



## FeCoNiCrMn系高熵合金变形机制的研究进展

牛利冲, 李杰, 赵思杰, 吴凯迪, 张波, 冯运莉

(华北理工大学 冶金与能源学院, 唐山 063210)

**摘要:** 高熵合金的多主元特征, 使其在变形过程中表现出多种变形机制的协同作用, 因而表现出优异的性能。与传统合金相比较, 对高熵合金中多种变形机制调控的可能性更大。研究发现, 微结构及其演变将直接影响合金中的变形机制, 通过“微结构-变形机制-性能”这一设计思路, 在高熵合金中引入多变形机制并调控其激活顺序成为今后研究高熵合金的重点。本文对FeCoNiCrMn系高熵合金变形机制的研究现状进行了综述, 总结了高熵合金中常见的几种变形机制, 并对高熵合金中变形机制的研究进行了展望。

**关键词:** 高熵合金; FeCoNiCrMn; 变形机制; 微结构

文章编号: 1004-0609(2022)-08-2316-11

中图分类号: TG139

文献标志码: A

**引文格式:** 牛利冲, 李杰, 赵思杰, 等. FeCoNiCrMn系高熵合金变形机制的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(8): 2316-2326. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42013

NIU Li-chong, LI Jie, ZHAO Si-jie, et al. Research progress of deformation mechanism of FeMnCoCrNi high entropy alloy system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8): 2316-2326. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42013

CANTOR等<sup>[1]</sup>和YEH等<sup>[2]</sup>提出一种新的合金化思路并设计开发了高熵合金, 其多主元的特性彻底颠覆了根据Hume-Rothery规则建立的经典合金化框架。由于具有较高的混合熵, 高熵合金容易形成简单的固溶体结构, 如FCC、BCC和HCP结构<sup>[3-5]</sup>, 到目前为止, 人们已经对FeCoNiCrMn系高熵合金进行了大量研究。研究发现, 通过对高熵合金成分以及加工工艺的控制可以将马氏体相变、层错、位错滑移和孪生等变形机制引入到高熵合金中。但不同的是由于原子尺寸差和模量错配使高熵合金具有严重的晶格畸变<sup>[6-7]</sup>, 这使得传统位错滑移理论和固溶强化效应不能很好地解释高熵合金中的位错运动; 同时, 研究发现在变形过程中双向相

变诱导塑性(TRIP)效应<sup>[8]</sup>, 这与传统TRIP合金完全不同; 孪晶在高熵合金变形过程中与层错和位错之间产生的交互作用也比传统的合金<sup>[9]</sup>中的更加明显; 此外, 异质结构的引入会使合金在不损失塑性的情况下大幅度提高强度。由于冷变形后高熵合金较高的再结晶温度和晶粒长大温度以及较大的晶粒长大激活能和晶粒长大指数<sup>[8]</sup>, 高熵合金冷轧退火后比传统合金更容易形成异质结构。这些都说明高熵合金的变形机制在一定程度上有区别于传统合金, 人们还需对高熵合金中的强化理论和变形机制进行深入的研究, 进一步认识高熵合金中塑性变形机理、应变硬化行为和微结构演化三者之间的联系。因此, 本文对FeCoNiCrMn系高熵合金中强化

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974134); 河北省科技重大专项项目(21281008Z); 河北省高等学校科学技术重点项目(ZD2016019)

收稿日期: 2021-07-08; 修订日期: 2021-08-13

通信作者: 李杰, 副教授, 博士; 电话: 13315519630; E-mail: leijie@ncst.edu.cn

和变形机制的研究进展进行了总结, 并对高熵合金今后的研究方向进行了展望。

## 1 高熵合金的强化机制

### 1.1 固溶强化

传统合金中固溶强化是指将不同于基体材料的金属或非金属原子, 融入到基体材料原子点阵间隙或结点上, 引起局部晶格畸变, 产生局部应力场, 阻碍位错的运动, 提高材料的强度。但是由于高熵合金中组元较多导致其没有明显的溶剂与溶质之分, 且本身就具有较为严重的晶格畸变, 所以早期科研人员认为固溶强化对高熵合金性能的贡献十分有限<sup>[10]</sup>。JEONG 等<sup>[11]</sup>将 Al 加入到 FeCoNiCrMn 中, 并通过测量铸态均匀化后 FeCoNiCrMn 和  $Al_{0.5}FeCoNiCrMn$  的屈服强度, 发现合金中的固溶强化作用并不明显。然而最近 DING 等<sup>[12]</sup>发现用 Pd 代替 Mn 加入到 FeCoNiCrMn 合金中, 会造成合金

局部较大的晶格畸变, 严重阻碍位错的运动, 提高合金的强度。此外, 科研工作者分别将微量的 C 和 N 加入到 FeCoNiCrMn 中也发现了同样的现象<sup>[13-14]</sup>。这表明高熵合金中固溶强化作用不仅与加入原子的尺寸和含量有关, 而且还与合金中元素的种类以及主元之间产生的不同理化作用有关。

### 1.2 细晶强化

晶粒细化可以提高合金的综合力学性能, 晶粒尺寸越小晶界的体积分数越高, 阻碍位错的运动, 提高合金性能。屈服强度和晶粒尺寸可以用经典 Hall-Petch 公式表示:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k/\sqrt{d} \quad (1)$$

式中:  $d$  为晶粒尺寸;  $k$  是材料常数。OTTO 等<sup>[15]</sup>对三种不同晶粒尺寸的 FeCoNiCrMn 高熵合金的研究表明(见图 1), 在 873 K 以下, 温度对式(1)中曲线斜率  $k$  的值影响不大。但是随着温度降低,  $k$  值呈逐渐升高的趋势, 77 K 温度下  $k$  值达到 538

