

2195 铝锂合金平面应变热压缩行为

李世清¹, 邓赞辉¹, 杨群英¹, 林 林², 芮永林², 张志清^{1,3}

(1. 重庆大学, 重庆 400030)

(2. 西南铝业(集团)有限责任公司, 重庆 401326)

(3. 重庆市西彭铝产业园区, 重庆 401326)

摘 要: 2195 铝锂合金被认为是航空航天领域的理想结构材料, 但对其热变形行为的研究却相对较少。本工作通过平面应变热压缩试验, 研究了 2195 铝锂合金的热变形行为, 变形温度为 400~500 °C, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹。研究表明, 材料变形呈稳态流变特征, 随变形温度增高和应变速率降低, 流变应力逐渐减小, 合金具有正应变速率敏感性。建立了 2195 铝锂合金材料本构方程, 其激活能值为 214.937 kJ/mol。通过分析加工图, 得到材料的适宜加工区为应变速率接近 0.01 s⁻¹, 温度为 475~500 °C。最后通过分析动态软化过程中的应力规律, 得到了材料软化机制判定方程。

关键词: 2195 铝锂合金; 平面应变压缩; 流变应力; 本构方程; 加工图; 动态软化机制

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0553-07

铝锂合金是一种以 Li 为主要合金元素的新型铝合金, 其特点是密度低, 耐热性和抗腐蚀性优良。研究表明^[1,2], 在铝合金中加入 1% 的锂, 可使合金密度降低 3%, 刚度提高 6%。因此铝锂合金被认为是航空航天领域的理想结构材料。

2195 铝锂合金是美国 Weldalite™049 系列合金, 在原来合金的基础上, 通过适当改变 Cu 和 Li 的含量, 使合金具有超高强度, 优良的可锻性、可焊性和低温性能^[3]。与常规的铝合金一样, 2195 铝锂合金也需要经过高温塑性加工成形。成形过程中的流变应力是材料的最基本属性, 其受温度、应变速率等因素影响。采用单轴压缩获得不同温度、应变速率条件下合金流变应力及组织转变是研究材料热变形行为的常见方式。韩冬峰等^[4]采用高温等温压缩, 研究了不同应变速率、不同温度下的 2195 铝锂合金热压缩行为, 得出了流变应力解析式中的各参数的值, 并且计算了材料的热变形激活能。蒋呐等^[3]也对 2195 铝锂合金的多道次热压缩流变应力及软化规律进行了模拟研究, 并最终建立了该合金多道次热变形的流变应力方程。平面应变压缩相对于单轴压缩, 具有导向流动的作用, 即通过在特定方向施加变形障碍, 使材料在压缩过程中沿着特定的方向流动, 从而模拟了材料的轧制过程。此外, 平面应变压缩由于制导效应, 其在特定取向的研究结果会比单轴压缩更加精确。伊朗 Sharif 大学和

韩国工业技术研究院的学者^[5]对超细晶商用纯铝 AA1050 (试验前进行了多道次累积叠轧处理) 进行了平面应变压缩试验, 通过分析其流变应力曲线, 发现材料的软化效应与叠轧道次有关。西北工业大学和中航工业北京航空制造工程研究所的研究人员^[6]对镍基高温合金的平面应变压缩行为也进行了相关研究。研究表明, 在大部分的实验条件下, 材料几乎没有表现出软化现象。但是当处于高应变速率时, 绝热升温导致了材料的剧烈软化, 而且曲线还出现了单轴压缩所没有的双峰特征。这说明材料在变形过程中发生了强烈的应力集中和动态再结晶现象。文献[7]对平面应变压缩行为的取向性进行了研究, 作者首先对单晶纯铁进行平面应变压缩试验和单剪试验, 然后对比两者的应力-应变曲线、EBSD 图像和晶体塑性理论计算值, 最后得出: 材料的应力应变行为和晶体取向关系密切。

目前各国学者对不同材料平面应变压缩行为的研究相对较少, 尤其是有关 2195 铝锂合金平面应变压缩行为及热变形过程中微观组织演变以及加工图的研究鲜见公开发表。因此本研究的主要工作是: 利用 Gleeble-3500 热模拟压缩试验机, 获得 2195 铝锂合金在变形温度为 400~500 °C, 应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 时的应力-应变曲线。根据曲线及相关数据, 获得材料的本构方程。绘制材料的热变形加工图, 分析不同变形参数下材料的失稳特性, 得出材料的安全加工区域。

收稿日期: 2017-02-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) (2013AA032401)

作者简介: 李世清, 男, 1992 年生, 硕士, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030, 电话: 023-65678750, E-mail: 982665297@qq.com

