

• 高熵合金凝固铸造与成型:多学科视角下的前沿挑战

特邀专栏

Solidification, Casting, and Forming of High-Entropy Alloys: Cutting-Edge Challenges
from a Multidisciplinary Perspective •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5112

高熵合金中的化学短程有序

乔珺威, 龙 燕

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要:高熵合金因其多主元特性突破了传统合金的设计局限,展现出优异的力学性能。近年来研究发现,高熵合金中普遍存在化学有序现象。本文综述了化学短程有序的形成机制、调控手段、表征技术及其对力学性能的影响。发现合金中化学有序的形成受混合焓和原子尺寸等多种因素影响;热处理工艺、掺杂间隙原子以及辐照处理等都能调控合金中的化学有序度;X射线衍射、透射电子显微镜技术以及计算机模拟是表征化学有序的常用方法;合金中的化学有序主要通过影响位错行为和层错能从而影响其力学性能。深入理解化学有序,可为通过成分设计与加工工艺提高高熵合金性能提供重要基础。

关键词:高熵合金;化学短程有序;力学性能

中图分类号: TG13

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)08-0731-08

Chemical Short-range Order in High-entropy Alloys

QIAO Junwei, LONG Yan

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: High-entropy alloys overcome the design limitations of traditional alloys because of their multiple principal element characteristics and excellent mechanical properties. Recent studies have shown that chemical ordering is common in high-entropy alloys. In this paper, the formation mechanism, regulation methods, characterization techniques and their effects on the mechanical properties of chemical short-range order materials are reviewed. The formation of chemical order in the alloy is affected by many factors, such as the mixing enthalpy and atomic size. The degree of chemical order in an alloy can be controlled by heat treatment, interstitial atom doping and irradiation treatment. X-ray diffraction, transmission electron microscopy and computer simulation are common methods used to characterize chemical order. The chemical order of an alloy affects its mechanical properties by affecting its dislocation behavior and stacking fault energy. An in-depth understanding of chemical order provides an important basis for improving the performance of high-entropy alloys through composition design and processing technology.

Key words: high-entropy alloy; chemical short-range order; mechanical properties

随着现代社会对高性能金属材料的迫切需求,传统合金逐渐不能满足现代工业的需求,因此,大量科研工作者致力于开发性能更为优异的合金。2004年 Yeh 等^[1]提出了高熵合金的概念,突破了传统合金的设计局限。与传统合金相比,高熵合金具有多个主元,不再严格区分溶质与溶剂。在以往认知中,多种元素混合会使得合金组织结构变得复杂,但随着对多元相图的进一步探索,发现多种元

素混合所形成的合金仍可能保持单相结构^[2]。高熵合金由于其优异的力学性能^[3]、良好的热稳定性^[4]、抗辐照^[5]、耐腐蚀^[6]等特性而备受关注。

研究初期,研究者认为高熵合金中的元素分布符合经典的固溶体模型,其元素原子随机占据晶格位点^[7-8]。然而,高熵合金各组成元素的原子半径、电子亲和力和自身物理特性等存在差异,各元素原子之间的相互作用复杂,合金中原子呈现均匀分布状态的

收稿日期: 2025-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(52271110)

作者简介: 乔珺威, 1982年生, 博士, 教授. 研究方向为特种高熵合金. Email: qiaojunwei@gmail.com

引用格式: 乔珺威, 龙燕. 高熵合金中的化学短程有序[J]. 铸造技术, 2025, 46(8): 731-738.

QIAO J W, LONG Y. Chemical short-range order in high-entropy alloys[J]. Foundry Technology, 2025, 46(8): 731-738.

可能性极小,这也就是高熵合金中局域化学短程有序(chemical short-range order, CSRO)的由来^[9-10]。高熵合金中的这种 CSRO 可通过改变熔炼凝固或热处理过程中的冷却速率增强^[11-12]。高熵合金中的 CSRO 会改变其层错能和位错滑移阻力从而影响力学性能,但是建立化学有序度与性能之间的关系仍然是巨大的挑战^[13]。透射电子显微镜(TEM)能够用来观测 CSRO,但这种表征方式也存在争议^[14-15]。随着像差校正技术的不断推进,原子尺度表征变得越来越精确,高角度环形暗场(HAADF)和环形明场(ABF)扫描透射电子显微镜(STEM)结合球差校正器被广泛应用于 CSRO 结构的表征。关于 CSRO 对高熵合金力学性能影响的研究有很多,例如对微观屈服强度^[16]、蠕变性能^[17]、摩擦性能^[18]及断裂韧性^[19]等。本文综述了高熵合金中化学短程有序的形成、调控、表征以及对合金力学性能的影响。

1 局域化学短程有序的形成原因

高熵合金的高混合熵特性限制了其组成元素之间相互结合的倾向,在研究初期,相关的研究者通常忽略了混合熵的作用,认为高熵合金的组成元素之间呈现均匀无序的分布状态。但这种说法不太准确,实际上在混合熵的作用下,不同元素间的结合倾向不同,高熵合金中的局域化学有序普遍存在。当合金中某些元素对之间的混合熵呈现负值时,它们之间具有较强的化学亲和力,容易形成原子对,从而促进局部化学有序的形成。Fernández-Caballero 等^[20]通过蒙特卡洛模拟发现,由于 Mo 元素与 Ta/Nb 元素之间的负混合熵,在 MoTaVW 和 MoNbVW 四元高熵合金中,Mo-Ta 和 Mo-Nb 对易结合形成类似 B2 相的有序结构。混合熵的正负直接决定了原子对结合的偏好,负混合熵促进不同元素间的有序结构形成,而正混合熵则可能导致同类原子聚集从而抑制化学有序的形成^[21]。Yang 等^[22]利用分子动力学研究 CoCrNi 合金中的化学短程有序时,发现易形成局部的 Ni 偏聚和 Co-Cr 原子对。

