

[文章编号] 1004- 0609(2001)03- 0412- 04

7075 铝合金热压缩变形流变应力^①

林高用, 张 辉, 郭武超, 彭大暑

(中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

[摘 要] 在 Gleeble 1500 热模拟试验机上, 采用高温等温压缩试验, 对 7075 铝合金在高温压缩变形中的流变应力行为进行了研究。结果表明, 应变速率和变形温度的变化强烈地影响合金流变应力的大小, 流变应力随变形温度升高而降低, 随应变速率提高而增大; 可用 Zener-Hollomon 参数的指数形式来描述 7075 铝合金高温压缩变形时的流变应力行为。

[关键词] 7075 铝合金; 热压变形; 流变应力

[中图分类号] TG 319

[文献标识码] A

7075 铝合金具有优良的综合性能, 是航空航天领域广泛使用的一种轻型结构材料。为了提高该合金的综合性能, 充分挖掘其使用潜力以满足航空航天工业的需求, 从不同的侧面对该合金进行各种深入细致的研究, 具有重要的实际意义。

7075 铝合金在热变形过程中流变应力的大小是决定变形所需负荷及所需消耗能量的关键因素, 在进行工程计算时首先就应确定材料变形的流变应力。流变应力 σ 的大小与变形温度 T 、应变速率 $\dot{\epsilon}$ 及应变 ϵ 有关, 也与材料成分、晶粒尺寸、变形历史等其它条件有关。通常忽略后者的影响, 表达为

$$\sigma = f(\epsilon) \cdot f(\dot{\epsilon}) \cdot f(T) \quad (1)$$

上式的具体形式随材料、变形方式等变化, 定量的表达可用著名的 Zener-hollomon 参数^[1]、Arrhenius 关系^[2]、Sah 模型^[3]等。通过这些定量公式, 可以解释合金高温变形的物理本质。

1 实验

实验所用材料为东北轻合金加工厂提供的 $d162\text{ mm}$ 的 7075 铝合金铸锭。从铸锭上切取小块试样, 车削成如图 1 所示的压缩试样。热压变形在 Gleeble 1500 热模拟试验机上进行, 压缩时在试样两端填充石墨加机油作为润滑剂。变形温度分别为 250, 300, 350, 400, 450 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率为 0.05, 0.5, 5, 25 s^{-1} 。

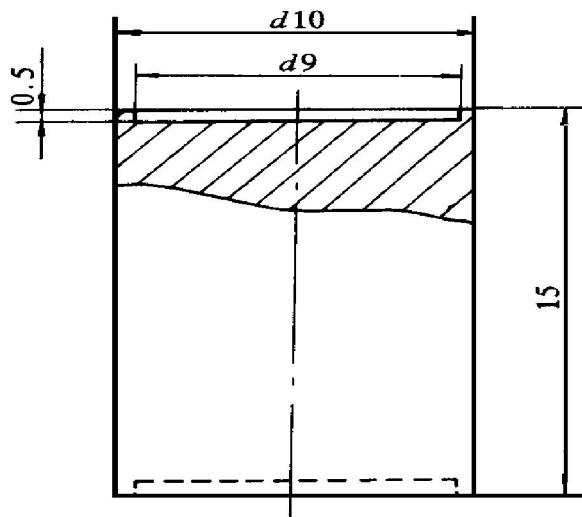


图 1 热压缩试样(单位: mm)

Fig. 1 Specimen of hot compression (unit: mm)

2 实验结果

7075 铝合金高温压缩变形时随变形温度和应变速率的变化所获得的真应力-真应变曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 7075 铝合金热压缩变形时, 流变应力的变化规律表现为: 先随应变的增加迅速升高, 出现一峰值后逐渐下降, 并且在应变速率一定时, 随变形温度升高, 该峰值点呈下降趋势; 稳态流变应力随温度的变化呈现出与峰值应力相同的变化趋势, 并且当应变达到一定值时, 稳态流变应力基本上保持不变而与真应变无关; 此外, 随着温度的升高, 合金变形表现出越来越明显的动态软化现

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(G19990649008- 5)

