

几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流动本构模型

郭伟国, 田宏伟

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 建立了塑性流动本构模型, 对 Al3003-H12、2219-T87、7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 5 种典型的铝合金在应变率从 10^{-4} /s 到 8 000 /s, 初始温度从 77 K 到 800 K 以及真实应变超过 0.50 条件下进行系统实验, 并对塑性流动行为进行分析。结果表明: 这些铝合金材料具有应变率效应; 铝合金材料应变率敏感性可归于短程障碍对热激活位错运动的影响; 在 200~600 K 时, 这些材料存在第三类动态应变时效现象。基于热激活位错运动机制, 推出一个物理概念的本构模型, 比较得出的模型预测结果和实验结果一致, 可方便用于工程应用。

关键词: 铝合金; 塑性流动; 应变率; 动态应变时效; 本构模型

中图分类号: TG 142.7

文献标识码: A

Strain rate sensitivity and constitutive models of several typical aluminum alloys

GUO Wei-guo, TIAN Hong-wei

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to evaluate the strain rate sensitivity and set up the constitutive model of aluminum alloys, five types of aluminum alloys as Al3003-H12, 2219-T87, 7050-T7451, 2024-T351 and LY12-cz were systematically tested under strain rate range of 10^{-4} –8 000 /s, initial temperature of 77–800 K and the true strain exceeding 0.50. The plastic flow behavior of these materials was also analyzed. The results show that the plastic flow stress of these aluminum alloys is really sensitive on the strain rates. The aluminum alloys have strain rate sensitivity due to a thermally-activated resistance effect of short-range barriers. The third kind of dynamic strain aging occurs at temperature of 200–600 K. Finally, based on the mechanism of dislocation motion, a physically based model is established. The theoretical predictions agree well with the experimental results, and it can be easily used in the engineering application.

Key words: aluminum alloy; plastic flow; strain rate; dynamic strain aging; constitutive model

众所周知, 铝合金材料广泛应用于各个工程领域, 在过去数年对其力学性能的研究中^[1-3], 得出铝合金的力学性能依赖于温度和应变率, 其塑性流动应力随温度、应变率和应变的变化而变化, 而热激活位错运动是其塑性流动行为的机理。同时, 也有研究发现, 7050、2024 和 LY12-cz 铝合金塑性流动应力对应变率几乎不敏感^[4-5], 像 3004 铝合金还具有负应变率效应^[6]。在铝合金材料本构预测模型的应用方面, Johnson-Cook

模型或其修正式在工程中得到了广泛应用, 但在应用中发现此模型对工作硬化率随应变率增加而下降或保持常数行为的预测不理想^[7], 因此, 研究者通过对此模型的修改以达到拓广此模型的应用^[8]。近年来, 在航空航天领域的结构设计中, 工程科技人员为了提高 Al3003-H12、2219-T87^[9-10]、7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 这些铝合金材料的使用效率, 以获得更高的结构设计极限, 急需对这些材料在很宽温度、很宽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872169); 国防科技工业民用专项科研技术资助项目

收稿日期: 2007-10-22; 修订日期: 2008-10-16

通讯作者: 郭伟国, 教授, 博士; 电话: 029-88494859; E-mail: weiguo@nwpu.edu.cn

应变率范围和大变形下的性能进行深入、全面理解。为了深入揭示这些材料在极端环境下的力学行为, 近年来, 本文作者对这 5 种铝合金材料的塑性流动行为进行了较系统的研究。本文作者对这些材料在应变率从 10^{-4} /s 到 10^4 /s, 初始温度从 77 K 到 800 K 范围内的结果进行分析, 探讨铝合金材料的应变率敏感性以及塑性流动中所呈现的现象。同时, 基于热激活位错运动机制和系统的实验研究, 导出一个可供工程应用的物理概念本构预测模型, 并对模型预测结果和实验结果进行分析和讨论。