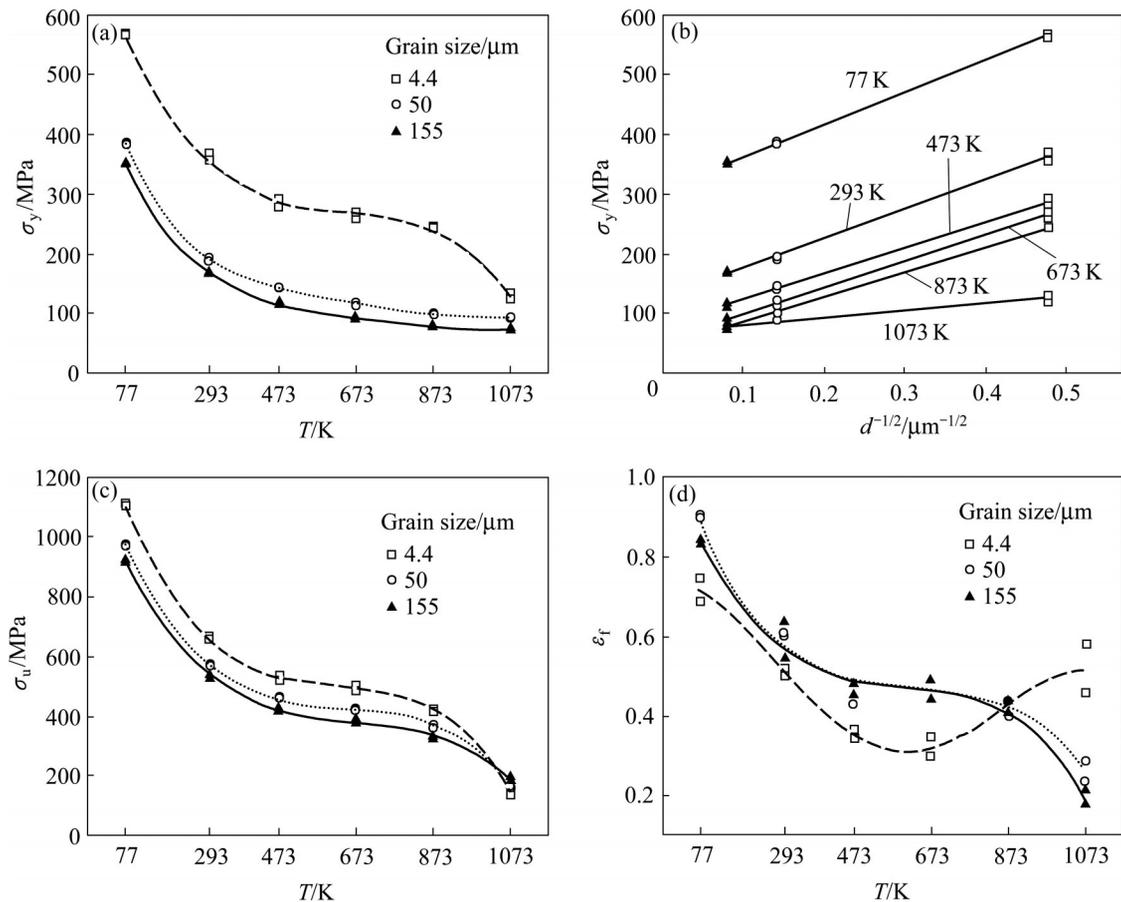


图 1 不同晶粒尺寸下温度与 FeCoNiCrMn 合金力学性能的关系<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Relationship between temperature and mechanical properties of FeCoNiCrMn alloy with different grain sizes<sup>[15]</sup>: (a), (b) Yield stress ( $\sigma_y$ ); (c) Ultimate tensile strength ( $\sigma_u$ ); (d) Elongation to fracture ( $\epsilon_f$ )

$\text{MPa}\cdot\mu\text{m}^{-1/2}$ 。科研工作者通过在FeCoNiCrMn高熵合金中加入B元素,延缓晶粒的长大<sup>[16]</sup>。这是因为B元素容易在晶界偏聚,阻碍晶界的运动。同样添加C元素以后,FeCoNiCrMn高熵合金的 $k$ 值提高到 $935.25\text{ MPa}\cdot\mu\text{m}^{-1/2}$ ,提高合金的强度<sup>[17]</sup>。除了添加微量元素,通过放电等离子烧结的方法也可以得到较细晶粒的高熵合金<sup>[18]</sup>。

### 1.3 沉淀强化

通过改变成分或者热处理工艺,在高熵合金的基体中析出金属化合物可以有效地提高合金的强度。LI等<sup>[19]</sup>通过对含有Al的FeCoNiCrMn高熵合金进行冷轧和退火后,在FCC基体中出现富Cr的 $\sigma$ 相和富Ni、Al的 $B2$ 相(见图2)。由于这些析出相的存在,合金在经过退火后将获得超细晶多相组织,

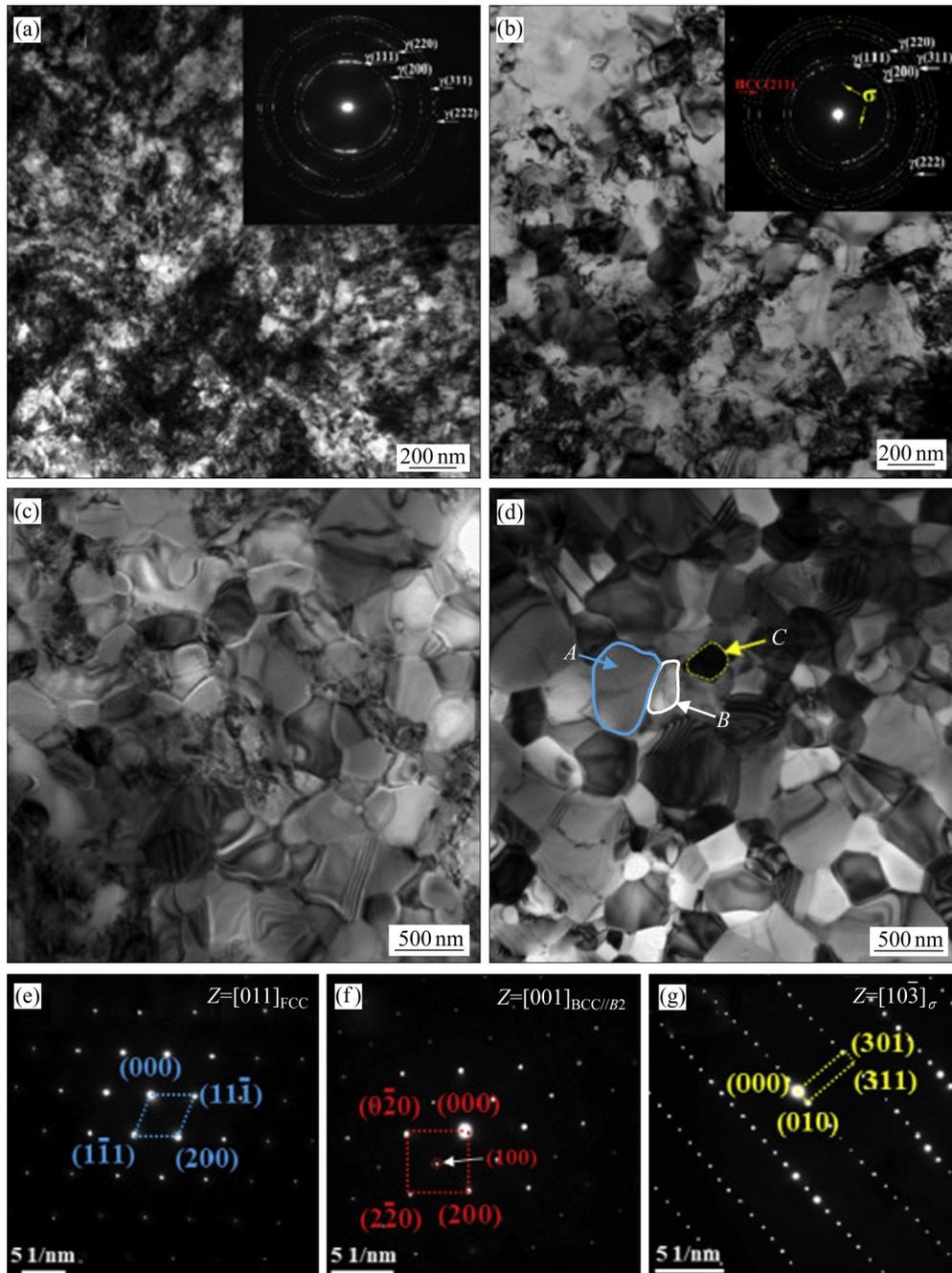


图2  $\text{Al}_{0.3}\text{FeCoNiCrMn}$ 高熵合金不同温度退火1 h后的TEM像以及图2(d)中晶粒的SAED谱<sup>[19]</sup>

