5A06-O 铝镁合金板材温热成形本构方程研究

杨希英,郎利辉,刘康宁,郭禅

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院,北京 100191)

摘要:目的 提出 5A06-O 铝镁合金板材在不同温度及应变率条件下的统一本构方程。方法 采 用 CCS-88000 电子万能试验机对 5A06-O 铝镁合金板材进行不同变形温度和应变速率条件下的单 向拉伸试验。结果 随着温度的升高,流变应力明显下降,同时,应变会显著增加;在常温时,应变 速率对流变应力的影响不明显,但当温度高于 150 ℃时,流变应力均随着应变速率的增加而升高。 结论 提出了在温热条件下描述材料复杂流变曲线本构方程的建模方法-增函数相减法,通过该方 法建立的本构方程形式简单,能够反映温度和应变率的影响,实现对复杂流变曲线较为准确的描述。

关键词:铝镁合金;温热成形;本构方程;流变应力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.01.004

中图分类号:TG146.22
文献标识码:A
文章编号:16

文章编号:1674-6457(2015)01-0022-05

Constitutive Equation of

5A06-O Aluminium Magnesium Alloy Sheet in Warm/Hot Forming

YANG Xi-ying, LANG Li-hui, LIU Kang-ning, GUO Chan

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

ABSTRACT: To propose a unified constitutive equation of 5A06-O aluminum magnesium alloy sheet under the condition of different temperature and strain rate. Uniaxial tensile test of 5A06-O aluminum magnesium alloy sheet under the condition of different temperature and strain rate was conducted on a CCS-88000 electronic universal testing machine. With the increase of temperature, the flow stress decreased obviously and the maximum strain increased significantly. At room temperature, the influence of strain rate on flow stress was not obvious. When the temperature was higher than 150 $^{\circ}$ C, the flow stress was elevated with the increase of strain rate. A modeling method called increasing functions subtracted by each other was proposed to describe the complex flow stress-strain curve in warm/hot condition. The constitutive equation established by this method had a simple form, could reflect the influence of temperature and strain rate and describe the complex flow stress-strain curve more accurately.

KEY WORDS: aluminium magnesium alloy; warm/hot forming; constitutive equation; flow stress

轻量化是汽车及航空航天制造业的发展趋势, 采用轻质合金材料是轻量化的重要措施之一^[1-2]。 铝合金密度低,比强度较高,较高的断裂韧性和疲劳 强度,具有优良的导电性、导热性和抗蚀性。作为轻量化材料,铝合金在制造业领域有取代钢材的发展趋势^[3-8]。

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(50975014)

作者简介:杨希英(1985—),男,河北衡水人,博士研究生,主要研究方向为液压成形。

5A06 属国产铝镁合金,是一种具有代表性的轻质材料,在航空航天等制造领域得到广泛应用,但在常温下,受成形性的限制,主要用于低拉深比的零件及焊接结构,已严重限制了其应用的宽度及广度^[9-11]。在温热条件下,其成形性能将得到极大地改善^[12-15]。为此文中利用单向拉伸试验获得温热环境下的流变曲线,研究了 5A06-O 铝镁合金板材的温热成形性能和变形机理,以及流变应力随温度、变形程度和应变速率的变化规律;并针对温热条件下复杂的变形行为,提出了在温热条件下描述材料复杂流变曲线的统一本构方程的建模方法-增函数相减法。

1 实验材料及方法

试验用材为厚度 1.4 mm 的 5A06-O 铝镁合金 板材,其化学成分如表 1 所示。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,将试验用材按与轧制方向分别为 0°,45°和90°方向加工成如图 1 所示的形状和尺寸。

表1 5A06 铝镁合金板材化学成分(质量分数,%) Table 1 Chemical compositions of 5A06 alloy



图 1 试样的几何形状及尺寸



试验设备是长春试验机研究所制造的 CCS-88000 电子万能试验机。环境箱采用封闭式整体对 流加热。热电偶直接接触试件测量,控温精度可达 ±1.5℃。

试验方法:试验温度设置分别为 20,150,200, 250,300 ℃,每种温度下的拉伸速度分别取0.000 55, 0.005 5,0.055 mm/s,同一条件下进行 3 次试验,到 达设定温度后,均保温 10 min,以保证整个试件上的 温度一致。