研究材料在热变形过程中的软化行为，获得材料发生再结晶的临界条件，从而为企业的工艺制定提供一定的参考。

1 实验

本实验选用西南铝业（集团）有限责任公司生产的 2195 铝锂合金，其名义成分为（质量分数，%）：Cu 4.12, Li 1.02, Mg 0.44, Ag 0.4, Zr 0.11, Fe 0.05, Al 余量。根据 DSC 分析及前期成果，选择均匀化工工艺参数为 440 °C/16 h+490 °C/20 h。处理之后通过线切割得到 20 mm×15 mm×10 mm 的试样。

平面压缩试验在 Gleeble-3500 热模拟压缩试验机上进行，变形温度 T 为 400, 420, 440, 460, 480, 500 °C，应变速率为 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹，变形量 60%。试验后迅速水淬以保留变形组织。

2 结果与讨论

2.1 流变应力

2195 铝锂合金的应力-应变曲线及峰值应力与形变温度、应变速率的关系分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 可知，其应力在变形初期随变形程度增加而急剧增大，并迅速达到峰值，之后随着应变量的增大，应力不再发生明显变化或逐渐下降至某一应力后保持稳定，呈现稳态流变特征。高温热变形是材料加工硬化

和动态软化相互竞争的过程，在变形初期，随着压缩过程的进行，位错密度急剧增加，加工硬化强于动态软化，材料的流变应力不断增大。随着变形的增加，材料软化所需的能量起伏和结构起伏不断被满足，动态软化强于或等于加工硬化，因此材料的流变应力减小或基本保持不变。通过对比图 1 各图及分析图 2 还能发现，在一定的应变速率下，随着变形温度的升高，材料的流变应力逐渐减小；在一定温度下，随着应变速率的增加，材料的流变应力不断增大，说明 2195 铝锂合金具有正应变速率敏感性。

2.2 本构方程

材料热变形过程中流变应力与形变温度、应变速度间的关系可以通过本构方程加以描述。目前常用的流变应力模型主要有两类^[8-12]：一是采用高温变形实验的方法，根据所得数据，利用数理统计等手段，建立经验或半经验模型。二是根据材料高温变形时的物理机制，考虑变形过程中的组织演化（如位错滑移、攀移，动态回复、动态再结晶等）建立模型。两种方法各有利弊，本研究采用第 1 种方法，即通过对平面压缩实验数据进行运算处理，建立相应的流变应力本构方程。根据文献

[13]，材料的流变应力符合式 $\sigma = \frac{1}{A} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$ ，

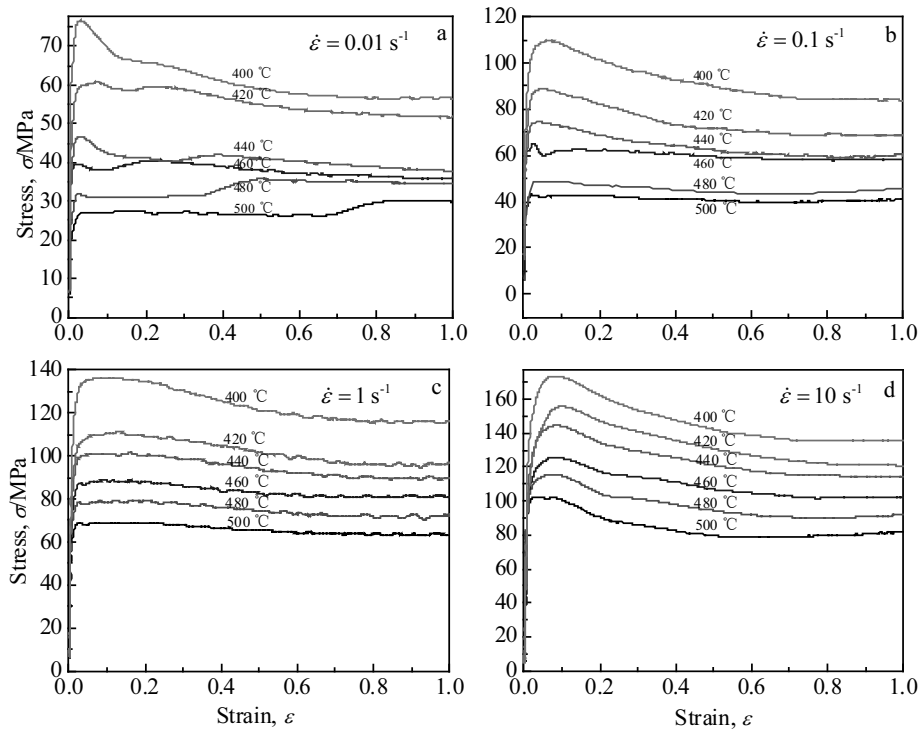


图 1 2195 铝锂合金不同应变速率下的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of 2195 Al-Li alloy during plane strain compression: (a) $\dot{\epsilon}=0.01 \text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=1 \text{ s}^{-1}$, and (d) $\dot{\epsilon}=10 \text{ s}^{-1}$

