

文章编号:1000-582X(2011)07-051-06

温度及应变速率对 7075 铝合金临界损伤因子的影响

权国政¹, 王熠昕¹, 张艳伟¹, 王凤彪¹, 高林²

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 中国第二重型机械集团公司, 四川 德阳 618000)

摘要:解析 Cockcroft-Latham 韧性累积损伤计算原理, 提出“基于损伤敏感率演变规律求解临界损伤因子”的方法。完成不同温度和应变速率条件下多组 7075 铝合金试样的热物理模拟压缩试验, 以采集到的真实应力-应变数据作为数值计算损伤值的底层材料模型, 以最大损伤值出现的镢粗鼓外缘部位为研究区域, 获得“损伤敏感率在变形初期快速下降至后期逐步趋于 0”的损伤软化规律, 而损伤软化现象对应变速率较为敏感。以损伤敏感率为 0 作为临界损伤因子出现的时机, 获得 7075 铝合金在温度 573~723K、应变速率 0.01~10s⁻¹ 下的临界损伤因子分布规律。结果显示其不是常数, 而是为在 0.255~0.453 范围内变化的变量, 其在高的温度下对应变速率更为敏感, 在高的应变速率下对温度更为敏感。

关键词:热物理模拟; 损伤; 变量; 铝合金

中图分类号: TB302.4

文献标志码: A

Effect of different temperatures and strain rates on the critical damage factor of 7075 aluminum alloy

QUAN Guo-zheng¹, WANG Yi-xin¹, ZHANG Yan-wei¹, WANG Feng-biao¹, GAO Lin²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. China National Erzhong Group Co., Deyang, Sichuan 618000, P. R. China)

Abstract: The computation principle of Cockcroft-Latham ductile cumulative damage is analyzed. A method to solve the critical damage factor based on the evolution rules of damage sensitive rate is brought forward. Several series of billet samples are compressed on heat physical simulation machine under different deformation temperatures and strain rates, and then the collected true stress-strain data are used to calculate the performance of computations. As the outer edge of upsetting drum where the maximum damage value appears is concerned, a typical damage softening rule is obtained and described as the damage sensitive rate decreases rapidly at the initial deformation, then gradually tends to 0. In further, damage softening is more sensitive to strain rate than temperature. A principle that critical damage factor arises when damage sensitive rate decreases to 0 is assumed, then the distribution of critical damage factor under temperature 573~723 K and strain rate 0.01~10 s⁻¹ is obtained. The results show that the critical damage factor of 7075 aluminum alloy is not a constant but a change within a range of 0.255 ~ 0.453, and it is more sensitive to strain rate in high temperature and more sensitive to temperature in high strain rate.

Key words: heat physical simulation; damage; change; aluminum alloy

收稿日期: 2011-03-26

基金项目: 科技部国家重大专项项目(G09003.8-4); 重庆市重大科技攻关项目(CSTC2009aa3012-1); 中央高校基本科研业务费资助基金(CDJXS11131147); 国家大学生创新性实验计划项目(091061164)

作者简介: 权国政(1980-), 男, 重庆大学副教授, 博士后, 主要从事材料变形行为及跨尺度分析研究, (Tel) 023-65103065; (E-mail) quanz_2006@yahoo.com.cn.

金属材料的韧性损伤是反映材料在塑性变形过程中断裂倾向的物理量,当损伤达到临界值时,材料发生断裂^[1]。自 20 世纪 70 年代以来,为了预测金属塑性变形中裂纹的产生,不少学者从不同角度提出了各自的模型,其中以空穴理论及累积损伤理论为基础的 Cockcroft-Latham 准则,被广泛融入到有限元代码中并早已成熟地应用于体积成形的裂纹预测^[2-3]。通常学者们认为:临界损伤因子是一个与材料的冶金性能(合金成分、晶粒尺寸及形态等)有关的常数,其不随变形工艺条件(温度、应变速率、摩擦、变形历史等)的改变而变化^[3-5]。因此,鲜有报道临界损伤因子受变形条件的影响,主要是因为难以获得不同变形条件下准确的临界损伤因子。而对该内容的研究通常遇到如下 2 个瓶颈问题:①缺少高速摄像装备,在热物理模拟压缩或拉伸实验中无法准确地捕捉到表面裂纹的出现时机;②无法正确处理所采集到的应力-应变数据,因而无法有效利用其获得临界损伤因子^[1-6]。

