

高熵合金的锯齿流变研究进展

刘官浩¹ 张 敏¹ 王雪姣¹ 吴玉程² 乔珺威¹

(1.太原理工大学材料科学与工程学院,高熵合金研究中心; 2.合肥工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 随着高熵合金得到广泛关注,对其变形过程中的锯齿流变现象的研究也与日俱增。目前对高熵合金锯齿流变的研究主要分为低温、室温和高温 3 类。研究结果表明,高熵合金在多种温度和应变速率下变形都会表现出明显的锯齿流变现象,且锯齿形成机理也因试验环境和合金成分的不同而有所不同。主要从 3 种温度下论述高熵合金中的锯齿流变现象,并对高熵合金锯齿流变研究进行展望。

关键词 高熵合金;锯齿流变;影响因素;机理

中图分类号 TG111.5;TQ029 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Serration Flow of High-entropy Alloys

Liu Guan hao¹, Zhang Min¹, Wang Xue jiao¹, Wu Yucheng², Qiao Junwei¹

(1.Research Center for High-entropy Alloys,School of Materials Science and Engineering,

Taiyuan University of Technology;

2.School of Materials Science and Engineering,Hefei University of Technology)

Abstract: With the widespread attention of high-entropy alloys, the research on serration flow during deformation is also paid attention, which is mainly divided into three categories, low temperature, room temperature and high temperature. The research results indicate that high-entropy alloys exhibit obvious serration flow when deformed at various temperatures and strain rates, and the formation mechanism of serrations also varies with the test environment and alloy composition. The serration flow phenomenon in high-entropy alloys was mainly expounded under three conditions of different temperatures, and the future research on serration flow of high-entropy alloys was prospected.

Key Words: High Entropy Alloy,Serration Flow,Influencing Factors,Mechanism

高熵合金打破了传统合金的元素分配理念,不同于传统合金高熵合金表现为多主元形式,使其理论上具有传统合金两倍以上构型熵。这种高熵效应使高熵合金具有高固溶体稳定性,从而表现出良好的耐腐蚀性^[1-4]、高抗疲劳性^[5-7]、高强度和断裂韧性^[8-10]、抗剪切破坏性等优异的性能^[11-18]。

新兴材料的工程应用需进行大量的机械测试,以确定其合适的服役条件和应用领域。许多材料在机械测试得到的力学曲线中会表现出锯齿形波动,这种现象被称为锯齿流变现象。在纳米晶、非晶合金、镁合金、铝合金、奥氏体不锈钢、粒状材料、多孔材料、铁磁材料、高熵合金等^[19-21]材料中都发现了锯齿流变现象。而锯齿流变现象可能会对材料的塑性和表面品质产生不利影响,因此,研究者对锯齿流变现象的产生机理进行了研究,

而锯齿流变机理往往因材料类型而有所不同。在非晶合金中,其通常被认为是剪切带的形成和传播引起的^[22];对于镁合金、铝合金等传统晶体合金,COTTRELL A H等^[23]提出了位错停滞模型,认为锯齿的形成是间隙溶质原子或置换溶质原子对移动位错的钉扎-脱扎循环造成的。高熵合金因其多主元的特殊结构,其溶质原子的成分及存在形式仍难以界定,这给位错停滞模型在高熵合金中的应用带来了困难。因此,高熵合金中溶质原子的存在形式仍需深入研究。

研究者对高熵合金锯齿流变的研究首先致力于对高熵合金锯齿出现条件的研究。研究表明,无论拉伸还是压缩试验,温度和应变速率是影响锯齿出现及类型的最主要因素,且在接近 0 K 和 600 K 以上时易出现锯齿流变现象,这给高熵合金在极端环境下服役带来了极大

收稿日期:2022-03-11;修改稿收到日期:2022-04-12
第一作者简介:刘官浩,男,1997 年出生,硕士研究生,太原(030000), E-mail: liuguanhaols@hotmail.com
通信作者:乔珺威,男,1982 年出生,教授,太原(030000), E-mail: qiaojunwei@gmail.com
引用格式:刘官浩,张敏,王雪姣,等. 高熵合金的锯齿流变研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):158-162.
LIU G H,ZHANG M,WANG X J, et al. Research progress in serration flow of high-entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Al-
loys, 2023, 43(2):158-162.