高熵合金组成元素之间的原子尺寸差异也是导致局域化学短程有序形成的重要因素。若合金组成元素之间存在较大的原子尺寸差异,则会导致严重的晶格畸变^[23],从而使其局部应变能剧烈波动,促使原子在纳米尺度区域内重排以降低体系的能量势垒,进而形成局域化学有序结构。例如,在 $\text{Al}_8\text{Cr}_{17}\text{Co}_{17}\text{Cu}_8\text{Fe}_{17}\text{Ni}_{33}$ 高熵合金中,由于 Al 元素的原子半径相对较大,增强了合金的晶格畸变程度,最终导致 Al 原子与 Ni/Cu 原子优先配对形成局部化学短程有序

结构^[24]。在难熔高熵合金中也存在类似的情况,Tong 等^[25]采用 DFT(density functional theory)研究了 14 种难熔合金的局部结构,发现所有难熔高熵合金都存在一定的晶格畸变,但加入 Hf 或 Zr 元素后其晶格畸变程度显著增大。

在各元素原子半径差极小的 FeCoNiCr 合金中也存在化学短程有序^[26]。虽然该合金的晶格畸变可以忽略不计,但是其元素间的相互作用不容忽视。在磁相互作用下,Cr-Cr 和 Fe-Fe 原子对之间存在强烈的排斥作用,而 Ni-Cr 和 Ni-Fe 原子对在相互吸引作用下形成有序结构。

2 局域化学短程有序的调控方法

局域化学短程有序与原子的排列密切相关,热处理工艺是调控合金中化学有序度的常用方法。Zhang 等^[15]研究 CoCrNi 中熵合金中的短程有序时,合金热处理结束后利用快速水冷和缓慢炉冷两种不同的冷却方式进行冷却,发现缓慢炉冷的方式促进短程有序结构的形成。合金熔炼结束后的冷却方式也会影响化学短程有序的生成,Guo 等^[27]通过高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)研究激光粉末熔融技术(laser powder bed fusion, LPBF)制备的 CoCr-FeMnNi 合金,发现凝固过程中缓慢冷却的合金其化学有序度较高。除了冷却速度,时效温度也是一种调控合金 CSRO 的常用手段,在时效处理中,合金原子会进一步扩散和重排,导致具有互相偏好倾向的原子结对形成化学有序结构。高温热处理会加速合金原子的扩散,但研究发现,并非时效温度越高越有利于 CSRO 的形成,当超过一定温度后,合金中 CSRO 含量会降低^[28]。在时效温度一定时,控制时效时间也能影响 CSRO 结构的生成^[29]。随着时效时间延长,合金原子会进一步向合金能量降低的方向扩散和聚集,导致 CSRO 结构逐渐稳定并增加。但是时效时间也存在阈值,时效时间超过这个阈值后,可能导致 CSRO 生长成中程有序甚至长程有序,从而形成析出相。

除热处理工艺外,在合金中添加小尺寸的 B、C、N、O 等非金属元素也能促进 CSRO 的形成^[30-31]。这些元素通常在晶格间隙位置与合金中某些特定的金属元素形成牢固的键合关系,如 Mn-C、Ti-O 等。此外,辐照处理也会导致合金中的化学有序度变化,辐照产生的高浓度空位和间隙原子会加速原子迁移,促进合金中局部化学有序结构的形成。例如,Su 等^[32]研究辐照对 NiCoFeCrMn 高熵合金中 CSRO 的调控作用时,发现加大辐照剂量会导致合金中的

CSRO 分数增加。Zhang 等^[10]的研究也表明辐照会增强 CoCrNi 合金中的 CSRO 结构。

3 局域化学短程有序的特征

计算机模拟能够直观地呈现高熵合金中的 CSRO 结构,常见的 FCC 合金和难熔 BCC 高熵合金都有学者进行相关研究。Huang 等^[33]利用 MD-MC 混合模拟研究 HfNbTaZr 难熔高熵合金中的 CSRO,弛豫后的初始合金模型中各元素原子完全随机分布(图 1a);经过 2 000 ps 的混合模拟后形成了明显的有序结构(图 1c),从图 1e 中的双元素分布可以直观地看出该合金易形成 Hf-Ta 和 Nb-Ta 原子对;利用原子对的径向分布函数图也可以间接表征这种有序结构,如图 1d 所示,混合模拟后合金的第一近邻位置出现 Hf-Ta 和 Nb-Ta 原子对的概率最大。此外,利用计算机能够轻易地计算出上个世纪所提出的短程有序参数(Warren-Cowley 参数)^[34-36],该参数越负其有序度越高。Li 等^[37]在研究退火温度

对 CoCrNi 合金中化学有序度的影响时就利用此方法表征短程有序,如图 1f 所示。随退火温度升高合金的有序度降低,各元素原子更接近随机分布,图 1g 的原子分布与该趋势相对应,说明利用计算机计算 Warren-Cowley 参数表征合金的化学有序度完全可行。

尽管计算机模拟可直观呈现 CSRO 的原子构型,但实验验证仍面临挑战。虽然短程有序这一概念最开始是从实验的角度提出的,但目前各种实验表征方法都存在一些缺陷。早在 1950 年 Cowley^[34]就提出了短程有序参数这一概念,并且用 X 射线衍射对二元 Cu₃Au 合金中的有序结构进行表征,在漫散射背景中宽峰的位置对应于有序态的超晶格反射。2017 年 Zhang 等^[10]利用高能 X 射线和中子衍射技术研究了 CoCrNi 合金中的局域化学有序结构,发现其 EXAFS 函数的第一壳层位置存在原子失配情况,如图 2a 所示。这表明不同原子之间的键长略有不同,结合 Debye-Waller 因子(DW)可以揭示合金的