**Fig. 2** TEM images of  $\text{Al}_{0.3}\text{FeCoNiCrMn}$  HEA annealed at different temperatures for 1 h ((a)–(d)) and SAED patterns taken from A, B and C grains marked by arrows in Fig. 2(d) ((e)–(g))<sup>[19]</sup>: (a) 500 °C; (b) 600 °C; (c) 700 °C; (d) 800 °C; (e) Grain A; (f) Grain B; (g) Grain C

使该合金具有较高的强度。KLIMOVA 等<sup>[20]</sup>发现将 C 加入到 FeCoNiCrMn 系高熵合金, 并经过形变热处理后会在基体中析出富含 Cr 的  $M_{23}C_6$  型碳化物。由于碳化物引起的钉扎效应, 强烈限制晶粒的生长, 使合金在室温和低温下具有优异的力学性能。此外, B 的加入使 FeCoNiCrMn 合金析出大量的硬质纳米级  $(Cr, Fe)_2B$  颗粒, 提高合金的综合力学性能<sup>[21]</sup>。

## 2 变形机制的研究现状

### 2.1 位错滑移机制

FeCoNiCrMn 系高熵合金在室温和低温下都具有优良的延展性。室温下屈服强度仅为 125 MPa, 但在 77K 条件下屈服强度达到 800 MPa 且保持较高的伸长率<sup>[22]</sup>。早期对 FeCoNiCrMn 系高熵合金研究表明, 已研究的所有晶粒尺寸(4.4~155  $\mu\text{m}$ )和温度下(77~873 K), 在塑性变形的初始阶段位错沿  $\{111\}$  滑移面开动, 滑移方向为  $1/2[112]$ 。此外, 由于合金中大量层错的存在表明合金中全位错分解为  $1/6\langle 112 \rangle$  Shockley 分位错<sup>[15]</sup>。

LAPLANCHE 等<sup>[22]</sup>研究 FeCoNiCrMn 合金在 77 K 和 293 K 温度下位错的演化过程, 发现在较小应变水平下由于位错滑移在晶界处产生位错堆积,

随着应变增加, 位错堆积严重, 进而形成胞状结构。同时发现在 77 K 和 293 K 两种温度下, 位错密度变化较小, 这表明了温度对位错演化的影响不大。ZHANG 等<sup>[23]</sup>发现, 高熵合金高的强度和塑性与不同应变阶段塑性变形机制的协同作用有关。这是因为合金在不同的塑性变形阶段中出现位错与位错, 位错与层错强烈的交互作用(见图 3)严重阻碍位错的运动, 提高了合金的加工硬化率。

为了揭示温度和应变对高熵合金屈服应力、位错演化和加工硬化的影响, 研究人员测量了 FeCoNiCrMn 合金在不同温度和应变水平下活化体积的变化<sup>[22, 24]</sup>, 从理论解释了活化体积的变化趋势, 并总结了流变应力与应变率、温度和塑性应变的具体理论框架。实验结果表明, 活化体积的变化趋势遵循传统合金中的 Cottrell-Stokes 定律, 揭示了 FeCoNiCrMn 合金塑性变形的机理是固溶强化和林位错硬化。

此外, DING 等<sup>[12]</sup>用 Pd 代替 Mn 加入到 FeCoNiCrMn 合金中并研究了对合金中位错演化的影响。发现原子尺寸较大, 电负性较高的 Pd 元素加入合金后会打乱合金中的元素分布, 造成合金局部不均匀和较大的晶格畸变。由于较高的晶格畸变导致位错滑移困难, 主滑移面上较高的阻力导致位错进行交滑移, 从而提高了合金的强度、加工硬化

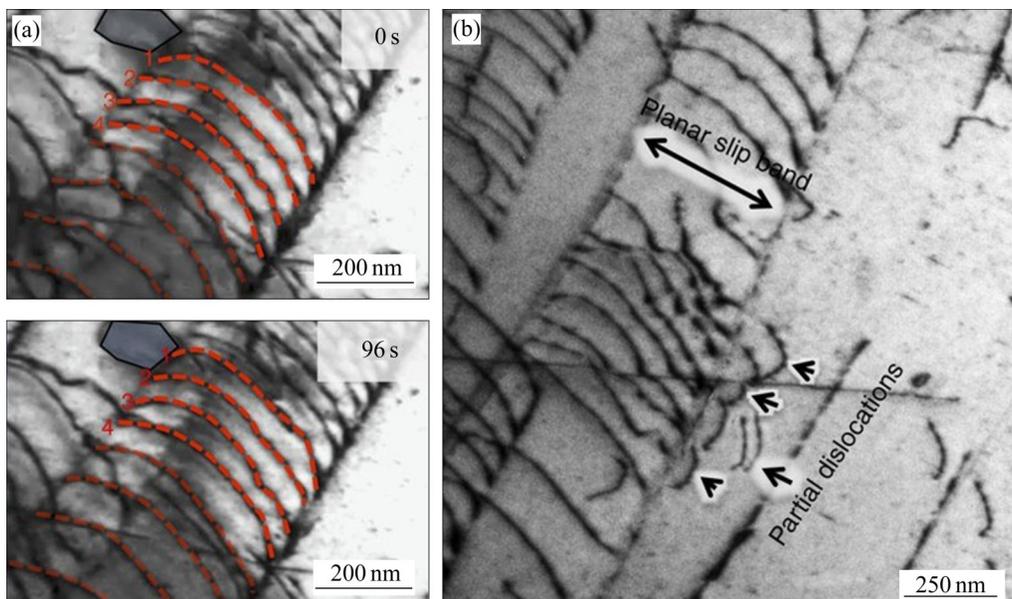


图3 FeCoNiCrMn 高熵合金 TEM 下位错滑移的动态过程<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Dynamic process of FeCoNiCrMn HEA dislocation slip under TEM<sup>[23]</sup>: (a) Image represent dynamic process of planar slip of undissociated type dislocations; (b) Bright-field TEM image showing blocking of partial dislocations by localized band of planar slip

和延展性。KAUSHIK等<sup>[25]</sup>揭示了不同应变水平下的位错胞、堆垛层错和机械孪晶间的交互作用，并通过模拟和实验证实了合金微观结构和组织的演化与位错滑移系和形变孪晶取向密切相关。结果表明，位错滑移和剪切带的形成有利于强织构的形成(见图4)，而形变孪晶则相反。