通过以实验数据为底层材料模型、辅助数值模拟仿真再现、损伤敏感率演变规律分析等手段,准确获得损伤敏感率收敛为 0(裂纹产生)的时机,并以该时机的最大损伤值作为临界损伤因子,从而获得 7075 铝合金在温度 573~723K、应变速率 0.01~10 s⁻¹下的临界损伤因子分布规律。通过对此规律的研究可进一步优化控制热锻工艺条件,如压机速度、温度、操作时间等,从而有效避免微细、内部裂纹的产生。7075 合金为析出强化型超硬可锻铝合金,是航空、航天领域的重要合金^[7],提出有效的临界损伤因子并在数值模拟分析中推广应用,将有效保障其热锻品质并提升制件工作可靠性。

1 实验方法

采用 7075 铝合金铸造棒材,其化学成分如下: $w(\text{Zn})=5.5\%$, $w(\text{Mg})=2.2\%$, $w(\text{Cu})=1.7\%$, $w(\text{Cr})=0.22\%$, $w(\text{Mn})=0.1\%$, $w(\text{Fe})=0.3\%$, $w(\text{Si})=0.4\%$,其余为 Al^[7]。设计物理模拟热压缩的变形温度 573、623、673、723 K,应变速率为 0.01、0.1、1、10 s⁻¹,试样的高度压缩率为 60%。采用线切割制成直径为 10 mm、高度为 12 mm 的 16 个圆柱试样。将所有的试样进行 673 K 下保温 12 h 的组织均匀化处理,之后快速水淬。为减小摩擦对应力状态的影响,在圆柱试样两端涂覆润滑剂并加垫石墨片^[8]。最后在 Gleeble1500 试验机上执行热压缩试验。

2 Cockcroft-Latham 损伤敏感率定义

Cockcroft 与 Latham^[9-13]提出的韧性损伤准则以空穴理论、损伤累积理论为基础,将静水应力的作用作了最简单的表达,即最大拉应力沿应变积分获得最大拉应力-应变能,存在一个固定的最大值 C_{\max} 。Cockcroft 和 Latham 认为最大拉应力-应变能不断累积的源动力是拉伸主应力^[14]。累积的最大拉应力-应变能即为损伤因子 C ,如式(1)所示,是衡量材料失效程度的一个重要指标,存在一个固定的极限值 C_{\max} ,即为临界损伤因子。

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_T}{\sigma} d\bar{\epsilon}, \quad (1)$$

式中: $\bar{\epsilon}_f$ 为材料断裂时的等效塑性应变; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; σ_T 为变形过程中某一时刻某一单元内的最大拉应力; $d\bar{\epsilon}$ 为等效应变增量; C 为损伤因子。

在数值计算中,将式(1)进一步变换成离散步求和式(2),可将复杂的积分计算简化为单位时间增量内的损伤量计算。

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_T}{\sigma} \frac{d\bar{\epsilon}}{dt} dt = \int_0^{t_f} \frac{\sigma_T}{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dt \cong \sum_0^{t_f} \frac{\sigma_T \dot{\bar{\epsilon}} \Delta t}{\sigma}, \quad (2)$$

式中: $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为变形过程中某一时刻某一单元内的等效塑性应变速率; Δt 为有限元计算中的时间增量;其他参数同式(1)。

