

文章编号: 1004-0609(2005)04-0621-05

2519 铝合金热变形流变行为^①

李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用 Gleeble-1500 热模拟机进行高温等温压缩实验, 研究了 2519 铝合金在变形温度为 300~450 ℃、应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 条件下的流变变形行为。结果表明: 应变速率和变形温度对合金流变应力的大小有显著影响, 流变应力随温度升高而降低, 随应变速率的提高而增大, 在应变速率 $\dot{\epsilon} < 10 \text{ s}^{-1}$ 条件下, 流变应力开始随应变增加而增大, 达到峰值后趋于平稳, 表现出动态回复的特征; 而在 $\dot{\epsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$, $t \geq 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变形条件下, 合金发生了局部动态再结晶。可用包含 Arrhenius 项的 Zener-Hollomon 参数描述 2519 铝合金高温塑性变形时的流变行为。

关键词: 2519 铝合金; 热压缩变形; 流变应力; Zener-Hollomon 参数

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

Hot deformation behavior of 2519 aluminum alloy

LI Huizhong, ZHANG Xinming, CHEN Ming'an, ZHOU Zhuoping

(School of Materials Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The flow stress features of 2519 aluminum alloy were studied by isothermal compression at 300~450 ℃ and strain rate of 0.01~10 s⁻¹ with Gleeble-1500 simulated machine. The results show that the flow stress is controlled by strain rate and deformation temperature. The flow stress increases with strain rate increasing and decreases with deformation temperature increasing. The flow stress of 2519 aluminum alloy increases with strain and tends to be constant after a peak value at strain rates less than 10 s⁻¹, showing dynamic recovery; The flow stress decreases after a peak value with the increase of strain at strain rates of 10 s⁻¹ and deformation temperature higher than 350 ℃, showing partial dynamic recrystallization. The flow stress of 2519 aluminum alloy during high temperature deformation can be represented by Zener-Hollomon parameter including the Arrhenius term.

Key words: 2519 aluminum alloy; hot compression deformation; flow stress; Zener-Hollomon parameter

2519 铝合金是继 5083、7039 铝合金之后美国于 20 世纪 80 年代研发的一种新型装甲铝合金, 该合金具有良好的抗弹性能、焊接性能及抗应力腐蚀性能^[1-3]。对 2519 合金在焊接及抗应力腐蚀方面的研究已有较多的报道^[2-7]。流变应力是表征金属与合金塑性变形性能的一个最基本量, 在实际塑性变形过程中, 合金的流变应力值决定了变形时所需施加的载荷大小和所需消耗能量的多少。对一些铝合

金热变形流变应力方面的研究已有报道^[8-10], 而对 2519 铝合金热加工流变应力行为研究的报道较少。本文作者在 Gleeble-1500 热模拟机上对圆柱试样进行等温压缩, 研究 2519 铝合金热变形时流变应力与变形温度、应变速率间的关系, 采用一元线性回归法建立流变模型, 为该合金的热加工工艺提供理论依据。

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064908)

收稿日期: 2004-10-09; 修订日期: 2004-12-28

作者简介: 李慧中(1968-), 男, 讲师, 博士研究生。

通讯作者: 李慧中, 电话: 0731-8830256; E-mail: LHZ606@mail.csu.edu.cn

1 实验

1.1 材料

2519 铝合金化学成分(质量分数, %)为: 0.10Si, 0.15Fe, 6.0Cu, 0.28Mn, 0.19Mg, 0.06Ti, 0.018Zr, 0.05V, 余量 Al。其制备工艺流程为: 采用 Al-Cu、Al-Mn、Al-Ti、Al-V 和 Al-Zr 等中间合金及纯 Mg、纯 Al 配制合金, 铁模浇铸 d 16 mm $\times$ 200 mm 棒材若干, 将棒材进行 510 $^{\circ}\text{C}$, 20 h 均匀化退火。加工出尺寸为 d 10 mm $\times$ 15 mm、两端带有深 0.2 mm 凹槽的 Rastegaev^[10] 样品。