[收稿日期] 2000- 08- 04; [修订日期] 2000- 11- 07

[作者简介] 林高用(1966-), 男, 讲师, 博士研究生。

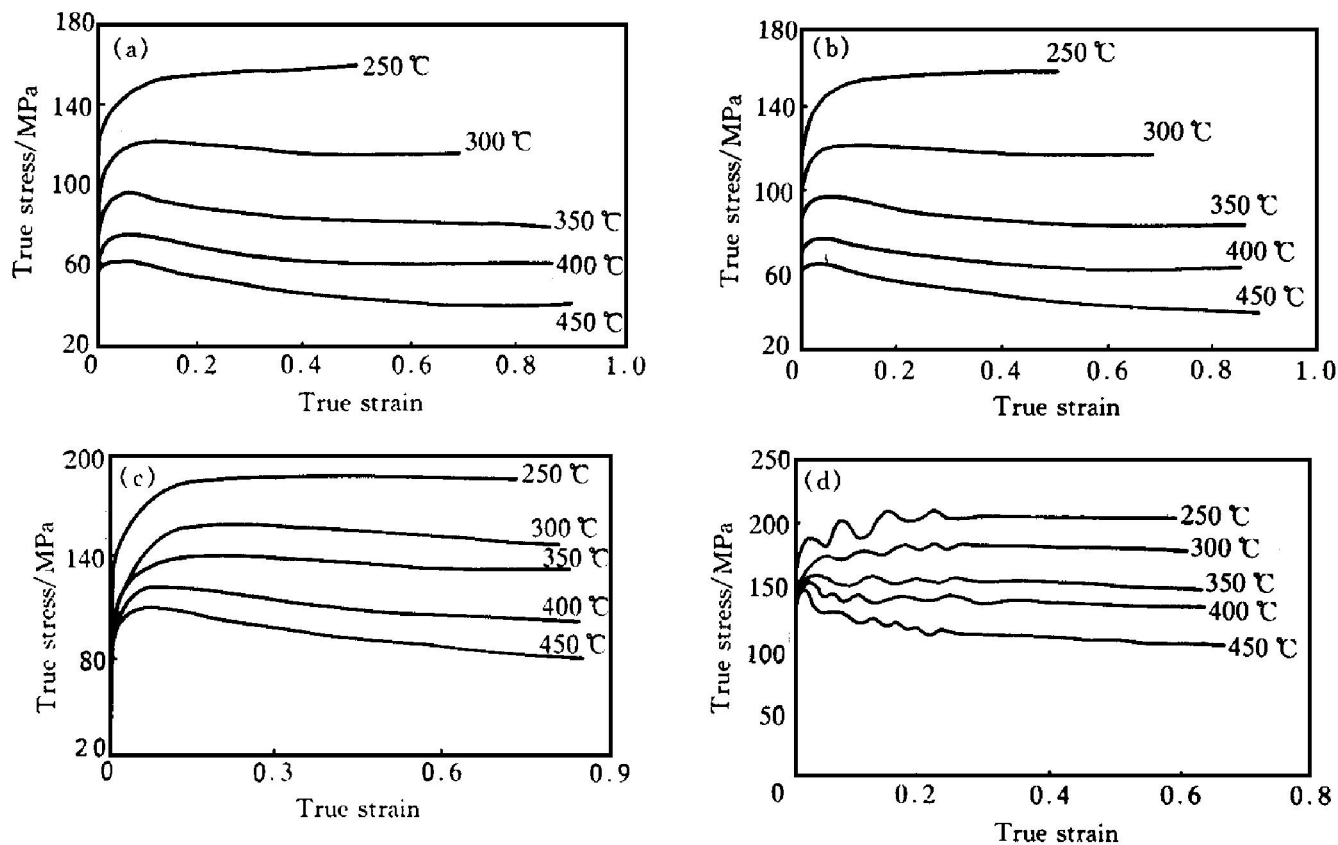


图 2 7075 铝合金热压缩变形的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves for 7075 aluminum alloy at hot compression

(a) $-\dot{\varepsilon} = 0.05 \text{ s}^{-1}$; (b) $-\dot{\varepsilon} = 0.5 \text{ s}^{-1}$; (c) $-\dot{\varepsilon} = 5 \text{ s}^{-1}$; (d) $-\dot{\varepsilon} = 25 \text{ s}^{-1}$