对FeCoNiCrMn系高熵合金的研究表明，在室温下其变形机制主要是以位错滑移为主，通过位错-位错、位错-层错等之间的交互作用阻碍位错的滑移，提高合金的性能。此外，研究发现与传统合金一样，位错滑移是高熵合金中基本的强化和变形机制。

## 2.2 TWIP机制

在传统合金中，人们对孪晶和位错滑移的相互作用进行了广泛的研究，发现通过降低合金系统的层错能会激活孪晶诱导塑性效应(Twinning induced plasticity, TWIP)<sup>[26-29]</sup>。FeCoNiCrMn高熵合金在常温下并未发现TWIP效应，但是通过不同的加工工艺可以在其中引入TWIP机制，这为提高高熵合金

性能提供新的设计方案。

低温下，FeCoNiCrMn合金在变形过程中会出现形变孪晶，进而产生TWIP效应。LAPLANCHE等<sup>[30]</sup>研究了FeCoNiCrMn合金在低温(77 K)和室温下的孪晶演化过程。研究发现在77 K和293 K下孪生所需的临界分切应力大致相同，但由于在77 K形变时，合金在颈缩之前比273 K更早地达到孪生的临界分切应力，从而形成大量纳米孪晶，增加晶界面积，减少位错的平均自由程，产生动态Hall-Petch效应，提高了加工硬化率，因此推迟颈缩的发生。而SUN等<sup>[31]</sup>对不同晶粒尺寸FeCoNiCrMn高熵合金的研究发现，晶粒细化抑制了形变孪晶的形成，晶粒尺寸控制着变形机制由位错滑移向形变孪晶的转变，并提出形变孪晶临界分切应力的公式：

$$\sigma_T = M \frac{\gamma}{b_p} + \frac{k_T}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

式中： $M$ 为泰勒因子； $\gamma$ 为层错能； $b_p$ 为分位错的柏氏矢量； $k_T$ 是孪晶的Hall-Petch常数； $d$ 为晶粒尺寸。GLUDOVATZ等<sup>[32]</sup>发现FeCoNiCrMn合金在低温下塑性有明显反常提高，与传统低温增脆的常识不符。这和其在低温下裂纹尖端出现的大量纳米孪

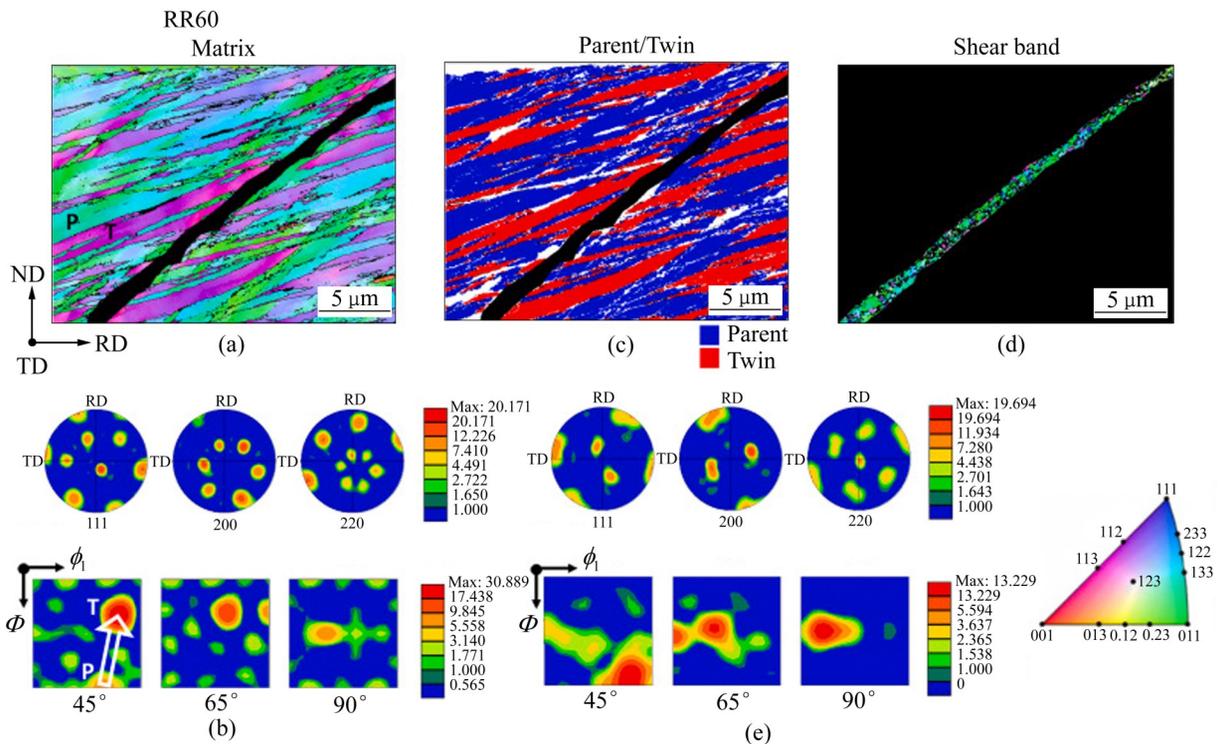


图4 FeCoNiCrMn高熵合金冷轧后组织和织构演变图<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Microstructures and texture evolution diagrams of FeCoNiCrMn HEA after cold rolling<sup>[25]</sup>: (a) IPF map of twinned matrix; (b) PFs and ODF sections of twinned matrix; (c) Parent-twin relationship established by TSL-OIM software; (d) IPF map of shear band developed in twinned matrix; (e) PFs and ODF sections of shear band orientations

晶桥有关。LIU 等<sup>[33]</sup>研究了低温下 FeCoNiCrMn 高熵合金孪晶和织构的转变, 研究发现形变孪晶沿平行拉伸方向形成, 其含量随着塑性变形程度增强。KIREEVA 等<sup>[34]</sup>和 STEPANOV 等<sup>[35]</sup>研究了 FeCoNiCrMn 高熵合金形变过程中晶粒取向和孪晶演化之间的关系。发现沿  $\langle 111 \rangle // TA$  取向的晶粒比沿  $\langle 001 \rangle // TA$  和  $\langle 101 \rangle // TA$  取向的晶粒更有利于形变孪晶。

此外, 通过不同的加工工艺也可以将 TWIP 效应引入到 FeCoNiCrMn 高熵合金的室温变形中。MOON 等<sup>[36]</sup>研究发现对高熵合金在 77 K 进行预形变并进行低温退火后, 会在 FeCoNiCrMn 中引入并保留大量的形变孪晶, 从而使合金的屈服强度提高到 1284 MPa。同时, JOO 等<sup>[37]</sup>研究了低熵、中熵和高熵合金的变形行为, 结果表明, FeCoNiCrMn 高熵合金中形变纳米孪晶的出现, 不仅产生动态 Hall-Petch 效应, 而且改变了合金的位错亚结构, 提高合金的强度和塑性。