1.2 实验方法

将加工好的试样在 Gleeble-1500 热模拟机上进行等温压缩实验, 压缩温度范围为 300~450 $^{\circ}\text{C}$, 应变速率范围为 0.01~10 s^{-1} , 总压缩应变量为 0.7(真应变), 热模拟实验的升温速率为 2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 保温时间为 3 min。压缩前圆柱试样两端的凹槽内填充 75% 石墨+20% 机油+5% 硝酸三甲苯脂, 以减少摩擦对应力状态的影响。由 Gleeble-1500 热模

拟机的计算机自动采集应力、应变、压力、位移、温度及时间等数据, 绘制真应力—真应变曲线。

2 实验结果

2.1 真应力—真应变曲线

图 1 所示为 2519 铝合金在高温等温压缩变形时实测的真应力—真应变曲线。从图 1 可以看出, 在 300~450 $^{\circ}\text{C}$ 和 0.01~10 s^{-1} 的变形条件范围内均存在较明显的稳态流变特征, 即在一定的温度和应变速率下, 当真应变超过一定值时, 真应力并不随真应变的继续增大而发生明显变化, 呈现出稳态流变的特征。在同一应变速率下, 随变形温度的升高, 真应力水平明显下降; 在同一变形温度下, 随应变速率增加, 真应力水平升高, 说明合金在该实验条件下具有正的应变速率敏感性; 随变形温度的降低和应变速率的增大, 进入稳态流变阶段时所对应的真应力值逐渐增大, 因而, 合金进入稳态变形愈困难; 当应变速率达 10 s^{-1} , 变形温度大于 300 $^{\circ}\text{C}$ 后, 应力—应变曲线上均出现一个波浪峰, 并随温度的升高这种波浪峰愈明显, 具有动态再结晶

