

TC4 合金绝热剪切动态演变过程数值模拟研究

李建崇, 李树奎, 范群波

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 对 TC4 合金强迫剪切过程进行了数值模拟, 获得了绝热剪切过程中变形局域化区域内的 von-Mises 应力、有效塑性应变以及温度的分布规律。通过分析发现: 大量应变集中于帽形试样变形局域化区域内, 且在试样两拐角处最大; 变形局域化区域内温度明显高于基体温度, 且在试样两拐角处最高。结果表明, 绝热剪切带内温度达到了 TC4 合金的再结晶温度, 这为 TC4 合金绝热剪切带内微观组织变形机制的研究提供了依据。

关键词: TC4 合金; 绝热剪切; 绝热温升; 再结晶

中图分类号: TG146.2⁺3; TG115.5⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)12-2193-03

TC4 合金是一种对绝热剪切相当敏感的合金, 在高应变速率加载条件下, 通常以绝热剪切带的形成与发展为其变形与破坏的主导机制^[1,2]。

在高应变速率加载条件下, 材料 90% 的塑性功转化为热能并且来不及散失, 因此近似地认为此变形过程为绝热过程。当由绝热温升而导致的热软化效应超过应变率强化效应和由变形程度的增加而导致的应变强化效应时, 材料就会发生热粘塑性本构失稳, 从而形成绝热剪切带(adiabatic shear band)^[3,4]。绝热剪切带内的温度因素是决定材料发生热粘塑性本构失稳的关键, 也是研究绝热剪切带内微观组织转变机制的重要参考。一些研究^[5,6]发现, 带内晶粒为细化的等轴晶粒, 并且晶粒内位错密度很低, 这些组织特征表明剪切带内已经发生了动态再结晶。但是由于目前试验条件的限制, 无法直接对带内温度场进行实测, 所以阻碍了对材料在绝热剪切过程中的微观变形机制进行进一步的研究。本研究以 TC4 合金为研究对象, 借助 LS-DYNA 有限元软件, 采用热力耦合方法对其强迫剪切过程进行了数值模拟, 得到了绝热剪切条件下 TC4 合金变形局域化区域内的应力、应变以及温度的分布规律。

1 本构模型

本研究采用 Johnson-Cook 热粘塑性本构模型为材料模型。它是一个能反映应变率强化效应和温升软化的理想刚塑性强化模型^[7]。具体本构关系式如下:

$$\sigma = [A + B(\epsilon_e^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (1)$$

式中: σ 为 von Mises 流动应力; ϵ_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$ 为相对等效塑性应变, 取 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为无量纲温度, 其中 T_m 与 T_r 为材料的熔点与室温。式(1)中第 1 个因子给出的是当 $\dot{\epsilon}^* = 1.0$ 和 $T^* = 0$ 时流动应力与等效塑性应变的函数关系。第 2 个与第 3 个因子表示应变率效应和温度效应。

本研究中 TC4 合金采用的参数在表 1 中列出^[8]。其中 ρ 、 ν 分别为 TC4 合金的密度与泊松比, A 、 B 、 n 、 C 、 m 分别为 TC4 合金的屈服强度、硬化强度、硬化指数、应变率敏感指数与温度软化指数。

2 数值模拟

在对材料绝热剪切特性的研究中, 一般采用“帽形”试样来得到绝热剪切的加载条件。本研究采用的力学模型借鉴 TC4 合金帽形试样的形状与尺寸^[9], 如图 1a 所示。由于试样是轴对称的, 建立模型时对其进行了简化, 如图 1b 所示。由于在剪切载荷作用下, 试样的两拐角及其连线附近区域是变形局域化区域, 也是最容易发生绝热剪切的部位, 所以该区域的网格划分较细, 以便于更准确地得到所需要的信息。试样的模型和初始网格划分如图 1b 所示。

表 1 TC4 合金的一些参数

Table 1 Some parameters of TC4 alloy

$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	ν	A/MPa	B/MPa	n	C	m
4.51	0.33	800	0	0	0.011	1.0

收稿日期: 2009-12-04

作者简介: 李建崇, 男, 1983 年生, 博士生, 北京理工大学材料科学与工程学院, 北京 100081, 电话: 010-68911144, E-mail: jchlee1983@163.com