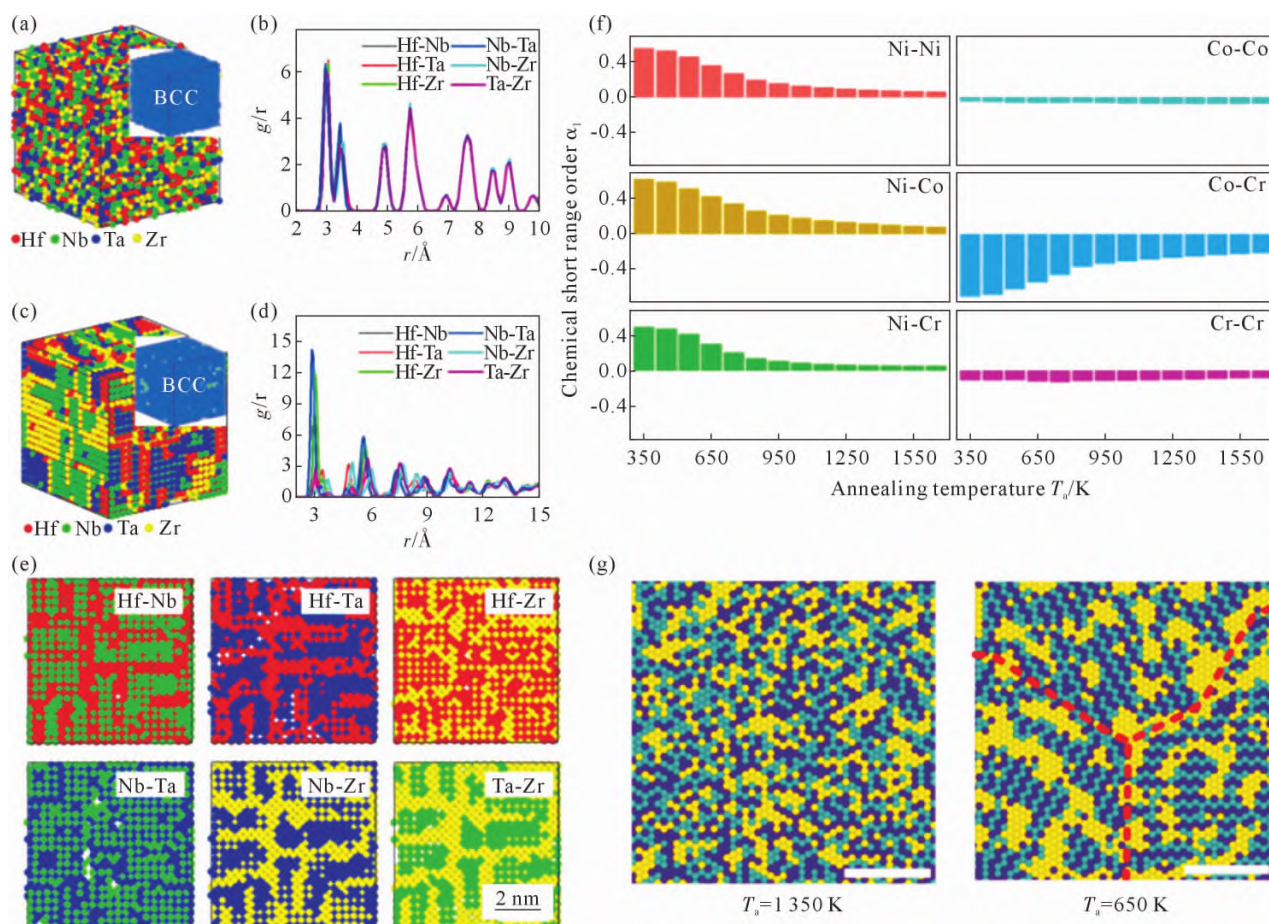


图 1 高熵合金原子分布图及径向分布函数图:(a, b) 初始 HfNbTaZr 合金模型的原子分布图及对应的径向分布函数图; (c~e) MD-MC 混合模拟后的原子分布、径向分布函数图和双元素原子分布;(f, g) CoCrNi 合金的 Warren-Cowley 参数随退火温度的变化关系和原子分布^[33,37]

Fig.1 Atomic distribution map and radial distribution function diagram of high-entropy alloys: (a, b) atomic distribution map and corresponding radial distribution function diagram of the initial HfNbTaZr alloy model; (c~e) post MD-MC hybrid simulation results showing the atomic distribution map, radial distribution function diagram, and dual-element atomic distribution map; (f, g) Warren-Cowley parameters as a function of the annealing temperature and atomic distribution map for the CoCrNi alloy^[33,37]

局域化学键合特征。这些研究的有序参数都只是停留在二元的范围,并不能表征多元合金的整体有序度,Singh 等^[38]将利用 X 射线衍射分析出的 Warren-Cowley 参数(图 2b)与合金组成元素的浓度相结合,借助几何工具描述吉布斯成分空间(图 2c),分析由 Warren-Cowley 参数所组成的矩阵的特征向量,从而量化多主元合金中的化学短程有序结构。

除了用 Warren-Cowley 参数表示化学短程有序外,也可用 TEM 和 STEM 直接观察合金中的 CSRO 结构。TEM 可以减少非弹性散射电子,增强衍射对比度,是研究合金中 CSRO 的有效手段。但这种表征方法也存在缺陷,代表 CSRO 的衍射信号是非常分散的,而 CSRO 的密度和尺寸都极小,它们所反射出的信号弱,难以将其与噪声背景区分开^[15,39]。因此,通常使用不同带轴的衍射图案来辨别 CSRO 的散射信号。如图 3a 所示,Chen 等^[39]在研究 VCoNi 合金时,在其[112]带轴的选区电子衍射花样中观察到 2 列额外的弥散阵点,这些弥散阵点即代表 CSRO 的散射信号,而在[110]带轴该信号消失。在此基础上,Chen 等^[40]利用 TEM 研究 VCoNi 合金不同带轴上的 CSRO 信号,发现其在[112]和[111]带轴上明显,而在[110]带轴上较弱,如图 3b 所示。有学者使用同样的方法在 CoCrNi 合金中也观察到 CSRO 结构^[15,28,41]。