2 实验结果及分析

图 2 为 5 A06-O 铝镁合金在不同变形温度和应 变速率条件下变形后的单向拉伸试样。在一系列不 同变形条件下的单向拉伸试验中,图中仅展示出了 2 种典型成形条件下的单拉试样,图 2a 为在 $\dot{\epsilon}$ = 0.005 5 s⁻¹时不同温度下单向拉伸变形后的试样, 图 2b 为 250 ℃时不同应变速率下单向拉伸变形后 的试样。



a ε =0.0055 s⁻¹时不同温度下 b 250 的单拉试样 的单

250 ℃时不同应变速率下 的单拉试样

图 2 不同温度和应变速率下拉伸变形后的试样 Fig. 2 Tensile specimens after deformation at different temperatures and strain rates

图 3 所示为不同应变速率时各温度下的真实应 力应变曲线。由图中可以看出,随着温度的升高,流 变应力明显下降,同时,应变会显著增加。当温度达 到 300 ℃时,将会产生明显的软化现象,产生上述 现象可从位错运动理论来解释,热激活使位错的 运动速度加快,或能穿过障碍,位错的快速运动也 提高了位错和相反符号的位错在同一滑移面相遇 时消失的速度。总体来说,不可运动位错的饱和 程度随着温度的升高而降低,因此硬化也随着温 度的升高而降低。应变速率的升高是和温度的降 低相对应的。

在常温时(20℃),应变速率对流变应力的影响 不明显;但当温度高于150℃时,流变应力均随着应 变速率的增加而升高,同时应变随之减小,且随着温 度的升高,应变速率的影响愈加明显。此外,还可以 看出,常温下的拉伸均产生了明显的屈服台阶,即吕 德带,而当温度升高到150℃以上时,吕德带立刻消 失。因此5A06-O 铝镁合金温成形不但可以降低设 备吨位,增加成形极限,而且能够改善常温下成形产 生吕德带而带来的制品表面不美观的现象。



国5 中国渔文中于时英天应力"英天应文画戏

Fig. 3 True stress-true strain curve under different strain rates

3 本构方程的建立

24

由前面分析可知,在温热条件下,轻质材料的变 形行为十分复杂,加工硬化和加工软化同时存在,实 现其准确描述的方程也往往十分复杂^[1],不利于推 广和应用。从分析流变曲线的形式出发,提出了简 单准确的本构方程建模方法。

为了便于分析,结合温热条件下材料流变曲线 的特点,把温热条件下材料的流变曲线分为3种形 式,如图4所示。①硬化占主导作用的应力单一增 加型;②初期硬化占主导,后期硬化与软化相消的应 力先增后稳型;③初期硬化占主导,后期软化占主导 的应力先增后减型。



图 4 3 种形式的流变曲线 Fig. 4 Three kinds of flow curves

如何实现上述流变曲线简单准确的描述是目前 的关键问题,由初等数学知识可知,在求不规则图形 的面积时,有一种常用的方法就是将所求的不规则 图形的面积看成若干基本规则图形的面积之差,如 图5所示,若求左边阴影部分不规则图形的面积,只 需先求出正方形面积再减去里面圆的面积即可。基 于这种思想,图4所示的复杂流变曲线的描述应该 也能用简单的函数模型相减得到。



图 5 不规则图形面积的求解方法 Fig. 5 The method of calculating the area of irregular graph

图 6 所示为 3 种不同流变形式利用简单函数相 减方法的描述,从图中可以看出,3 种不同的流变形 式均可用简单的增函数相减得到,其中 $\Delta\sigma$ 表示增 函数 σ_1 与温热成形应力 σ 的差值,称之为差值函数 $\Delta\sigma_0$



Fig. 6 Different forms of flow curves described by the method of increasing functions subtracted by each other

基于上述分析,复杂流变曲线的本构方程可以 由式(1)表示:

 $\sigma = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma_1(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) - \Delta \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ (1)

