

2219 铝合金动态压缩下应变率敏感性行为

徐毅珂, 黄亮, 王泽宇, 徐佳辉, 张会萍, 李建军

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了研究 2219 铝合金的应变率敏感性行为, 采用分离式霍普金森冲击压杆装置(SHPB)对 2 种热处理状态(T4 态和 T6 态) 2219 铝合金进行了动态压缩实验, 并利用金相显微镜(OM)和 X 射线衍射(XRD)仪对压缩后的试样进行了显微分析。结果表明: 2 种热处理状态下材料应变率超过 2000 s⁻¹时, 材料的流动应力显著下降, 即出现显著的应变率软化行为。基于应变率敏感性行为随真实应变及应变率的二维等高线图, 发现在高应变量、高应变率条件下材料表现出负应变率敏感性行为, 流动应力随着应变量与应变率的提升而下降。通过理论计算及微观组织表征, 发现温升软化和变形带导致的软化作用, 是材料在高应变量、高应变率表现出负应变率敏感性行为的重要原因。

关键词: 动态加载; 2219 铝合金; 力学行为; 热处理; 应变率敏感性

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)08-2963-08

2219 铝合金属于 Al-Cu-Mn 系合金, 热处理是该合金强化的主要手段之一。它具有比强度高、低温和高温力学性能好、断裂韧度高、焊接性能好等特点, 广泛应用于航空航天、轨道交通等领域, 如运载火箭的箱体、航天器液氢、液氨的燃料贮存箱、飞机蒙皮等^[1-6]。航天器在使用过程中, 避免不了要承受动态冲击载荷, 为了提高航天器的安全性并且尽量减少质量, 进行铝合金的动态变形行为的研究尤为重要。

国内外学者关于铝合金板料的应变率敏感性、应变硬化效应已经进行大量研究^[7-8]。金飞翔等^[9]发现 AA6016 铝合金板材在高应变速率下, 材料的抗拉强度和断裂应变随应变速率的增加逐渐增加, 有明显的应变率敏感性。Guo 等^[10]发现 Al-Zn-Mg-Cu 合金的应变率敏感性受加工硬化和动态应变时效的耦合效应控制。然而, 后来很多研究发现, 材料会出现负应变率敏感性, 产生这种现象的原因有很多^[11-13]。张子群等^[14]对 2219 铝合金进行了动态压缩力学性能研究, 发现 2219 铝合金对温度有较高的敏感性, 在高温会发生软化, 其流动应力随着温度的升高而降低。黄丹等^[15]发现高速冲击载荷下, 铝合金的瞬时绝热温升会使得绝热剪切带内的第二相回溶, 第二相的回溶会使得位错运动阻力降低, 从而使材料的力学性能显著下降。Tiamiyu 等^[16]

对 AA2017-T451 和 AA2624-T351 铝合金进行动态压缩加载, 发现 2 种合金都经历了变形局部化, 形成了绝热剪切带。在这 2 种合金中, 剪切带是由过度的热软化和连续铝相的粘塑性不稳定性形成的。Zhang 等^[17]对 Al-Mg-Si-Cu 在不同温度下进行动态压缩试验, 发现动态流动软化主要是动态回复和再结晶的结果。Zhang 等^[18]认为, 动态再结晶的纳米颗粒的平移-旋转运动是导致微观结构软化的原因。刘伟等^[19]对不同热处理状态的 Al-Mg-Si 合金进行了高温压缩试验, 发现合金在高温条件下软化的主要机制为动态回复。孙大翔等^[20]研究了 2519A 铝合金的不同形变热处理状态的动态冲击变形行为, 结果表明合金内 θ' 析出相被位错切割, 逐渐断裂分解, 最后溶质原子回溶于 Al 基体, 导致合金发生软化, 并发现高应变速率和绝热温度加速了析出相的分解速率。杨雨童等^[21]对挤压态喷射成形 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金进行高应变速率下的热压缩试验, 结果表明该合金流变应力曲线呈现典型的动态回复特征, 随着应变速率的升高绝热温升现象愈发明显。综上所述, 发现不同的合金造成材料的负应变率敏感性的原因总结为 3 种, 绝热温升造成的第二相回溶, 绝热剪切带的形成, 动态回复和再结晶, 都有可能造成材料的软化。但是, 不同热处理状态的 2219 铝合金的应变率敏感性行

收稿日期: 2021-08-08

基金项目: 湖北省重点研发计划(2020BAB139); 国家自然科学基金面上项目(51975229); 武汉市应用基础前沿项目(2020010601012178)
作者简介: 徐毅珂, 女, 1998 年生, 硕士生, 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074, 电话: 027-87543490, E-mail: xuyike@hust.edu.cn