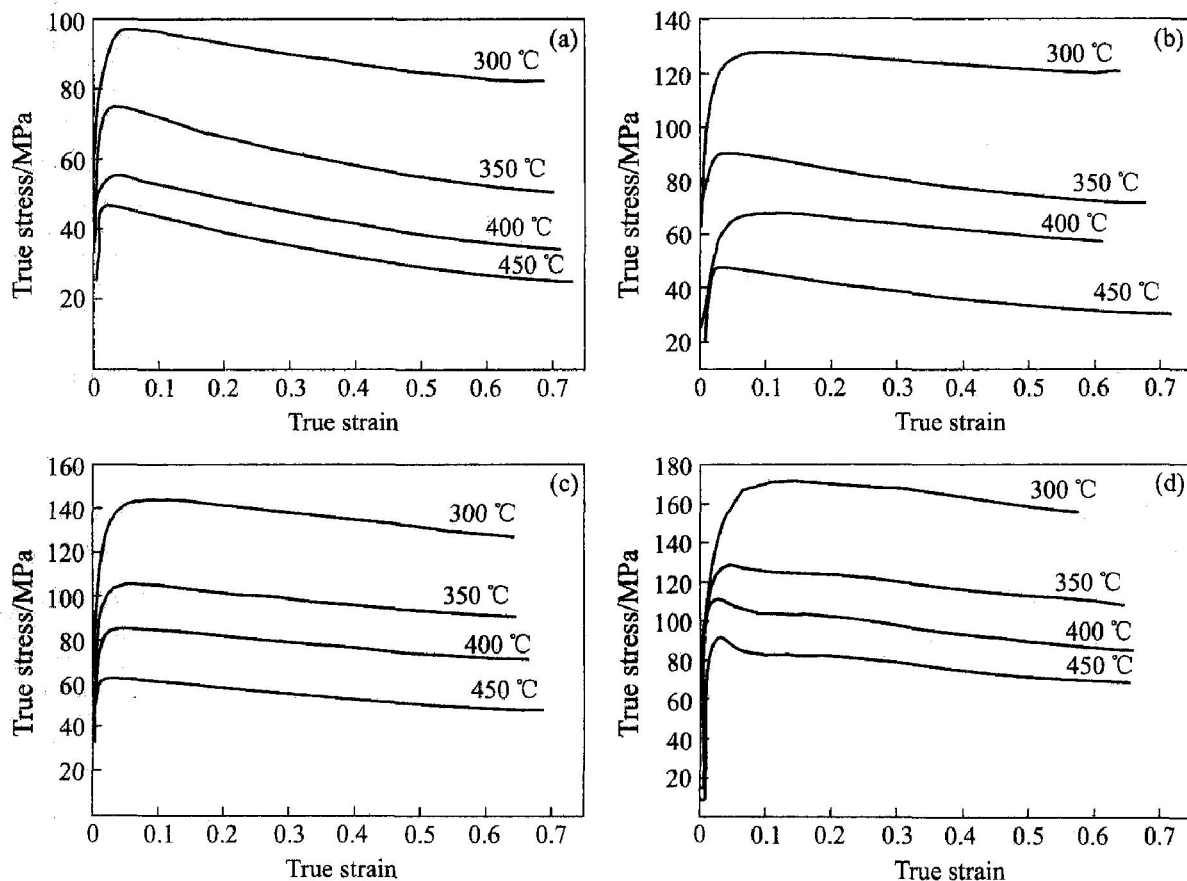


图 1 2519 铝合金热压缩变形真应力—真应变曲线

Fig. 1 True stress—true strain curves of 2519 aluminum alloy by hot compression

(a) —0.01 s^{-1} ; (b) —0.1 s^{-1} ; (c) —1 s^{-1} ; (d) —10 s^{-1}

特征。这表明, 2519 铝合金在较高应变速率, 较高温度时, 发生了局部动态再结晶。

2.2 流变应力方程

1944 年 Zener 和 Hollomon 提出并实验证实了确定钢的高速拉伸实验 σ — $\dot{\epsilon}$ 关系的一种方法^[11], 即:

$$\alpha = \alpha(Z, \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } Z = \dot{\epsilon} \exp[Q/(RT)] \quad (2)$$

式中 σ 为高温流变应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率; ϵ 为真应变; T 为变形温度; R 为摩尔气体常数; Z 为 Zener-Hollomon 参数, 其物理意义是温度补偿的变形速率因子; Q 为热变形激活能, 它反映材料热变形的难易程度, 也是材料在热变形过程中重要的力学性能参数。

研究表明, Z 与 σ 之间服从以下关系式^[12]:

$$Z = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (3)$$

结合式(2)和式(3)有:

$$\dot{\epsilon} = A_1 [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (4)$$

式中 A_1 , d , n 均为与温度无关的常数; A 为结构因子, s^{-1} ; d 为应力水平参数, MPa^{-1} ; n 为应力指数。

上述关系式就是由 Sellar 和 Tegart 提出的一种为包含变形激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦形式修正的 Arrhenius 关系。众多研究结果表明^[13, 14], 式(4)能较好地描述常规热变形。

在低应力水平条件下, 由于 $\alpha\sigma$ 值较小, 对式(3)和式(4)中的 $\sinh(\alpha\sigma)$ 进行泰勒级数展开后忽略高次项, 可近似得到低应力水平时上述两式的表达式为

$$Z = A' \sigma^n \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = A' \sigma^n \exp[-Q/(RT)] \quad (6)$$

其中 $A' = A_1 \alpha^n$ 。

在高应力水平条件下, 可以忽略 $\sinh(\alpha\sigma)$ 中的 $\exp(\alpha\sigma)$ 项, 由式(3)和式(4)可得:

$$Z = A \exp(\beta\sigma) \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon} = A \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (8)$$

式中 $A' = A_1/2^n$, $\alpha = \beta/n$ 。

假设 2519 铝合金高温塑性变形时的 σ , $\dot{\epsilon}$ 和 T 之间关系满足式(4), 然后根据式(6)和式(8), 求出常数 n , α 和 β 。

