

应变速率对 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金 绝热剪切敏感性的影响^①

刘小刚, 姜丽红, 刘征, 杨亮, 郭正华

(南昌航空大学航空制造工程学院, 江西南昌 330063)

摘要: 在室温下利用分离式霍普金森压杆对 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金帽型试样进行动态加载, 研究了不同应变速率下 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金的绝热剪切敏感性。结果表明, 动态加载前后 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金的晶粒尺寸分别约为 $100\ \mu m$ 、 $100\ nm$, 相差约3个数量级, 动态加载后细小的晶粒尺寸使 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金具有更低的绝热剪切敏感性; $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金绝热剪切敏感性随应变速率增加而增加, 在实验范围内, 应变速率 $3\ 360\ s^{-1}$ 时绝热剪切敏感性最高, 产生了与动态加载方向成 45° 、宽约 $2\ \mu m$ 的绝热剪切带, 此时临界应变值和单位体积绝热剪切形成能也最小。 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金在高应变速率变形过程中晶粒发生明显细化。 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金在动态加载下的绝热剪切归结为材料的热-黏塑性本构失稳。

关键词: 绝热剪切敏感性; 应变速率; 高熵合金; 绝热剪切带 (ASB)

中图分类号: TG115

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.029

文章编号: 0253-6099(2023)01-0133-04

Effect of Strain Rates on Adiabatic Shear Sensitivity of $Al_{0.4}CoCrFeNi$ High-Entropy Alloy

LIU Xiaogang, JIANG Lihong, LIU Zheng, YANG Liang, GUO Zhenghua

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract: The cap specimens of $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high-entropy alloy were dynamically loaded with a split Hopkinson pressure bar at room temperature, for studying the adiabatic shear sensitivity of $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high-entropy alloy at different strain rates. The results show that the grain size of $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high entropy alloy before and after dynamic loading is about $100\ \mu m$ and $100\ nm$, respectively, with about three orders of magnitude difference. The $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high entropy alloy, with a finer grain size after dynamic loading, has lower adiabatic shear sensitivity, which will increase with the increase of strain rate. Within the range in the experiment, the adiabatic shear sensitivity reaches the highest when the strain rate is $3\ 360\ s^{-1}$, forming an adiabatic shear band that is about $2\ \mu m$ wide and has an angle of 45° with the dynamic loading direction. At this moment, both the critical strain value and the formation energy per unit volume of adiabatic shear are the smallest. The $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high-entropy alloy undergoes significant grain refinement during high strain rate deformation. And the adiabatic shear of $Al_{0.4}CoCrFeNi$ high-entropy alloy under dynamic loading is attributed to the thermal-viscoplastic constitutive instability of the material.

Key words: adiabatic shear sensitivity; strain rate; high-entropy alloy; adiabatic shear band (ASB)

高熵合金 (High Entropy Alloy, HEA) 具有良好的极端环境服役特性^[1-3]和异于传统金属的性能^[4-7], 在军事工业与航空航天领域具有良好应用前景。绝热剪切是高应变速率变形中的本构失稳现象^[8]。绝热剪切敏感性用来表征绝热剪切发生的难易程度, 材料绝

热剪切敏感性越高, 越容易发生绝热剪切现象。目前关于 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金绝热剪切现象的研究很少, 不利于 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金走向实际工程应用。本文通过与TB6钛合金对比, 主要研究3种不同应变速率对 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金绝热剪切敏感性

① 收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 江西省重大科技研发专项项目(20194ABC28001); 南昌航空大学研究生创新专项资金项目(2030009412138)

作者简介: 刘小刚(1996—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要研究方向为材料动态行为。

通信作者: 姜丽红(1983—), 女, 江西南昌人, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料动态行为。

的影响规律,为该合金的工程应用提供实验数据与理论支持。

1 实验

采用纯度 99.99% 的 Al、Cr、Fe、Co、Ni 金属制备铸态 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金。在纯度 99.99% 的高纯氩气保护下采用真空电弧熔炼炉熔炼原料,熔炼过程中使用电磁搅拌器搅拌翻转熔炼 6 次,每次持续时长 3 min,然后浇铸成合金锭。合金锭实际元素含量检测结果如表 1 所示。