4 局域化学短程有序对力学性能的影响

在传统合金中,由于添加溶质元素所引起的 CSRO 对合金的变形行为影响显著,如在 Cu 基体中引入 Al 可以形成 CSRO,同时会降低合金的层错能,而 CSRO 和层错能都会从根本上影响合金的力学性能^[15,42]。高熵合金中复杂的原子环境更容易导致 CSRO 的形成,CSRO 通常会通过影响位错形核、位错滑移和合金的层错能从而影响合金的力学性能^[30]。

与传统单主元合金中空位与原子的直接交换不同,多主元高熵合金中空位迁移过程是不同原子的联合行为,会导致位错形核的激活能更高^[43]。此外,CSRO 原子的非均匀分布引起的化学波动会进一步影响位错形核。Smith 等^[44]使用相场位错动力学模型分析了难熔高熵合金中的 Frank-Read 位错源,发现 CSRO 的存在降低了 Frank-Read 源的平均临界激活应力。Zhao 等^[45]证明,FeCrCoNiMn 高熵合金中的化学有序度可通过高温时效得到改善,这表明合金的整体强化可以通过增加均匀位错成核所需的应力来反映。如图 4 所示,Bu 等^[46]借助原位应变实验对 HfNbTiZr 高熵合金中 CSRO 与位错的相互作用过程进行了动态观察,通过 STEM 和 APT 的结合发现富 Hf 和富 Nb 的团簇导致局部晶格应变波动,而且对位错有钉扎作用。随着局部应力的增加,位错逐渐经历滑移、局部钉扎最后形成位错环。此外,

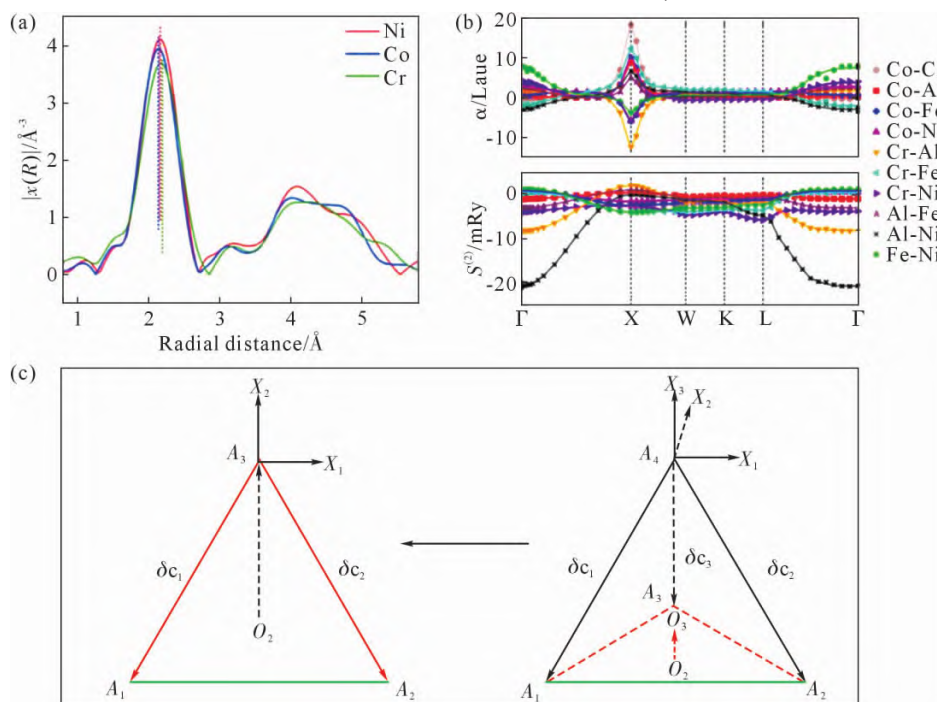


图 2 高熵合金中 EXAFS 函数幅度、Warren-Cowley 参数及吉布斯浓度空间:(a) CoCrNi 合金的 EXAFS 函数在实际空间中的幅度;(b) 不同原子对之间的 Warren-Cowley 参数;(c) 三元和四元合金的吉布斯浓度空间^[38]

Fig.2 The amplitude of the EXAFS function, Warren-Cowley parameters and Gibbs concentration space of high-entropy alloys: (a) the amplitude of the EXAFS function of CoCrNi alloy in real space; (b) Warren-Cowley parameters between different atomic pairs; (c) Gibbs concentration space of ternary and quaternary alloys^[38]