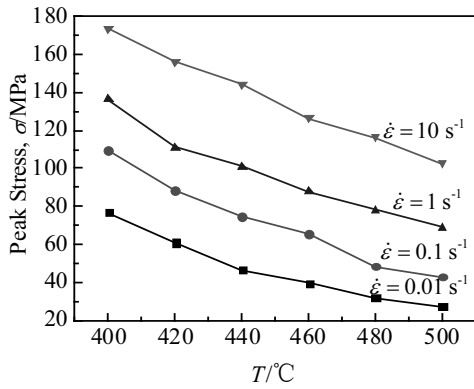


图 2 2195 铝锂合金在不同温度不同应变速率下热模拟平面压缩的峰值流变应力

Fig.2 Peak stresses of 2195 Al-Li alloy in plane strain compression at different temperatures and various strain rates

即只要算出参数 A 、 Z 和 n ，就能对材料在热变形过程中的流变应力进行估算。对于不同应力水平的应变速率，文献[13]推导出如下式子：

$$\text{低应力: } \ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + n_1 \ln \sigma - Q/RT \quad (1)$$

$$\text{高应力: } \ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + \beta \sigma - Q/RT \quad (2)$$

$$\text{高+低: } \ln \dot{\epsilon} = \ln A - Q/RT + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (3)$$

由以上知，当温度保持不变时， β 是曲线 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 的斜率， n_1 是曲线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 的斜率， n 是曲线 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的斜率。做各曲线如图 3 所示。

对于图 3a 计算 β 时，选取峰值应力大的数据点，即 400、420 和 440 °C 的曲线斜率，取其平均值得 $\beta=0.071993$ ；对于图 3b，选取其峰值应力小的数据点，即 500、480 和 460 °C 的曲线斜率，同样取其平均值得 $n_1=5.49548$ ；由 β 和 n_1 值得 $\alpha=\beta/n_1=0.013$ ；最后对于图 3c，取所有曲线的斜率求其平均值作为最终应力指数值 $n=4.6712$ 。

对所有应力状态，假设激活能 Q 与温度 T 无关，则：

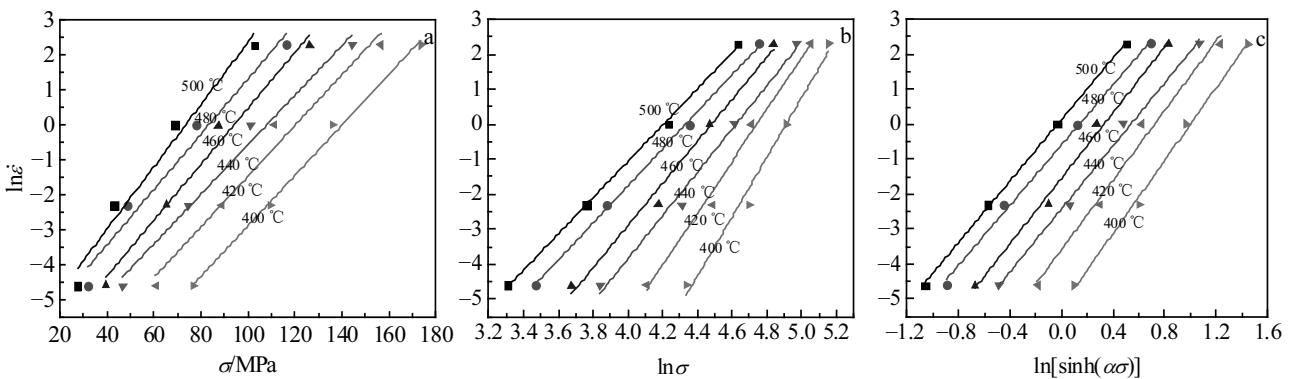


图 3 2195 铝锂合金 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 直线拟合曲线

Fig.3 Linear fitting curves about $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ (a), $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (b), and $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (c) of 2195 Al-Li alloy

$$Q = nR \left\{ \partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T) \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (4)$$

转化即为：

$$Q/nR = \left\{ \partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)] / \partial (1/T) \right\} \quad (5)$$

又结构因子 A 满足式 $\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ [13]，故分别做曲线 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 和 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ ，如图 4 所示，取其斜率和截距即为 Q/nR 和 $\ln A$ 。

平均斜率 $Q/nR=5534.426$ ，因 $R=8.314$ ， $n=4.6712$ ，故 $Q=214937$ (J/mol)，即 2195 铝锂合金的变形激活能为 214.937 kJ/mol。截距 $\ln A$ 为 33.745，因此 $A=4.52 \times 10^{14}$ 。

