

基于单向拉伸的防锈铝合金温热力学性能研究

郎利辉, 许爱军, 李 涛, 赵香妮

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 通过不同温度及应变速率下的单向拉伸试验, 获得了 5A06-O 防锈铝合金板材关键力学性能参数的变化规律。结果表明, 在一定的应变速率下, 5A06 铝合金的流动应力及抗拉强度随着温度的升高而降低, 断后延伸率随着温度的升高而显著的提高。当温度处在 20 ~ 150℃ 范围内, 均匀延伸率随着温度的升高而升高, 而在 150℃ ~ 300℃ 范围内, 随着温度的升高而降低。另外, 基于 Fields & Backofen 本构方程, 对 5A06 铝合金在不同温度状态下的强化规律进行了分析和探讨, 结果表明, 随着温度的逐渐升高, 应变强化指数不断减小, 应变速率敏感系数则显著增大, 应变速率强化作用明显增强。

关键词: 防锈铝合金; 温成形; 热成形; 成形性能; 本构方程

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5053.2012.1.004

中图分类号: TG389

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2012)01-0016-05

结构轻量化是当今制造业的发展趋势, 采用轻质材料是实现结构轻量化的重要途径, 铝合金具有较低的密度、较高的比强度、比模量、断裂韧性和疲劳强度, 以及良好的成形工艺性能, 因而在航空、航天、汽车、电子行业中得到了越来越多的应用, 成为轻量化技术中替代钢铁的主要材料之一^[1-4]。5A06 铝合金是一种国产的延性合金材料, 属于 Al-Mg 系合金, 具有抗腐蚀、易于成形加工、可焊性及低温性能良好、不可热处理强化等特点, 现已经得到了广泛的应用^[5]。但是, 5A06 铝合金在常温延伸率较小, 成形性能较差, 这严重制约了其更广泛应用⁰。国内外的有关学者通过研究表明^[6-9], 在特定的条件下, 采用温热成形技术将铝合金板加热到一定温度时成形, 铝合金成形能力将得到极大的提高。在铝合金温热成形过程中, 铝合金的温热力学性能参数与温度和应变速率息息相关, 是温热成形有限元模拟中必备的重要参数^[10]。国内对 5A06 铝合金的研究较多集中在常温力学性能^[5]、焊接性能^[4,11]和抗腐蚀性能^[12]等方面, 但对其温热力学性能的研究报道不多。为了研究 5A06 铝合金在温热变形过程中流动应力与应变速率和温度之间的关系, 引入

了 Fields & Backofen 本构方程, 通过其直接描述温度和应变速率等参数对流变应力的影响, 来描述材料变形过程中的流变应力, 在铝合金温热成形中得到了广泛的应用^[13,14]。因此基于 Fields & Backofen 本构方程研究 5A06 防锈铝合金的温热力学性能, 对我们进一步研究铝合金的温热成形技术有重要的意义。

本研究在 20 ~ 300℃, 对 5A06-O 防锈铝合金板进行了不同应变速率下的单向拉伸试验, 获得了其真实应力应变关系曲线和关键力学性能参数, 研究了温度和应变速率对成形性能指标的影响规律, 并基于 Fields & Backofen 本构方程, 得到了不同温度下的应变强化指数和应变速率敏感系数的变化规律。

1 试验及其结果

1.1 试验材料与设备

试验材料: 5A06-O 防锈铝合金板材, 厚度为 1.2mm, 其化学成分如表 1 所示。

试验设备: CSS-44050 电子万能试验机, 采用封闭式炉箱整体对流加热。热电偶直接接触式测量, 试验最高温度可达 450℃, 箱体内部温度误差为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

1.2 试验方法

试验试样制备与试验方法均按 GB/T 4338—2006《金属材料高温拉伸试验方法》进行。试样几何形状及

收稿日期: 2010-09-20; 修订日期: 2011-02-02

基金项目: 国家自然科学基金 (10577001)

作者简介: 郎利辉 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事柔性介质成形技术及成形过程数值模拟及优化的研究