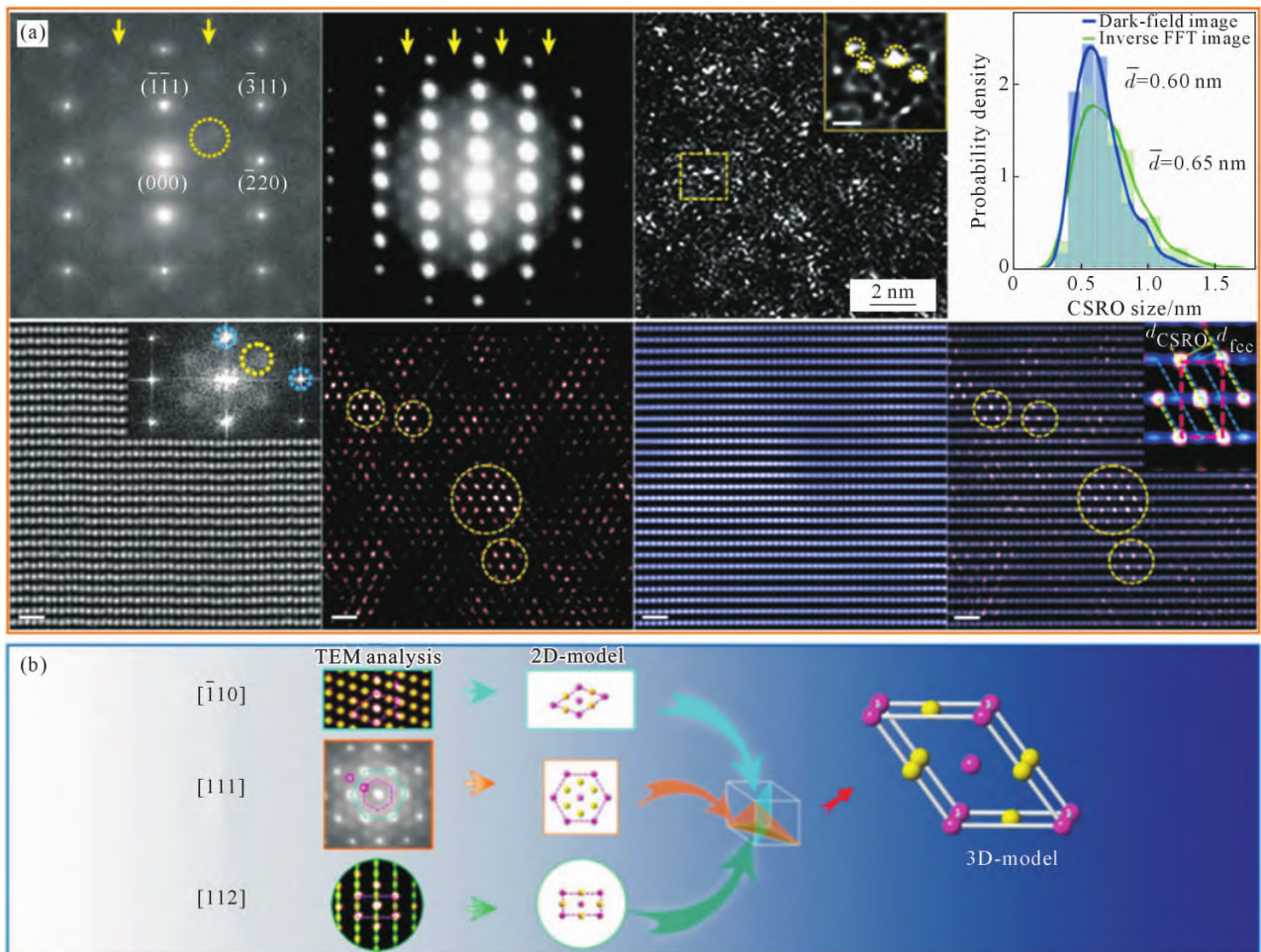


图3 VCoNi 合金中的 CSRO:(a) TEM 观察到 VCoNi 合金中存在 CSRO;(b) 根据 TEM 观察 VCoNi 合金不同带轴上的 CSRO 结构构建其空间结构^[39-40]

Fig.3 CSRO in the VCoNi alloy: (a) CSRO was observed in the VCoNi alloy via TEM; (b) according to the TEM observations of the CSRO structure on different zones of the VCoNi alloy, its spatial structure was constructed^[39-40]

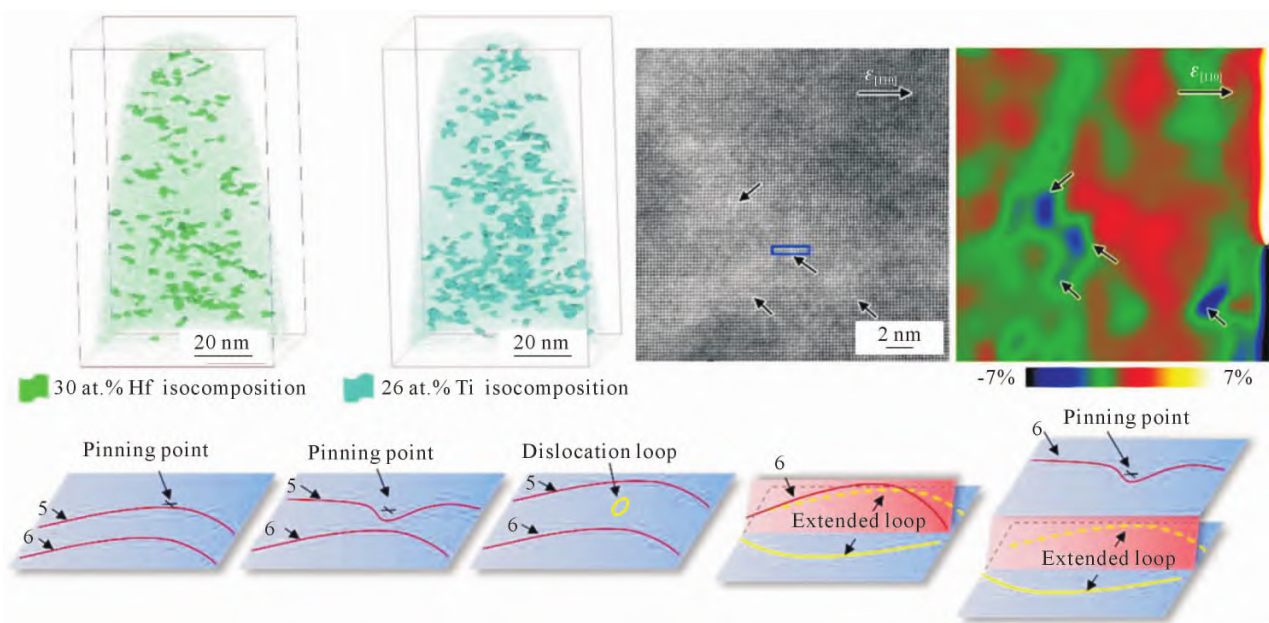


图4 HfNbTiZr 高熵合金中 CSRO 引起的位错钉扎、增殖和交叉滑移^[46]

Fig.4 Dislocation pinning, proliferation and cross-slip induced by CSRO in HfNbTiZr high-entropy alloy^[46]