对式(6)、(8)两边取对数分别可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A' - Q/(RT) + n \ln \sigma \quad (9)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A - Q/(RT) + \beta\sigma \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知, 当温度一定时, n 和 β 分别为 $\ln \dot{\epsilon}$ — $\ln \sigma$, $\ln \dot{\epsilon}$ — σ 曲线的斜率, 采用一元线性回归处理, 得 $\ln \dot{\epsilon}$ — $\ln \sigma$ 关系曲线, 如图 2(a) 所示, $\ln \dot{\epsilon}$ — σ 关系曲线如图 2(b) 所示。相关系数均大于 0.98。

n 值取图 2(a) 中峰值应力较低, 即温度为 350、400 和 450 °C 的 3 条直线斜率的平均值, 得到 $n = 11.08$, β 值取图 2(b) 中峰值应力较高, 即温度为 300、350、400 °C 的 3 条直线的平均值, 得 $\beta = 0.11969$, 则 $\alpha = \beta/n = 0.0108 \text{ mm}^2/\text{N}$

假定热变形激活能 Q 与温度 T 无关, 对式(4)两边分别取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 - Q/(RT) - n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (11)$$

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_{\dot{\epsilon}} \quad (12)$$

根据图 1 中不同温度下 2519 合金变形时的峰

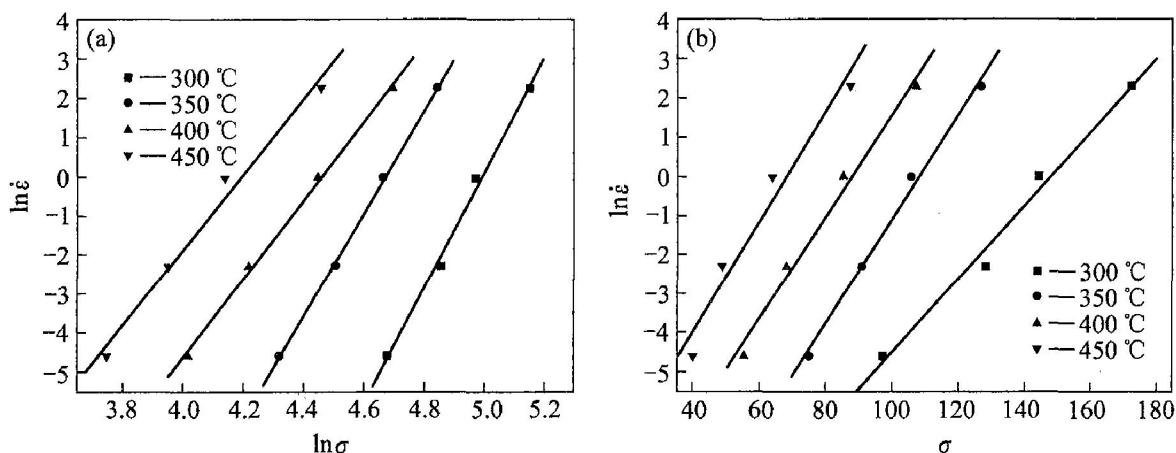


图 2 应变速率与流变应力的关系

Fig. 2 Relationships between strain rate and flow stress

(a) $-\ln \dot{\epsilon}$ — $\ln \sigma$; (b) $-\ln \dot{\epsilon}$ — σ

值应力、应变速率值和所求的 α 值代入式(11), 再用最小二乘法线性回归, 绘制出相应的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 关系曲线, 如图 3 所示; $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线如图 4 所示。式(12)中的第一项代表 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线的斜率, 第二项代表 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 关系曲线的斜率。由此, 可求得不同温度下变形激活能 Q 、应力指数 n 以及材料常数 A 值, 其值分别为: $Q = 189.83 \text{ kJ/mol}$, $n = 7.7563$, $A = 1.44 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$ 。