通讯作者: 许爱军, 博士研究生, (E-mail) hitxuaijun@163.com。

其尺寸如图 1 所示,长度方向与轧制方向一致。

表 1 5A06 防锈铝合金板化学成分(质量分数/%)
Tab. 1 Chemical compositions of 5A06 aluminium alloy(mass fraction/%)

| Mg | Si | Fe | Cu | Mn | Zn | Ti | Ni | Al |
|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| 6.1 | 0.47 | 0.26 | 0.03 | 0.6 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | Bal. |

试验步骤:试验温度设置分别为 20℃,150℃,200℃,250℃和 300℃,试验采取恒应变速率控制的方式进行,应变速率分别为 0.00055s⁻¹,0.0055s⁻¹和 0.055s⁻¹,同一条件下进行三次试验,当温度达到设定的目标值时,试样保温 10min,以保证整个试样上的温度一致。

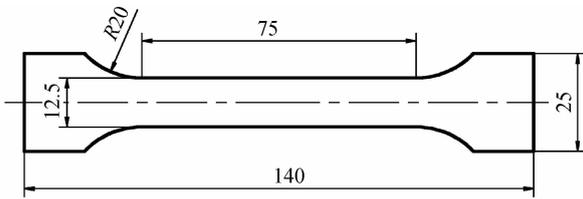


图 1 单拉试样几何形状及尺寸

Fig. 1 Geometry and dimensions of the specimen used for uniaxial tensile test

1.3 试验结果

1.3.1 应力应变关系

图 2 所示为 5A06 在不同温度和应变速率下单向拉伸试验获得的真实应力-应变曲线。图 3 为在不同应变速率下,5A06 板抗拉强度随温度的变化规律。从图 2 及图 3 中可以看出:在应变速率不变的情况下,抗拉强度随着温度的升高而

减小,同时流变应力显著下降,而应变随着温度的升高显著增加;当应变速率为 0.00055s⁻¹时,温度从 20℃ 上升到 300℃ 时,抗拉强度从 442.5MPa 降低到 101.1MPa,降低了 77.2%,降势明显。当温度高于 150℃ 时,不同应变速率下,抗拉强度随着温度的下降幅度基本一致,抗拉强度对应变速率不敏感。

另外,在温度为 20℃,应变速率为 0.00055s⁻¹时,拉伸曲线呈现锯齿状,应力数值反复跌落,即产生 Portevin-Le-Chatelier (PLC) 效应。从图中可以看出,随着应变速率增大,PLC 效应显著减小。这是因为,从微观角度看,PLC 效应是可动位错和溶质原子之间的动态相互作用,即动态应变时效 (DSA)。随着应变速率增大,作用在可动位错上的外加有效应力就大,从而可动位错的平均运动速率加快,可动位错在障碍前的等待时机就短,当溶质原子的扩散速率不如可动位错的运动速率时,DSA 效应就会减弱,此时,锯齿应力幅度也显著减小。因此,当应变速率增大到 0.055s⁻¹时,锯齿已不明显。另外,随着温度的升高,PLC 效应减小,这是因为高温下热激活增强了位错越过障碍的能力,减少锯齿应力的发生,从而减小了 PLC 效应。

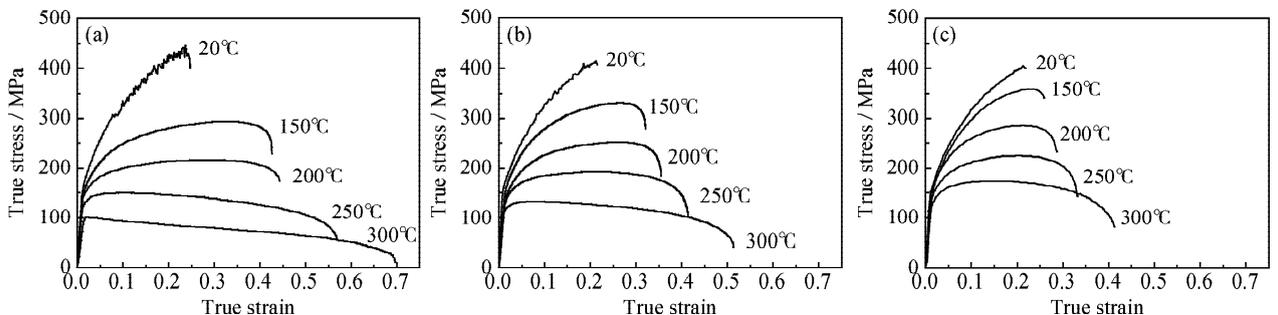


图 2 不同温度和应变速率下的真实应力-应变曲线 (a) $\dot{\epsilon} = 0.00055s^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 0.0055s^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 0.055s^{-1}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of 5A06-O aluminum alloy at different temperatures and strain rates