表 1 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金实测成分(质量分数) %

Al	Co	Cr	Fe	Ni
4.54	24.98	21.81	23.62	25.05

室温下利用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)在不同应变速率下动态加载 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金帽形试样,SHPB 装置和帽形试样尺寸如图 1 所示。加载时将合金帽形试样放在入射杆和透射杆之间,采用止动环控制帽形试件的剪切应变,用撞击杆撞击入射杆使试样在短时间内完成加载,使用 SDY2107 超动态应变仪收集信号。实验时控制加载气压以获得不同的加载速度,从而得到不同的加载应变速率,本实验高熵合金平均应变速率分别为 $2\,770\text{ s}^{-1}$ 、 $2\,950\text{ s}^{-1}$ 、 $3\,360\text{ s}^{-1}$ 。选用平均应变速率 $2\,450\text{ s}^{-1}$ 下的 TB6 钛合金进行对照实验。将变形后的高熵合金帽形试样沿着轴线切开制备样品,研磨抛光后观察微观组织。选用王水腐蚀剂并对高熵合金样品的抛光表面进行 10~13s 化学刻蚀。用光学显微镜、

透射电子显微镜观察样品显微组织,并采用 Nano Measurer 1.2 软件分析原始晶粒尺寸大小以及绝热剪切带(Adiabatic Shear Band, ASB)的宽度。

2 实验结果及讨论

2.1 高熵合金高应变率变形过程晶粒细化

动态加载前后 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金显微组织与尺寸分布如图 2 所示。 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金为简单的面心立方(FCC)单相固溶体结构^[9]。动态加载前 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的原始显微组织为片层状结构。在应变速率 $2\,770\text{ s}^{-1}$ 下动态加载后,绝热剪切变形区域的显微组织明显细化。通过 Nano Measurer 1.2 软件测得 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金加载前原始平均晶粒尺寸约 $100\text{ }\mu\text{m}$,动态加载后平均晶粒尺寸约 100 nm 。文献[10]发现面心立方金属的应变率敏感性随晶粒尺寸减小而减小,这在很大程度上抵消了纳米结构和超细晶粒材料中的应变硬化消失和高强度等不稳定因素,从而延缓甚至完全抑制 ASB。

2.2 应变速率对高熵合金绝热剪切敏感性的影响

一般情况下,绝热剪切发生时所吸收的能量(绝热剪切形成能)越少,绝热剪切发生时的临界应变越小,说明研究材料的绝热剪切敏感性越高,越容易形成 ASB^[11]。单位体积的绝热剪切形成能可以通过式(1)计算得到:

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

式中 E 为绝热剪切形成能, MJ/m^3 ; σ 为真应力, MPa ; ϵ 为真应变。根据式(1),通过对应力-应变曲线起始点到绝热剪切带出现点即“应力塌陷点”进行积分,可以得到材料在不同应变速率下的单位体积绝热剪切形成能。“应力塌陷”是指材料的流变应力值达到最大后突然出现急剧下降的一种现象,并且是在一个极短的时间内和小应变范围内的急剧下降。“应力塌陷”现象的产生也标志着 ASB 的形成,材料的承载能力会急剧下降。

图 3(a)~(c)分别为 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金在不同应变速率下绝热剪切区域的金相图;图 3(d)为 TB6 钛合金在应变速率 $2\,450\text{ s}^{-1}$ 时的绝热剪切区域的金相图。应变速率 $2\,770\text{ s}^{-1}$ 时,沿绝热剪切区域并未观察到光亮 ASB 的存在,仅在绝热剪切中心区域观察到绝热剪切局域化现象,如图 3(a)虚线区域所示。应变速率 $2\,950\text{ s}^{-1}$ 时,绝热剪切区域也没有产生 ASB,但在靠近底端位置出现了较为细长的裂缝。应变速率 $3\,360\text{ s}^{-1}$ 时,在绝热剪切变形区域产生了如图 3(c)箭头所示的