式中: σ 表示应力, ε 表示应变, ε 表示应变速 率,T 表示热力学温度,函数 σ_1 , $\Delta \sigma$ 可根据实际情 况的不同表示成不同的简单增函数,如幂函数或指 数函数等。另外,由图 6 可知,多数情况下 σ_1 只是 应变的函数,于是式(1)可简化为:

$$\sigma = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma_1(\varepsilon) - \Delta \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$
(2)

相对于常温来说,高温下流变应力的降低主要 是由温度的升高引起的加工软化所造成。鉴于此, 式(1)中 σ_1 可看成是由高温下应变对应的常温硬 化应力值,差值函数 $\Delta\sigma$ 可由 σ_1 减去温热条件下的 应力求得。

由图 3 可知,常温下的流变曲线可利用简单增 函数 Hollomon 本构方程进行拟合,如式(3)所示:

$$\sigma_1 = K_1 \varepsilon^{n_1} \tag{3}$$

式中, K_1 为强度系数, n_1 为应变强化指数。忽略常温下应变率对变形的影响,通过计算可得到 K_1 =710.02 MPa, n_1 =0.343 77。于是式(3)可表示成: σ_1 =710.02 $\varepsilon^{0.34377}$ (4)

将温热成形的应变值代入式(4),得到由高温 下应变对应的常温硬化应力值,用此应力值减去温 热成形时的应力值,即可得到应力差值函数 Δσ,不 同温度、不同应变率下的 Δσ 曲线描述如图 7 所示。





Fig. 7 Curve description of difference functions $\Delta\sigma$

从图中可以看出应力差值函数 $\Delta \sigma$ 也可用增函数 Hollomon 方程形式描述,则不同温度及不同应变率下的应力差值函数 $\Delta \sigma$ 可由方程式(5)表示:

 $\Delta \sigma = (\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = K_2 \varepsilon^{n_2}$ $\vec{x} \oplus K_2 = -813 \ 975/T + 997. \ 8, n_2 = A \cdot T + B,$ $\vec{x} \oplus K_2 = -813 \ 975/T + 997. \ 8, n_2 = A \cdot T + B,$

综上所述,在温热条件下,5A06-O 铝镁合金的 本构方程可表示为(6)的形式: $\sigma = 710. \ 02\varepsilon^{0.34377} - K_2\varepsilon^{n_2} (\ 150 \ ^{\circ}C \le T \le 300 \ ^{\circ}C ;$ $0.\ 000 \ 55 \le \dot{\varepsilon} \le 0.\ 055)$ (6)

图 8 所示为基于增函数相减法建立的本构方程 的计算曲线与试验所得曲线的对比。从图 8 可以看 出,此本构方程在不同的温度下,不管是对峰值前的 硬化阶段,还是在峰值后的软化阶段都有较好的描述。



图 8 计算曲线与试验曲线对比

Fig. 8 Comparison between calculated curves and test curves

4 结论

 1) 5A06-O 铝镁合金的流变应力随着温度的升高明显降低,而应变随着温度的升高显著增加;除常 温下流变应力对应变速率不敏感外,其他温度下,流 变应力均随着应变速率的增加而升高。

2)在温热条件下,5A06-O 铝镁合金的流变曲 线同时存在着加工硬化和加工软化,在峰值应力前 随着温度的升高,变形程度的增加,虽然流动应力继 续上升,但异号位错相互抵消或滑出表面而消失速 度加快,使得加工硬化的速率减缓;在峰值应力后, 随着温度的升高,速度的降低,变形程度的增大,动 态再结晶过程速度加快,软化现象愈加明显。

3)提出了在温热条件下描述材料复杂流变曲
 线的本构方程的建模方法-增函数相减法,可表示
 为:

 $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma_1(\varepsilon) - \Delta \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$

基于上述建模方法,建立了 5A06-O 铝镁合金 温热条件下的本构方程,此方程不管是对峰值前的 硬化阶段,还是在峰值后的软化阶段都有较好的描述。

参考文献:

