

文章编号: 1003-7837(2004)01-0044-04

7075 铝合金高温等温变形的流变应力特征

刘文娟, 韩冰, 袁鸽成

(广东工业大学材料与能源学院, 广东广州 510090)

摘要: 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上, 采用高温等温压缩法, 研究了 7075 铝合金在 250~450℃ 温度范围及 $1.0 \sim 0.001 \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内压缩变形时流变应力的变化规律。结果表明, 应变速率和变形温度对合金流变应力的影响很大, 流变应力随应变速率的提高而增大, 随变形温度的提高而降低; 其流变应力值可用 Zener-Hollomon 参数来描述。从流变应力、应变速率和温度的相关性, 得出了该合金高温变形的应力指数 n , 应力水平参数 α , 结构因子 A 和变形激活能 Q 。

关键词: 7075 铝合金; 流变应力; 等温变形
中图分类号: TG115.53 **文献标识码:** A

7075 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金。该合金具有高的室温强度和良好的综合性能, 作为一种轻型的结构材料, 在航天、航空、交通、民用等领域广泛应用。然而, 该合金的可挤压性较差, 挤压变形温度-速度条件难以控制, 使产品质量和生产效率受到影响。金属的热变形行为是确定其挤压、锻造、轧制、扭转等热加工工艺的理论依据。因此, 对该合金的热变形行为的研究具有重要的实际意义。目前, 有关该合金的研究主要集中在力学性能、铸造、热加工性能、热处理制度和超塑性等方面^[1-5], 其热变形行为的系统研究目前还少有报道。本文对添加 Zr 的 7075 合金的组织与高温变形行为进行研究, 利用等温压缩法研究铸态 7075 铝合金热变形的流变应力特征, 所得结果可为该合金挤压、锻造、轧制等热加工工艺的制定及热变形组织预测提供依据。

1 试验方法

合金配料的成分如表 1 所列。采用 1070A 工业纯铝、工业纯锌、工业纯镁、Al-Cu 及 Al-Zr 中间合金等原料配料。采用电阻式坩埚熔炼, 温度控制在 700~740℃。采用 Al-Ti-B 细化晶粒, 熔体除气、除渣后,

静置 10~15 min, 然后注入圆柱型铁模中。锭坯直径 20 mm、长度 150 mm, 铸锭在 470℃ 下保温 24 h, 进行均匀化退火。经化学分析, 铝合金铸锭成分(质量分数)为 Zn 5.65, Mg 2.59, Cu 1.54, Fe 0.09, Zr 0.20, Si 0.23, 其余为 Al。与配料成分相当吻合, 符合美国铝业协会(AA)对 7075 铝合金的要求。将铸锭车削成长 15 mm、直径 10 mm 的试样, 在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行压缩变形。为减少压头与样品之间的摩擦, 压缩时在试样两端填充润滑剂。变形温度分别为 250, 300, 350, 400, 450℃, 每种温度下的应变速率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 0.001, 0.01, 0.1, 1.0 s^{-1} 。

表 1 7075 铝合金配料的成分

Table 1 Composition of 7075 aluminum alloy

成分	Zn	Mg	Cu	Zr	Ti	Al
含量 w/%	5.7	2.6	1.6	0.23	0.20	余量

2 试验结果

图 1 为 7075 铝合金压缩变形时的真应力-真应变 $\sigma-\epsilon$ 曲线。由图 1 可见, 样品热压缩变形时, 流变应

收稿日期: 2003-09-02

作者简介: 刘文娟(1978-), 女, 河南新乡人, 硕士。

力的变化规律为:流变应力先随应变的增加迅速升高,出现一个峰值后流变应力逐渐下降,后趋于稳态流变应力值;随变形温度的升高流变应力降低,并且应力-应变曲线为波浪状,这是合金发生动态软化