进一步提出损伤敏感率的概念:单位时间增量 Δt 内的损伤增量与已存在的累积损伤量之间的比值,如式(3)所示。当材料损伤因子 C 达到临界损伤因子 C_{\max} 时产生断裂,之后 C 值不再继续增加,即损伤因子对外部条件不再敏感。

$$R_{\text{step}} = \frac{\Delta C}{C_{\text{acc}}}, \quad (3)$$

式中: R_{step} 为损伤敏感率; C_{acc} 为已存在的累积损伤量; ΔC 为单位时间增量内的损伤增量。

3 损伤敏感性计算分析

3.1 7075 铝合金真实应力-应变关系

压缩试验采集到 7075 合金在不同温度和应变速率下的真实应力-应变曲线如图 1 所示,将数据输入到 FEM 软件的自定义材料库中,作为数值计算的底层材料模型。从图中可看出,在变形开始阶段,应力由于加工硬化效应而迅速攀升至峰值;随后由于动态再结晶软化效应而逐渐下降,并且达到一定的应变量后趋于稳定。在变形温度一定时,峰值应力随应变速率的升高而升高;在应变速率一定时,峰值应力随变形温度的升高而降低。

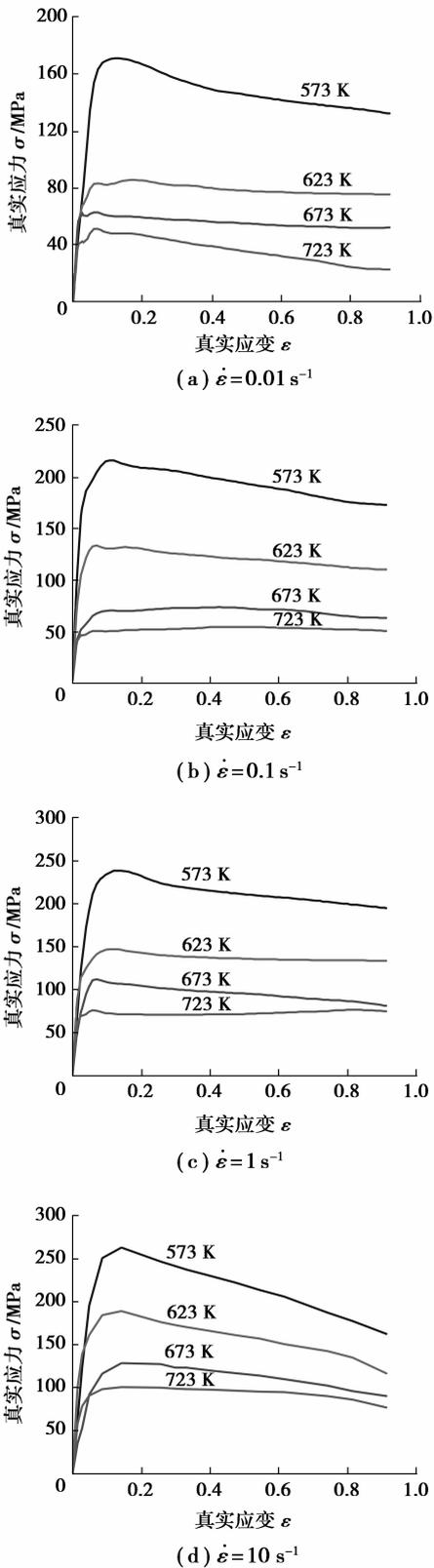


图 1 试验采集的 7075 铝合金真实应力-应变曲线

3.2 数值计算最大损伤值

在 DEFORM-2D 软件平台上进行热物理模拟压缩实验的仿真再现, 通过观察不同温度及应变速率下的模拟结果发现: 最大损伤值总是出现在镦粗

鼓的最外缘, 而最小损伤值总是出现在坯料的中心区域。图 2 表示在温度 623 K、应变速率 0.01 s^{-1} 时坯料镦粗后的损伤分布情况。跟踪不同温度及应变速率条件下, 镦粗鼓最外缘部位最大损伤值随着压缩变形量的变化, 如图 3 所示, 从中看出: 在应变速率为 1 s^{-1} 、 10 s^{-1} 时, 随着温度的升高, 最大损伤值整体减小; 在应变速率为 0.01 s^{-1} 、 0.1 s^{-1} 时, 最大损伤值随温度的变化规律性不明显。进一步比较分析在不同的温度下最大损伤值随着应变速率的变化规律性, 此时以镦粗变形结束时的最大损伤值为跟踪对象, 结果如图 4 所示, 从中看出: 在所有温度条件下, 最大损伤值随着应变速率的增加而明显下降。对于损伤值下降的现象一般称为损伤软化现象, 通过如上的两种对比可以看出: 损伤软化现象对应变速率较为敏感。

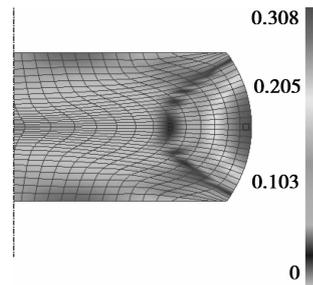