(a) $\dot{\epsilon} = 0.00055s^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon} = 0.0055s^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon} = 0.055s^{-1}$

1.3.2 延伸率

延伸率是判断材料塑性好坏的直接性能指标。延伸率越大,允许的塑性变形程度越大。图 4 为

5A06 在不同应变速率下,断后延伸率随温度的变化规律。从图中可以看出,断后延伸率随着温度的升高而显著增加,随着应变速率的降低而增加,且应变

速率越低,温度的对其的影响越明显。因此,该合金在低的应变速率和高的温度下可获得较好的成形性能。

均匀延伸率是指试样在拉伸过程中受最大力作用下的总的伸长率,其中包含残余应变和弹性应变,反映了试样真实的变形能力。图 5 为 5A06 在不同

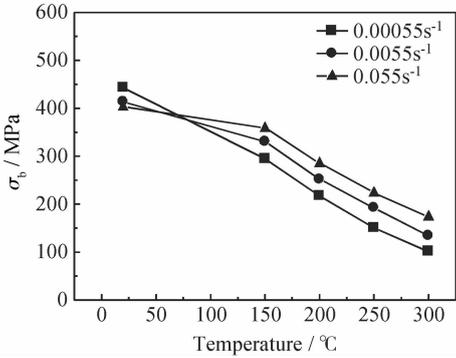


图 3 不同应变速率下的温度对抗拉强度的影响
Fig. 3 Influence of temperature on ultimate tensile strength at different strain rates

应变速率下,均匀延伸率随温度的变化规律。可以看出,在 150℃ 以下,随着温度的升高,材料的均匀延伸率升高,在 150℃ 以上,随着温度的升高,均匀延伸率却降低,并且这一趋势随着应变速率的降低得到增强。也就是说在较高的温度和较低的应变速率下,总延伸率的提高主要是通过局部变形得到。

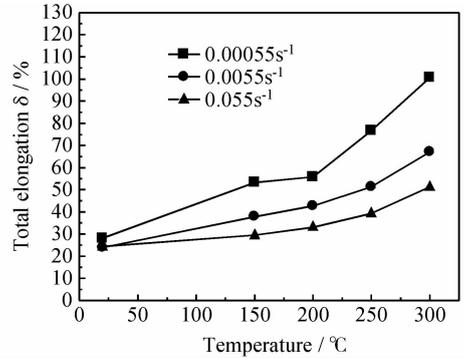


图 4 不同应变速率下温度对断后延伸率的影响
Fig. 4 Influence of temperature on total elongation at different strain rates

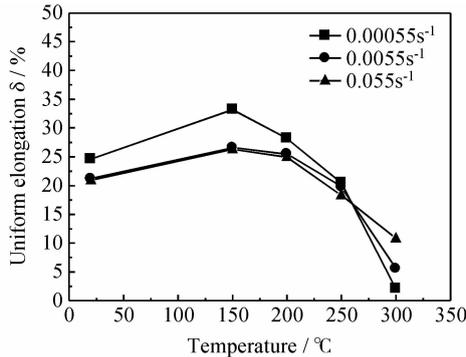


图 5 不同应变速率下温度对均匀延伸率的影响
Fig. 5 Influence of temperature on uniform elongation at different strain rates