除此之外, 学者们通过调控合金系统的层错

能, 在其他高熵合金中也观察到形变孪晶。例如 SHI 等<sup>[38]</sup>从异质结构、晶粒尺寸和元素含量三方面出发设计出一种具有多级硬化机制的高熵合金, 随着应变的增加, 在 FCC 晶粒中先后出现多种不同类型的孪晶。通过对这种多类型形变纳米孪晶机制的顺序激活(见图 5), 使该合金具有超过 20% 的伸长率 and 高达 1.2 GPa 强度的最优组合。

本节主要叙述 FeCoNiCrMn 系高熵合金中的孪生效应, 发现在低温下, 纳米孪晶的出现会极大地提高合金的强塑性。通过改变合金微结构使合金的变形方式由位错滑移向孪生转变, 从而将 TWIP 机制引入高熵合金已成为一大研究热点。此外, 通过对以前研究的总结, 发现在高熵合金中引入的多类型形变孪晶机制将成为今后设计超高强塑性高熵合金的重要方法。

### 2.3 TRIP 机制

在传统合金中, 通过对合金中相的转变来调节塑性变形, 从而使合金获得的高强度和um高延展性,

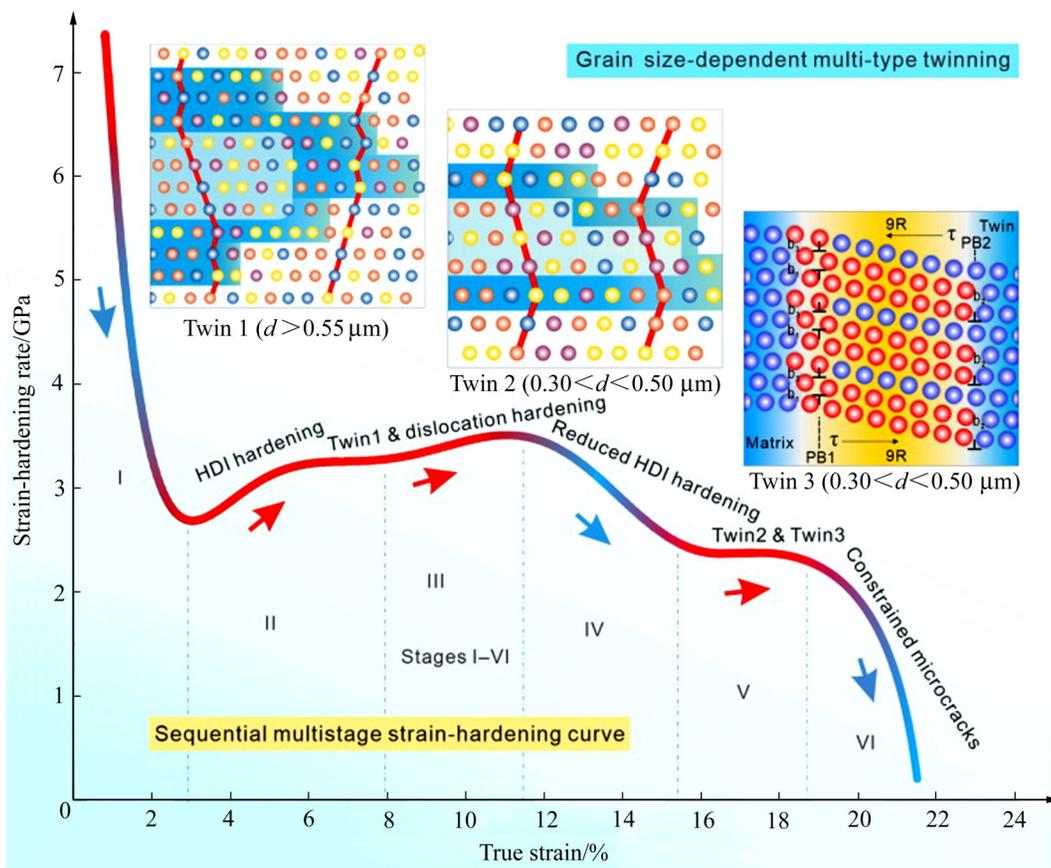


图5 不同晶粒尺寸的多类型孪晶TWIP高熵合金多级应变硬化图<sup>[38]</sup>

Fig. 5 Schematic illustration of sequential multistage strain hardening assisted by grain size-dependent multi-type twinning<sup>[38]</sup>

这激发了研究人员对高熵合金中相变诱导塑性效应 (Phase transformation induced plasticity, TRIP) 的研究。

SHAHMIR 等<sup>[39]</sup>对 FeCoNiCrMn 高熵合金在低温和室温下分别进行了高压扭转实验, 结果表明, 应变增加和变形温度降低将导致合金结构由 FCC 向 BCC 和 HCP 的相变, 明显提高了合金的应变硬化率。LI 等<sup>[9]</sup>在 FeCoNiCrMn 的基础上调整合金中主元的含量, 改变合金系统的层错能, 降低相的稳定性, 将“亚稳工程”引入高熵合金。随着形变的进行, HCP 相体积分数的增加会加剧位错和相界面的相互作用, 严重阻碍位错的滑移, 提高了合金的加工硬化率, 推迟了颈缩。有研究表明, 在室温拉伸时发现合金中发生 HCP-FCC 的可逆相变<sup>[40]</sup>, 同样, 在 Fe<sub>50</sub>Mn<sub>30</sub>Co<sub>10</sub>Cr<sub>10</sub> 中也观察到类似的双向 TRIP 效应<sup>[8]</sup>。这种双向的 TRIP 效应使合金具有较高的应变硬化率, 提高合金的性能。CHEN 等<sup>[41]</sup>探究了高熵合金局部化学成分、TRIP 效应和微结构演化之间

的协同作用。结果表明, 变形过程中位错和层错的相互作用促进 HCP 相的形成, 进而导致合金中局部化学成分发生变化, 促进 Lomer-Cottrell 位错锁的形成(见图 6), 强烈阻碍位错运动, 提高合金的加工硬化率。

通过对 FeCoCrNiMn 系高熵合金的研究发现, 对高熵合金主元的调控可以将 TRIP 效应引入到合金中。但是, 与传统合金最大的不同是高熵合金在拉伸过程中, 随着应变的增加将会发生可逆的相转变。由于这种可逆相变的发生, 使合金保持较高的应变硬化率和均匀的塑性变形能力, 因此高熵合金中的双向 TRIP 效应为克服强度-塑性矛盾提供了新的思路。

#### 2.4 异质形变诱导硬化机制

除了以上几种变形机制, 科研人员发现合金组织中异质结构的出现会提高材料的应变硬化率并实现强度-塑性的良好匹配。BAI 等<sup>[42]</sup>在 FeCoNiCrMn