1 铝合金材料塑性流动特征

1.1 铝合金的应变率效应

图 1 所示为 2219-T87 铝合金的塑性流动应力与真应变的关系。从图 1 中可看出, 在室温下, 当应变率从 10^{-2} /s 提高到 2 200 /s 时, 等温塑性流动应力大约会提高 100 MPa。图 2 所示为 Al3003-H12 铝合金在真实应变为 0.20 时的塑性流动应力与真应变率的关系。由图 2 可看出, 当应变率超过 1 000 /s 时, 流动应力迅速增加。图 1 和 2 反映了这 2 种材料的塑性流动应力强烈地依赖于应变率, 即它们是对应变率敏感的。图 3 所示为 7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 铝合金的塑性流动应力与应变的曲线。从图 3 中可以看出, 当应变率从 10^{-4} /s 增加到 2 000 /s 时, 7050-T7451 和 LY12-cz 的流动应力增加大约 40 MPa, 2024-T351 增加大约 20 MPa, 这些增加值比 2219-T87 和 Al3003-H12 铝合金的增加值小。但应变率的增加反映了材料具有应变率效应。

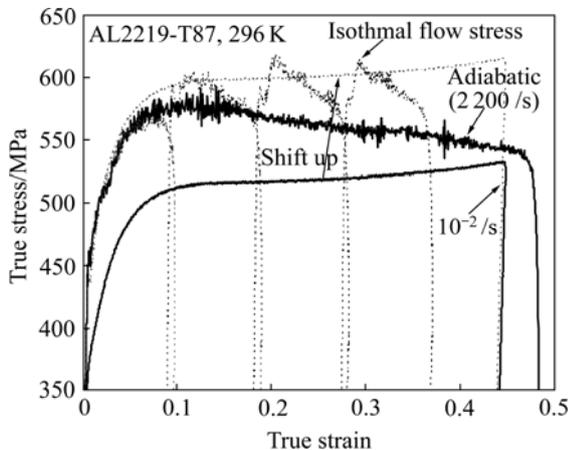


图 1 应变率对 2219-T87 铝合金塑性流动应力的影响
Fig.1 Effect of strain rate on plastic flow stress of 2219-T87 aluminum alloy

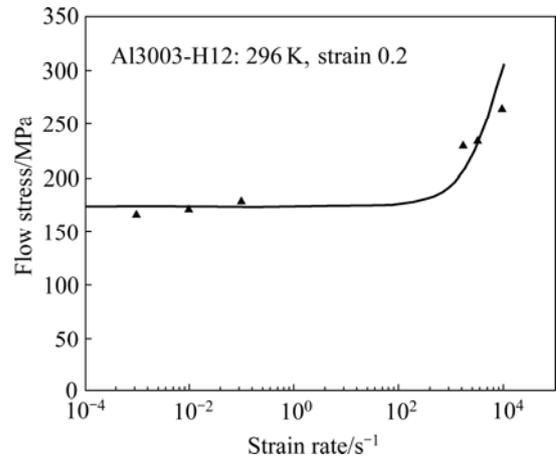


图 2 应变为 0.20 时 Al3003-H12 铝合金塑性流动应力与应变率的关系

Fig.2 Relationship between plastic flow stress and strain rate of Al3003-H12 aluminum alloy at strain of 0.20

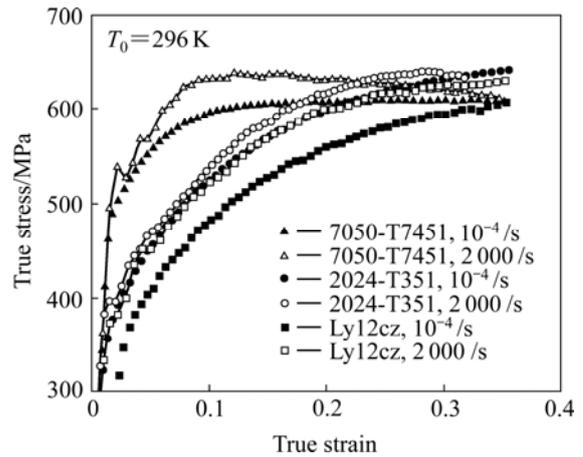


图 3 应变率对 7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 铝合金塑性流动应力的影响

Fig.3 Effects of strain rate on plastic flow stresses of 7050-T7451, 2024-T351 and LY12-cz aluminum alloys