挑战。基于此,YASUDA H Y 等^[24]通过改变高熵合金中 Al 含量,发现 Al 含量是锯齿现象出现的影响因素之一,为极端环境服役的高熵合金成分设计提供了思路。YANG Y 等^[25]借助传统合金中的位错停滞模型,计算出了 CoCrFeNi 高熵合金中的初始溶质原子浓度,证实了高熵合金中存在溶质原子,给高熵合金晶体结构的进一步研究打下基础。

近年来,对高熵合金锯齿流变研究的报道虽然逐渐增多,但是仍处在初级阶段。现阶段对高熵合金锯齿流变的研究通常是在不同的力学试验温度下,调整其初始应变速率,以研究锯齿出现的条件和可能的机理。因此,将高熵合金锯齿流变的研究根据试验温度可分为低温、室温和高温 3 类。

1 高熵合金低温锯齿流变

低温条件下的锯齿流变现象通常归因于局部热软化和位错运动的不稳定性两大方面。从热机械效应角度来看,在试验温度接近 0 K 时,金属材料具有极低的比热容和热导率。因为低热容量,局部变形释放的热量会造成显著温度峰值,而低热导率会导致温度峰值仅表现在局部,从而出现局部热软化现象,进而在力学曲线中表现为锯齿形应力降。另一方面,在低温下,变形过程中位错运动遇到的障碍也逐渐复杂化,在外加应力下位错再次运动的过程即表现为锯齿流变现象。

基于上述理论,LACTIONOVA M A 等^[26]研究了 Ag_{0.5}CoCrCuFeNi 高熵合金在 4.2~300 K 时的压缩行为,发现在 4.2 K 和 7.5 K 时的力学曲线都表现出了不同程度的锯齿流变行为。而在更高的温度下则未观察到锯齿流变现象。对比两种温度下的锯齿流变现象发现,4.2 K 时出现锯齿的应变值低于 7.5 K 时出现锯齿的应变值,4.2 K 和 7.5 K 时出现锯齿的临界应变分别为 1.2% 和 4.5%,说明了高熵合金在接近 0 K 时,其力学曲线会表现出锯齿流变现象,且越接近 0 K,锯齿流变现象越明显,与热软化机理一致。

为探寻更高温度下高熵合金出现锯齿流变现象的可能性,ANTONAGLIA J 等^[27]选用 Al_{0.5}CoCrCuFeNi 高熵合金在 7~9 K 下做单轴压缩试验。在 7、7.5 和 9 K 时都出现了锯齿流变现象,锯齿出现的临界应变也

随温度升高而降低。此外,应用平均场理论模型对高熵合金应力降做统计分析发现,锯齿应力降随温度升高而降低,与平均场模型预测结果一致。认为高熵合金锯齿流变现象与低温变形孪晶有关,随着温度的升高,压缩变形过程中诱导变形孪晶的难度逐渐升高,变形孪晶的数量和宽度都有可能降低,进而降低了位错运动遇到的势垒高度,导致应力降幅降低。

Cantor 合金作为最具代表性的高熵合金,其在低温拉伸曲线中也表现出了锯齿流变现象。TIRUNILAI A S 等^[28]对 CoCrFeMnNi 高熵合金的锯齿流变做出了一系列研究。首先在 4.2、77 K 和室温下分别做了单轴拉伸试验,发现在 4.2 K 时的拉伸应力-应变曲线中同样表现出了锯齿状波动。在后续研究中,将温度提高 8 K 的同时增设了 6×10^{-5} 、 3×10^{-4} 和 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 3 种应变速率下的对比拉伸试验,发现在 3 种应变速率的应力-应变曲线中都存在锯齿流变现象。对比发现,CoCrFeMnNi 高熵合金的锯齿流变行为受应变速率影响,应力降幅随应变速率增大而明显减小。此外,为研究高熵合金锯齿流变中的特殊机理,对比了 CoCrFeMnNi 高熵合金和 Cu 在 4.2 K 下的拉伸应力-应变曲线。发现 Cu 的锯齿应力降(约 5 MPa)远小于 CoCrFeMnNi 高熵合金的锯齿应力降(约 150 MPa),主要归因于高熵合金中固溶体的影响。因固溶体存在,CoCrFeMnNi 高熵合金的电导率远低于 Cu,易于在局部形成热软化,从而产生明显的锯齿流变现象。