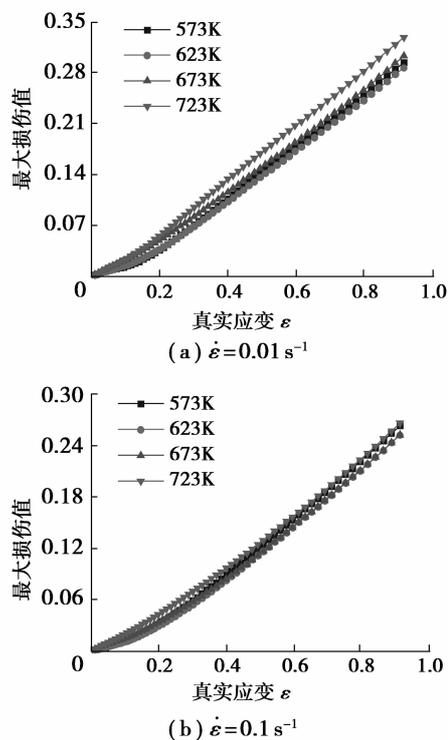


图 2 高度压缩 60% 后的损伤分布图 (623 K, 0.01 s^{-1})



54

http://qks.cqu.edu.cn

重庆大学学报

第 34 卷

(c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

(d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

图 3 不同温度及应变速率条件下锻粗鼓最外缘损伤值变化规律

图 4 锻粗变形结束时不同温度下最大损伤值随着应变速率的变化规律

3.3 Cockcroft-Latham 型损伤敏感率

计算压缩变形过程中不同变形时机的损伤敏感率, 获得了不同温度及应变速率条件下损伤敏感率随着变形量的变化规律, 如图 5 所示, 从图中看出: 在压缩开始阶段损伤敏感率总是迅速下降至低点, 然后略有上升, 之后缓慢下降并逐步趋向于 0 点。此处的 0 点设计有 $0 \sim 0.03$ 的误差, 即当损伤敏感率降至 0.03 时即认为产生裂纹。损伤敏感率曲线的高度非线性变化趋势, 体现了在等温塑性压缩变形过程中加工硬化效应和加工软化效应的合作用的高度非线性变化。在材料热塑性变形中, 加工硬化和软化效应均来自于材料多级微结构的热激活变化

(a) $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$

(b) $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ s}^{-1}$

(c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$

(d) $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$

图 5 不同温度及应变速率条件下锻粗鼓最外缘部位损伤敏感率变化规律

行为。一般来说, 加工硬化效应是由于变形产生的高位错密度、高位错增殖率和低位错湮没率; 加工软

化效应的主要形成机理是在变形中的动态再结晶,原始晶界发生局部迁移而使新晶粒快速形核和长大,使晶界附近位错密度及储能增大。在加工硬化和软化组织得不到充分的回复之前,两种效应均将引起损伤程度的增加。