综上可得本构方程如下：

$$\dot{\epsilon} = 4.52 \times 10^{12} [\sinh(0.013\sigma)]^{4.6712} \exp(-214937/RT)$$

$$Z = 4.52 \times 10^{12} [\sinh(0.013\sigma)]^{4.6712}$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{4.52 \times 10^{12}} \ln \left\{ \left(\frac{Z}{4.52 \times 10^{12}} \right)^{1/4.6712} + \left[\left(\frac{Z}{4.52 \times 10^{12}} \right)^{2/4.6712} + 1 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/0.013}$$

2.3 热加工图

热加工图主要描述材料微观组织对所施加的工艺参数的响应，加工图是由功率耗散图和失稳图叠加而成。根据加工图，可获得该材料的安全加工区域和失稳区域，不同的区域有相应的微观特征[14]：安全区域主要表现为动态回复、动态再结晶、超塑性、空位和晶间断裂等；失稳区主要表现为绝热剪切带、局部流变、扭转带以及裂纹等。

根据文献[15]中加工图的建立原理，对本研究加工图进行求解绘制，结果如图 5、图 6、图 7 所示。 $\epsilon=0.3$ 时，从图 5a 功率耗散图可知，2195 铝锂合金在等温热压缩过程中有一个功率耗散峰值，即在应变速率为 0.01 s^{-1} ，温度大约为 480 °C 处，其功率耗散系数大于 0.4。此外，在应变速率为 0.01 s^{-1} ，温度范围为 440~500 °C 区域，功率耗散系数都比较大。图 5b 失稳图显示了 2 个失稳区域，即在应变速率大于 1 s^{-1} ，温度为 400~450 °C 和 480~500 °C 2 个范围内，如图 5b 阴影所示，其余非阴影部分为安全加工区。将两者进行合并得到

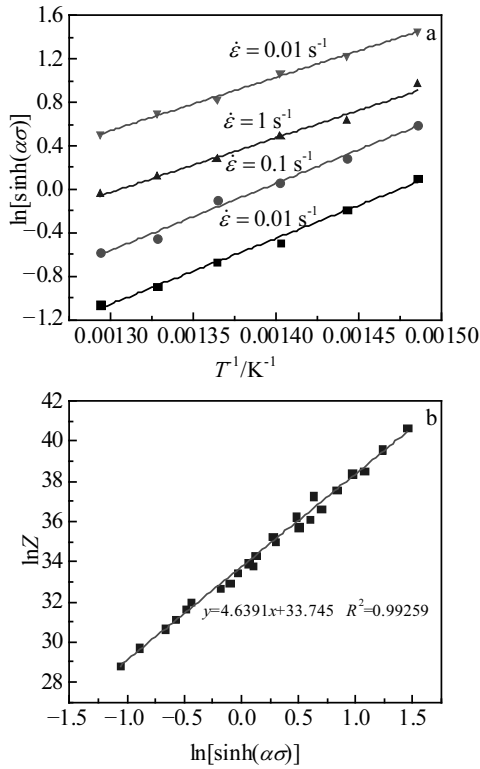


图 4 2195 铝锂合金 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$, $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 拟合曲线

Fig.4 Linear fitting curves about $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$ (a), and $\ln Z-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (b) of 2195 Al-Li alloy

应变为 0.3 时的加工图 (图 5c), 图中未被阴影覆盖的区域都是加工备选区域。在设计铝合金加工工艺的时候, 要避免选择流变失稳区和功率耗散系数小的区域。因此在当前条件下, 适宜选择的加工工艺为应变速率 0.01 s^{-1} , 温度 $440\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 。

在应变为 0.5 时, 图 6a 功率耗散图显示, 出现 2 个耗散峰值, 分别是应变速率为 0.01 s^{-1} , 温度为 460 和 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域, 两处功率耗散系数均大于 0.36 。图

6b 失稳图显示, 材料的热变形安全加工区较小, 大体为应变速率小于 0.1 s^{-1} 的所有实验温度范围, 较之于应变为 0.3 的情况流变失稳区域有较大增加。由于要同时满足较大功率耗散系数和安全加工的要求, 因此选择的加工工艺为应变速率小于 0.1 s^{-1} , 温度为 $470\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 。

应变为 0.7 时, 图 7a 功率耗散图显示, 在应变速率为 0.01 s^{-1} , 温度为 $430\sim 470\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 出现功率耗散的峰值, 其值最大在 $450\text{ }^\circ\text{C}$, 约为 0.4 。图 7b 失稳图表明在当前条件下, 安全加工区域只存在于应变速率小, 温度偏高的右下角部分, 且安全区域较之前的 $\epsilon = 0.3$ 、 $\epsilon = 0.5$ 急剧减小, 说明随着变形的增加, 2195 铝锂合金继续变形的难度不断增大。图 7c 加工图表明, 材料适合的加工工艺为应变速率小于 0.1 s^{-1} , 温度为 $470\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 。