LIU J 等^[29]在 CoCrFeNi 高熵合金的低温拉伸曲线中观察到锯齿流变,并将高熵合金在低温出现锯齿的温度提高到了 20 K。借助透射电镜表征,发现在 4.2 K 下拉伸过程中发生了 FCC 到 HCP 的相转变,说明了相转变可能是锯齿产生的原因。TIRUNILAI A S 等^[30]将低温锯齿出现的温度提高到了目前最高的 35 K,证实了 CoCrFeMnNi 高熵合金在 4.2~35 K 范围内都会出现锯齿流变现象。同时表明了初始位错密度是影响锯齿幅值的重要因素,并提出了与传统离散模型完全不同的低温锯齿模型,其主要机理见图 1,基于位错不能交叉滑移和位错增殖事件出现的前提,建立了由横向滑移介导的从完全无锯齿变形到完全锯齿变形逐渐过渡的模型。

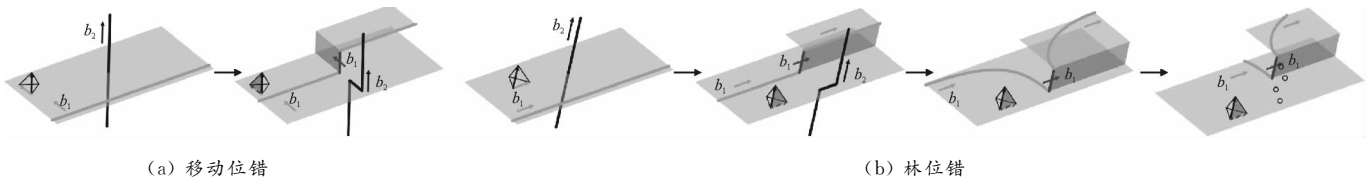


图 1 移动位错与林位错的相互作用过程^[30]
Fig.1 Intersection process of a moving dislocation with a forest screw dislocation^[30]

2 高熵合金室温锯齿流变

在钢、铝合金和镁合金等传统合金的室温拉伸曲线中,都存在不同程度的锯齿流变现象。但高熵合金因其迟滞扩散效应而难以在室温拉伸中出现锯齿流变。GUO L 等^[31]通过给 CoCrFeMnNi 高熵合金外加 0.93% 摩尔比 C 元素的方式,成功在其室温拉伸真应力-真应变曲线中观察到阶梯状锯齿。说明 C、N 等间隙原子是传统合金出现锯齿现象的关键因素,而高熵合金难以在室温出现锯齿是因为其多主元的特殊结构,当高熵合金也存在间隙原子 C 时,也同样可出现锯齿流变现象。本研究认为高熵合金在室温力学曲线中出现锯齿归因于 C、堆垛层错和移动位错之间的相互作用,见图 2。

高熵合金的室温压缩试验表现出了与室温拉伸试验完全相反的特征,SONKUSARE R 等^[32]在 CoCu Fe MnNi 高熵合金压缩曲线中观察到了截然不同的现象,在 10^{-3} 和 $3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 两种应变速率下的室温压缩试验中,高应变速率下的曲线中出现了锯齿流变现象,而低应变速率下则表现为平滑的曲线,这一现象与之前所报道的低应变速率下易于出现锯齿的结论相反。通过电子背散射衍射表征发现,在高应变速率下压缩的试样出现明显的变形孪晶,这很可能是高应变速率下出现锯齿现象的原因。此外,高应变速率下压缩试样具有尺寸相对较小的晶粒、较高百分比的高角度晶和较低的几何必要位错密度。