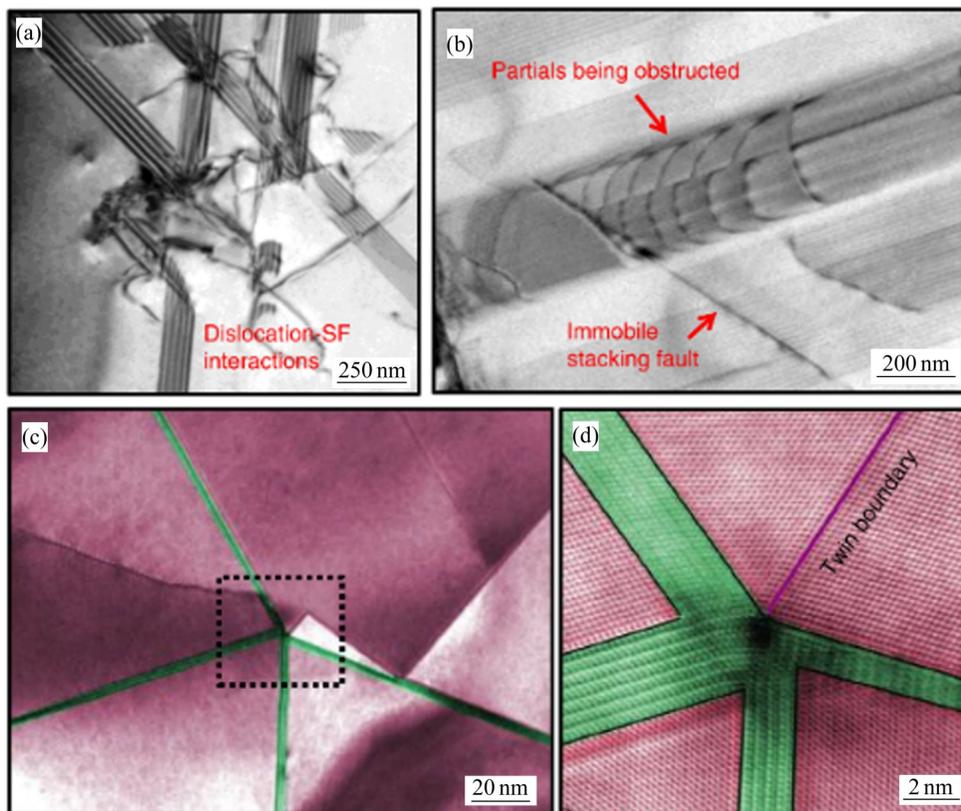


图6 Fe<sub>34</sub>Co<sub>34</sub>Ni<sub>6</sub>Cr<sub>20</sub>Mn<sub>6</sub>高熵合金中HCP相与层错对位错运动的阻碍<sup>[41]</sup>

Fig. 6 Intersection of thin HCP plates and obstacle effect of stacking faults on dislocation motion<sup>[41]</sup>: (a) TEM image showing blocking of dislocations by 3D stacking fault network; (b) Partial dislocations being hindered by immobile stacking fault, which eventually reversed dislocation glide direction; (c) STEM image of conjunction of four HCP lamellae and one twin; (d) Higher magnification HAADF image corresponding to region marked by box in Fig. (c)

高熵合金中引入由细小等轴晶(EG)、粗大柱状晶(CG)和 $\sigma$ 析出物组成的异质结构, 并深入分析了异质结构引起的强化机制。研究表明合金在塑性变形过程中位错主要产生在柱状晶中, 等轴晶中很少产生位错(见图 7)。EG 和 CG 塑性变形能力的不同, 导致在两者界面处出现应变梯度。为了保持应变的连续性, 在 CG 晶界附近出现大量的几何必需位错

(GND), 位错的堆积和 GND 的出现引起背应力强化, 进而提高合金的强度。另外, XIE 等<sup>[43]</sup>制备出具有纳米颗粒的多级异质结构 FeCoNiCrMn 高熵合金, 并将其和不含纳米颗粒的异质结构材料进行比较。实验结果证实, 由于弹性模量的提高(见图 8 (a)), 导致超细晶(UFG)和粗晶粒之间的形变不相容性增强; 同时, UFG 中的纳米颗粒会与位错相互作用

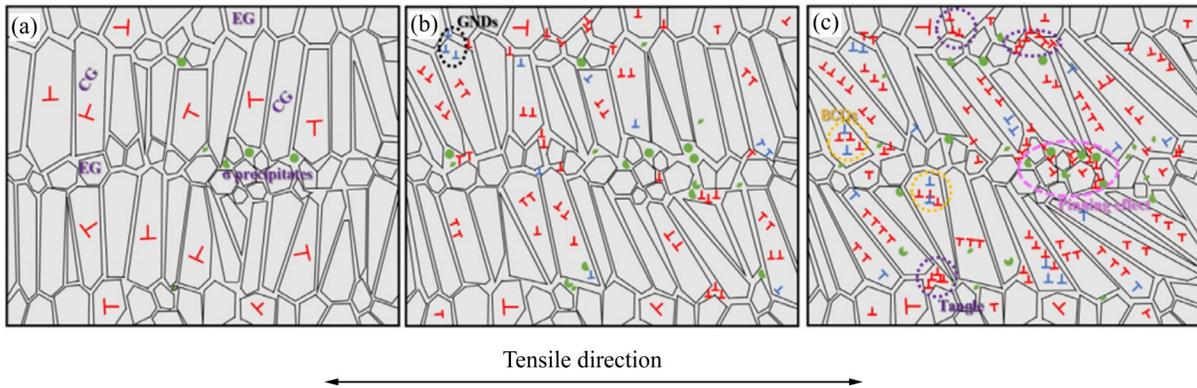


图 7 FeCoNiCrMn 高熵合金中温退火样品形变示意图<sup>[42]</sup>

Fig. 7 Schematic illustration of sample annealed of FeCoNiCrMn HEA at intermediate-temperature<sup>[42]</sup>: (a) Before deformation; (b) During deformation; (c) After deformation