将不同条件下加工图叠加, 如图 8 所示。叠加后的加工图表明, 安全加工区域近似为 2 个部分, A 为应变速率接近 0.01 s^{-1} , 温度为 $430\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$, B 为应变速率小于 0.1 s^{-1} , 温度为 $470\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 。对于区域 A, 其温度变化范围较窄, 容易造成实际生产中的温度失控, 从而导致材料报废, 故一般不选择其作为实际加工区。对于区域 B, 为保证远离失稳区, 应该选择靠近右下角的区域, 即应变速率接近 0.01 s^{-1} , 温度为 $475\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域, 作为安全加工的区域, 保证变形过程有较大的工艺参数选择余量。

2.4 动态软化行为的判定^[16,17]

材料在热变形过程中会发生动态软化, 动态软化包括动态回复 (DRV) 和动态再结晶 (DRX), 二者是相互竞争的关系。当动态回复难以抵消位错的增殖, 且位错积累到一定程度时即可发生动态再结晶。动态再结晶一方面可以提高材料的热塑性^[18], 一方面可以细化晶粒, 提高材料的综合性能^[19]。但是对动态再结

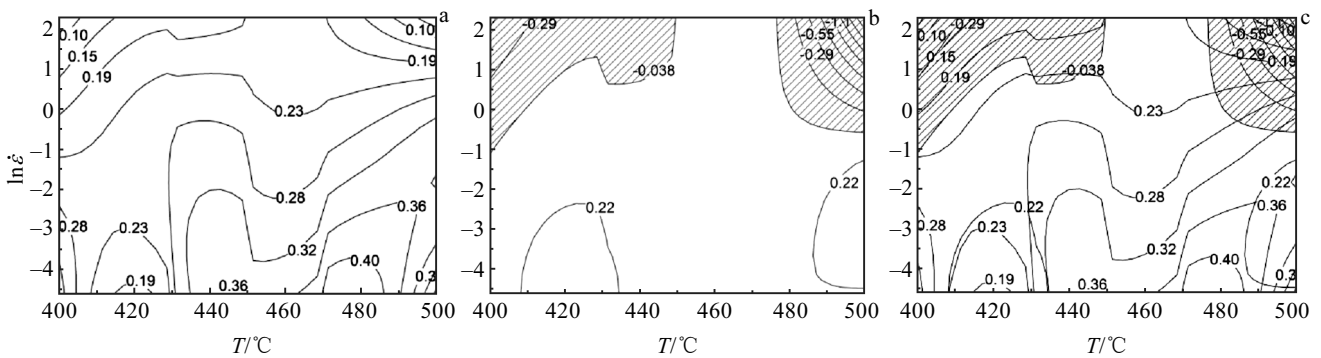


图 5 2195 铝锂合金在应变为 0.3 时的功率耗散图、失稳图与加工图

Fig.5 Power dissipation map (a), instability map (b) and processing map (c) of 2195 Al-Li alloy during plane strain compression at strain of 0.3

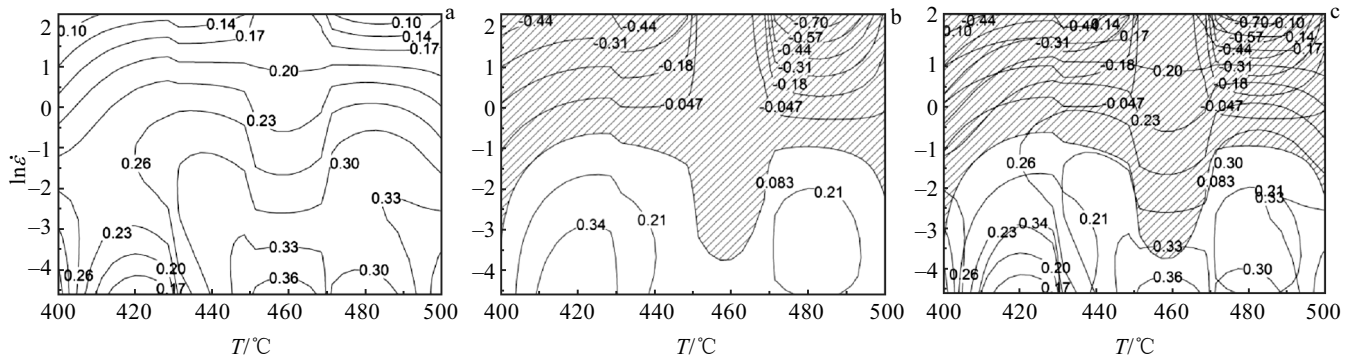


图 6 2195 铝锂合金在应变为 0.5 时的功率耗散图、失稳图与加工图

Fig.6 Power dissipation map (a), instability map (b) and processing map (c) of 2195 Al-Li alloy during plane strain compression at strain of 0.5