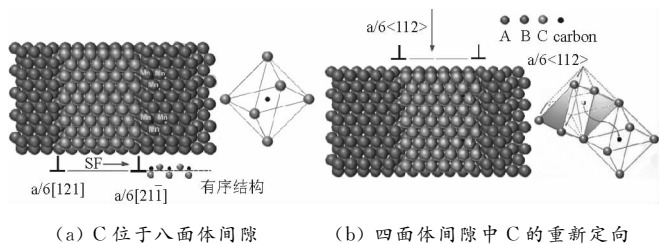


图 2 添加 C 原子的高熵合金锯齿流变机制示意图^[31]

Fig.2 Schematic diagram of serrated flow mechanism of high-entropy alloys with C atoms addition^[31]

3 高熵合金高温锯齿流变

在高温条件下,高熵合金中的原子扩散速率会呈指数上升,从而提高了锯齿流变现象发生的可能性。因此,高熵合金高温锯齿流变的相关报道也更为多样化,将从高温压缩和高温拉伸两方面进行论述。

TONG C J 等^[33]在 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ 高熵合金的高温压缩应力-应变曲线中发现了锯齿流变现象,但未深入研究。在这一基础上,CHEN S 等^[34,35]对

$\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ 高熵合金的压缩锯齿流变做出了一系列研究。首先在 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 应变速率下采用 400、500 和 600 °C 的压缩试验温度,发现锯齿随温度升高从向上锯齿转变为向下锯齿,且在 600 °C 观察到由 FCC 相转变为 FCC 和 BCC 相混合的结构,说明在高温下,相转变也是锯齿产生的可能原因。另外,提出了类似于传统合金的溶质原子对位错的钉扎机理见图 5,解释了高温下高熵合金出现锯齿的可能原因。后续的研究中,CHEN S 等^[35]添加了室温、300 和 700 °C 压缩试验,拓宽了 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ 高熵合金出现锯齿的温度范围。并对应力-时间曲线做出分析,根据斜率的大小将锯齿流变分为 2 个阶段。通过透射电镜表征发现了 600 °C 压缩试样存在 L_{12} 纳米粒子的析出,类似传统合金中的溶质原子对移动位错起到阻碍作用。ZHANG Y 等^[36]在 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrCuFeNi}$ 高熵合金的高温压缩试验中也观察到了类似的锯齿随温度升高的锯齿类型转变,本研究认为,锯齿的出现是因为随温度的升高,位错迁移率和堆垛层错能也升高,导致变形机制从 $\{111\} \langle 11\bar{2} \rangle$ 孪晶转变为位错滑移。

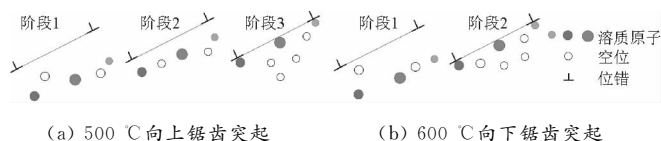


图 3 500 °C 和 600 °C 下位错和溶质原子之间相互作用的示意图^[34]

Fig.3 Schematic diagram of interactions between dislocations and solute atoms at 500 °C and 600 °C^[34]

研究表明, $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ 系列高熵合金在高温压缩试验中会出现锯齿流变现象,而 Al 含量的调整会改变锯齿形成的内在机理。为探究 Al 对高熵合金锯齿行为的影响,YASUDA H Y 等^[24]通过对比 CoCrFe-Ni 和 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的高温压缩试验结果,发现 600 °C 的 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金应力-应变曲线表现出明显的锯齿行为,而 CoCrFeNi 高熵合金则未发现锯齿现象,说明 Al 对高熵合金锯齿行为具有关键作用。在 NIU S 等^[37]的研究中,通过对比 CoCrFeNi 和 $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的高温压缩曲线也观察到相同趋势。发现 Al 对锯齿流变现象产生影响的主要原因是 Al 与其他元素较大的原子尺寸差异。

相较于高熵合金的压缩锯齿行为,出现拉伸锯齿的高熵合金种类更加丰富。CARROLL R 等^[38]选用了 Ni、CoNi、CoFeNi、CoCrFeNi 和 CoCrFeMnNi 材料,分别在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 300~700 °C 条件下做单轴拉伸试验。结果表明,元素种类越多,越容易出现锯齿流变现象,表现为出现锯齿的温度和应变速率范围都