为及其背后的机理尚不清楚，需要进一步的研究。

本工作采用分离式霍普金森冲击压杆装置 (SHPB) 对 2 种热处理状态的 (T4 态和 T6 态) 2219 铝合金进行了动态压缩实验，研究其应变率敏感性行为，揭示了 2 种热处理状态 2219 铝合金负应变率敏感性行为的机理。

1 实验

实验材料为原始态 2219-O 铝合金板料，材料的组成成分如表 1 所示。试样规格为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的圆柱形，在厚度为 8 mm 的 2219 铝合金板料上采用线切割的方式进行加工，其中，试样的轴向与板料轧制方向相平行，且试样取材于板料厚度中心。对于固溶态 (T4 态) 与时效态 (T6 态) 的 2219 铝合金试样进行了准静态压缩和应变率为 2000、4000、6000 以及 8000 s^{-1} 的动态压缩加载，用 AG-IC 100 kN 材料高温持久性能试验机和分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置对试样进行准静态压缩和动态压缩实验。

试样的金相组织采用 KEYENCE 公司的 VHX-1000C 超景深三维显微镜进行观察。对于分离式霍普金森压杆试样，加载后沿着径向打磨，观察试样沿着轴向的截面，而对于其他试样，通过线切割的方式得到 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的块状试样，随后选择方向进行观察。试样首先依次采用 400#、800#、1200# 以及 2000# 的砂纸进行打磨，随后在呢料抛光布上配合粒度为 $2.5 \mu\text{m}$ 的金刚石抛光膏进行抛光以去除试样表面上的划痕。最后，凯勒试剂腐蚀约 1 min 后利用乙醇及棉球清洁试样表面并擦除试样表面上的氧化层，凯勒试剂的配比为 $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=5:3:2:90$ 。X 射线衍射 (XRD) 物相分析使用日本岛津公司的 XRD-7000x 射线衍射仪，仪器的最小步进角度为 0.0001° ，可实现 $-6^\circ \sim 160^\circ$ 范围内的扫描。在进行 XRD 检测前，首先对块状试样打磨至 1200#，随后采用乙醇进行清洗，从而去除试样表面杂质残留。XRD 检测过程中，加速电压设置为 40 kV，电流为 30 mA，以 $5^\circ/\text{min}$ 的扫描速率对试样进行 $5^\circ \sim 100^\circ$ 的扫描。

表 1 2219 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy ($\omega/\%$)

Cu	Mn	Ti	Zr	V	Al
6.20	0.30	0.06	0.15	0.08	Bal.

2 结果与讨论

2.1 动态压缩力学性能

利用分离式霍普金森压杆对固溶态与时效态的 2219 铝合金试样进行了应变率为 2000、4000、6000 以及 8000 s^{-1} 的动态压缩加载，所得到的材料应力-应变曲线如图 1 所示。图 1a 为 2219-T6 铝合金的应力-应变曲线，在准静态下，材料的抗拉强度为 512 MPa，断裂应变为 0.357；当应变速率从 2000 s^{-1} 到 6000 s^{-1} 时，材料的抗拉强度由 493 MPa 到 375 MPa，断裂应变由 0.171 到 0.55。图 1b 为 2219-T4 铝合金的应力-应变曲线，在准静态下，材料的抗拉强度为 400 MPa，断裂应变为 0.357；当应变速率从 2000 s^{-1} 到 6000 s^{-1} 时，材料的抗拉强度由 435 MPa 到 241 MPa，断裂应变由 0.206 到 0.582。分析表明，在低应变速率下铝合金板材的抗拉强度比准静态下高，表现出了应变率硬化效应，而高应变速率下，随着应变速率增加，铝合金板材的塑性逐渐提高。

固溶处理后， 8000 s^{-1} 应变率下的动态压缩强度减小为 265 MPa，真应变增加为 95%。经过时效处理后， 8000 s^{-1} 应变率下的动态压缩强度减小为 384 MPa，真应变进一步增加为 88%。当加载应变速率进一步提升至 $4000 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 后，2 种不同热处理状态下的 2219 铝合金均表现出了明显的软化行为。分析是由于较高应变速率下材料微观组织发生改变，导致了材料整体强度的下降，在下文的金相观察分析，发现变形带有利于促进位错回复从而发生材料软化行为。同时在 $4000 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内，材料整体的流变应力随着加载应变速率升高表现出了不明显的上升趋势，分析可能是由于位错运动强度提升所导致的应变率硬化效应^[22]。