2 本构方程

2.1 Fields & Backofen 本构方程

在热成形的过程中,材料的任何应变以及流动应力主要取决于变形温度和应变速率。因此在综合考虑应变和应变速率对流动应力的影响时,材料在不同温度和不同应变速率条件下的单向拉伸曲线可表示为

$$\sigma = f(K, \varepsilon^n, \dot{\varepsilon}^m, T) \quad (1)$$

式中 ε 为应变, $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, T 为温度, K 为应变强化系数, n 为应变强化指数和 m 为应变速率敏感系数, K, n 和 m 这三个参数均是与温度 T 有关的材料常数。

为更好地研究 5A06 铝合金温度和应变速率对

温热成形性能的影响,本文基于同时考虑应变强化和应变速率强化的 Fields & Backofen 本构方程来描述其应力-应变速率关系:

$$\sigma(T) = K(T) \varepsilon^{n(T)} \dot{\varepsilon}^{m(T)} \quad (2)$$

式中 $K(T)$ 为应变强化系数; $n(T)$ 为应变强化指数; $m(T)$ 为应变速率敏感系数。

2.2 应变强化指数

应变硬化指数 n 反映了板材成形过程中的形变硬化能力。 n 值越大,板材的局部应变能力越强,总体成形极限越大。

在一定温度下的应变强化指数 n 可以在材料本构方程式(2)的基础上,由式(3)计算得到

$$n = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}, T} \quad (3)$$

图 6 为不同应变速率下,5A06 铝合金应变强化

指数 n 随温度的变化趋势图。由图可知,在应变速率一定的情况下,随着温度升高,5A06 铝合金的强化指数逐渐降低,应变强化作用不断削弱。在温度一定的情况下,随着应变速率的增大, n 值增大,应变强化作用加强。当应变速率为 0.00055s^{-1} , 20°C 下,硬化指数为 0.32,而到 300°C 时硬化指数降低到 0.016,几乎降为零,应变强化能力基本丧失。总体说来,降低幅度非常大。

2.3 应变速率敏感系数

应变速率敏感系数是指材料塑性变形时的流变应力对于应变速率的敏感性参数,即当应变速率增大时材料强化倾向的参数。

同样,在一定温度下的应变速率敏感系数 m 可

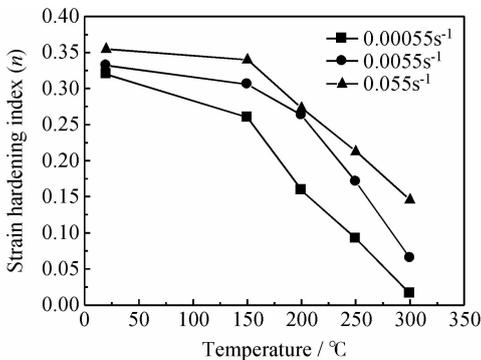


图 6 应变强化指数随温度变化趋势

Fig. 6 Influence of temperature on strain hardening index at different strain rates

以在材料本构方程式(2)的基础上,由式(4)计算得到

$$m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{\epsilon, T} \quad (4)$$

图 7 为 5A06 铝合金应变速率敏感系数 m 随温度的变化趋势图。从图中可以看出,温度对 5A06 的应变速率敏感系数有极其重要的影响。当温度较低时, m 值较小,在 20°C 时, m 值几乎为零,随着温度的逐渐升高, m 值不断增大,到 300°C 时增大到 0.12,此时应变速率敏感性明显加强,材料的均匀变形的能力增强。因此为保证其成形性能,需要综合考虑温度和应变速率对其成形性能的影响。

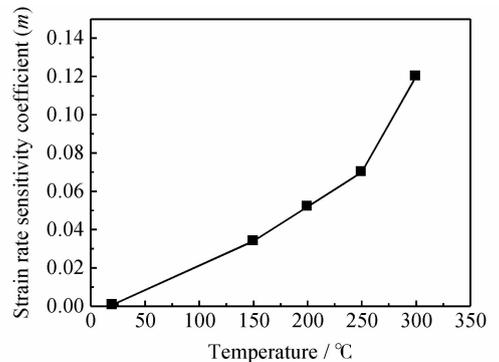


图 7 应变速率敏感系数随温度变化趋势

Fig. 7 Influence of temperature on strain rate sensitivity index at different strain rates