CSRO 引起的位错钉扎和局部交叉滑移, 共同增强 HfNbTiZr 高熵合金的塑性。Chen 等^[39]观察到位错通过 VCoNi MEA 中的 CSRO 区域时是波浪形路径。He 等^[47]还观察到, 在 FeMnCoCrN 高熵合金断裂区域附近的 CSRO 与奥氏体基体之间的界面处存在许多堆垛层错, 这表明 CSRO 的存在对塑性变形期间的位错运动也有阻碍作用。

高熵合金的变形也受层错能控制, 已有理论计算证实, CrCoNi 合金的层错能与其 CSRO 结构显著相关, 如图 5 所示, 其平均层错能随着化学有序度的增加而增加, 通过调控其化学有序度可以有效调节合金的层错能^[48]。其实在传统合金中也存在类似的现象^[49]。只是高熵合金近乎无限的成分设计空间及原子尺度 CSRO 结构, 使其能在更宽范围内调节层错能。层错能对合金的相稳定性和位错运动影响显著, CSRO 在高熵合金中对缺陷行为的调控作用可能比在传统合金中更为突出^[50]。Zhang 等^[51]从实验的角度也证明 CSRO 结构会导致其旁边的缺陷更容易引发异质形核, 并对比了 1 200 °C 均匀化处理后经水冷和炉冷两种冷却方式冷却的 CoCrNi 合金, 发现炉冷后的样品(化学有序度高)其异质形核所占比例高, 且发生位错形核所需的力更大。但是计算机模拟计算与实验所测得的层错能存在差异, 主要是因为实验上几乎不存在各元素原子完全均匀分布的高熵合金^[48]。

5 结论与展望

高熵合金中 CSRO 普遍存在, 其对合金力学性能的影响不可忽视。深入理解 CSRO 的形成、调控及其与性能之间的关系, 对设计高性能高熵合金至关重要; 未来研究需聚焦于 CSRO 的精准量化、参数化模型建立以及在辐照等极端环境下的演化行为。本文通过综述近年来的相关研究主要得出以下结论。

(1) CSRO 的形成主要由元素间混合焓和原子尺寸差异共同驱动, 即使在原子半径相近的合金中, 磁相互作用等效应也会导致有序结构。

(2) 高熵合金中的 CSRO 可通过热处理、添加间隙原子(B、C、N、O)或辐照等方式进行调控。

(3) 计算机模拟可量化有序度并揭示原子对偏好现象, 实验上则通过 X 射线和 TEM 等方法表征。但目前的实验表征都存在不足之处。

(4) CSRO 通过钉扎位错、提高位错形核能垒、以及增加层错能等协同增强合金的强度、塑性和断裂韧性等。

参考文献:

- [1] YE H J W, CHEN S K, LIN S J, GAN J Y, CHIN T S, SHUN T T, TSAU C H, CHANG S Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and out-

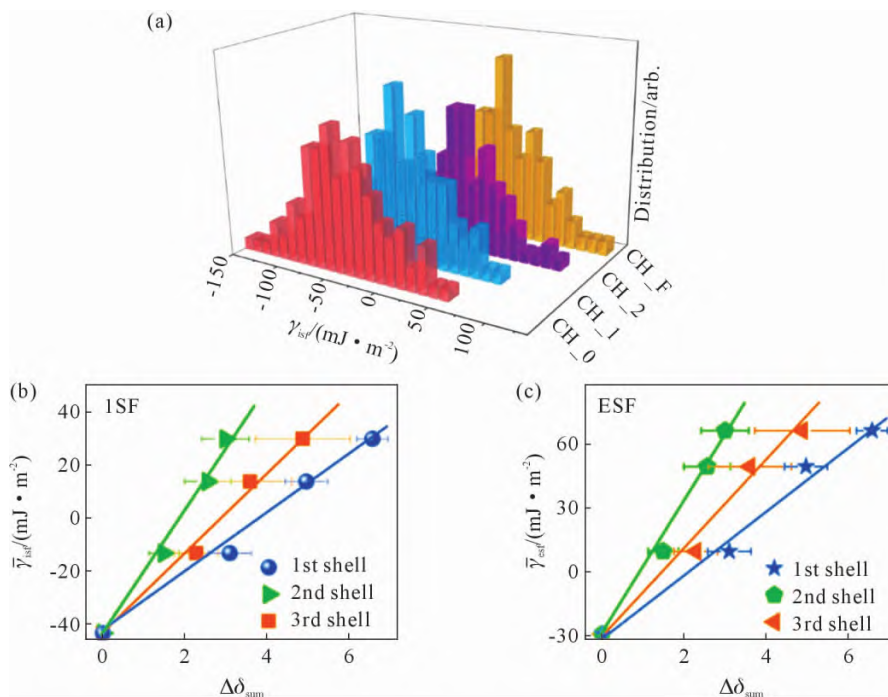


图 5 堆垛层错能与化学有序度的关系:(a) CrCoNi 合金在不同状态下的本征层错能;(b) 不同近邻壳层的平均本征层错能;(c) 不同近邻壳层的非本征层错能^[48]

Fig.5 Relationships between stacking fault energy and chemical order degree: (a) intrinsic stacking fault energy of CrCoNi alloy in different states; (b) average intrinsic stacking fault energy of different neighboring shells; (c) extrinsic stacking fault energy of different neighboring shells^[48]