2.2 应变率敏感性

材料的应变率敏感性 (strain rate sensitivity, SRS) 表明了材料的流动应力随着应变率的变化规律，其定义为材料应力随着应变率的偏导数，由于试验及测量条件的限制，实际的应变率敏感性 m 将通过公式(1)^[23,24]计算得到：

$$m = \frac{\partial \ln \sigma_f}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \approx \frac{\ln \sigma_D - \ln \sigma_{qs}}{\ln \dot{\epsilon}_D - \ln \dot{\epsilon}_{qs}} \quad (1)$$

其中， σ_f 、 $\dot{\epsilon}$ 为所计算的流动应力及应变率，而 σ_D 以及 $\dot{\epsilon}_D$ 为动态加载条件下的流动应力及应变率， σ_{qs} 以及 $\dot{\epsilon}_{qs}$ 为准静态加载条件下的流动应力及应变率。通过上式计算可得到材料的应变率敏感性 $m = f(\dot{\epsilon}, \epsilon)$ ，如图 2 可以看出，在较低应变率 (2000 s^{-1}) 下，其整体均表现为正应变率敏感性，当加载应变速率进一步提升至 $4000 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 后，随着应变率的提升，

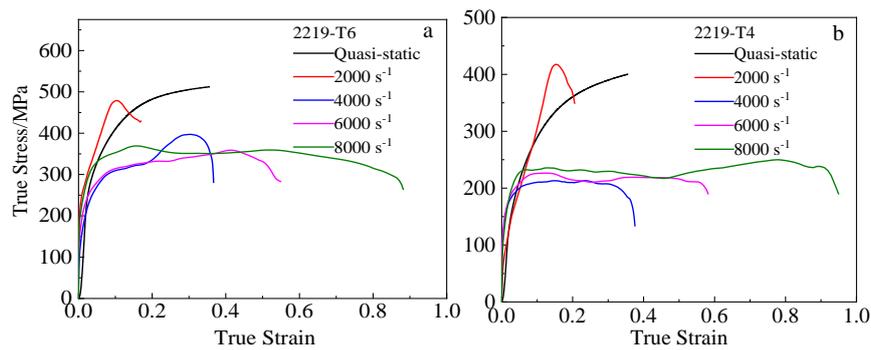


图 1 固溶态与时效态 2219 铝合金在动态压缩加载条件下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of 2219 aluminum alloy under dynamic compression loading: (a) 2219-T6 and (b) 2219-T4

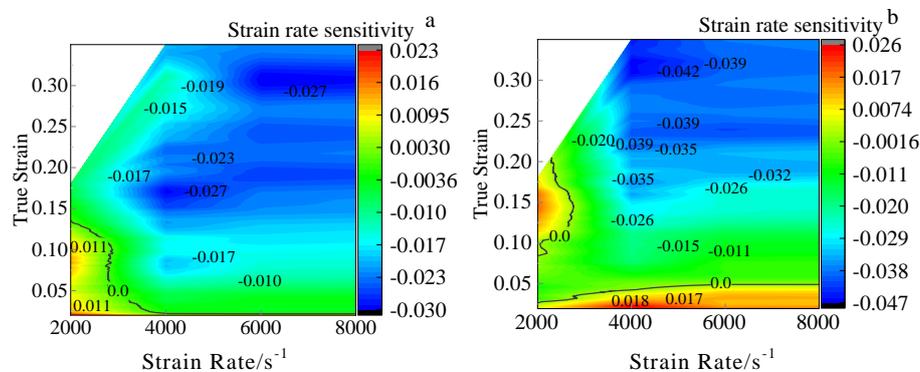


图 2 2219 铝合金的应变率敏感性

Fig.2 Strain rate sensitivity of 2219 aluminum alloy: (a) 2219-T6 and (b) 2219-T4

材料整体呈现为负应变率敏感性, 同时, 在固定应变率下, 材料的应变率敏感性随着应变量的提升而下降。

在动态加载试验过程中, 2219-T6 铝合金在 2000 s^{-1} 的较低应变率下的 m 值为 0 到 0.011, 呈现为正应变率敏感性, 而 2219-T4 铝合金在 $4000 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 较高应变率下和较低应变率下 m 值为 0 到 0.018, 呈现为正的应变率敏感性, 在高应变率、高应变率的加载条件下材料 2219-T6 的 m 值为 -0.01 到 -0.027 , 而 2219-T4 铝合金在 $4000 \sim 8000 \text{ s}^{-1}$ 较高应变率下和较低应变率下 m 值为 0 到 -0.042 , 均呈现为负应变率敏感性。对于 2219-T6 与 2219-T4 铝合金而言, 由于加工硬化的强化作用, 导致材料在准静态应变的初期就呈现出更高的强度, 并且在动态压缩加载条件下, 其正应变率敏感性所持续的应变率明显较低, 同时, 由于峰值时效态的 2219-T6 铝合金基体中的加工硬化作用达到了最大, 因此动态压缩加载条件下, 材料整体表现为负的应变率敏感性。