逐渐变宽。TSAI C W 等^[39]为探究出现这一现象的可能原因,做了与 CARROLL R 等^[38]相同的试验,并通过计算 CoCrFeMnNi 高熵合金中各元素原子晶格扩散速率,证明了高熵合金因迟滞扩散效应,原子对位错的作用方式与传统合金会有所不同。此外,认为合金元素增加造成原子尺寸差异增大是多主元高熵合金容易出现锯齿流变的原因。基于上述理论,提出了原位钉扎机理,该研究的计算结果表明原位钉扎可以大大提高原子对可动位错的钉扎效率,是高熵合金出现锯齿的可能机理。另外, FU J X 等^[40]通过拟合 CoCrFeMnNi 高熵合金锯齿出现的临界应变与温度的关系,分别计算出了两个温度范围的活化能,在 300~500 °C 时活化能为 116 kJ/mol,溶质原子钉扎过程主要通过管扩散方式实现;在 500~600 °C 时活化能为 296 kJ/mol,溶质原子钉扎过程受协同晶格扩散主导。揭示了锯齿类型转变的可能原因。后续研究中, FU J X 等^[41]还研究了轧制量对 CoCrFeMnNi 高熵合金锯齿流变的影响,在 20%、30% 和 40% 轧制量的拉伸试验中,都观察到了锯齿间断的现象。

除 Cantor 合金体系外,在其他高熵合金中也存在拉伸锯齿现象。HAN Z 等^[42]在 VCoNi 高熵合金中发现了锯齿流变现象,并指出,锯齿的出现可能是因为高温下基体中 σ 相的析出,对移动位错产生钉扎作用。此外, $\text{Al}_5\text{Cr}_{12}\text{Fe}_{35}\text{Mn}_{28}\text{Ni}_{20}$ ^[43]、 CoCuFeNiTi ^[44] 和 HfNbTaTiZr ^[45] 等高熵合金也被报道了在高温拉伸试验中出现锯齿流变现象。值得注意的是, YANG Y 等^[25]借助传统合金中的位错停滞模型,通过拟合单个锯齿的应力降与应变变化的关系,计算出了 CoCrFeNi 高熵合金中溶质原子的初始浓度。这一研究表明了高熵合金中也存在类似于传统合金中的溶质原子,给揭示高熵合金高温锯齿流变机理的类传统合金研究打下基础,但其主要元素和存在形式仍需进一步探索。

4 结 语

高熵合金被提出至今,虽然仅有十几年的历程,但因其优异的性能,得到了飞速的发展,成功从初期的第一代高熵合金转变成如今的非等摩尔比二代高熵合金。在高熵合金中取得的一系列突破,也逐步加快了高熵合金的军事化、工业化应用的步伐。高熵合金锯齿流变研究在近年来也逐步增多。在低温下,从液氮温度下出现锯齿提高到了 35 K。类比传统合金的间隙原子形式,通过添加 C 发现了高熵合金室温拉伸的锯齿流变现象。更有研究发现,高熵合金在高应变速率下的室温压缩也会表现出锯齿行为。另外,高熵合金高温下的锯齿

类型最多,且出现锯齿的成分和试验条件也最为丰富,间接证明了高熵合金的迟滞扩散效应的可能性。尽管高熵合金锯齿流变在多方面取得了一定进展,但其锯齿流变起源和普适的锯齿流变机理仍需进一步探索。

对于高熵合金锯齿流变的进一步研究,可从以下方面开展:①现有对高熵合金室温锯齿流变的研究较少,可对高熵合金在室温下出现锯齿流变的可能性深入研究。②在低温和高温环境下,高熵合金仅在一定温度范围出现锯齿,研究高熵合金锯齿出现的临界温度及其影响因素将有利于高熵合金的应用;③虽有研究表明高熵合金中存在溶质原子,但其具体的存在形式仍有待研究。