1.2 温度效应及动态应变时效现象

为了研究铝合金的温度效应, 对铝合金进行了不同温度的实验。图 4 所示为 Al3003-H12 在应变率分别为 10^{-3} /s 和 3 200 /s 时的流动应力随温度的变化。由图 4 可看出, 当温度增加时, 流动应力并不是连续下降, 而是存在一个缓慢区, 如图中 $T_{0.001}$ 区和 T_{3200} 区(示意区域划分按照: 起点为应力由迅速下降转缓的拐点; 终点为第 2 次应力迅速下降改变点)。随着应变率从 10^{-3} /s 增加到 3 200 /s, 这个区域移到更高的温度范围内。图 5 所示为应变率为 0.1 /s 时 7050-T7451 铝合金塑性流动应力随温度的变化曲线。由图 5 可看出,

对于 7050-T7451 铝合金, 当应变率为 0.1 /s 时, 在温度从 210 K 到 480 K 范围内(T_i 至 T_c), 塑性流动应力随温度增加而增加, 即存在一个温度负敏感现象。图 6 所示为 7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 3 种铝合金材料所存在的温度负敏感区(即 210 K 到 480 K)。这个温度负敏感区(应力随温度增加由下降转为增加)实际上是一种第三类动态应变时效现象^[11-12]。动态应变时效是应变率和温度同时作用的效果, 金属中溶质原子的增加会加剧这种现象。由此可看出, 在铝合金的力学性能测试中, 若温度处在动态应变时效区, 塑性流动应力对温度和应变率的变化会出现反常或负指数变化, 即表现出对温度或应变率的敏感性异常。

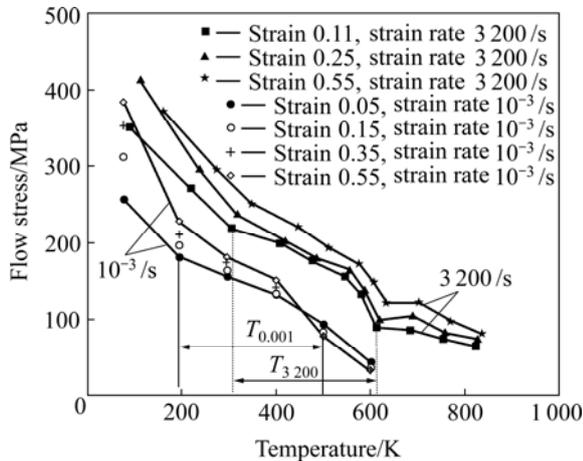


图 4 不同应变率下 Al3003-H12 铝合金塑性流动应力随温度的变化曲线

Fig.4 Change curves of plastic flow stress with temperature of Al3003-H12 aluminum alloy at different strain rates

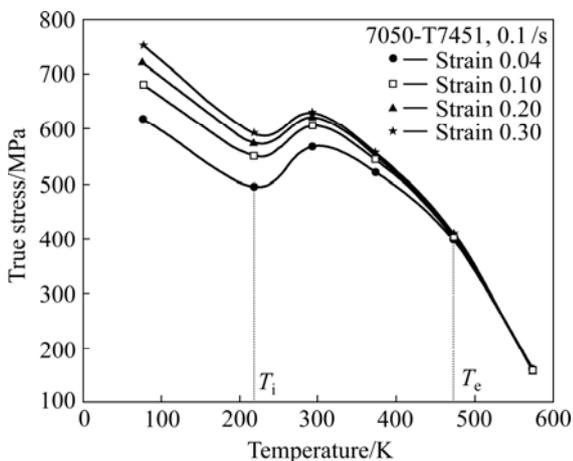


图 5 应变率为 0.1 /s 时 7050-T7451 铝合金塑性流动应力随温度的变化曲线

Fig.5 Change curves of plastic flow stress with temperature of 7050-T7451 aluminum alloy at strain rate of 0.1 /s