2.3 绝热温升

为了评估动态加载条件下绝热温升对于材料的影响程度, 利用材料的力学响应计算得到材料由于塑性应变所导致的整体绝热温升, 计算方式如公式 (2)^[25]所示:

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c} \int_0^{\epsilon} \sigma_f d\epsilon \quad (2)$$

其中, ρ 为材料的密度, 取 $\rho = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, c 为材料的定压比热容, 取 $c = 0.88 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, η 为塑性变形过程中的热转换系数, 对于动态应变过程而言 $\eta = 0.95$, 而对于准静态应变过程而言, 试样变形过程中产生的热量有时间向环境散失, 因此 $\eta = 0$ ^[23], σ_f 与 ϵ 分别为流动应力以及对应的应变。计算得到的材料绝热温升如图 3 所示。可以看出, 对于绝热状态下的动态压缩加载, 在材料的强度未出现较大差异的情况下, 材料的绝热温升主要与材料的应变率成正比, 但材料整体的绝热温升量有限, 在 2000 s^{-1} 应变率的动态压缩加载条件下, 由于试样的应

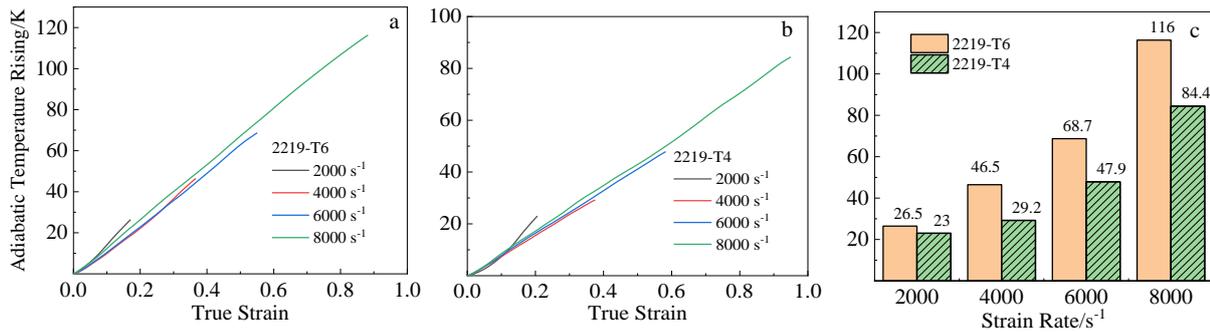


图 3 2219 铝合金动态加载条件下的绝热温升

Fig.3 Adiabatic temperature rising curves (a, b) and statistics (c) of 2219 aluminum alloy under dynamic compression loading: (a) 2219-T6, (b) 2219-T4

变量明显较低,因此材料的绝热温升量仅为 23~26.5 K,同时,随着加载应变率的提升,由于材料应变量的提升,其绝热温升也随之提升,在 8000 s⁻¹ 的应变率下,2 种热处理状态下的 2219 铝合金试样整体绝热温升量达到了最高的 84.4~116.0 K。

然而,对于加载应变率为 4000~8000 s⁻¹ 的试样而言,2 种不同热处理状态下的 2219 铝合金试样在进入塑性应变状态后即发生了明显的软化行为,其对应的绝热温升量极为有限,例如在应变率达到 0.4 的情况下,材料的绝热温升值根据其加载条件、热处理条件的不同,分别为 29.2~46.5 K。

试样的绝热温升与应变率紧密相关,随着应变率的提升,绝热温升呈非线性增大。随着温度的升高,会发生一定的回复。回复过程所发生的变化,与其内部组织结构密切相关,而组织结构变化的程度又取决于回复温度。通常选用对应温度(或约化温度)表示回复温度的高低如公式(3)^[26]:

$$T_H = T / T_m \quad (3)$$

其中: T 为实际加热温度, T_m 为金属熔点的温度。当应变率增大到 4000 s⁻¹, 2219-T6 和 2219-T4 态材料的局部温升分别达到 46.5 和 29.2 K 以上(环境温度取为 20 °C), 经计算 2219-T6 和 2219-T4 态材料的 T_H 分别 0.37、0.35。 $T_H > 0.3$, 这说明材料在大于 4000 s 应变率下动态压缩过程中,材料内部会发生位错回复,经过回复可部分消除宏观残余内应力,储存能得以释放。因为绝热温升对材料的性能具有一定的影响,这也与 4000 s 以上材料的流动应力曲线较低的事实相吻合。