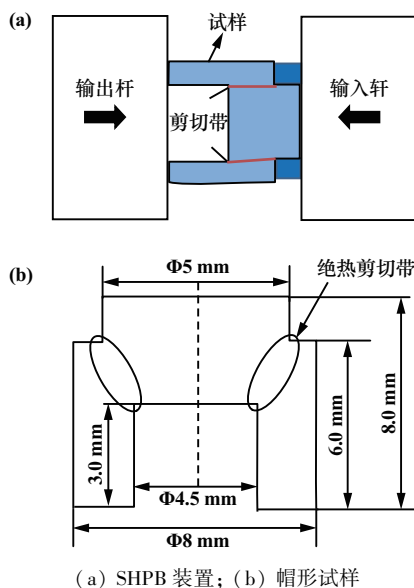
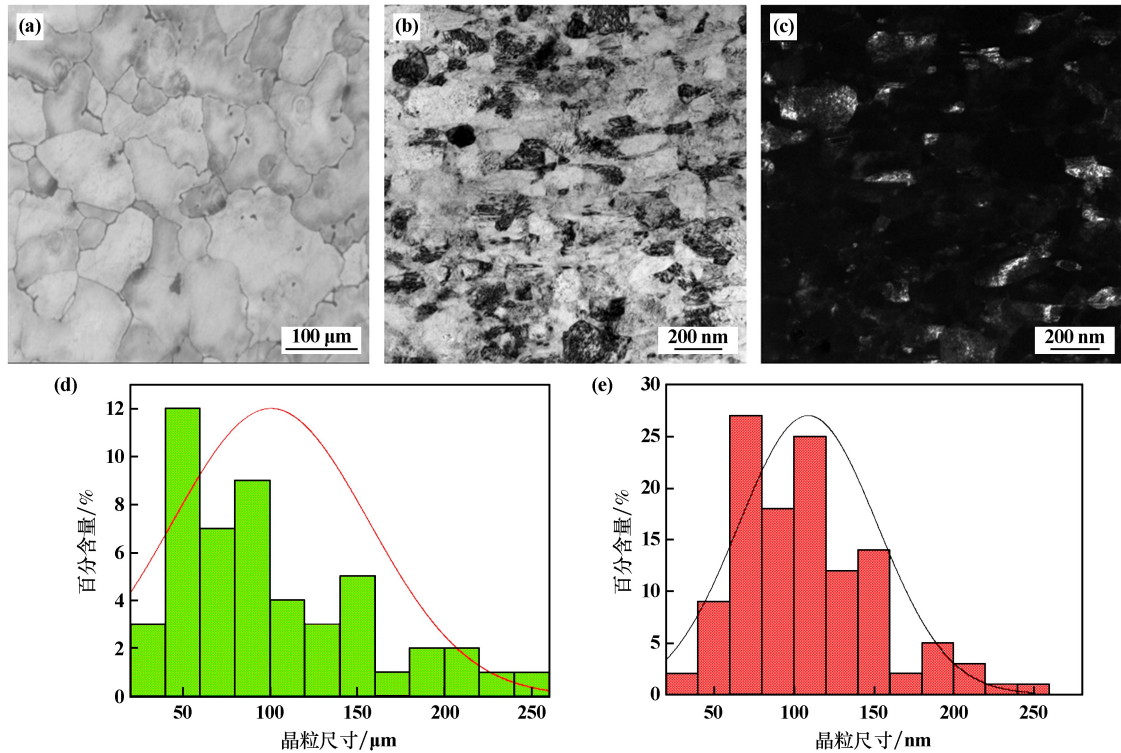
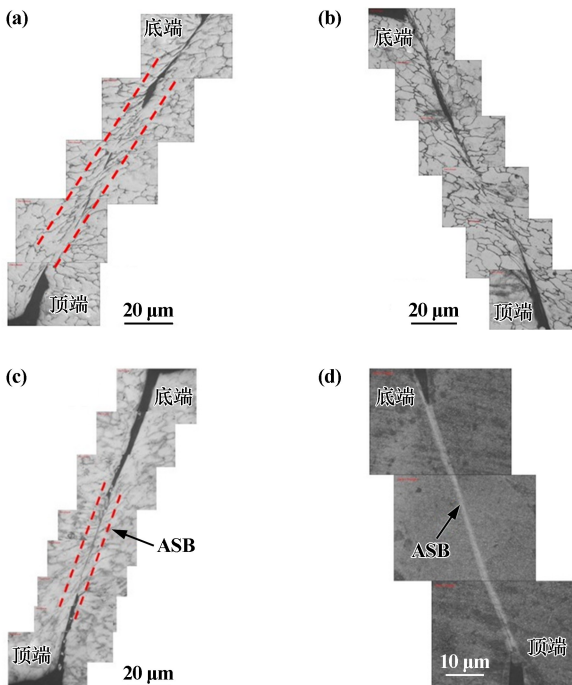