3 结论

(1) 变形温度对 5A06 铝合金的流变应力及抗拉强度有显著影响,流变应力及抗拉强度随着变形温度的升高而降低。

(2) 在温热状态下,5A06 铝合金断后延伸率随着温度的升高而显著提高,均匀延伸率随着温度的升高先升高后降低。

(3) 5A06 铝合金的应变强化指数随着温度的升高和应变速率的降低而不断减小,应变速率敏感系数随着温度的升高而增大。为保证其成形性能,需要综合考虑温度和应变速率对其成形性能的影响。

参考文献:

[1] LIU Xiao-jing, XU Yong-chao, YUAN Shi-jian. Effects of

Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2008, 24(3): 395 - 399.

[2] JIN Cheng, HE Shi-yu, ZHOU Guang-tao, et al. Experimental and numerical investigations of void damage in aluminum alloy welds under thermal cycling condition [J]. Materials Science and Engineering(A), 2009, 499: 171 - 176.

[3] YAO Wei, WU Ai-ping, ZOU Gui-sheng, et al. 5A06/TA2 diffusion bonding with Nb diffusion-retarding layers [J]. Materials Letters, 2008, 62: 2836 - 2839.

[4] 汪兴均, 黄文荣, 魏齐龙, 等. 电子束焊接 5A06 铝合金接头 Mg 元素蒸发烧损行为分析[J]. 焊接学报. 2007, 27, (11): 61 - 63.

[5] 张占峰, 于国林, 周德钦. 羽毛状晶组织对 5A06 铝合金疲劳性能的影响[J]. 轻合金加工技术. 2009, 37, (12): 39 - 41.

[6] 刘合军, 郎利辉, 李涛, 等. 高强度铝合金板材的温热介质充液成形研究[J]. 塑性工程学报 2009, 16(1): 31

- 36.

- [7] LI Daoming, GHOSH Amit. Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(145): 281 - 293.
- [8] PALUMBO G, TRICARICO L. Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens[J]. Journal of Material Processing Technology, 2007,(184):115 - 123.
- [9] 齐军,何祝斌,苑世剑. 铝合金管材热态内高压成形研究[J]. 航空材料学报, 2006,26(3):99 - 102.
- [10] WU Xiang-dong, WAN Min, HAN Fei, *et al.* Stress-strain curves for different loading Paths and yield loci of aluminum alloy sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006,16:s51460 - s1464.
- [11] CHEN Yan-bin, MIAO Yu-gang, LI Li-qun, *et al.* Joint performance of laser-TIG double -side welded 5A06 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009,19:26 - 31.
- [12] 高淑明,李广宇,冯正海. 5A06 铝合金板材腐蚀性能的研究[J]. 轻合金加工技术. 2001,29,(6):45 - 47.
- [13] 刘合军,郎利辉,李涛. 铝合金板材温热成形性能[J]. 塑性工程学报,2009,16(3):145 - 149.
- [14] LI Daoming, GHOSH Amit. Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures [J]. Materials Science and Engineering, 2003(352): 279 - 286.

Research on Warm and Hot Mechanical Property of Corrosion-resisting Aluminum Alloy Sheet Based on Uniaxial Tensile Test

LANG Li-hui, XU Ai-jun, LI Tao, ZHAO Xiang-ni

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191 China)

Abstract: The uniaxial tensile tests of corrosion-resisting aluminum alloy sheet 5A06-O with thickness of 1.2mm were performed at various temperatures ranging from 20°C to 300°C and at different strain rates in this study. It is shown that the flow stress and ultimate tensile strength of 5A06-O aluminum alloy in uniaxial tension decreases as the deformation temperature increases, while the total elongation increases along with the temperature increases. However, the uniform elongation increases with the temperature increasing from 20°C to 150°C, while decreases with the temperature increasing from 150°C to 300°C. In addition, hardening law of 5A06-O at different temperatures were analyzed and discussed based on Fields & Backofen constitutive equation. It is indicated that the strain hardening index decreases with increasing temperature, while the strain rate sensitivity coefficient increases observably along with the temperature increases.

Key words: corrosion-resisting aluminum alloy; warm forming; hot forming; forming property; constitutive equation