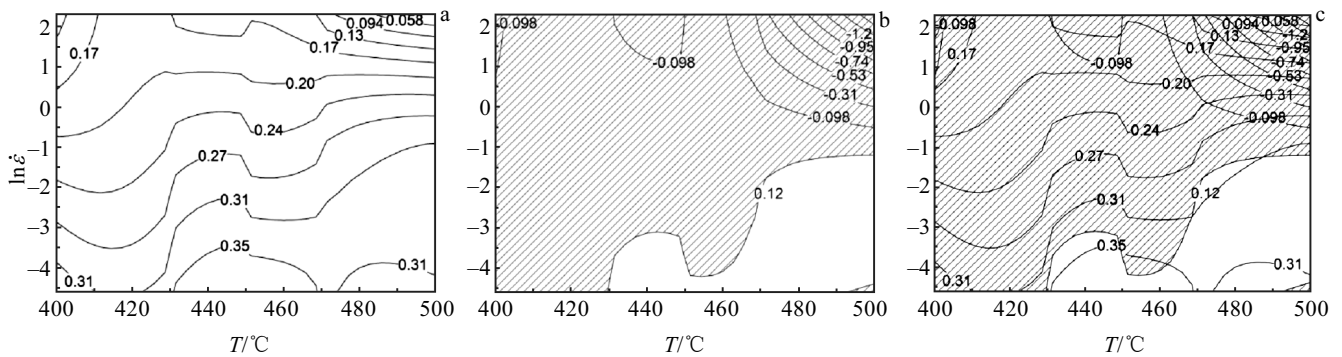


图 7 2195 铝锂合金在应变为 0.7 时的功率耗散图、失稳图与加工图

Fig.7 Power dissipation map (a), instability map (b) and processing map (c) of 2195 Al-Li alloy during plane strain compression at strain of 0.7

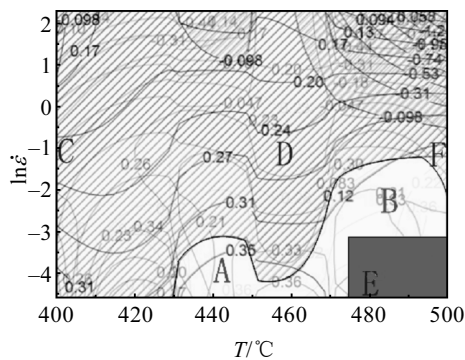


图 8 2195 铝锂合金的整体加工图

Fig.8 Superposition of processing maps of 2195 Al-Li alloy at various strains (0.3, 05, and 0.7)

晶也有不利的方面，如晶粒异常长大等。因此很有必要明确动态再结晶的发生条件，从而及时控制动态再结晶行为。定义材料在发生动态再结晶时的应变为临界应变，并将此应变作为动态再结晶是否发生的判据。

Poliak 和 Jonas 认为^[20]，动态再结晶的临界条件与 $-(\partial\theta/\partial\sigma) - \sigma$ (θ 为应变硬化率) 曲线上的最小值以及 $\theta - \sigma$ (或者 $\ln\theta - \varepsilon$) 曲线上的拐点相对应，从而可以得到临界应变 ε_c ，对应的应力即为临界应力 σ_c 。应变硬化率是指当应变速率和温度一定时，应力随应变的变化率，即 $\theta = (d\sigma/d\varepsilon)_{\varepsilon, T}$ ^[21]。在实际操作时，首先求出各不同条件下的 θ ，再作出 $-(\partial\theta/\partial\sigma) - \sigma$ 曲线，最后确定曲线的最低点，该点所对应的应力值即为临界应力。

图 9 是 2195 铝锂合金在不同应变速率条件下作出的 $-(\partial\theta/\partial\sigma) - \sigma$ 曲线。可以发现，每段曲线都有一个最低点，得出每段曲线的最低点即为临界应力值。由图可知，2195 铝锂合金在热变形过程中的临界应力值均随着变形温度的升高和应变速率的降低而减少。说明在高温低速下，2195 铝锂合金更容易发生动态再结晶。此外，由应变速率和变形温度可以确定 Z 值，故将临界应力和 Z 进行拟合，做 $\ln\sigma_c - \ln Z$ 曲线，如图 10 所示，得到拟合方程并将 Z 的表达式代入，结果如下：