所造成的;在变形温度保持不变时,随应变速率的提高流变应力增大;温度对流变应力的影响比应变速率对流变应力的影响大。

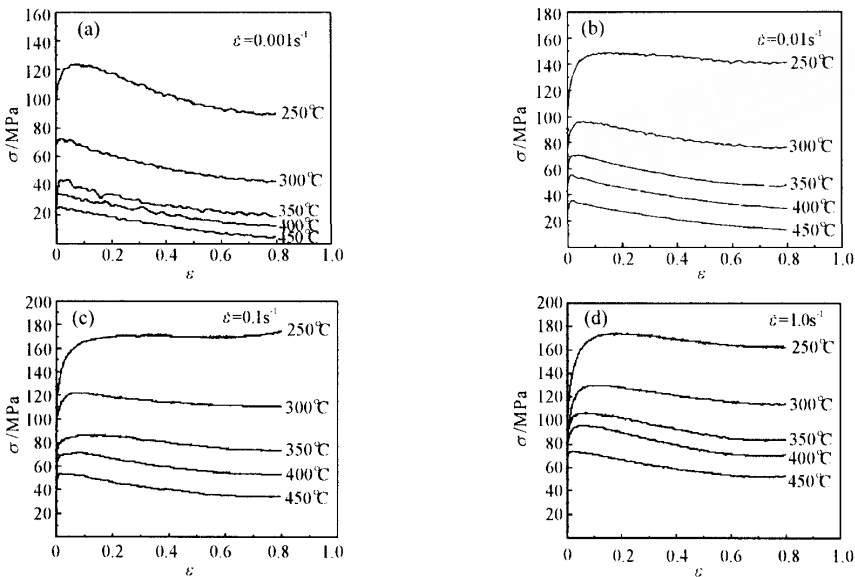


图 1 7075 铝合金的真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curve of 7075 aluminum alloy

3 分析与讨论

金属和合金的热变形是一个受热激活控制的过程.其流变行为可用应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、温度 t 和流变应力 σ 之间的关系进行描述^[1-7].低应力水平下的稳态流变应力 σ 和应变速率之间的关系可用指数关系进行描述,高应力水平下两者满足幂指数关系^[2-5]:

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n, \tag{1}$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma), \tag{2}$$

式(1)和(2)中, β 和 n 是与温度无关的常数.另外, Sellars 和 Tegart 提出了一种包含变形激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦关系式来描述这种热激活稳态变形行为^[3]:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \tag{3}$$

式(3)中, A, α, n 均为与温度无关的常数, $\alpha = \beta/n, R$ 为气体常数, T 为绝对温度.式(3)适用于所有的应力状态. $\dot{\epsilon}$ 和 T 的关系可用 Zener-Hollomon 参数 Z 表示^[2-5]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right), \tag{4}$$

则流变应力 σ 可表达成 Zener-Hollomon 参数 Z 的函数:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\sqrt[n]{\frac{Z}{A}} + \sqrt{\sqrt[n]{\left(\frac{Z}{A}\right)^2 + 1}} \right]. \tag{5}$$

求出式(4)和(5)中的常数,则可利用这两个公式计算材料热加工中稳态流变应力 σ 与 $Z, \dot{\epsilon}$ 的关系,为制定热加工工艺提供理论依据.

对式(1)和(2)两边取对数得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n \ln \sigma, \tag{6}$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma. \tag{7}$$

利用式(6)与(7),用作图法可求出常数 β 和 n .在试验过程中,当变形量很大($\epsilon > 0.4$)时,润滑剂难以均匀铺展,样品与模具接触面的摩擦条件恶化,压缩样品出现腰鼓,使应力应变的测量和计算失真;当变形量较小($\epsilon < 0.4$)时,石墨润滑剂的润滑效果更好,合金变形较均匀;当 $\epsilon = 0.3$ 时,各应力-应变曲线都已进入稳态变形阶段.所以本试验取 $\epsilon = 0.3$ 时的应力值作为稳态流变应力值,并采用热电偶实测

温度进行数据处理,以此对温度变化引起的流变应力的变化进行修正.作 $\ln\dot{\epsilon}-\sigma, \ln\dot{\epsilon}-\ln\sigma$ 曲线图,如图2

所示.用作图法分别求出 $\beta = 0.0793 \text{ MPa}^{-1}$, $n = 5.2459$,对应的 α 值为 0.0151 MPa^{-1} .

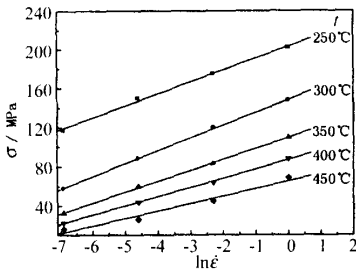
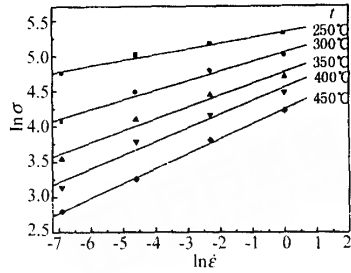


图2 $\epsilon = 0.3$ 时的应力-应变速率关系曲线

Fig. 2 Relation between stress and strain rate at $\epsilon = 0.3$



在一定的应变和应变速率下对式(3)求得:

$$Q = Rn \frac{d[\ln \sinh(\alpha\sigma)]}{d(1/T)} \quad (8)$$

作 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - (1/T)$ 曲线,如图3所示.由图3可得 $\frac{d[\ln \sinh(\alpha\sigma)]}{d(1/T)} = 3551.6$,将 R, n 代入式(8)得 $Q = 154.9 \text{ kJ/mol}$.