2.4 微观组织

取在 2000 s⁻¹ 应变率下的动态压缩加载所得到的试样,沿着轴向方向切割,测量试样垂直于径向

的截面形貌,如图 4 所示。在动态加载条件下,2 种不同热处理条件下的 2219 铝合金试样均表现出了明显的应变非均匀性。根据材料的应变模式,将试样分为以下 3 个不同的应变区:位于上下端面的难变形区(HDZ),位于试样圆周的小变形区(SDZ),以及沿着试样对角线分布的大变形区(LDZ)。在低应变区,由于动态加载过程中试样与入射杆、透射杆之间的摩擦,导致其端面沿径向的应变受阻,因此在单向压缩加载条件下,试样端面整体的应变量较小,形成了低应变区;而在试样的四周,一方面由于动态压缩加载条件下,试样在沿着轴向方向发生压缩的同时,也会沿径向向四周扩展,另一方面由于断面沿径向的应变受到了抑制,因此试样四周的晶粒呈现为弯曲变形的形态;而在试样的对角线区域,其在小变形区以及弯曲变形区之间的共同作用下,受到了较强的剪切应力,进而发生了局部的剪切应变,形成了剪切带结构。可以看出,试样截面上的局部剪切带的影响区域也随着试样应变量的提升而明显增大。在相同的加载条件下,试样最终所发生的应变主要受到了试样强度的影响,综合强度最高的 2219-T6 铝合金试样的应变量最低,同时随着材料强度的降低, T4 态试样的应变也随之提升。

对经过动态压缩加载的 2219 铝合金进行 XRD 分析,如图 5 所示。[220]和[111]面的峰强度对比,要远远大于标准卡片中 2 个峰强度比,由此可知,[220]面具有明显的取向。晶格的不同晶面的布拉格衍射的强度是不同的,但可以通过比值来表示晶粒的取向度,定量分析晶粒取向的强弱程度,可以定义晶粒取向度为 M ^[27]:

$$M(hkl) = \frac{I(hkl) / \sum I(hkl)}{I_0(hkl) / \sum I_0(hkl)} \quad (4)$$

其中 $I(hkl)$ 为所测得的 (hkl) 晶面所对应的衍射强度, $I_0(hkl)$ 为 pdf 卡片的 (hkl) 晶面所对应的衍射强度。采用晶粒取向度公式, 可以表示晶粒的无序度。如 M 趋向于 1, 则表明晶粒取向趋向于随机分布; M 大于 1, 表明有明显的取向; M 小于 1 则表明无明显取向。

从图 5 可以看出, (220) 晶面的 M 值达到 2 以上, 表明合金在 (220) 面上具有明显的择优取向, 随着应变率的增加 (220) 面的择优取向更加明显, 在 (200)、(311) 面的 M 值接近 1, 表明在这 2 个晶面晶粒取向趋向于随机分布, (111)、(222) 面的 M 值小于 1, 表明该晶面不具有明显的择优取向。

对于铝合金等 fcc 材料而言, 其塑性变形过程中材料基体中的滑移系为沿着密排面分布的 $\{111\}\langle 110\rangle$, 而在单向压缩加载条件下, Hazif 等人^[28]的研究表明, 随着加载应力的提升, 当局部的应力分量达到了临界值 $\sigma_{\{110\}}$ 后, 沿着晶面族 $\{110\}\langle 110\rangle$ 的位错滑移也会开动。因此对于 2219 铝合金在动态压缩加载条件下的取向改变, 其成因可能在于塑性应变过程中 $\{110\}$ 晶面上滑移系的开动。在塑性变形过程中, 由于晶粒内部的变形不均匀以及晶粒与晶粒之间的变形不协调, 导

致了晶粒整体或局部的旋转。其中, 晶粒局部的旋转导致了单一晶粒内部的取向出现了差异, 而且在浸蚀操作过程中, 由于不同取向的晶面结构具有不同的耐蚀性, 因此在下面介绍的金相观察中, 试样的部分晶粒中观察到了变形带。同时晶粒之间的变形协调也导致了晶粒整体的旋转, 在单向压缩加载条件下, 材料的应变状态较为单一, 因此在发生了较大程度的塑性应变之后, 沿着加载方向材料会出现明显的择优取向, 同时动态压缩加载条件下, 材料的绝热温升降低了特定滑移系中位错运动所需的应力, 进一步促进了材料取向的改变, 最终形成了如图 6 中所示材料的 $\{220\}$ 晶面衍射强度提升。

对大变形区进行金相观察, 所得到的结果如图 7、8 所示。由于在动态压缩加载条件下, 材料均可以达到较高的应变率, 因此对试样的金相组织上也具有明显的影响。通过图 7、8 可以看出, 对于 2219-T6 和 219-T4 铝合金而言, 在动态压缩应变条件下材料的部分晶粒都出现了垂直于加载方向的变形带(DBs)^[29], 这些变形带分布不均匀, 在某些晶粒中集中分布。同时, 在图 7b, 7d 中, 试样的大变