图 1 SHPB 装置及帽形试样尺寸



(a) 加载前合金原始组织; (b) 动态加载后合金组织 TEM 明场像图; (c) 图(b)对应的 TEM 暗场像图;
 (d) 加载前合金晶粒尺寸分布; (e) 动态加载后合金晶粒尺寸分布

图 2 动态加载前后 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金显微组织与尺寸分布



(a) 应变速率 $2770 s^{-1}$ 的 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金;
 (b) 应变速率 $2950 s^{-1}$ 的 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金;
 (c) 应变速率 $3360 s^{-1}$ 的 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金;
 (d) 应变速率 $2450 s^{-1}$ 的 TB6 钛合金

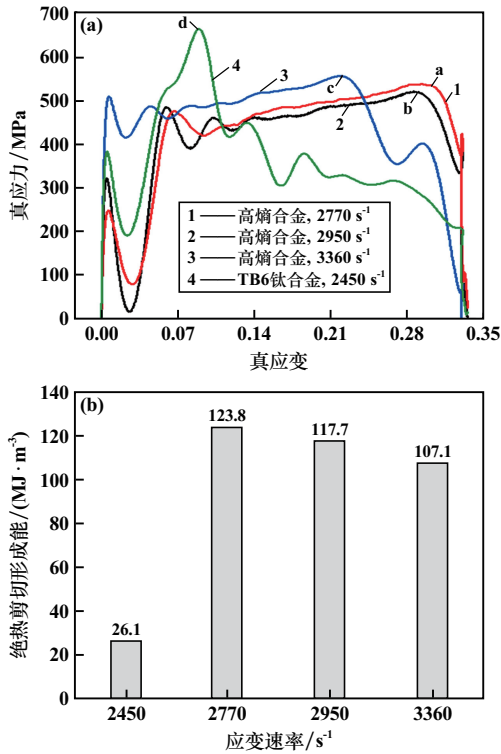
图 3 不同应变速率下高熵合金和 TB6 微观组织形貌

宽约 $2 \mu m$ 的 ASB, 且 ASB 与其动态加载方向成 45° 角。3 种不同应变速率下, 在高熵合金试样底端和顶端位置产生裂缝的长度和宽度不尽相同, 应变速率 $3360 s^{-1}$ 的试样底端和顶端产生裂缝的长度和宽度均明显高于其他 2 种应变速率下的。应变速率 $2450 s^{-1}$ 下, TB6 在绝热剪切变形区域产生了如图 3(d) 箭头所示的宽约 $5 \mu m$ 的 ASB, 方向与 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金的 ASB 方向一致。综上所述, $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金在应变速率 $3360 s^{-1}$ 下具有更高的绝热剪切敏感性。

图 4 为 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金与 TB6 钛合金在不同应变速率下发生绝热剪切失效时的临界应变和绝热剪切形成能。应变速率 $2770 s^{-1}$ 、 $2950 s^{-1}$ 、 $3360 s^{-1}$ 时, 对应的 $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金帽形试样发生绝热剪切失效时的临界应变和绝热剪切形成能分别为 0.294 (a 点), $123.8 MJ/m^3$; 0.288 (b 点), $117.7 MJ/m^3$; 0.219 (c 点), $107.1 MJ/m^3$ 。应变速率 $2450 s^{-1}$ 下 TB6 钛合金帽形试样发生绝热剪切失效时的临界应变为 0.089 (d 点), 绝热剪切形成能为 $26.1 MJ/m^3$ 。通过上述对比可知, $Al_{0.4}CoCrFeNi$ 高熵合金的绝热剪切敏感性随应变速率增加而增加。