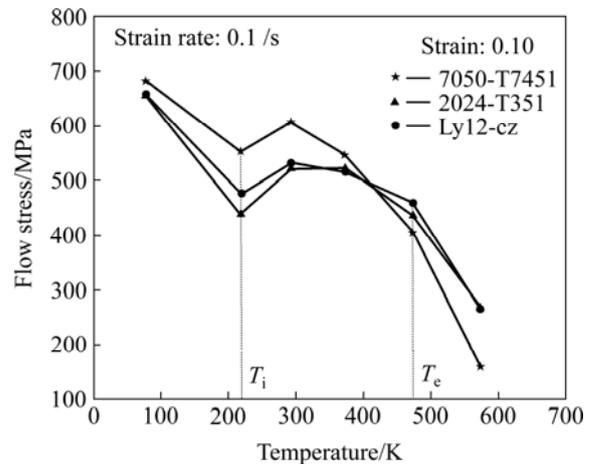


图 6 7050-T7451、2024-T351 和 LY12-cz 铝合金塑性流动应力随温度的变化曲线

Fig.6 Change curves of plastic flow stress with temperature of 7050-T7451、2024-T351 and LY12-cz aluminum alloys at strain rate of 0.1 /s

2 物理概念本构模型

2.1 模型的建立

基于 FCC 材料模型的建立^[13]和位错动力学理论, 本文作者对铝合金材料本构模型建立过程简述如下。

众所周知, 对多晶体金属和合金材料, 流动应力 τ 主要由 2 部分组成: 热激活部分 (τ^*) 和非热部分 (τ^a)。总流动应力可表示为: $\tau = \tau^a + \tau^*$ 。

非热应力 τ^a 应不受温度和应变率 $\dot{\gamma}$ 的影响或影响较小, 实验结果往往表明在高温区呈现此特征, 从高温区塑性流动曲线拟合, 有:

$$\tau^a \approx a_0 + a_1 \dot{\gamma}^n + \dots \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 \dots 和 n 为依据实验确定的参数。

热激活部分 τ^* 是温度 T 、应变率 $\dot{\gamma}$ 和材料本身结构变量的函数。为了建立 $\dot{\gamma}$ 、 T 和 τ^* 的关系, 需要了解 ΔG (激活自由能) 与 τ^* 的关系。在此借鉴 KOCKS 等^[14]建立的 ΔG 与 τ^* 的经典关系式:

$$\Delta G = G_0 \left[1 - \left(\frac{\tau^*}{\hat{\tau}} \right)^p \right]^q \quad (2)$$

式中 $0 < p \leq 1$ 和 $1 \leq q \leq 2$ 描述的是塑性流动曲线的形状; $\hat{\tau}$ 是 0 K 时的剪切滑移应力, 在温度为 0 K 时, 位错不需要热激活的作用就可以越过能垒(或障碍), 通常将流动应力与温度的曲线向 0 K 温度延伸可得此值; G_0 为自由能。 $\dot{\gamma}$ 与 ΔG 的关系可用 Orowan 方程描述:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) \quad (3)$$

式中 $\dot{\gamma}_0$ 为指数前项。组合方程(2)和(3)可得:

$$\tau^* = \left\{ \hat{\tau} \left[1 - \left(\frac{kT}{G_0} \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_r} \right)^{1/q} \right] \right\}^{1/p} + a_1 \gamma^n \quad (4)$$

若材料的塑性流动应力不受应变率和温度的影响, 则式(4)可以较好地预测材料的塑性流动应力。

塑性流动应力强烈地依赖于应变率、温度和累积应变, 实际上反映了材料的微观结构发生了演化。则热激活部分 τ^* 变为式^[13,15]:

$$\tau^* = \tau^0 \left\{ 1 - \left[-\frac{kT}{G_0} \left(\ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + \ln f(\gamma, T) \right) \right]^{1/q} \right\}^{1/p} \times f(\gamma, T) \quad (5)$$

$$\text{式中 } f(\gamma, T) = 1 + a \left[1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^2 \right] \gamma^{1/2}。$$

2.2 模型预测与实验结果比较

对 2219-T87, 从图 1 可看出, 若将 10^{-2} /s 时的应力应变曲线平行上移, 可发现此曲线与 2 200 /s 时的等温曲线一致, 说明流动应力不受应变率的影响, 直接采用式(4)得到模型预测结果, 如图 7 所示。通过比较可看出, 模型结果与实验结果一致, 具体模型及参数为:

$$\tau^* = \left\{ 300 \left[1 - \left(-8.65 \times 10^{-5} T \cdot \ln \frac{\dot{\gamma}}{2 \times 10^{10}} \right)^2 \right] \right\} + 520 \gamma^{0.04} \quad (6)$$