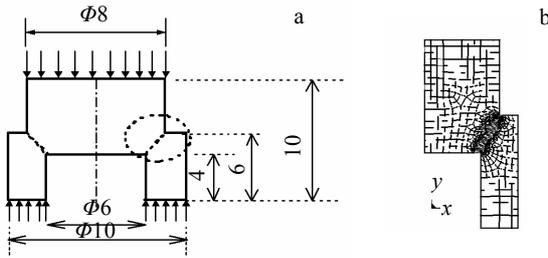


图 1 TC4 帽形试样尺寸和力学模型以及网格划分

Fig.1 Geometrical shape and size of the TC4 hat specimen (a) and finite element model and meshes (b)

对模型下端界面实施全约束，上端界面施加垂直于界面向下的位移载荷，位移速度为 30 m/s，设定试样初始温度为室温 20 °C。建立模型后需对生成的 Key 文件进行修改，需要添加相应的热材料关键字与控制关键字来进行热力耦合分析。

3 模拟结果分析

LS-DYNA 的模拟结果如图 2a~2c 所示，分别为帽形试样在承载过程中的应力、应变和温度分布情况。图 2a 为加载过程中 von-Mises 应力在帽形试样的分布情况。发现此时帽形试样中的最大应力分布于两拐角处，最大为 1.294×10^3 MPa；两拐角连线附近的局部区域内应力较其它部位大，且距离此区域越远应力越小。从图 2b 可以看出，最大有效塑性应变也出现在帽形试样的上、下拐角处，最大应变为 0.53；整个试样中的有效塑性应变主要集中于上述的局部区域内，且此区域内，从两拐角处到区域中心，应变呈递减趋势分布，而基体部位几乎没有发生变形。图 2c 为帽形试样下拐角附近的温度分布情况。表明上述局部区域内绝热温升较大，拐角处温度最高，为 472.5 °C；温度从两拐

角处到区域中心逐渐降低，基体温度明显低于上述区域，且与初始温度相差不大。因此可以判断，在强迫剪切条件下，帽形试样两拐角连线附近的区域为变形强烈的变形局域化区域(见图 3)，是帽形试样在承载过程中最易发生绝热剪切的部位；帽形试样两拐角处承受应力最大，变形最为严重，而且绝热温升最高，因此是绝热剪切带萌生的主要部位；两拐角连线附近的变形局域化区域内，温度较基体高，且温差较大，应力、应变集中，是绝热剪切带扩展的主要区域。

通过以上分析可以发现：在强迫剪切条件下，当变形达到一定程度后，帽形试样的绝热剪切带由上拐角或下拐角处萌生(抑或同时萌生)，并且随着变形的增加，沿着两拐角连线不断向内部扩展，最终在变形局域化区域内形成绝热剪切带。

绝热剪切带内的温度是影响材料微观组织转变机制的重要因素。关于钛合金绝热剪切带内微观组织转变机制的研究侧重于带内组织发生了动态再结晶转变^[5,6]，但是由于试验条件的限制而不能确定带内温度是否达到了合金的再结晶温度。因此本文选取了如图 3 所示 3 个特征部位(分别为帽形试样的下拐角处、变形局域区中心以及基体部位)，来研究其温度随时间变化的情况。模拟结果见图 4。从图 4 中可以看出，随着变形的增加，变形局域化区域内温度在极短时间内迅速升高，而基体温度变化不大。拐角处最高温度达到 525 °C，超过了 TC4 合金的再结晶温度($0.4T_m$ ，约为 480 °C)，但未达到其相变温度(约 1000 °C)。因此在本模型中，TC4 合金绝热剪切带内最高温度超过了 TC4 的再结晶温度，为其微观组织发生动态再结晶提供了动力；由于带内最高温度远低于其相变温度，因此带内组织不可能发生相变。这与文献[10]中关于 TC4 合金绝热剪切带内微观组织演化的研究结果是一致的。

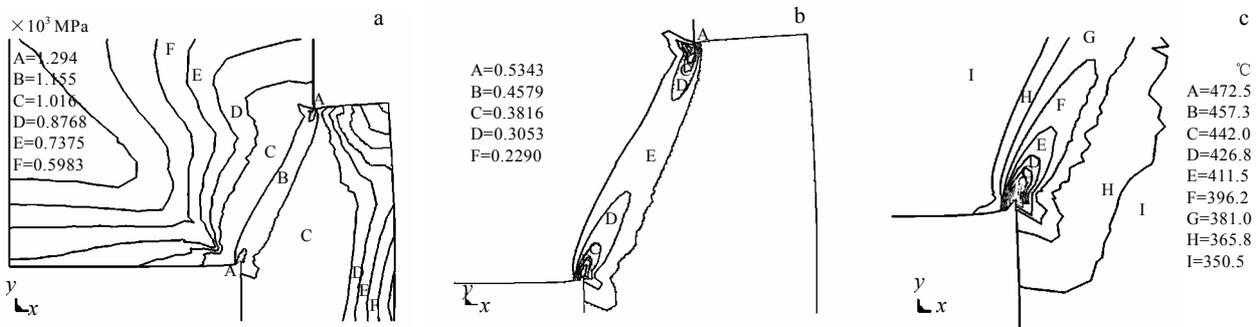


图 2 LS-DYNA 模拟结果

Fig.2 Simulation results by LS-DYNA: (a) distribution of von-Mises stress, (b) distribution of equivalent strain, and (c) distribution of temperature