通过图5确定了裂纹产生的时机,然后返回到图3中确定该时机下的最大损失值并作为临界损伤因子,所获得的7075铝合金在不同温度及应变速率下的临界损伤因子分布规律如图6所示。从中看出:7075铝合金的临界损伤因子不是一个常数,而是一个在0.255~0.453范围内变化的变量。当应变速率在 $0.01\sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 范围内,临界损伤因子随着变形温度的升高而波动很小;当应变速率在 $0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$ 范围内,临界损伤因子随着变形温度的升高而升高。当变形温度在573~648 K范围内,临界损伤因子随着应变速率的增加,其波动幅度很小;当变形温度在648~723 K范围内,临界损伤因子随着应变速率的增加而减小。因此可以认为:在高的变形温度(648~723 K)条件下,其临界损伤因子对应变速率更为敏感;在低的变形温度(573~648 K)条件下,其临界损伤因子对应变速率不敏感;在高的应变速率($0.1\sim 10\text{ s}^{-1}$)条件下,其临界损伤因子对变形温度更为敏感;在低的应变速率($0.01\sim 0.1\text{ s}^{-1}$)条件下,其临界损伤因子对变形温度不敏感。

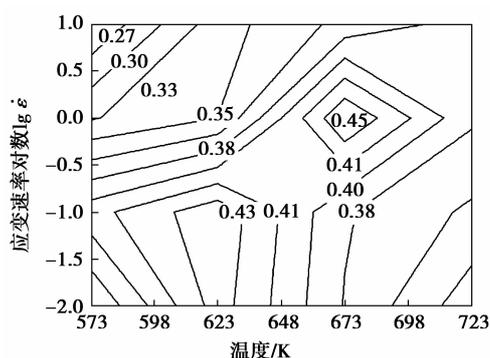


图6 温度及应变速率对7075铝合金临界损伤因子的影响规律

4 结论

1)提出一种损伤敏感率的概念,通过实验与数值模拟仿真相互佐证的途径,分析损伤敏感率曲线,确定裂纹产生时机,从而建立了在一定程度上取代高速摄像的确定临界损伤因子的方法。

2)最大损伤值总是出现在镦粗鼓的最外缘部位,而最小损伤值总是出现在坯料的中心区域。在

应变速率为 1 s^{-1} 、 10 s^{-1} 时,随着温度的升高,最大损伤值呈规律性减小,而在其他应变速率下变化规律不明显;在温度一定时,随着应变速率的增加,最大损伤值呈明显下降。

3)计算出7075铝合金在不同温度及应变速率下的临界损伤因子分布规律,发现7075铝合金的临界损伤因子不是一个常数,而是一个在0.255~0.453范围内变化的变量,并得出在高的变形温度条件下,临界损伤因子对应变速率更为敏感,而在高的应变速率条件下,临界损伤因子对变形温度更为敏感。

参考文献:

- [1] 邢勇,权国辉.基于临界损伤因子的40Cr伞齿轮锻造温度优化[J].热加工工艺,2009,38(11):96-98.
XING YONG, QUAN GUO-HUI. Optimization of forging temperature of 40Cr bevel gear based on critical damage value [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(11):96-98.
- [2] QUAN G Z, TONG Y, CHEN B. A constitutive description for drawing limit of magnesium alloy tube based on continuum damage mechanics [J]. Materials Science Forum, 2009(610/613):951-954.
- [3] SOWERBY R, CHANDRASEKARAN N. The prediction of damage accumulation when upsetting AISI 1045 steel specimens, based on McClintock's model [J]. Materials Science and Engineering, 1986, 79(1):27-35.
- [4] PEREIRA I M, RUBIM G, ACSELRAD O. Comparison of the experimental and the numerically predicted mechanical damage in the sheet forming of steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/3):13-18.
- [5] DEY S, BORVIK T, HOPPERSTAD O S. On the influence of fracture criterion in projectile impact of steel plates [J]. Computational Materials Science, 2006, 38(1):176-191.
- [6] KO D C, KIM B M, CHOI J C. Prediction of surface-fracture initiation in the axisymmetric extrusion and simple upsetting of an aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62 (1/3): 166-174.
- [7] QUAN G Z, LIU K W, ZHOU J. Dynamic softening behaviors of 7075 aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19 (3): 537-541.
- [8] 杨立斌,张辉,彭大暑.7075铝合金高温流变行为的研究[J].热加工工艺,2002,31(1):1-5.