而对 Al3003 铝合金, 塑性流动应力受应变率、温度和累积应变的影响, 参照式(4)和(5), 得出具体本构模型为

$$\tau = 72 \left\{ 1 - \left[-3.2 \times 10^{-5} T \left(\ln \frac{\dot{\gamma}}{2 \times 10^{10}} + \ln f(\gamma, T) \right) \right]^{1/q} \right\}^{1/p} \times f(\gamma, T) + 64 \gamma^{0.4} \quad (7)$$

$$T = T_0 + 0.41 \int_0^\gamma \alpha d\gamma$$

$$f(\gamma, T) = 1 + 6 \left[1 - \left(\frac{T}{916} \right)^2 \right] \gamma^{0.05}$$

图 8 和 9 所示为不同温度和不同应变率下的模型预测结果与实验结果。由图 8 和 9 可看出, 实验数据和模型预测结果一致。

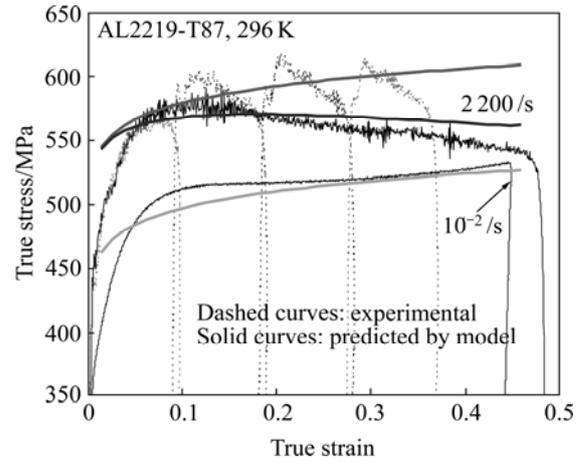


图 7 不同应变率下模型预测结果和实验结果比较

Fig.7 Comparison of model predictions with experimental results at different strain rates

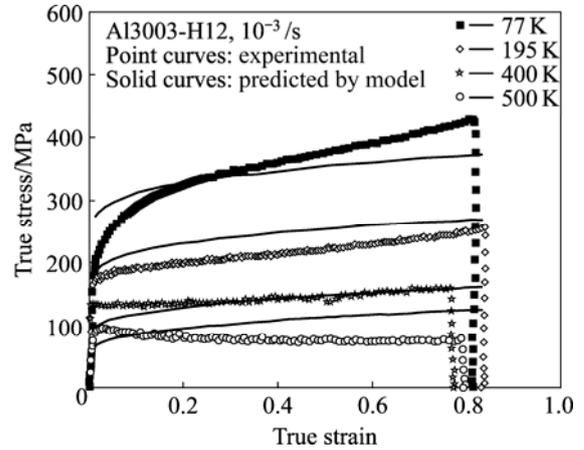


图 8 在应变率 10^{-3} /s 时不同温度下模型预测结果与实验结果比较

Fig.8 Comparison of model predictions with experimental results at different temperatures and strain rate of 10^{-3} /s

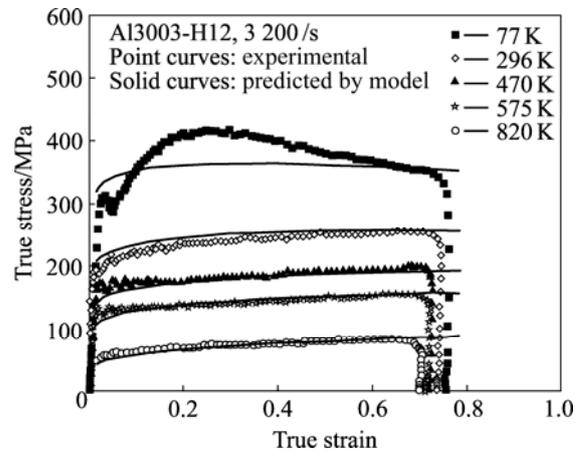


图 9 在应变率 3 200 /s 时不同初始温度下模型预测结果与实验结果比较

Fig.9 Comparison of model predictions with experimental results at different initial temperatures and strain rate of 3 200 /s