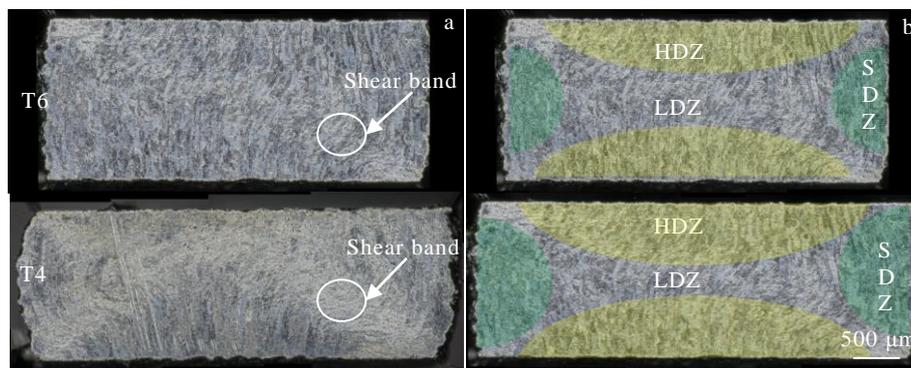


图 4 2219 铝合金在 SHPB 加载后的形貌

Fig.4 Appearance of 2219 aluminum alloy samples under SHPB loading: (a) macro morphology and (b) three strain zones

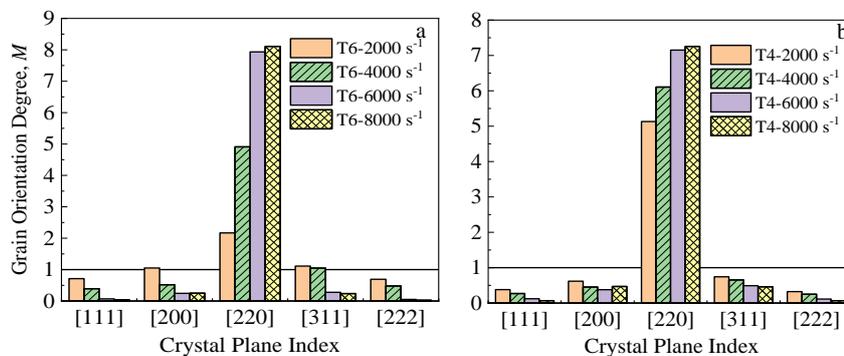


图 5 2219 铝合金不同晶面的晶粒取向度

Fig.5 Grain orientation of different crystal planes: (a) 2219-T6 and (b) 2219-T4

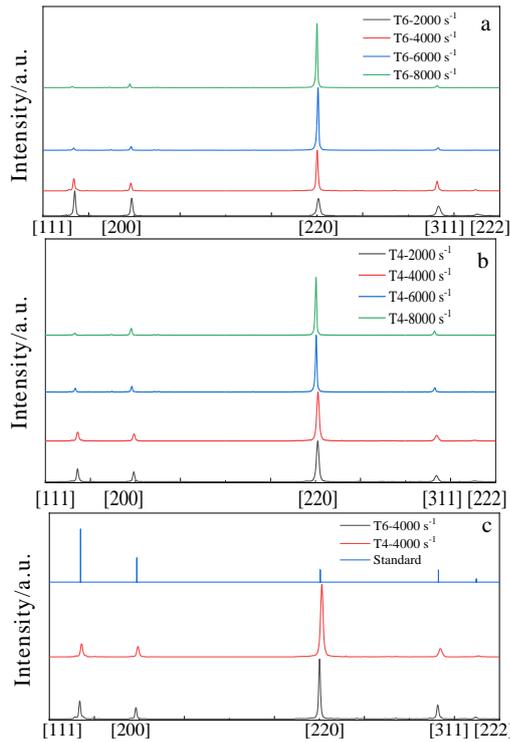


图 6 2219 铝合金的 XRD 分析结果

Fig.6 XRD results of 2219 aluminum alloy: (a) 2219-T6, (b) 2219-T4, and (c) dynamic loading at 4000 s⁻¹