- comes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299-303.
- [2] YE H J W, LIN S J, CHIN T S, GAN J Y, CHEN S K, SHUN T S, TSAU C H, CHOU S Y. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35: 2533-2536.
- [3] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, CHANG E H, GEORGE E P, RITCHIE R O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. *Science*, 2014, 345(6201): 1153-1158.
- [4] LI Z, ZHANG Z H, LIU X L, LI H X, ZHANG E P, BAI G H, XU H, LIU X G, ZHANG X F. Strength, plasticity and coercivity tradeoff in soft magnetic high-entropy alloys by multiple coherent interfaces[J]. *Acta Materialia*, 2023, 254: 118970.
- [5] EL-ATWANI O, LI N, LI M, DEVARAJ A, BALDWIN J K S, SCHNEIDER M M, SOBIERAJ D, WRÓBEL J S, NGUYEN-MANH D, MALOY S A, MARTINEZ E. Outstanding radiation resistance of tungsten-based high-entropy alloys[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav2002.
- [6] NENE S S, FRANK M, LIU K, SINHA S, MISHRA R S, MCWILLIAMS B A, CHO K C. Corrosion-resistant high entropy alloy with high strength and ductility[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 166: 168-172.
- [7] 吕昭平,雷智锋,黄海龙,刘少飞,张凡,段大波,曹培培,吴渊,刘雄军,王辉.高熵合金的变形行为及强韧化[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1553-1566.
- LYU Z P, LEI Z F, HUANG H L, LIU S F, ZHANG F, DUAN D B, CAO P P, WU Y, LIU X J, WANG H. Deformation behavior and toughening of high-entropy alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1553-1566.
- [8] YE Y F, WANG Q, LU J, LIU C T, YANG Y. High-entropy alloy: Challenges and prospects[J]. *Materials Today*, 2016, 19(6): 349-362.
- [9] WALSH F, ASTA M, RITCHIE R O. Magnetically driven short-range order can explain anomalous measurements in CrCoNi[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(13): e2020540118.
- [10] ZHANG F X, ZHAO S J, JIN K, XUE H, VELISA G, BEI H, HUANG R, KO J Y P, PAGAN D C. Local structure and short-range order in a NiCoCr solid solution alloy[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(20): 205501.
- [11] MAITI S, STEURER W. Structural-disorder and its effect on mechanical properties in single-phase TaNbHfZr high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 106: 87-97.
- [12] SANTODONATO L J, ZHANG Y, FEYGENSON M, PARISH C M, GAO M C, WEBER R J K, NEUEFEIND J C, TANG Z, LIAW P K. Deviation from high-entropy configurations in the atomic distributions of a multi-principal-element alloy[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5964.
- [13] MA E. Unusual dislocation behavior in high-entropy alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 181: 127-133.
- [14] WALSH F, ZHANG M W, RITCHIE R O, MINOR A M, ASTA M. Extra electron reflections in concentrated alloys do not necessitate short-range order[J]. *Nature Materials*, 2023, 22: 926-929.
- [15] ZHANG R P, ZHAO S T, DING J, CHONG Y, JIA T, OPHUS C, ASTA M, RITCHIE R O, MINOR A M. Short-range order and its impact on the CrCoNi medium-entropy alloy[J]. *Nature*, 2020, 581: 283-287.
- [16] YIN B L, YOSHIDA S, TSUJI N, CURTIN W A. Yield strength and misfit volumes of NiCoCr and implications for short-range-order[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2507.
- [17] NAGHDI A, DOMÍNGUEZ-GUTIÉRREZ F J, HUO W Y, KARI-MI K, PAPANIKOLAOU S. Dynamic nanoindentation and short-range order in equiatomic NiCoCr medium-entropy alloy lead to novel density wave ordering[J]. *Physical Review Letters*, 2024, 132: 116101.
- [18] XIE H C, ZHAO R, MA Z C, ZHANG W, ZHAO H W, REN L Q. Role of chemical short-range order in friction and wear behaviors in medium-entropy alloy CoCrNi[J]. *Tribology International*, 2024, 193: 109392.
- [19] GÜNEN A, MAKUCH N, ALTINAY Y, ÇARBOĞA C, DAL S, KARACA Y. Determination of fracture toughness of boride layers grown on $\text{Co}_{1.21}\text{Cr}_{1.82}\text{Fe}_{1.44}\text{Mn}_{1.32}\text{Ni}_{1.12}\text{Al}_{0.08}\text{B}_{0.01}$ high entropy alloy by nanoindentation[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(24): 36410-36424.
- [20] FERNÁNDEZ-CABALLERO A, WRÓBEL J S, MUMMERY P M, NGUYEN-MANH D. Short-range order in high entropy alloys: Theoretical formulation and application to Mo-Nb-Ta-V-W system[J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2017, 38: 391-403.
- [21] STEURER W. Crystal structures of metallic elements and compounds[M]//LAUGHLIN D E, HONO K. *Physical Metallurgy* (Fifth Edition). Amsterdam: Elsevier, 2014: 1-101.
- [22] YANG X F, XI Y Z, HE C Y, CHEN H, ZHANG X C, TU S T. Chemical short-range order strengthening mechanism in CoCrNi medium-entropy alloy under nanoindentation[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 209: 114364.
- [23] XU X D, LIU P, GUO S, HIRATA A, FUJITA T, NIEH T G, LIU C T, CHEN M W. Nanoscale phase separation in a fcc-based CoCrCuFeNiAl_{0.5} high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2015, 84: 145-152.
- [24] FANTIN A, LEPORE G O, MANZONI A M, KASATIKOV S, SCHERB T, HUTHWELKER T, D'ACAPITO F, SCHUMACHER G. Short-range chemical order and local lattice distortion in a compositionally complex alloy[J]. *Acta Materialia*, 2020, 193: 329-337.
- [25] TONG Y, ZHAO S J, BEI H B, EGAMI T, ZHANG Y W, ZHANG F X. Severe local lattice distortion in Zr- and/or Hf-containing refractory multi-principal element alloys[J]. *Acta Materialia*, 2020, 183: 172-181.
- [26] TAMM A, AABLOO A, KLINTENBERG M, STOCKS M, CARO A. Atomic-scale properties of Ni-based FCC ternary, and quaternary alloys[J]. *Acta Materialia*, 2015, 99: 307-312.
- [27] GUO S, WANG M, WANG Q, SUI S, KAYANI S H, SEOL J B, ZHU P C, GUO A F, LIN X, HUANG W D. The influence of chemical short-range order on the nanoindentation properties of high-entropy alloys prepared via laser powder bed fusion[J]. *Materials Characterization*, 2024, 207: 113560.