3 应变率敏感性与时效影响的分析

3.1 铝合金应变率敏感性的分析

通过以上研究获知: 1) 5种铝合金的塑性流动应力对应变率是敏感的, 其中7050-T7451、2024-T351和LY12-cz铝合金对应变率的敏感性弱; 2) 在室温附近(200~600 K)存在程度不同的“第三类动态应变时效”现象^[11-12]。

通常, 粘弹性材料和弹塑性材料普遍具有应变率效应, 这是由于材料的塑性流动是位错克服各种障碍的滑移运动过程, 这个过程依赖于应力、温度、应变率和材料本身微观结构。已有研究表明, 铝合金的塑性流动应力强烈地依赖于温度。按照位错运动学和动力学理论, 铝合金的塑性流动应力也受应变率的影响, 这种影响归于短程障碍对热激活位错运动的影响。但已有的一些研究发现, 7050、2024和LY12-cz铝合金塑性流动应力对应变率几乎不敏感^[4-5], 甚至3004铝合金具有负应变率效应^[6], 本文作者认为, 这是“第三类动态应变时效”现象所致^[11-12]。图10所示为“第三类动态应变时效”与静态时效和Portevin-Lechatelier锯齿型动态应变时效的比较结果。

3.2 动态时效影响分析

“静态应变时效”是指溶质原子向不动位错扩散, 在位错附近或位错核形成气团, 位错被钉扎。如果施加外力足够高, 位错会挣脱溶质原子的束缚而运动或滑移, 即位错的脱钉过程。在应力应变曲线上, “静态应变时效”的过程见图10中曲线1, 通常, 时效的时间越长, 最高屈服点应力就越高。而常说的动态应变时效是指在塑性变形中位错的重复钉扎(不连续或重复的屈服出现)^[16-17](见图10的曲线2), 这个现象常称为Portevin-Lechatelier(PLC)效应, 动态应变时效是变形和时效同时发生的过程。在相同的应变率下, 当温度 T_2 比 T_1 高时, 随温度提高, 流动应力不是下降, 而是整体流动应力曲线或局部曲线上升, 本文作者称之为“第三类动态应变时效”^[12](见图10的曲线3), 实际上, 这种现象几乎存在于所有金属中^[12]。

本研究结果表明, 在室温附近(即200~600 K), 铝合金材料存在第三类动态应变时效, 在时效区, 铝合金有可能表现为对温度和应变率变化不是很敏感, 已有的实验结果也证实在此温度区域, 7050-T7451、2024-T351和LY12-cz材料受应变率的影响很小, 甚至不敏感。由于铝合金对应变率的敏感性很小, 若对同

一材料实验过程、样品取样位置、材料批次及材料处理等不严格一致, 由此引起的实验结果分散性有时会比应变率变化引起的差异大, 这可能是室温附近铝合金对应变率不敏感的原因。当然, 在工程应用中将对应变率敏感性弱简化为对应变率不敏感不会引起较大的误差。

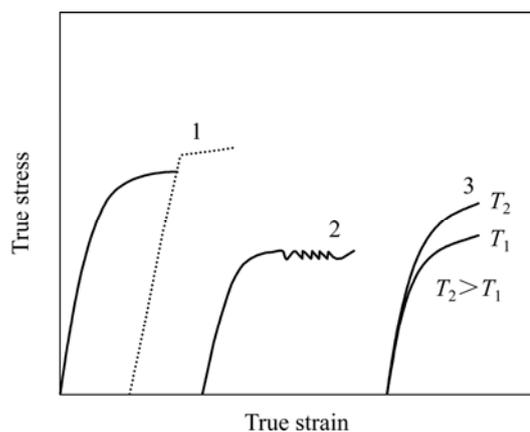


图10 应变时效的示意图

Fig.10 Schematic diagram of strain aging: 1—Static strain aging; 2—PLC dynamic strain aging; 3—Third dynamic strain aging