形区存在明显的晶粒扭曲，表明了在此位置发生了较为明显的局部剪切变形。

考虑到材料在动态压缩加载条件下所发生的绝热温升极为有限，因此其变形行为很可能是导致材料软化的关键因素。在塑性变形过程中，由于其变形主要集中于沿着试样对角线分布的大变形区，因此在试样基体中易形成局部的剪切应变集中区域。然而，DBs 的不均匀性，表明变形诱导界面上的应变分布不同，大多数 DBs 在其边界附近表现出应变积累^[30]。变形带在某些晶粒中集中分布，因此认为变形带形成可能是因为晶体取向发生变化造成的，在压缩试样时，由于晶粒的各向异性，取向不同的晶粒所受应力不同，作用在各个晶粒上同一滑移系的分切应力值也因此而有较大的差异。某些处于软取向的晶粒首先开始变形，而那些位于硬取向的晶粒可能仍处于难变形状态。晶粒之间的变形协调也导致了晶粒整体的旋转，已变形晶粒内的位错滑移至晶界处塞积，造成应力集中，这可能会造成了变形带的产生。在高应力变形条件下，变形带可以促进位错发生回复行为，可以释放应力集中^[29,30]，从而降低了材料所表现出的强度，促使材料发生软化行为。

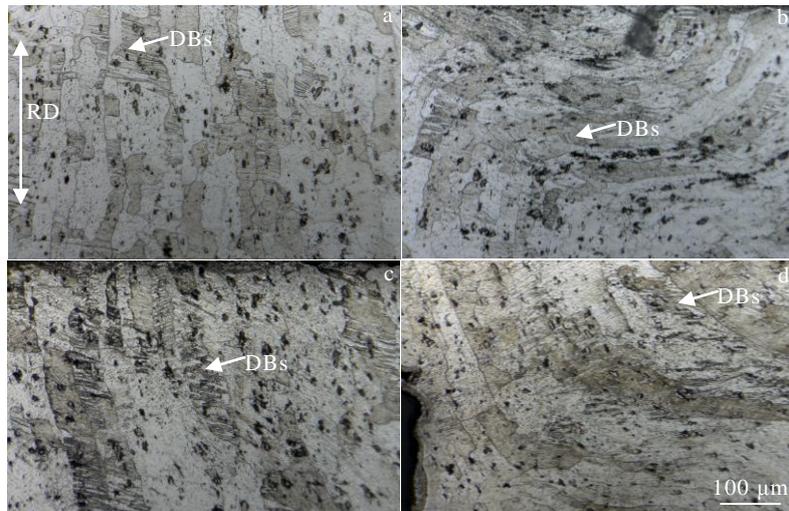


图 7 2219 铝合金在 2000 s⁻¹ 应变率加载下的金相照片

Fig.7 OM images of 2219 aluminum alloy under dynamic loading at strain rate of 2000 s⁻¹: (a, b) 2219-T6 and (c, d) 2219-T4

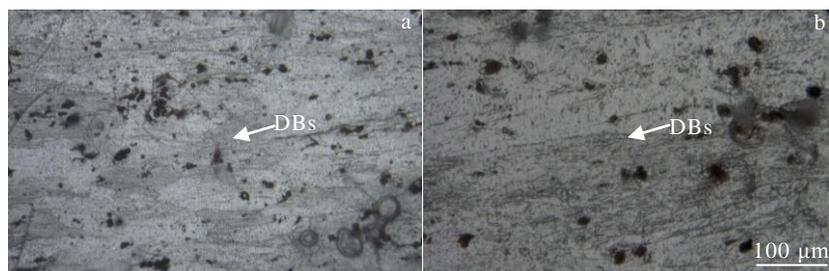


图 8 2219 铝合金在 4000 s⁻¹ 应变率加载下的金相照片

Fig.8 OM images of 2219 aluminum alloy under dynamic loading at strain rate of 4000 s⁻¹: (a) 2219-T6 and (b) 2219-T4

3 结 论

1) 在较低应变率下的动态压缩加载条件下 ($\dot{\epsilon}=2000\text{ s}^{-1}$), 材料的强度随着应变率的增大而增大, 表现出了应变率硬化效应。当加载应变率进一步提升至 $4000\sim 8000\text{ s}^{-1}$ 后, 2 种不同热处理状态下的 2219 铝合金均表现出了明显的软化行为。

2) 通过材料的应变率敏感性分析了材料性能随应变、应变率的演变规律, 在高应变量、高应变率的加载条件下材料 2219-T6 的 m 值为 -0.01 到 -0.027 , 而 2219-T4 铝合金在 $4000\sim 8000\text{ s}^{-1}$ 较高应变率下和较低应变率下 m 值为 0 到 -0.042 , 均表现为负应变率敏感性。

3) 当应变率增大到 4000 s^{-1} , 2219-T6 和 2219-T4 态材料的局部温升分别达到 46.5 和 29.2 K 以上, 材料内部会发生位错回复, 而 XRD 和金相观察分析发现变形带有利于促进位错回复, 从而发生材料软化行为, 这是材料在高应变率和高应变量下体现负敏感性行为的重要原因。