象;在变形温度保持不变时,流变应力随着应变速率的提高而增大;在高应变速率下的真应力-真应变曲线表现出比低应变速率下的真应力-真应变曲线更加复杂曲折的现象。

3 分析与讨论

3.1 应变速率对流变应力的影响

Zener 和 Hollomon 的有关研究证明,材料在高温塑性变形时应变速率受热激活过程控制,应力与应变速率之间的关系可用一项 Z 参数,即 Zener-Hollomon 参数表示^[1]:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(\Delta H / RT) \quad (2)$$

Z 参数的物理含义为温度补偿的应变速率因子,式中 R 为气体常数, ΔH 为变形激活焓。有关研究表明,当流变应力高于 50 MPa 时,可采用指数形式来描述流变应力与 Z 参数之间的关系^[4]:

$$Z = A \exp(\beta \sigma) \quad (3)$$

式中 A 和 β 是与应变变量有关的参数。

由文献[5]可得,7075 铝合金的变形激活焓为 $\Delta H = 158432 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。将变形条件和结果代入公式(2),即可得到 Z 参数与流变应力的关系曲线,如

图 3 所示。由图 3 可见, $\ln Z$ 与流变应力 σ 呈直线关系,回归相关系数为 0.9725~0.9912。在不同的应变变量下,直线的斜率略有变化。这种关系表明,实测数据符合式(3),即该合金的 Z 参数可表示为流变应力的指数形式。

当温度不变时,由式(2)和(3)可得

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + \beta \sigma \quad (4)$$

其中 $\ln A_1 = \ln A + \Delta H / (RT)$ 。

由实验结果可以绘制出流变应力与应变速率之间的关系曲线,如图 4 所示。通过线性回归分析证明,回归相关系数等于 0.9436~0.9765,表明 σ - $\dot{\varepsilon}$ 关系符合式(4)所示关系,即 7075 铝合金高温压缩变形时的应力-应变速率关系满足指数形式。这种关系可以用于描述该合金各温度下应变速率与稳态流变应力和峰值应力的关系,从而可为通过控制应变速率来控制热加工的应力水平和力能参数提供理论依据。

3.2 变形温度对流变应力的影响

从图 2 的真应力-真应变曲线可知,温度变化对合金的流变应力大小有直接的影响。在恒应变速率条件下变形时,假定在一定的温度范围内 ΔH 保持不变,采用指数形式来描述流变应力与 Z 参数之