金属材料在高应变速率下的变形可视为绝热过程, 局部变形伴有高的局部温升, 如果温升引起强度下

降大于应变硬化引起的强度增加,材料就会发生热塑失稳。并且在高应变速率下材料的流变应力对应变率敏感,材料变形呈现黏塑性特征,因而在高应变速率下要采用材料的黏塑性本构方程。由于在高应变速率下的变形会伴有明显的绝热温升,不同于一般的等温变形,黏塑性本构关系也称为热-黏塑性本构关系。



(a) 真应力-真应变曲线; (b) 单位体积绝热剪切形成能
图4 不同应变速率下的加载曲线及绝热剪切形成能

$\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金在动态加载下的绝热剪切也可视为材料的热-黏塑性本构失稳,其一维剪切情况下的表达式为:

$$\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}, T) \quad (2)$$

式中 τ 为剪切应力, MPa; γ 为剪切应变; $\dot{\gamma}$ 为剪切应变速率, s^{-1} ; T 为形变温度, K。本构失稳的临界条件为:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} + \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \frac{d\dot{\gamma}}{d\gamma} + \frac{\partial \tau}{\partial T} \frac{dT}{d\gamma} = 0 \quad (3)$$

式(3)右边第一项表示加工硬化,第二项是应变率硬化,第三项是热软化。当 $d\tau/d\gamma < 0$ 时, $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金材料发生绝热剪切局域化现象。本构失稳的发生取决于应变硬化、应变率硬化和热软化效应间的竞争,当应变硬化和应变率硬化效应小于热软化效应时, $d\tau/d\gamma$ 越容易小于 0, 即越容易发生绝热剪切局域化现象。因此,具有较高淬透性和较低热软化能力的材料通常具有较高的抗剪切局域化能力,而低应变硬化和应变率硬化均有利于形成绝热剪切带。

3 结 论

1) 动态加载前后 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金的晶粒尺寸分别约 $100 \mu\text{m}$ 和 100nm , 相差约 3 个数量级, 在高应变速率变形过程中 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金晶粒发生明显细化。

2) $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金绝热剪切敏感性随应变速率增加而增加, 应变速率 3360s^{-1} 时, 产生了与动态加载方向(或者反方向)成 45° 角、宽约 $2 \mu\text{m}$ 的 ASB, 发生 ASB 时的临界应变值和单位体积绝热剪切形成能也最小。在其他 2 种较小的高应变速率下并没有产生 ASB, 仅出现变形局域化和细小裂缝。

3) $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金在动态加载下的绝热剪切归结为材料的热-黏塑性本构失稳。

参考文献:

- [1] Zou Y, Ma H, Spolenak R. Ultrastrong ductile and stable high-entropy alloys at small scales[J]. Nature Communications, 2015, 6(1):1-8.
- [2] Gludovatz B, Hohenberg A, Catoor D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. Science, 2014, 345(6201):1153-1158.
- [3] ZHANG Z, ZHANG H, TANG Y, et al. Microstructure, mechanical properties and energetic characteristics of a novel high-entropy alloy $\text{HfZrTiTa}_{0.53}$ [J]. Materials & Design, 2017, 133:435-443.
- [4] 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.
- [5] Muskeri S, Hasannaemi V, Salloom R, et al. Small-scale mechanical behavior of a eutectic high entropy alloy [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):1-12.
- [6] 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(5):299-303.
- [7] Cantor B, Chang I T H, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375:213-218.
- [8] Meyers M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [9] WANG W R, WANG W L, WANG S C, et al. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2012, 26:44-51.
- [10] GUO Y Z, LI Y L, PAN Z, et al. A numerical study of microstructure effect on adiabatic shear instability: Application to nanostructured/ultrafine grained materials[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(11):1020-1029.
- [11] 杨 扬, 杨双君, 刘文辉. $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ 高熵合金组织结构对其绝热剪切敏感性的影响[J]. 矿冶工程, 2019, 39(3):119-122.

引用本文: 刘小刚, 姜丽红, 刘 征, 等. 应变速率对 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金绝热剪切敏感性的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1):133-136.