参考文献 References

- [1] Qiu Yang(邱 阳), Zhang Zhifeng(张志峰), Gao Mingwei(高明伟) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2019, 43(2): 122
- [2] Wang Z, Huang L, Li J *et al. Metals*[J], 2018, 8(5): 305
- [3] Zhu H, Huang L, Li J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 714: 124
- [4] Su H, Huang L, Li J *et al. Journal of Materials Science & Technology* [J], 2020, 70: 125
- [5] Chen S, Zhang H, Jiang X *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2019, 44: 197
- [6] Huang Pan(黄 攀), Huang Liang(黄 亮), Su Hongliang(苏红亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 2987
- [7] Tao Jiahui(陶家辉), Gu Boqin(顾伯勤), Chen Lili(陈立立) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(11): 3571
- [8] Mao Pingli(毛萍莉), Sun Qinghai(孙庆海), Liu Zheng(刘正) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2016, 40(12): 1207
- [9] Jin Feixiang(金飞翔), Man Gu(谷 曼), Zhong Zhiping(钟志平) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2020, 27(7): 139
- [10] Guo Y, Zhang M, Wang Z *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 806(7): 140 691
- [11] Wu Gaohui(武高辉), Zhu Dezhi(朱德智), Chen Guoqing(陈国钦) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(2): 264
- [12] Shi X H, Fan Z Y, Cao Z H *et al. Materials Letters*[J], 2021, 284: 128 942
- [13] Yu Haiping, Jin Yanye, Hu Lan *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 793: 139 880
- [14] Zhang Ziqun(张子群), Jiang Zhaoliang(姜兆亮), Wei Qingyue(魏清月). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2017, 45(10): 47
- [15] Huang Dan(黄 丹), Li Zhuo(李 卓), Zhou Xudong(周旭东) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(1): 242
- [16] Tiamiyu A A, Basu R, Odeshi A G *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 636: 379
- [17] Zhang H, Li L, Yuan D *et al. Materials Characterization*[J], 2007, 58(2): 168
- [18] Zhang W, He L, Lu Z *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2020, 786: 139 430
- [19] Liu Wei(刘 伟), Liu Wei(刘 巍), Zhou Wenjie(邹文杰) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2021, 46(2): 168
- [20] Sun Daxiang(孙大翔), Dong Yu(董 宇), Ye Lingying(叶凌英) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2021, 49(2): 79
- [21] Yang Yutong(杨雨童), Luo Rui(罗 锐), Cheng Xiaonong(程晓农) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2019, 29(12): 2700
- [22] Ye T, Li L, Liu X *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 666: 149
- [23] Zhao M, Huang L, Li C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2021, 810(4): 141 031
- [24] Yan S L, Yang H, Li H W *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 688: 776
- [25] Meyers M A. *Dynamic Behavior of Materials*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1994: 310
- [26] Xu Hengjun. *Materials Science and Fundamentals*(材料科学基础)[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2001: 385
- [27] Guo Xinjian(郭新建). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011
- [28] Hazif R L, Poirer J P. *Acta Metallurgica*[J], 1975, 23(7): 865
- [29] Li X, Xi W, Yan H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 753: 59
- [30] Son H W, Cho C H, Lee J C *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 814(C): 152 311

Strain Rate Sensitivity Behavior of 2219 Aluminum Alloy Under Dynamic Compression

Xu Yike, Huang Liang, Wang Zeyu, Xu Jiahui, Zhang Huiping, Li Jianjun

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical properties of 2219 aluminum alloy, dynamic compression experiments were carried out through split Hopkinson impact pressure bar (SHPB) equipment on 2219 aluminum alloy under two heat treatment states (T4 and T6). The microstructure of the obtained samples was analyzed by OM and XRD. It is found that the flow stress of the material decreases significantly when the strain rate exceeds 2000 s^{-1} under the two heat treatment conditions, that is, a significant strain rate softening behavior occurs. Based on the two-dimensional contour map of strain rate sensitivity behavior with true strain and strain rate, it is found that the material exhibits negative strain rate sensitivity behavior under the condition of high strain and high strain rate, and the flow stress decreases with the increase of strain and strain rate. Through theoretical calculation and microstructure characterization, it is found that the softening effect caused by temperature rise softening and lamellar grain breakage is an important reason for the negative strain rate sensitivity behavior of the material at high strain and high strain rate.

Key words: dynamic loading; 2219 aluminum alloy; mechanical property; heat treatment; strain rate sensitivity

Corresponding author: Huang Liang, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China, Tel: 0086-27-87543490, E-mail: huangliang@hust.edu.cn