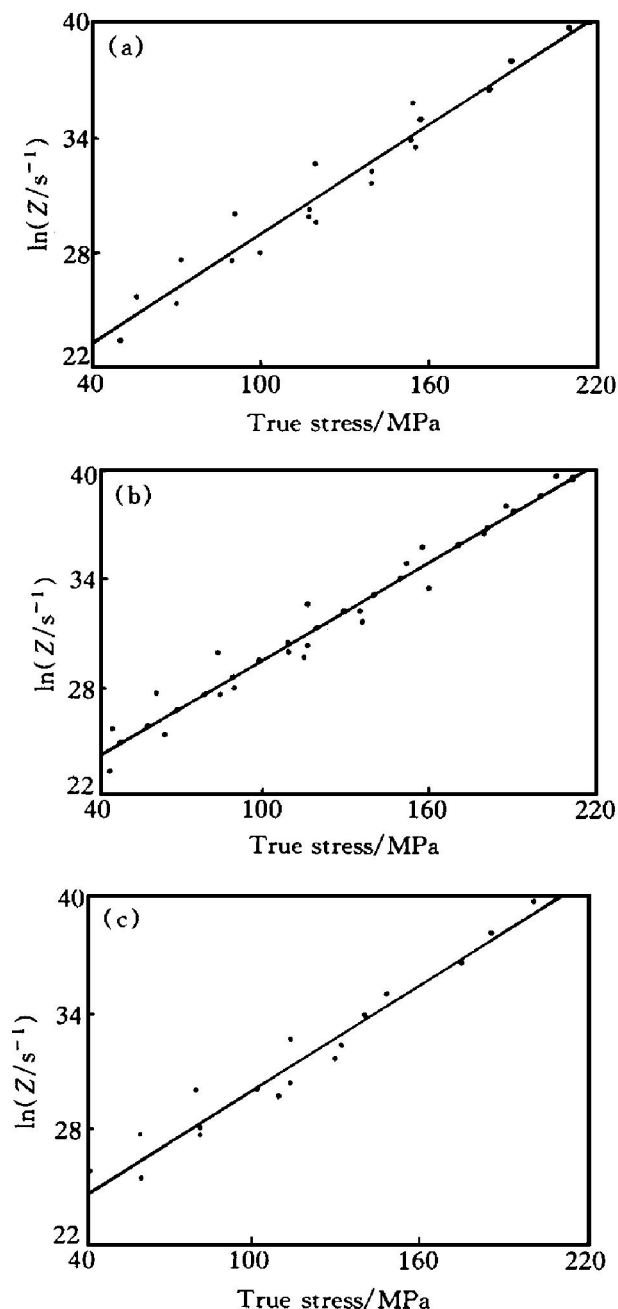


图3 流变应力与Z参数的关系曲线

Fig. 3 Relationship of flow stress and Zener-Hollomon parameter

(a) $\dot{\varepsilon} = 0.2$; (b) $\dot{\varepsilon} = 0.4$; (c) $\dot{\varepsilon} = 0.6$

间的关系, 于是由式(2)和(3)可得

$$BT^{-1} = A_2 + \beta_2 \sigma \quad (5)$$

式中 B , A_2 , β_2 都是与温度无关的系数。

根据实验结果绘制流变应力与变形温度之间的关系曲线, 如图5所示。线性回归分析表明, 在恒定应变速率条件下, $\sigma-T$ 关系符合式(5)所示关系, 即流变应力与变形温度的倒数呈线性关系, 相关系数为 0.9765~0.9948, 说明该合金可以采用Z参数的指数形式来描述高温变形时的流变应力行为。

3.3 合金高温变形物理本质

上述分析表明, 7075铝合金高温压缩变形时

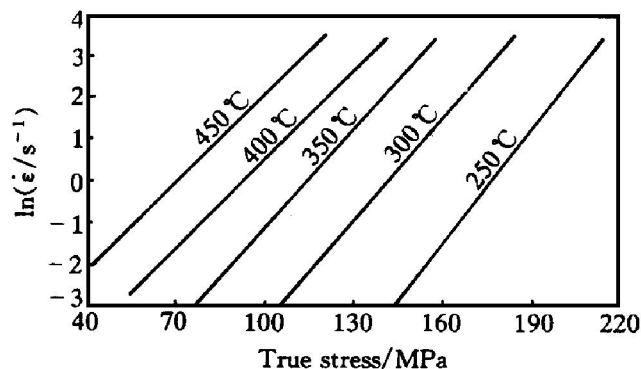


图4 应变速率与流变应力的相关性

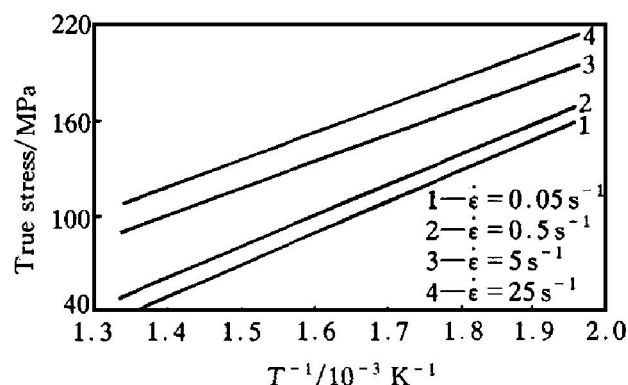
Fig. 4 Relationship of strain rate and flow stress
($\varepsilon = 0.2, 0.4$)

图5 变形温度与流变应力的相关性

Fig. 5 Relationship of deformation temperature and flow stress
($\varepsilon = 0.2, 0.4$)