- YANG LI-BIN, ZHANG HUI, PENG DA-SHU. Study of mechanic behavior for 7050 aluminum alloy under hot-working conditions[J]. Hot Working Technology, 2002, 31(1):1-5.
- [9] VAZ M, DE SANTI JR N, VERRAN G O. Ductile fracture prediction in metal forming processes [J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2008, 1(2/3):232-242.
- [10] KOMORI K. Effect of ductile fracture criteria on chevron crack formation and evolution in drawing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(1):141-160.
- [11] LADEMO O G, ENGLER O, KELLER S, et al. Identification and validation of constitutive model and fracture criterion for Al-Mg-Si alloy with application to sheet forming[J]. Materials and Design, 2009, 30(8): 3005-3019.
- [12] DORUM C, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T. Numerical modelling of magnesium die-castings using stochastic fracture parameters[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(14):2232-2248.
- [13] FAN W F, LI J H. An investigation on the damage of AISI-1045 and AISI-1025 steels in fine-blanking with negative clearance [J]. Materials Science and Engineering, 2009, 499(1/2):248-251.
- [14] LIANG X. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(16): 5163-5181.
- [15] ZHANG X H, RUAN X Y, OSAKADA K. Forgeability of AZ31B magnesium alloy in warm forging [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3):632-635.

(编辑 王维朗)

(上接第 33 页)

- [11] 杜爱民, 宋俊杰, 娄光. 混合动力汽车用行星齿轮结构参数优化及应用[J]. 同济大学学报, 2010, 38(1): 103-107.
DU AI-MIN, SONG JUN-JIE, LOU GUANG. Optimization and application of planetary gear set for hybrid electric vehicle[J]. Journal of Tongji University, 2010, 38(1):103-107.
- [12] PARK J, PARK Y. Model based optimization of supervisory control parameters for hybrid electric vehicles[C]//SAE World Congress, April 14-17 2008, Detroit, MI, USA. [S. l.]: SAE International, 2008: 59-81.
- [13] 何仁, 马承广, 张涌, 等. 基于驾驶意图的无级变速器目标速比确定方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 16-20.
HE REN, MA CHENG-GUANG, ZHANG YONG, et al. Method to determine target speed ratio of CVT based on driving intention [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):16-20.
- [14] DEUR J, PETRI J, ASGARI J, et al. Recent advances in control-oriented modeling of automotive power train dynamics[C/OL]// International IEEE Symposium on Industrial Electronics, Dubrovnik, Hrvatska, June 20-23, 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01709856>.
- [15] 张兰春, 常思勤. 功率分流式无级变速器的整车经济性研究[J]. 南京理工大学学报, 2008, 32(3): 346-349.
ZHANG LAN-CHUN, CHANG SI-QIN. Fuel economy of vehicle with power split CVT[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2008, 32(3): 346-349.
- [16] 刘振军, 郝宏伟, 董小洪, 等. 湿式双离合器自动变速器换挡控制与仿真分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 7-14.
LIU ZHEN-JUN, HAO HONG-WEI, DONG XIAO-HONG, et al. Shifting control and simulation of wet dual clutch transmission [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1):7-14.
- [17] 舒红, 蒋勇, 高银平. 中度混合动力汽车模型预测控制策略[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(1):36-41.
SHU HONG, JIANG YONG, GAO YIN-PING. Model predictive control strategy of a medium hybrid electric vehicle [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(1):36-41.

(编辑 张 莘)