4 结论

- 1) 铝合金材料具有应变率效应。
- 2) 铝合金对应变率的敏感性可归因于短程障碍对热激活位错运动的影响。
- 3) 当温度为200~600 K时, 铝合金塑性流动应力存在程度不同的第三类动态应变时效现象, 此时效的出现会导致塑性流动应力随温度和应变率异常变化(或不敏感)。
- 4) 基于热激活位错运动机制, 给出了物理概念的本构模型, 模型计算结果和实验结果一致, 此模型可方便用于工程应用。

REFERENCES

- [1] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平. 2519铝合金热变形流变行为[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 621-625.
LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping. Hot deformation behavior of 2519 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 621-625.
- [2] 林高用, 张辉, 郭武超, 彭大暑. 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, PENG Da-shu. Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3): 412-415.
- [3] 赵寿根, 何 著, 杨嘉陵, 程 伟. 几种航空铝材动态力学性能实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 982-985.
- ZHAO Shou-gen, HE Zhu, YANG Jia-ling, CHENG Wei. Experiment investigation of dynamic material property of aluminium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 982-985.
- [4] 高玉华. 铝合金 Lc4 和 LY12cz 在高应变率拉伸和压缩下的本构关系[J]. 材料科学与工艺, 1994, 2(2): 24-29.
- GAO Yu-hua. Dynamic compression and tensile properties of Al alloys Lc4 and LY12cz at high strain rate[J]. Materials Science and Technology, 1994, 2(2): 24-29.
- [5] 高玉华. 铝合金 Lc4 和 LY12cz 应变率相关力学性能的实验研究[J]. 上海力学, 1995, 16(1): 61-66.
- GAO Yu-hua. An experimental study of rate-dependence materials Al-alloys Lc4 and LY12cz[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1995, 16(1): 61-66.
- [6] PENG K, CHEN W, QIAN K. Study on dynamic strain aging phenomenon of 3004 aluminum alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2006, A415: 53-58.
- [7] LIANG R Q, KHAN A S. A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures[J]. Int J of Plasticity, 1999, 15: 963-980.
- [8] RULE W K, JONES S E. A revised form for the Johnson-Cook strength model[J]. Int J Impact Eng, 1998, 21(8): 609-624.
- [9] HAMPTON R W, NELSON D. Stable crack growth and instability prediction in thin plates and cylinders[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 469-491.
- [10] KAIBYSHEV R, KAZAKULOV I, GROMOV D, MUSIN F, LESUER D R, NIEH T G. Superplasticity in a 2219 aluminum alloy[J]. Scripta mater, 2001, 44: 2411-2417.
- [11] 钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 陈文哲, 张好国, 彭开萍. 金属和合金中的动态应变时效现象[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 8-23.
- QIAN Kuang-wu, LI Xiao-qi, XIAO Lin-gang, CHEN Wen-zhe, ZHANG Hao-guo, PENG Kai-ping. Dynamic strain aging phenomenon in metals and alloys[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Sciences Edition, 2001, 29(6): 8-23.
- [12] GUO Wei-guo. Dynamics strain aging during the plastic flow of metals[J]. Key Engineering Materials, 2002, 340-341: 823-828.
- [13] 郭伟国. 高导无氧铜在大变形、不同温度和不同应变率下的流动应力和本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25: 244-250.
- GUO Wei-guo. Flow stress and constitutive model of OFHC Cu for large deformation, different temperatures and different strain rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25: 244-250.
- [14] KOCKS U F, ARGON A S, ASHBY M F. Progress in materials science[M]. Oxford: Pergamon, 1975: 1-271.
- [15] Nemat-Nasser S, Li Y L. Flow stress of fcc poly crystals with application to OFHC Cu[J]. Acta Mater, 1998, 46: 565-577.
- [16] KUBIN L P, ESTRIN Y, PERRIER C. On static strain ageing[J]. Acta Metall, 1992, 40: 1037-1044.
- [17] KLOSE F B, ZIEGENBEIN A, WEIDENMULLER J, NEUHÄUSER H, HÄHNER P. Portevin-LeChatelier effect in strain and stress controlled tensile tests[J]. Computational Materials Science, 2003, 26: 80-86.

(编辑 李艳红)