的流变应力强烈地取决于应变速率和变形温度, 可采用Zener-Hollomon参数的指数形式来描述其流变应力行为。

7075铝合金的塑性变形流变应力行为是与变形体内的位错组态密切相关的。变形初期, 需较高的能量来启动位错; 流变应力达到峰值之后, 开始进入稳态变形, 流变应力基本保持不变。此时, 合金变形的实质为位错的增殖和位错间由于相互作用而引起的相互销毁和重组之间达到动态平衡, 合金变形组织中的亚晶平均大小、亚晶间平均取向差以及平衡位错密度均保持基本不变, 合金中发生“重复多边形化”, 表现出强烈的动态回复行为^[6~9]。变形条件, 尤其是应变速率、应变量和变形温度决定了合金的组织演变过程和流变应力行为, 而如前所述, 这种变形条件可用方程(2)和(3)所示的Z参数来表示。由此可见, 合金变形组织与Z参数之间也应该存在一定的对应关系, 利用这种关系可为合金变形组织的预测、控制和优化提供依据^[10, 11]。

此外, 从图2所示的实测曲线可见, 当应变速率较高时(25 s^{-1}), 出现应力-应变曲线在变形初始阶段表现出强烈的锯齿形波动随后逐渐趋于平稳的

奇异现象。一般认为, 金属在应变速率较低时, 因发生动态再结晶, 应力-应变曲线会发生这种波动现象, 但本实验却是在高速变形下出现这种现象。这可能是因为 7075 铝合金在高应变速率下发生了不连续动态再结晶, 也可能是变形热效应或别的原因造成的。因此, 对这种奇异现象的物理本质, 还需进行更进一步的研究。

4 结论

7075 铝合金高温压缩变形时的流变应力强烈地取决于应变速率和变形温度, 流变应力随变形温度升高而降低, 随应变速率提高而增大。可采用 Zener-Hollomon 参数的指数形式来描述 7075 铝合金高温压缩变形时的流变应力行为。

[REFERENCES]

- [1] McQueen H J, Jonas J J. Recovery and recrystallization in the hot-working of aluminum alloys [A]. Arsenault R J. Treatise on Materials Science and Technology Vol. 6, Plastic Deformation of Materials [C]. New York: Academic Press, 1975. 393- 493.
- [2] Wang W A, Jonas J J. Flow of plastic and viscoplastic solids in hot forming processes [J]. Trans Metall Soc AIME, 1968, 242: 2271.
- [3] Sah J P, Richardson G J, Sellars C M. Plane strain compression testing at elevated temperature [J]. J Aust Inst Met, 1969, 14: 292.
- [4] Castro-Fernandez F R, Sellars C M, Whiteman J A. Changes of flow stress and micro-structure during hot deformation of Al1Mg-1Mn [J]. Mater Sci Technol, 1990, 6: 453.
- [5] Sheppard T, Jackson A. Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminum alloys [J]. Mater Sci Technol, 1997, 13: 203.
- [6] McQueen H J. Metal forming: industrial, mechanical, computational and micro-structure in a thermo-mechanical analysis of the hot rolling of aluminum [J]. Res Mechanical, 1991, 31: 455- 469.
- [7] ZHANG X M, SONG M, ZHOU Z P, et al. Micro-structure and mechanical properties of 2104 aluminum alloy forgings made by a new process [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2000, 10(2): 139- 143.
- [8] LIN Jun-ping(林均品), AN Xi-yong(安希镛), LEI Ting-quan(雷廷权). 铝合金动态再结晶的研究[J]. Materials Science and Technology (材料科学与工艺), 1988, 7: 107- 115.
- [9] SHEN J, XIE S S, TANG J H. Dynamic recovery and dynamic recrystallization of 7005 aluminum alloy during hot compression [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 13: 379- 386.
- [10] LIU Y Y, ZHANG H, PENG D S, et al. Experimental simulation on control rolling process of 6201 aluminum alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(2): 318- 321.
- [11] Vernon-Parry K D, et al. Deformation micro-structure and texture in hot worked aluminum alloys [J]. Mater Sci Technol, 1996, 12: 889- 895.

Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation

LIN Gao-yong, ZHANG Hui, GUO Wu-chao, PENG Da-shu

(Department of Materials Science and Engineering, Central South University,
Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The flow stress behavior of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation was studied by isothermal compression test at Gleeble-1500 thermal-mechanical simulator. The results show that the flow stress is controlled by both strain rate and deforming temperature, the flow stress decreases with the increase of deforming temperature, while increases with the increase of strain rate. The flow stress of 7075 alloy during high temperature deformation can be represented by a Zener-Hollomon parameter in exponential form.

[Key words] 7075 aluminum alloy, hot compression deformation, flow stress

(编辑 袁赛前)