参 考 文 献

- [1] KAO Y F, LEE T D, CHEN S K, et al. Electrochemical passive properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($x=0, 0.25, 0.50, 1.00$) alloys in sulfuric acids[J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 1 026-1 034.
- [2] SHI Y, YANG B, XIE X, et al. Corrosion of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys: Al-content and potential scan-rate dependent pitting behavior[J]. Corrosion Science, 2017, 119: 33-45.
- [3] 邵凤翔, 赵瑞锋, 王新莉, 等. $\text{Cr}_x\text{CuFe}_2\text{Mo}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{Ni}_2$ 高熵合金的耐蚀性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1 092-1 095.
- [4] 郭富强, 任波. CuCrFeNiMn 高熵合金的耐蚀性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(2): 202-206.
- [5] HEMPHILL M A, YUAN T, WANG G Y, et al. Fatigue behavior of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ high entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 5 723-5 734.
- [6] THURSTON K V S, GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, et al. Effect of temperature on the fatigue-crack growth behavior of the high-entropy alloy CrMnFeCoNi[J]. Intermetallics, 2017, 88: 65-72.
- [7] TANG Z, YUAN T, TSAI C W, et al. Fatigue behavior of a wrought $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ two-phase high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2015, 99: 247-258.
- [8] GAO X, LU Y, ZHANG B, et al. Microstructural origins of high strength and high ductility in an $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ eutectic high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 141: 59-66.
- [9] 刘亮, 齐锦刚, 王冰, 等. CoCrFeNiV_x 高熵合金的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(11): 1 130-1 133.
- [10] 温丽华, 寇宏超, 王一川, 等. $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ 多主元高熵合金的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(6): 579-581.
- [11] LI Z, ZHAO S, DIAO H, et al. High-velocity deformation of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy: Remarkable resistance to shear failure[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-8.
- [12] EGAMI T, GUO W, RACK P D, et al. Irradiation resistance of multicomponent alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2014, A45(1): 180-183.
- [13] TODAI M, NAGASE T, HORI T, et al. Novel TiNbTaZrMo high-entropy alloys for metallic biomaterials[J]. Scripta Materialia, 2017, 129: 65-68.
- [14] JO Y H, JUNG S, CHOI W M, et al. Cryogenic strength improve-