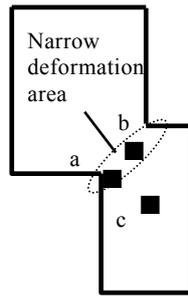


图 3 特征部位分布图

Fig.3 Distribution of gauge section

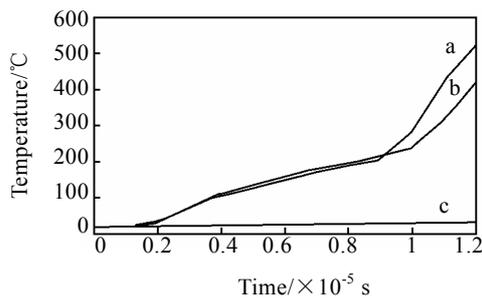


图 4 特征部位温度随时间变化曲线

Fig.4 Temperature of gauge section vs time

4 结 论

1) TC4 合金在绝热剪切过程中变形局域化区域内的 von-Mises 应力、应变以及温度在帽形试样两拐角处最大, 且集中分布于两拐角连线附近的变形局域化区域。

2) 在强迫剪切条件下, 当变形达到一定程度后, 帽形试样的绝热剪切带由两拐角处萌生, 并且随着变形的增加, 沿着两拐角连线不断向内部扩展, 最终在变形局域化区域内形成绝热剪切带。

3) 变形局域化区域内的最高温度为 525 °C, 超过了 TC4 合金的再结晶温度, 但未达到其相变温度。因此为其绝热剪切带内微观组织发生动态再结晶而未发生相变提供了依据。

参考文献 References

- [1] Lu Weixian(卢维娴), Wang Lili(王礼立). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1986, A22(4): 317
- [2] Winter R E. *Philos Mag*[J], 1975, 31: 765
- [3] Bai Y L. *Res Mechanics*[J], 1990,31: 133
- [4] Wang Lili(王礼力), Yu Tongxi(余同希), Li Yongchi(李永池). *Impact Dynamics*(冲击动力学)[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992: 2
- [5] Kim D K, Lee S, Beak W H. *Materials Science and Engineering*[J],1998, A249: 197
- [6] Bao Hesheng(包合胜), Wang Lili(王礼立), Lu Weixian(卢维娴). *Explosive and Shock Waves*(爆炸与冲击)[J], 1989, 9: 109
- [7] Johnson G R, Cook W H. *Fracture Mechanics*[J], 1985, 21(1): 31
- [8] Fan Yafu, Duan Zhuping. *Mechanics in Engineering*[J], 2003, 25: 40
- [9] Perez Prado M T, Hines J A, Vecchio K S. *Acta Mater*[J], 2001, 49(2): 2905
- [10] Liao Shih-Chieh, Duffy J. *J Mech Phys Solids*[J], 1998, 46: 2227

Simulation of Adiabatic Shearing Behavior of TC4 Alloy during Dynamic Loading

Li Jianchong, Li Shukui, Fan Qunbo

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The adiabatic shearing behavior of TC4 alloy was simulated using LS-DYNA, and the distribution of equivalent strain, von-Mises stress and temperature rise in the hat-shaped specimen during dynamic loading were obtained. It is found that a large part of plastic strain is concentrated in a narrow deformation area. The temperatures in this area are much higher than those of the matrix material. The equivalent strain, von-Mises stress and temperature rise in each corner of the hat-shaped specimen are highest during all the loading processes. The simulation indicates that the maximum temperature in adiabatic shear band is higher than the recrystallization temperature of TC4 alloy, but lower than its phase transformation temperature, which is helpful to the research of the microstructure deformation mechanism of adiabatic shear band of TC4 alloy.

Key words: TC4 alloy; adiabatic shearing; adiabatic temperature rise; recrystallization

Corresponding author: Li Jianchong, Candidate for Ph. D., School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China, Tel: 0086-10-68911144, E-mail: jchlee1983@163.com