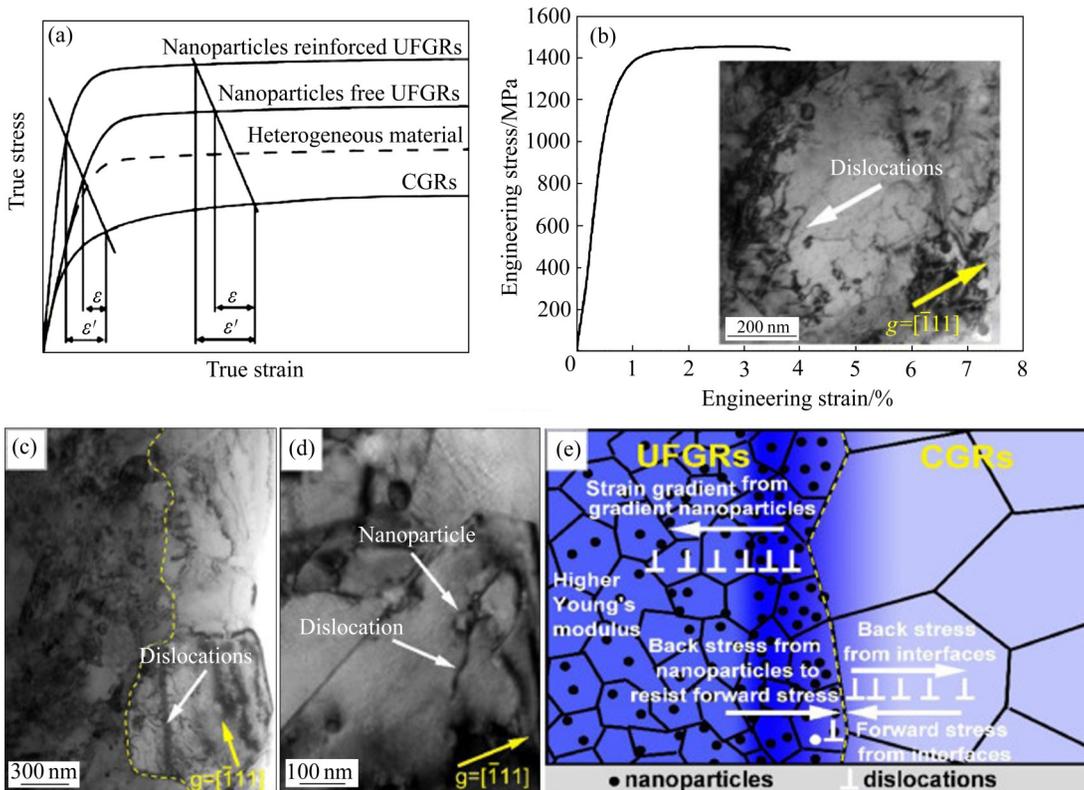


图 8 纳米颗粒与 FeCoNiCrMn 高熵合金异质结构的交互作用<sup>[43]</sup>

Fig. 8 Interaction between nanoparticles and FeCoNiCrMn high entropy alloy heterostructure<sup>[43]</sup>: (a) Schematic drawing of strain partitioning showing larger strain difference in both elastic and plastic deformation; (b) Typical tensile engineering stress-strain curve and TEM BF image of sample with pre-straining of about 3%; (c), (d) TEM BF images of sample deformed to tensile strain of about 4%; (e) Schematic drawing illustrating three mechanisms to enhance back stress in sample

用(见图8(d)),产生额外的背应力;纳米颗粒的存在将会进一步细化UFG晶粒(见图8(e)),造成高的应变梯度,产生更高的背应力,这些都将使合金性能得到强化。

除此之外, YANG等<sup>[44]</sup>和 AN等<sup>[45]</sup>分别将异质结构引入到CrCoNi中熵合金和FeCoNiCrMn高熵合金,结果表明,异质形变引起的强化可以有效实现合金高强度-塑性的良好组合。

异质结构的引入,为提高应变硬化率和实现强度-塑性的优良匹配提供了新的强化方法。但是并非所有的异质结构都将提高合金的性能,这与异质结构中不同强度水平组织的大小、比例、结构等密切相关。因此,有关异质形变强化机制研究方面还需要大量实验和理论工作。

### 3 总结与展望

综上所述,高熵合金中变形机制并不是单独存在的。在变形过程中,是多种机制的协调作用使高熵合金具有高的强韧性。这意味着调控高熵合金中不同变形机制和其激活顺序,对其强韧化具有十分重要的意义。今后可从变形机制的角度出发,通过调整合金组分、改变合金的特性、调控加工工艺,控制微观结构的演变,获得理想的微结构,如位错密度、晶粒尺寸、堆垛层错、孪晶等。进而在合金中引入多种变形机制,并控制其激活顺序,提高合金的综合性能。按照这种设计理念,会更直接、更有效地在高熵合金广阔的成分设计空间中,找到突破传统合金性能极限的可能。

### REFERENCES

- [1] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 375/376/377: 213-218.
- [2] YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6: 299-303.
- [3] YANG T, ZHAO Y L, TONG Y, et al. Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys[J]. *Science*, 2018, 362(6417): 933-937.
- [4] MA Y, WANG Q, JIANG B B, et al. Controlled formation of coherent cuboidal nanoprecipitates in body-centered cubic high-entropy alloys based on  $Al_2(Ni,Co,Fe,Cr)_{14}$  compositions[J]. *Acta Materialia*, 2018, 147: 213-225.
- [5] QIAO J W, BAO M L, ZHAO Y J, et al. Rare-earth high entropy alloys with hexagonal close-packed structure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(19): 195101.
- [6] 畅海涛, 霍晓峰, 李万鹏, 等. 高熵合金强化机制的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(10): 3633-3645.  
CHANG Hai-tao, HUO Xiao-feng, LI Wan-peng, et al. Research development of strengthening mechanism of high entropy alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(10): 3633-3645.
- [7] 吕昭平, 雷智锋, 黄海龙, 等. 高熵合金的变形行为及强韧化[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1553-1566.  
LÜ Zhao-ping, LEI Zhi-feng, HUANG Hai-long, et al. Deformation behavior and toughening of high-entropy alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1553-1566.
- [8] LU W, LIEBSCHER C H, DEHM G, et al. Bidirectional transformation enables hierarchical nanolaminate dual-phase high-entropy alloys[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(44): e1804727.
- [9] LI Z M, PRADEEP K G, DENG Y, et al. Metastable high-entropy dual phase alloys overcome the strength-ductility trade-off[J]. *Nature*, 2016, 534: 227-230.
- [10] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, SALISHCHEV G A, et al. Effect of V content on microstructure and mechanical properties of the  $CoCrFeMnNiV_x$  high entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 628: 170-185.
- [11] JEONG H T, KIM W J. Microstructure tailoring of  $Al_{0.5}CoCrFeMnNi$  to achieve high strength and high uniform strain using severe plastic deformation and an annealing treatment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 71: 228-240.
- [12] DING Q, ZHANG Y, CHEN X, et al. Tuning element distribution, structure and properties by composition in high-entropy alloys[J]. *Nature*, 2019, 574: 223-227.
- [13] STEPANOV N D, YURCHEKO N Y, TIKHONOVSKY M A, et al. Effect of carbon content and annealing on structure and hardness of the  $CoCrFeNiMn$ -based high entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 687: 59-71.
- [14] XIE Y C, CHENG H, TANG Q H, et al. Effects of N addition on microstructure and mechanical properties of  $CoCrFeNiMn$  high entropy alloy produced by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering[J]. *Intermetallics*, 2018, 93: 228-234.
- [15] OTTO F, DLOUHÝ A, SOMSEN C, et al. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a

- CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61: 5743–5755.
- [16] SEOL J B, BAE J W, LI Z M, et al. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2018, 151: 366–376.
- [17] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, CHERNICHENKO R S, et al. Effect of thermomechanical processing on microstructure and mechanical properties of the carbon-containing CoCrFeNiMn high entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 693: 394–405.
- [18] 夏泽邦, 陈维平, 蒋珍飞, 等. 粉末冶金制备 $\text{Fe}_{28}\text{Ni}_{28}\text{Mn}_{28}\text{Cr}_8\text{Cu}_8$ 与 $\text{Fe}_{28}\text{Ni}_{28}\text{Mn}_{28}\text{Cr}_8\text{Al}_8$ 高熵合金的微观组织与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(5): 1049–1056.
- XIA Ze-bang, CHEN Wei-ping, JIANG Zhen-fei, et al. Microstructure and mechanical properties of  $\text{Fe}_{28}\text{Ni}_{28}\text{Mn}_{28}\text{Cr}_8\text{Cu}_8$  and  $\text{Fe}_{28}\text{Ni}_{28}\text{Mn}_{28}\text{Cr}_8\text{Al}_8$  high entropy alloys prepared by powder metallurgy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(5): 1049–1056.
- [19] LI Z Y, FU L M, PENG J, et al. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of an ultrafine-structured Al-containing FeCoCrNiMn high-entropy alloy produced by severe cold rolling[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 786: 139446.
- [20] KLIMOVA M, SHAYSULTANOV D, SEMENYUK A, et al. Effect of carbon on recrystallised microstructures and properties of CoCrFeMnNi-type high-entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 851: 156839.
- [21] 侯丽丽, 梁霄羽, 要玉宏, 等. B含量对FeCrCoNiMn高熵合金组织及力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(10): 3203–3207.
- HOU Li-li, LIANG Xiao-yu, YAO Yu-hong, et al. Effect of B content on the microstructure and mechanical properties of FeCrCoNiMn high-entropy alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(10): 3203–3207.
- [22] LAPLANCHE G, BONNEVILLE J, VARVENNE C, et al. Thermal activation parameters of plastic flow reveal deformation mechanisms in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2018, 143: 257–264.
- [23] ZHANG Z J, MAO M M, WANG J W, et al. Nanoscale origins of the damage tolerance of the high-entropy alloy CrMnFeCoNi[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 10143.
- [24] HONG S I, MOON J, HONG S K, et al. Thermally activated deformation and the rate controlling mechanism in CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 682: 569–576.
- [25] KAUSHIK L, KIM M S, SINGH J, et al. Deformation mechanisms and texture evolution in high entropy alloy during cold rolling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 141: 102989.
- [26] CHRISTIAN J W, MAHAJAN S. Deformation twinning[J]. *Progress in Materials Science*, 1995, 39: 1–157.
- [27] ALLAIN S, CHATEAU J P, BOUAZIZ O. A physical model of the twinning-induced plasticity effect in a high manganese austenitic steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 387/388/389: 143–147.
- [28] PIERCE D T, BENTLEY J, WITTIG J E, et al. Stacking fault energy measurements of Fe-Mn-Al-Si austenitic twinning-induced plasticity steels[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 66: 753–756.
- [29] SRINIVAS B, DHAL A, PANIGRAHI S K. A mathematical prediction model to establish the role of stacking fault energy on the cryo-deformation behavior of FCC materials at different strain levels[J]. *International Journal of Plasticity*, 2017, 97: 159–177.
- [30] LAPLANCHE G, KOSTKA A, HORST O M, et al. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 118: 152–163.
- [31] SUN S J, TIAN Y Z, LIN H R, et al. Transition of twinning behavior in CoCrFeMnNi high entropy alloy with grain refinement[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 712: 603–607.
- [32] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. *Science*, 2014, 345(6201): 1153–1158.
- [33] LIU T K, WU Z, STOICA A D, et al. Twinning-mediated work hardening and texture evolution in CrCoFeMnNi high entropy alloys at cryogenic temperature[J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 419–427.
- [34] KIREEVA I V, CHUMLYAKOV Y I, POBEDENNAYA Z V, et al. Orientation dependence of twinning in single crystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 705: 176–181.
- [35] STEPANOV N, TIKHONOVSKY M, YURCHENKO N, et al. Effect of cryo-deformation on structure and properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy[J]. *Intermetallics*, 2015, 59: 8–17.
- [36] MOON J, BOUAZIZ O, KIM H S, et al. Twinning engineering of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 197: 113808.
- [37] JOO S H, KATO H, JANG M J, et al. Tensile deformation behavior and deformation twinning of an equimolar CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 689: 122–133.
- [38] SHI P J, REN W L, ZHENG T X, et al. Enhanced strength-ductility synergy in ultrafine-grained eutectic high-entropy alloys by inheriting microstructural lamellae[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 489.

- [39] SHAHMIR H, ASGHARI-RAD P, MEHRANPOU M S, et al. Evidence of FCC to HCP and BCC-martensitic transformations in a CoCrFeNiMn high-entropy alloy by severe plastic deformation[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 807: 140875.
- [40] 伍诗伟. 微结构对 $Al_{0.1}CoCrFeNi$ 亚稳高熵合金变形行为的影响[D]. 上海: 上海大学, 2019: 28-37.  
WU Shi-wei. Effect of microstructures on the deformation behaviors of  $Al_{0.1}CoCrFeNi$  metastable high-entropy alloy[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019: 28-37.
- [41] CHEN S J, OH H S, GLUDOVATZ B, et al. Real-time observations of TRIP-induced ultrahigh strain hardening in a dual-phase CrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 826.
- [42] BAI Y J, JIANG H, YAN KUO, et al. Phase transition and heterogeneous strengthening mechanism in CoCrFeNiMn high-entropy alloy fabricated by laser-engineered net shaping via annealing at intermediate-temperature[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 92: 129-137.
- [43] XIE Y H, LIANG J M, ZHANG D L, et al. Sustaining strength-ductility synergy of CoCrFeNiMn high entropy alloy by a multilevel heterogeneity associated with nanoparticles[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 187: 390-394.
- [44] YANG M X, YAN D S, YUAN F P, et al. Dynamically reinforced heterogeneous grain structure prolongs ductility in a medium-entropy alloy with gigapascal yield strength[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(28): 7224-7229.
- [45] AN Z B, MAO S C, LIU Y N, et al. Hierarchical grain size and nanotwin gradient microstructure for improved mechanical properties of a non-equiatomic CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 92: 195-207.

## Research progress of deformation mechanism of FeMnCoCrNi high entropy alloy system

NIU Li-chong, LI Jie, ZHAO Si-jie, WU Kai-di, ZHANG Bo, FENG Yun-li

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** The multi-principal component characteristics of high entropy alloy make it show the synergistic effect of variety of deformation mechanisms in the deformation process, and then exhibit excellent properties. Compared with traditional alloys, it is more possible to regulate various deformation mechanisms in high entropy alloys. It is found that the microstructure and its evolution will directly affect the deformation mechanism in the alloy. Through the design idea of "microstructure-deformation mechanisms-properties", introducing multi-deformation mechanism into high entropy alloy and regulating its activation sequence has become the focus of high entropy alloy research in the future. In this paper, FeCoNiCrMn alloy system is taken as an illustrative example for the current discussion and summary research status of several deformation mechanisms in alloys. Finally, the future research on deformation mechanism in high-entropy alloys is prospected.

**Key words:** high-entropy alloy; FeCoNiCrMn; deformation mechanisms; microstructure

**Foundation item:** Project(51974134) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(21281008Z) supported by the Major Science and Technology Special Project of Hebei Province, China; Project(ZD2016019) supported by the Key Science and Technology Project of Colleges of Hebei Province, China

**Received date:** 2021-07-08; **Accepted date:** 2021-08-13

**Corresponding author:** LI Jie; Tel: +86-13315519630; E-mail: lejie@ncst.edu.cn

(编辑 李艳红)