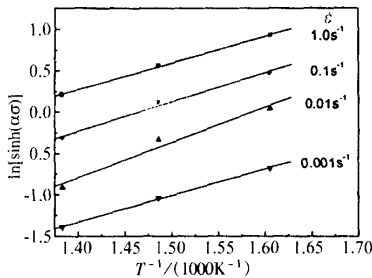


图3 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 与温度的关系

Fig.3 Relation between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and temperature

对式(3)两边取对数得:

$$\ln\dot{\epsilon} = \ln A - \frac{Q}{RT} + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (9)$$

作 $\ln\dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 曲线图(图4).由图4可得 $[Q/(RT) - \ln A]/n$ 的值为直线的截距,将 Q, R, T, n 代入该式,可求得 $A = 3.9838 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.通过上述步骤所求得的材料常数还不特别准确,热压缩变形时流变应力、应变速率和温度的相关性更接近于双曲正弦关系.可利用式(9)求出更为精确的 n 值,然后代入 $\alpha = \beta/n$ 中求出一个新的 α 值^[3],再利用新的 n 和 α 值求出材料的其它常数.最后求得材料的 $n = 4.5661, \alpha = 0.0174 \text{ MPa}^{-1}, Q = 141.8 \text{ kJ/mol}, A = 1.$

$9502 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.

将所求得的常数代入(4)和(5)两式得:

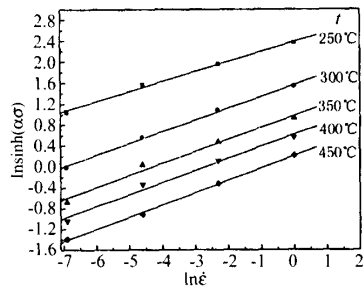


图4 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - \ln\dot{\epsilon}$ 关系曲线

Fig.4 Relation between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $\ln\dot{\epsilon}$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(141.8/RT) \quad (10)$$

$$\sigma = 57.6 \ln \left[\sqrt[4.5661]{\frac{Z}{1.9502 \times 10^9}} + \sqrt{\left(\frac{Z}{1.9502 \times 10^9} \right)^2 + 1} \right] \quad (11)$$

式(11)可用于计算实际热加工中材料的稳态流变应力及负荷估算、设备选型和其它加工工艺参数的选择和控制等,还可用于预测该合金的热变形组织与性能,对指导实际生产具有重要意义.

4 结论

(1)7075 铝合金热变形时,流变应力曲线存在近稳态流变现象;随变形温度的升高流变应力降低,随应变速率的提高流变应力增大.温度对流变应力的影响比应变速率对流变应力的影响更为显著.

(2)7075 铝合金高温变形的流变应力 σ 是 Z 参数的函数:

$$\sigma = 57.6 \ln \left[\sqrt[4.5661]{\frac{Z}{1.9502 \times 10^9}} + \sqrt[4.5661]{\left(\frac{Z}{1.9502 \times 10^9}\right)^2 + 1} \right],$$

Z 参数可表示为: $Z = \dot{\epsilon} \exp(141.8/RT)$.

该模型可用于 7075 铝合金塑性加工时的负荷估算、设备选型和其它加工工艺参数的选择,还可用于热变形组织与性能的预测。

参考文献:

[1] 毛萍莉,杨柯,苏国跃.铸态奥氏体不锈钢的热变形行为

[J]. 金属学报,2001,37(1):39.

[2] 林高用,张辉,孟力平,等.7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 中国有色金属学报,2001,(2):412.

[3] 沈健. 2091 铝锂合金高温塑性变形行为研究[D]. 长沙:中南工业大学材料科学与工程系,1996.

[4] 袁鸽成,张新明.新型 Al-Sn-Si 合金高温塑性变形流变应力的研究[J]. 实验力学,2001,16(1):34-38.

[5] Wang Y, Lin D L. A correlation between tensile flow stress and Zener-Hollomon factor in TiAl alloys at high temperatures[J]. J Mat Sci, 2000,(19): 1185-1188.

[6] Yao X X. The strain-rate sensitivity of flow stress and work-hardening rate in a hot deformed Al-1.0Mg alloy[J]. J Mat Sci, 2000,(19):743-744.

[7] Poirier J P, 关德林. 晶体的高温塑性变形[M]. 大连:大连理工大学出版社,1989.24.

Flow stress characteristics of isothermal deformation at high temperature for 7075 aluminum alloy

LIU Wen-juan, HAN Bing, YUAN Ge-cheng

(Faculty of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Flow stress of 7075 aluminum alloy in the temperature range of 250-450°C and strain rate range of 1.0-0.001 s⁻¹ was studied by isothermal compression test with Gleeble-1500 machine. The results show that flow stress is controlled by strain rate and deformation temperature, the flow stress increases with strain rate increase, but decreases with temperature raise, and the flow stress of 7075 aluminum alloy during high-temperature deformation can be described by Zener-Hollomon parameter. Stress index n , stress scale parameter α , structural factor A , and activation enthalpy Q of the alloy during plastic deformation at high temperature were derived from the correlativity of flow stress, strain rate, and temperature.

Key words: 7075 aluminum alloy; flow stress; isothermal deformation