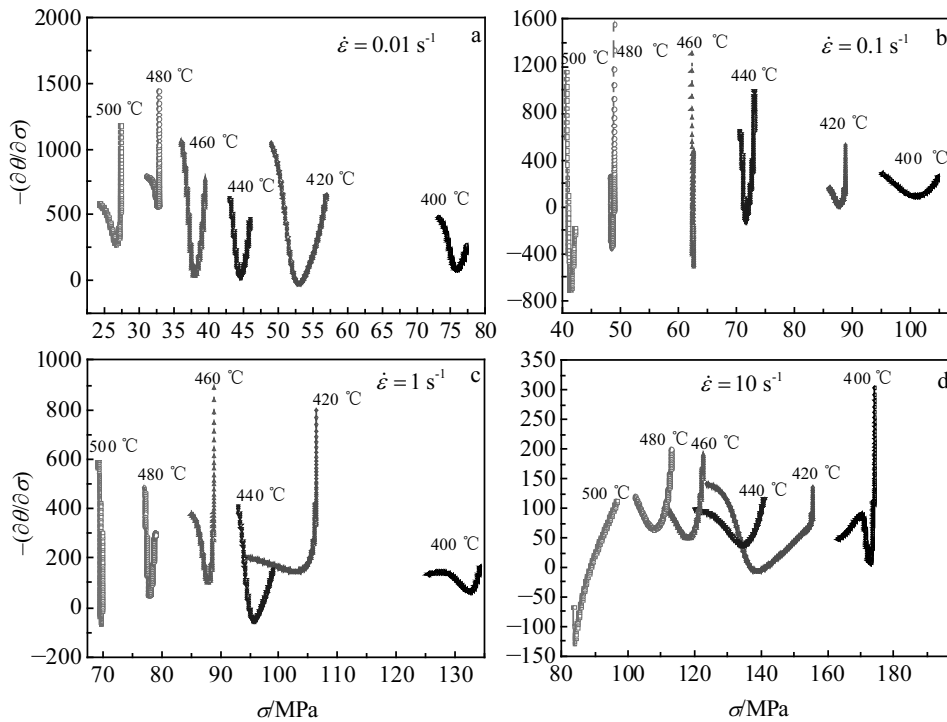


图 9 不同应变速率下的 $-(\partial\theta/\partial\sigma)-\sigma$ 曲线

Fig.9 $-(\partial\theta/\partial\sigma)-\sigma$ curves under various strain rates: (a) $\dot{\epsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$, (b) $\dot{\epsilon}=0.1\text{ s}^{-1}$, (c) $\dot{\epsilon}=1\text{ s}^{-1}$, and (d) $\dot{\epsilon}=10\text{ s}^{-1}$

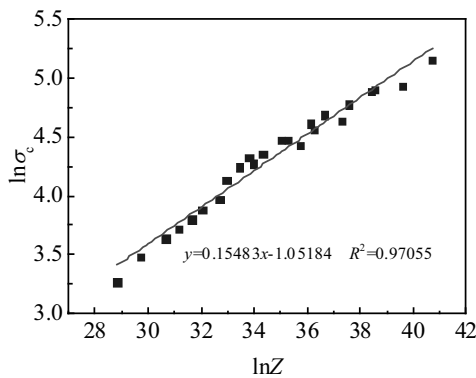


图 10 2195 铝锂合金 $\ln\sigma_c - \ln Z$ 拟合曲线

Fig.10 Linear fitting curves about $\ln\sigma_c - \ln Z$ of 2195 Al-Li alloy

$$\sigma_c = 0.3493(\dot{\epsilon} \exp \frac{Q}{RT})^{0.15483}$$

由上式可知，每一个应变速率和变形温度都对应唯一一个临界应力，当达到临界应力时，动态再结晶开始，故可通过上式判定不同变形条件下动态再结晶情况。

虽然通过上式可以判断材料热变形过程动态再结晶条件，但是不够直观，因此将临界应力 (Z) 对应变速率 (X) 和变形温度 (Y) 做 3D 曲面图，如图 11 所示。当应力在曲面以上时，表明发生了动态再结晶，当应力正好在曲面时为动态再结晶的临界点，当应力

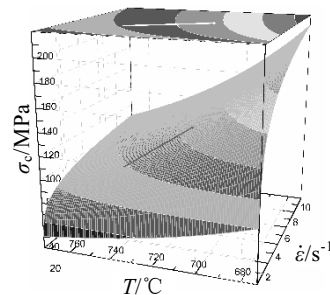


图 11 2195 铝锂合金动态再结晶判定曲面

Fig.11 Surface plots for determining DRX of 2195 Al-Li alloy

在曲面以下时，表明还未发生动态再结晶。

3 结 论

1) 2195 铝锂合金的流变应力随着应变速率的增加和变形温度的降低而升高，表现出正应变速率敏感性。

2) 2195 铝锂合金的热变形激活能为 214.937 kJ/mol，流变应力本构方程为：

$$\dot{\epsilon} = 4.52 \times 10^{12} [\sinh(0.013\sigma)]^{4.6712} \exp(-214937/RT)$$

$$Z = 4.52 \times 10^{12} [\sinh(0.013\sigma)]^{4.6712}$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{4.52 \times 10^{12}} \right) \ln \left\{ \left(\frac{Z}{4.52 \times 10^{12}} \right)^{1/4.6712} + \left[\left(\frac{Z}{4.52 \times 10^{12}} \right)^{2/4.6712} + 1 \right]^{1/2} \right\}$$