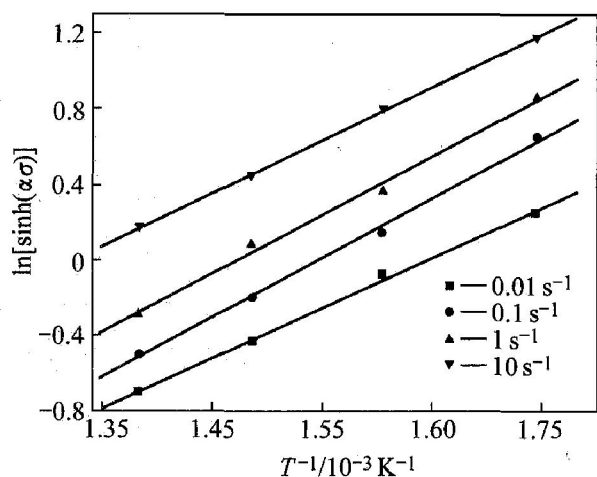


图 3 流变应力与变形温度的关系

Fig. 3 Relationships between flow stress and deformation temperature

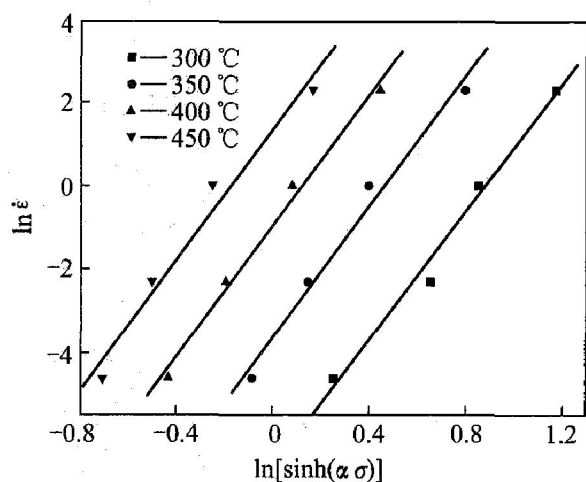


图 4 应变速率与流变应力的关系

Fig. 4 Relationships between strain rate and flow stress

对式(3)两边取对数可以得到:

$$\ln Z = \ln A_1 + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (13)$$

将前面求得的变形激活能 Q 代入式(2)得:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp[189.83 \times 10^3 / (RT)] \quad (14)$$

将不同变形温度下合金热变形得应变速率代入

式(14)得到不同的 Z 值, 再与对应的峰值应力一起代入式(11), 用最小二乘法线性回归, 绘制相应的 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线, 如图 5 所示。采用一元线性回归分析可得出两者的关系为: $\ln Z = 33.036 + 720 \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 。显然 2519 合金流变应力双曲正弦项的自然对数和 Z 参数的自然对数间满足线性关系。由此可见, 可以用包含 Arrhenius 项的 Z 参数描述 2519 合金高温压缩变形时的流变行为。

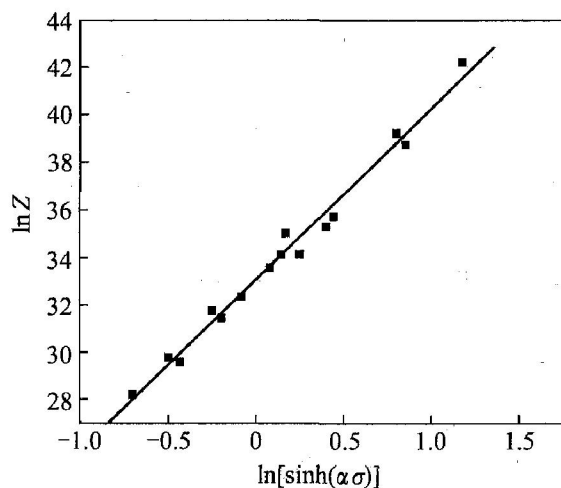


图 5 流变应力与 Z 参数的关系

Fig. 5 Relationship between flow stress and Zener-Hollomon parameter

将所求参数代入方程(4)可得实验合金的应力—应变关系方程:

$$\dot{\epsilon} = 1.44 \times 10^{14} [\sinh(0.0108\sigma)]^{7.7563} \times \exp[-189.83 / (RT)] \quad (15)$$

3 分析与讨论

上述分析表明, 2519 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, 可用 Zener-Hollomon 参数来描述其流变应力。

金属在较高温度下塑性变形时, 同时存在着加工硬化和动态软化两个过程。加工硬化是由于在外加应力下使位错密度增加, 位错之间互相交割, 以致许多位错被钉扎住而难以运动。动态软化则使位错密度降低和位错重新排列成低能量状态的组织。在热变形过程中, 主要的软化过程为动态回复和动态再结晶。