- [28] ZHANG M W, YU Q, FREY C, WALSH F, PAYNE M I, KUMAR P, LIU D Y, POLLOCK T M, ASTA M D, RITCHIE R O, MINOR A M. Determination of peak ordering in the CrCoNi medium-entropy alloy via nanoindentation[J]. *Acta Materialia*, 2022, 241: 118380.
- [29] LIU N J, TIAN X T, LIU Q J, GAN B, DING J, MA E, WANG Z J. Aging elevates chemical short-range order and twinning stress in a CrCoNi medium-entropy alloy[J]. *Science China Materials*, 2023, 66(6): 4220-4225.
- [30] WU Y, ZHANG F, YUAN X Y, HUANG H L, WEN X C, WANG Y H, ZHANG M Y, WU H H, LIU X J, WANG H, JIANG S H, LU Z P. Short-range ordering and its effects on mechanical properties of high-entropy alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 62: 214-220.
- [31] GUO L, GU J, GONG X, LI K, NI S, LIU Y, SONG M. Short-range ordering induced serrated flow in a carbon contained FeCoCrNiMn high entropy alloy[J]. *Micron*, 2019, 126: 102739.
- [32] SU Z X, SHI T, SHEN H H, JIANG L, WU L, SONG M, LI Z M, WANG S, LU C Y. Radiation-assisted chemical short-range order formation in high-entropy alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 212: 114547.
- [33] HUANG X S, LIU L H, DUAN X B, LIAO W B, HUANG J J, SUN H B, YU C Y. Atomistic simulation of chemical short-range order in HfNbTaZr high entropy alloy based on a newly-developed interatomic potential[J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109560.
- [34] COWLEY J M. X-ray measurement of order in single crystals of Cu₃Au[J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(1): 24-30.
- [35] NORMAN N, WARREN B E. X-ray measurement of short range order in Ag-Au[J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(4): 483-486.
- [36] COWLEY J M. Short-range order and long-range order parameters [J]. *Physical Review*, 1965, 138: A1384.
- [37] LI Q J, SHENG H, MA E. Strengthening in multi-principal element alloys with local-chemical-order roughened dislocation pathways [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3563.
- [38] SINGH P, SMIRNOV A V, JOHNSON D D. Atomic short-range order and incipient long-range order in high-entropy alloys [J]. *Physical Review B*, 2015, 91: 224204.
- [39] CHEN X F, WANG Q, CHENG Z Y, ZHU M L, ZHOU H, JIANG P, ZHOU L L, XUE Q Q, YUAN F P, ZHU J, WU X L, MA E. Direct observation of chemical short-range order in a medium-entropy alloy[J]. *Nature*, 2021, 592: 712-716.
- [40] CHEN X F, YUAN F P, ZHOU H, WU X L. Structure motif of chemical short-range order in a medium-entropy alloy[J]. *Materials Research Letters*, 2022, 10(3): 149-155.
- [41] ZHOU L L, WANG Q, WANG J, CHEN X F, JIANG P, ZHOU H, YUAN F P, WU X L, CHENG Z Y, MA E. Atomic-scale evidence of chemical short-range order in CrCoNi medium-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2022, 224: 117490.
- [42] AN X H, WU S D, WANG Z G, ZHANG Z F. Significance of stacking fault energy in bulk nanostructured materials: Insights from Cu and its binary alloys as model systems[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 101: 1-45.
- [43] 丁佳琪, 左家栋, 王亚强, 张金钰, 吴凯, 刘刚, 孙军. 多主元合金中局部化学短程有序的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(4): 1507-1519.
- DING J Q, ZUO J D, WANG Y Q, ZHANG J Y, WU K, LIU G, SUN J. Progress in the local chemical short-range order of multi-principal alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(4): 1507-1519.
- [44] SMITH L T W, SU Y Q, XU S Z, HUNTER A, BEYERLEIN I J. The effect of local chemical ordering on Frank-Read source activation in a refractory multi-principal element alloy[J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 134: 102850.
- [45] ZHAO Y K, PARK J M, JANG J I, RAMAMURTY U. Bimodality of incipient plastic strength in face-centered cubic high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2021, 202: 124-134.
- [46] BU Y Q, WU Y, LEI Z F, YUAN X Y, WU H H, FENG X B, LIU J B, DING J, LU Y, WANG H T, LU Z P, YANG W. Local chemical fluctuation mediated ductility in body-centered-cubic high-entropy alloys[J]. *Materials Today*, 2021, 46: 28-34.
- [47] HE Z F, GUO Y X, SUN L F, YAN H L, GUAN X J, JIANG S, SHEN Y F, YIN W, ZHAO X L, LI Z M, JIA N. Interstitial-driven local chemical order enables ultrastrong face-centered cubic multi-component alloys[J]. *Acta Materialia*, 2023, 243: 118495.
- [48] DING J, YU Q, ASTA M, RITCHIE R O. Tunable stacking fault energies by tailoring local chemical order in CrCoNi medium-entropy alloys[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(36): 8919-8924.
- [49] HAN D, WANG Z Y, YAN Y, SHI F, LI X W. A good strength-ductility match in Cu-Mn alloys with high stacking fault energies: Determinant effect of short range ordering[J]. *Scripta Materialia*, 2017, 133: 59-64.
- [50] ZHAO S J, STOCKS G M, ZHANG Y W. Stacking fault energies of face-centered cubic concentrated solid[J]. *Acta Materialia*, 2017, 134: 334-345.
- [51] ZHANG Q, JIN X, SHI X H, QIAO J W, LIAW P K. Short range ordering and strengthening in CoCrNi medium-entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 854: 143890.

(责任编辑:杨浩雪)