3) 通过热加工图，得出 2195 铝锂合金的最适合加

工区为应变速率接近 0.01 s^{-1} , 温度范围为 $475\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4) 2195 铝锂合金动态再结晶的临界应力判据为:

$$\sigma_c = 0.3493(\dot{\varepsilon} \exp \frac{Q}{RT})^{0.15483}。$$

参考文献 References

- [1] Chen Jian(陈建). *Civil Aircraft Design and Research*(民用飞机设计与研究)[J], 2010(1): 39
- [2] Huo Hongqing(霍红庆), Hao Weixin(郝维新), Gemg Guihong(耿桂宏) *et al. Vacuum and Cryogenics*(真空与低温)[J], 2005(2): 63
- [3] Jiang Na(蒋呐), Li Jingfeng(李劲风), Zheng Ziqiao(郑子樵) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(6): 949
- [4] Han Dongfeng(韩冬峰), Zheng Ziqiao(郑子樵) Jiang Na(蒋呐) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(12): 2090
- [5] Mohebbi M S, Akbarzadeh A, Yoon Y O *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 593: 136
- [6] Cheng L, Xue X, Tang B *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 606: 24
- [7] Yabe S, Terano M, Yoshino M. *Procedia Engineering*[J], 2014, 81: 1342
- [8] Sah J P, Richardson G J, Sellars C M. *Indian Journal of Technology*[J], 1973, 11(10): 445
- [9] Puchi E S, Staia M H. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1998, 29(9): 2345
- [10] Airod A, Vandekinderen H, Barros J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 134(3): 398
- [11] Wright R N, Paulson M S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1998, 80: 556
- [12] Masataka Tokuda, Tadashi Inaba, Hiroyuki Ohigashi *et al. Int J Mechan Sci*[J], 2001, 43(9): 2035
- [13] Liu Wenyi(刘文义). *Thesis for Doctor*(博士论文)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014
- [14] Chakravartty J K, Prasad Y, Asundi M K. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1991, 22(4): 829
- [15] Prasad Y, Seshacharyulu T. *International Materials Reviews* [J], 1998, 43(6): 243
- [16] Liang Houquan(梁后权), Guo Hongzhen(郭鸿镇), Ning Yongquan(宁永权) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2014, 50(7): 871
- [17] Liang H Q, Nan Y, Ning Y Q *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 632: 478
- [18] Cao Jinrong(曹金荣), Liu Zhengdong(刘正东), Cheng Shichang(程世长). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2007, 43(1): 35
- [19] Stewart G R, Jonas J J, Montheillet F. *ISIJ International*[J], 2004, 44(9): 1581
- [20] Poliak E I, Jonas J J. *Acta Material*[J], 1996, 44(1): 127
- [21] Huang Guangsheng(黄光胜), Wang Lingyun(汪凌云), Huang Guangjie(黄光杰). *Metal Forming Technology*(金属成形工艺)[J], 2004, 24(2): 41

Hot Deformation Behavior of 2195 Al-Li Alloy Under Plane Strain Compression

Li Shiqing¹, Deng Zanhui¹, Yang Qunying¹, Lin Lin², Guo Yonglin², Zhang Zhiqing^{1,3}

(1. Chongqing University, Chongqing 400030, China)

(2. Southwest Aluminum (Group) Co., Ltd, Chongqing 401326, China)

(3. China West Peng Industrial Park, Chongqing 401326, China)

Abstract: 2195 Al-Li alloy was identified as an ideal construction material for aerospace field, but researches on its hot deformation behavior were quiet rare. In this study, isothermal compression tests were conducted at Gleeble-3500 thermal mechanical simulator in the temperature range from $400 \text{ }^\circ\text{C}$ to $500 \text{ }^\circ\text{C}$ and strain rate range from 0.01 s^{-1} to 10 s^{-1} . Results show that flow stress reaches its minimum under the condition of high temperature and low strain rate. Furthermore, constitutive equation was established to describe the flow stress and the hot deformation activation energy of 2195 Al-Li alloy is 214.937 kJ/mol . By analyzing the processing map, the optimum processing parameters are obtained, i.e. temperature between $475 \text{ }^\circ\text{C}$ to $500 \text{ }^\circ\text{C}$, strain rate close to 0.01 s^{-1} . It is quite convenient to estimate DRX behavior through a judgment equation of dynamic recrystallization.

Key words: 2195 Al-Li alloy; plane strain compression; flow stress; constitutive equation; processing map; DS mechanism

Corresponding author: Zhang Zhiqing, Ph. D., Professor, School of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China, Tel: 0086-23-65678750, E-mail: zqzhang@cqu.edu.cn