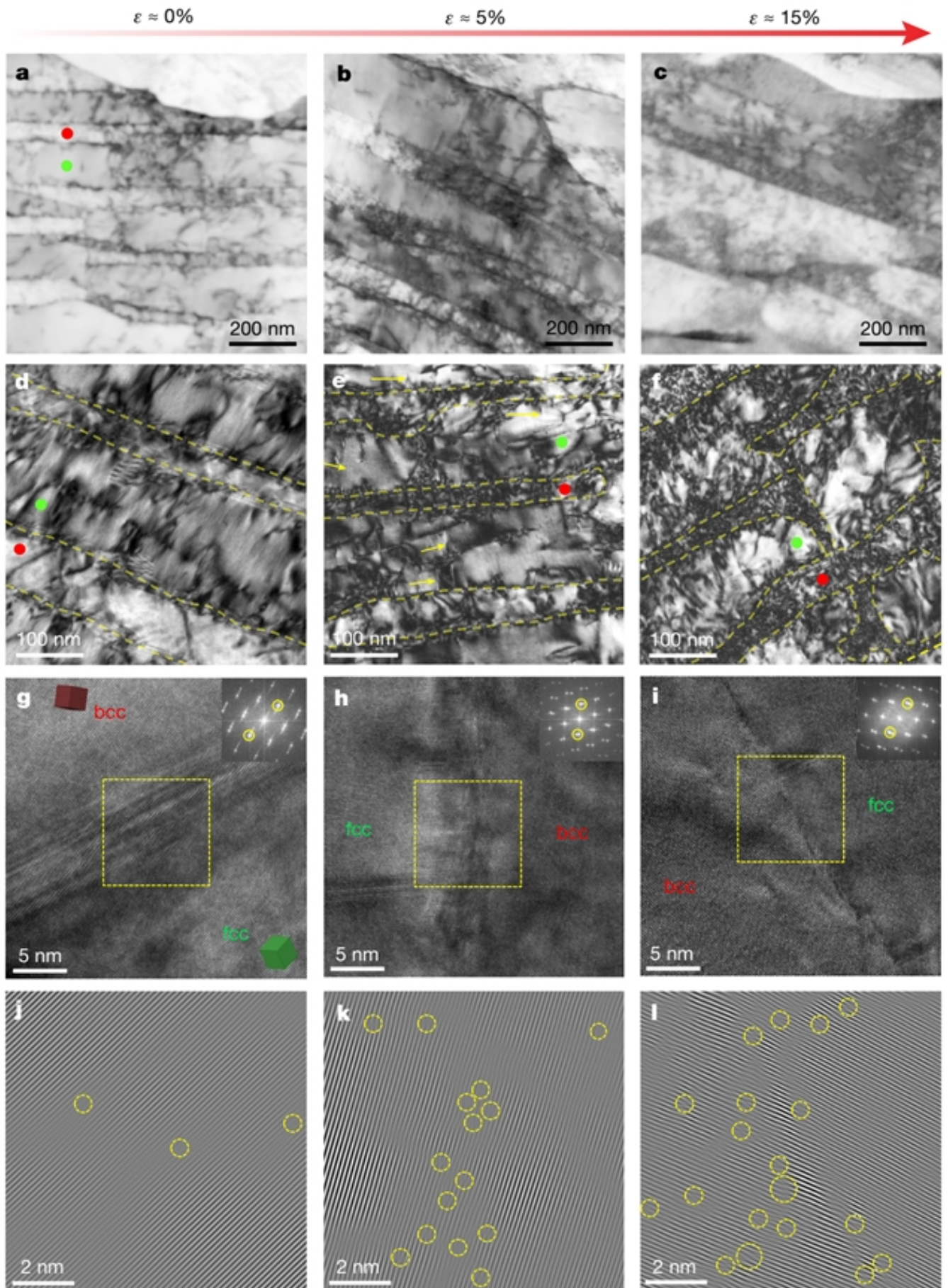


图3：通过原位中子衍射研究AM

AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>的变形机理。(a) 拉伸方向FCC和BCC特征晶面的晶格应变 (lattice strain) 随真应力的演变，图中标志和实线分别代表中子衍射实验和晶体塑性有限元模拟结果。(b) 拉伸过程中应力在FCC和BCC相中的实时分布。(c) 不同应变下合金的中子衍射图谱。(d) 通过改进Williamson-Hall方法计算得到的FCC和BCC相位错密度随应变的变化。



---

图4：AM AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>的变形微结构演变。（a-c）不同应变下合金的虚拟明场旋进电子衍射（precession electron diffraction）图，图中红色标志代表BCC纳米片层，绿色标志代表FCC纳米片层。（d-f）不同应变下合金的高倍明场TEM图，图中黄色箭头指明5%应变下FCC纳米片层中的变形层错（deformation-induced stacking faults），黄色虚线指明FCC-BCC相界面。（g-i）高分辨TEM图显示原子尺度FCC-BCC相界面特征。（j-l）不同应变下对应的反快速傅里叶变换（IFFT）图，图中黄色圆圈指明刃型位错（edge dislocations）。

该研究揭示了利用激光3D打印特有的热物理场特性及高熵合金的多主原特性设计高性能双相/多相，异质纳米结构的思路。纳米片层组织特有的强韧化机理可有效指导高性能铝合金及钛合金多相片层结构设计。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04914-8>

作者：陈文等 来源：《自然》

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