- ment by utilizing room-temperature deformation twinning in a partially recrystallized VCrMnFeCoNi high-entropy alloy[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-8.
- [15] LI D, LI C X, FENG T, et al. High-entropy $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ alloy fibers with high tensile strength and ductility at ambient and cryogenic temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2017, 123: 285-294.
- [16] QIAO J W, MA S G, HUANG E W, et al. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures[C]. *Witzlerland: Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications Ltd.*, 2011.
- [17] CHUANG M H, TSAI M H, WANG W R, et al. Microstructure and wear behavior of $\text{Al}_x\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_y$ high-entropy alloys[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59: 6 308-6 317.
- [18] 郭富强. $\text{Al}_x\text{CrCuNiTi}$ 高熵合金的微观组织与硬度[J]. *特种铸造及有色合金*, 2019, 39(12): 1 277-1 281.
- [19] FRIEDMAN N, JENNINGS A T, TSEKENIS G, et al. Statistics of dislocation slip avalanches in nanosized single crystals show tuned critical behavior predicted by a simple mean field model[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(9): 095 507.
- [20] LEBYODKIN M A, ESTRIN Y. Multifractal analysis of the Portevin-Le Chatelier effect: General approach and application to AlMg and $\text{AlMg}/\text{Al}_2\text{O}_3$ alloys[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(12): 3 403-3 413.
- [21] DAHMEN K A, BEN-ZION Y, UHL J T. A simple analytic theory for the statistics of avalanches in sheared granular materials[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(7): 554-557.
- [22] LIU Z Y, YANG Y, LIU C T. Yielding and shear banding of metallic glasses[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61: 5 928-5 936.
- [23] COTTRELL A H, BILBY B A. Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1949, A62(1): 49-62.
- [24] YASUDA H Y, SHIGENO K, NAGASE T. Dynamic strain aging of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy single crystals[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 108: 80-83.
- [25] YANG Y, LI Z, ZHANG W, et al. Concentration of “Mysterious Solute” in CoCrFeNi high entropy alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2022, 211: 114 504.
- [26] LAKTIONOVA M A, TABCHNIKOVA E D, TANG Z, et al. Mechanical properties of the high-entropy alloy $\text{Ag}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ at temperatures of 4.2 ~ 300 K[J]. *Low Temperature Physics*, 2013, 39(7): 630-632.
- [27] ANTONAGLIA J, XIE X, TANG Z, et al. Temperature effects on deformation and serration behavior of high-entropy alloys (HEAs) [J]. *JOM*, 2014, 66: 2 002-2 008.
- [28] TIRUNILAI A S, SAS J, WEISS K P, et al. Peculiarities of deformation of CoCrFeMnNi at cryogenic temperatures[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(19): 3 287-3 300.
- [29] LIU J, GUO X, LIN Q, et al. Excellent ductility and serration feature of metastable CoCrFeNi high-entropy alloy at extremely low temperatures[J]. *Science China Materials*, 2019, 62(6): 853-863.
- [30] TIRUNILAI A S, HANEMANN T, WEISS K P, et al. Dislocation-based serrated plastic flow of high entropy alloys at cryogenic temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2020, 200: 980-991.
- [31] GUO L, GU J, GONG X, et al. Short-range ordering induced serrated flow in a carbon contained FeCoCrNiMn high entropy alloy[J]. *Micron*, 2019, 126: 102 739.
- [32] SONKUSARE R, JAIN R, BISWAS K, et al. High strain rate compression behaviour of single phase CoCuFeMnNi high entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 823: 153 763.
- [33] TONG C J, CHEN M R, YE H J W, et al. Mechanical performance of the $\text{Al}_x\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy system with multiprincipal elements[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2005, A36(5): 1 263-1 271.
- [34] CHEN S, XIE X, CHEN B L, et al. Effects of temperature on serrated flows of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy[J]. *JOM*, 2015, 67: 2 314-2 320.
- [35] CHEN S, XIE X, LI W, et al. Temperature effects on the serrated behavior of an $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 210: 20-28.
- [36] ZHANG Y, LI J, WANG J, et al. Temperature dependent deformation mechanisms of $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloy, starting from serrated flow behavior[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 757: 39-43.
- [37] NIU S, KOU H, ZHANG Y, et al. The characteristics of serration in $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A702: 96-103.
- [38] CARROLL R, LEE C, TSAI C W, et al. Experiments and model for serration statistics in low-entropy, medium-entropy and high-entropy alloys[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-12.
- [39] TSAI C W, LEE C, LIN P T, et al. Portevin-Le Chatelier mechanism in face-centered-cubic metallic alloys from low to high entropy [J]. *International Journal of Plasticity*, 2019, 122: 212-224.
- [40] FU J X, CAO C M, TONG W, et al. The tensile properties and serrated flow behavior of a thermomechanically treated CoCrFeNiMn high-entropy alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A690: 418-426.
- [41] FU J X, CAO C M, WEI T, et al. Effect of thermomechanical processing on microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiMn high entropy alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(5): 931-938.
- [42] HAN Z, DING C, LIU G, et al. Analysis of deformation behavior of VCoNi medium-entropy alloy at temperatures ranging from 77 K to 573 K[J]. *Intermetallics*, 2021, 132: 107 126.
- [43] ANTONAGLIA J, XIE X, TANG Z, et al. Temperature effects on deformation and serration behavior of high-entropy alloys (HEAs) [J]. *JOM*, 2014, 66: 2 002-2 008.
- [44] SAMAL S, RAHUL M R, KOTTADA R S, et al. Hot deformation behaviour and processing map of Co-Cu-Fe-Ni-Ti eutectic high entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, A664: 227-235.
- [45] CHEN S Y, WANG L, LI W D, et al. Peierls barrier characteristic and anomalous strain hardening provoked by dynamic-strain-aging strengthening in a body-centered-cubic high-entropy alloy[J]. *Materials Research Letters*, 2019, 7(12): 475-481.

(编辑:刘晨辉)