2519 铝合金的塑性变形的流变行为是与变形体内的位错组态密切相关的, 变形初期, 需要较高的能量来启动位错; 流变应力达到峰值以后, 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增值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尺寸、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”, 表现强烈的动态回复行为^[13-15]。变形条件, 尤其是应变量, 应变速率和变形温度决定了合金的组织演变过程和流变行为。

一般认为, 金属在应变速率较低时, 因发生动态再结晶导致应力—应变曲线出现波浪峰现象。但在本实验并未发生, 说明在实验温度范围内, 低应变速率条件下合金在热变形过程中主要发生动态回复, 而在高温、高应变速率下出现了波浪峰现象。这是由于在高温、高应变速率下进行变形, 变形时间短, 螺型位错的交滑移和刃型位错的攀移所产生的动态回复有限, 亚晶界未能很好的形成, 晶内的位错密度依然保持较高水平, 从而使得金属内部的储能迅速增加, 达到了发生动态再结晶所需的驱动力, 最终导致动态再结晶的发生。

REFERENCES

- [1] Fisher Jr, James J. Aluminum alloy 2519 in military vehicles[J]. *Advanced Materials and Processes*, 2002, 160(9): 43-46.
- [2] Carter H B, David H E, Ashok S, et al. Transient crack growth behavior in aluminum alloys C415-T8 and 2519-T87[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 62(1): 1-22.
- [3] Carter H B, David H E, Ashok S, et al. Creep crack growth behavior of aluminum alloy 2519: Part I-experimental analysis[J]. *ASTM Special Technical Publication*, 1997, 1297(1): 3-18.
- [4] Kramer L S, Blair T P, Blough S D, et al. Stress-corrosion cracking susceptibility of various product forms of aluminum alloy 2519[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, 11(6): 645-650.
- [5] 陈险峰, 彭大暑, 张 辉, 等. 热处理制度对 2519 铝合金板材力学性能和应力腐蚀敏感性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 934-938.
CHEN Xian-feng, PENG Da-shu, ZHANG hui, et al. Influence of heat treatment on mechanical properties and stress corrosion sensitivity of 2519 aluminum alloy plate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 934-938.
- [6] Dymek S, Dollar M. TEM investigation of age-hardenable Al2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 81(2/3): 286-288.
- [7] 李慧中, 张新明, 陈明安, 等. 2519 铝合金焊接接头的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(6): 956-960.
LI Huizhong, ZHANG Xir-ming, CHEN Ming-an, et al. Microstructures and properties of welded joint of 2519 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(6): 956-960.
- [8] 沈 健. AA7050 铝合金的热加工变形特征[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(4): 593-597.
SHEN Jian. Hot deformation behaviors of AA7005 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(4): 593-597.
- [9] 林高用, 张 辉, 郭武超, 等. 7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(3): 412-415.
LIN Gao-yong, ZHANG Hui, GUO Wu-chao, et al. Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(3): 412-415.
- [10] 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, 1996.
SHEN Jian. Study on the Plastic Deformation Behavior of 2091 Al-Li Alloy at Elevated Temperatures [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1996.
- [11] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain-rate upon the plastic flow of steel[J]. *J Appl Phys*, 1944, 15(1): 22-27.
- [12] Shi H, McLaren A J, Sellars C M, et al. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys[J]. *Mater Sci Eng*, 1997, 13(3): 210-216.
- [13] McQueen H J, Yue S, Ryan N D, et al. Hot working characteristics of steels in austenitic state[J]. *J Mater Process Technol*, 1995, 53(1/2): 293-310.
- [14] Mcqueen H J, Fry E, Belling J. Comparative constitutive constants for hot working of Al-4.4Mg-0.7Mn (AA5083)[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10(2): 164-172.
- [15] ZHANG Xir-ming, SONG Ming, ZHOU Zhuo-ping, et al. Microstructure and mechanical properties of 2104 aluminum alloy forgings made by a new process [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(2): 139-143.

(编辑 陈爱华)