- [1] TAYLOR B, LANNING H W. Warm Forming of Aluminum-production Systems//In:Proceedings of the 25th National SAMPE Symposium and Exhibition [R]. San Diego, CA:SAMPE, 1980.
- [2] 王高潮,李娟,徐雪峰,等. TC4 钛合金的超塑变形机制研究[J]. 精密成形工程,2011,3(6):22—25.
 WANG Gao-chao, LI Juan, XU Xue-feng, et al. Study on the Superplastic Deformation Mechanism of Ti-Alloy TC6
 [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011,3 (6):22—25.
- [3] 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(1/2):171-176.
- [4] 杨中玉,张津,郭学博,等. 铝合金的织构及测试分析 研究进展[J]. 精密成形工程,2013,5(6):1-7.

YANG Zhong-yu, ZHANG Jin, GUO Xue-bo, et al. Research Progress on Aluminum Alloy Texture and Test Analysis [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013,5(6):1-7.

- [5] LIU Xiao-jing, XU Yong-chan, 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.
- [6] 郎利辉,王永铭,谢亚苏,等. 某铝合金异形盒形件充 液成形坯料形状优化[J]. 精密成形工程,2013,5(3): 19—23.
 LANG Li-hui, WANG Yong-ming, XIE Ya-su, et al. The

Blank Optimization of Aluminum Alloy Irregular Box Sheet Hydroforming Process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(3):19–23.

 [7] 郎利辉,谢亚苏,王永铭.飞机大型复杂双曲度蒙皮充 液成形数值模拟及实验研究[J].精密成形工程, 2011,3(6):112—116.
 LANG Li-hui, XIE Ya-su, WANG Yong-ming. Aircraft

Large Complex Double Curvature Skin Hydroforming Numerical Simulation and Experiment Research [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3 (6): 112– 116.

- [8] CHEN Yan-bin, MIAO Yu-gang, I Li-qun, et al. Joint Performance of Laser-TIG Double-side Welded 5A06 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 9(1):26—31.
- [9] 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.

WANG Xing-jun, HUANG Wen-rong, WEI Qi-long, et al. Evaporation Loss of Mg Element in 5A06 Aluminium Alloy Electron Beam Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 27(11):61—63.

- YAO Wei, WU Ai-ping, ZOU Gui-sheng, et al. 5A06/TA2 Diffusion Bonding with Nb Diffusion-retarding Layers [J]. Materials Letters, 2008, 62 (17/18):2836-2839.
- [11] 丁少行,郎利辉,黄磊.2024 铝合金难成形高锥盒形件 充液成形数值模拟[J]. 精密成形工程,2014,6(3): 31-40.

DING Shao-hang, LANG Li-hui, HUANG Lei. Simulation Research on Hydroforming of Hard Forming Deep Taper-Shaped Part of 2024 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(3):31-40.

[12] 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.
QI Jun, HE Zhu-bin, YUAN Shi-jian. Research on Warm Hydroforming of Aluminum Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials,2006,26(3):99—102.

(下转第55页)

WU Meng-ling, WU Tai-bin. The Research of Molding Process Parameters on the Plastic Warpage's Influence [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2 (6):19-23.

- [4] XU G J. Study of Thin-wall Injection Molding[D]. Ohio: The Ohio State University,2004:8—10.
- [5] LOSCH K. Thin Wall Molding: Demanding but Rewarding[J]. Moder Plastics, 1997, 74(11):79-82.
- [6] 宋满仓,颜克辉,赵丹阳. 薄壁塑件注塑成形特性的试验研究[J]. 中国机械工程,2006,17(8):380—383.
 SONG Man-cang, YAN Ke-hui, ZHAO Dan-yang. Experimental Research on Injection Molding Characteristics for Thin Wall Plastic Parts[J]. China Mechanical Engineering,2006,17(8):380—383.
- [7] LIAO S J, CHANG D Y, CHEN H J, et al. Optimal Process Conditions of Shrinkage and Wapage of Thin-w all Parts
 [J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 44 (5): 917-928.
- [8] 王久林,李萍,李纪龙,等.基于模具补偿法的机械式
 胀形桥壳回弹控制[J].精密成形工程,2014,6(4): 31-35.

WANG Jiu-lin, LI Ping, LI Ji-long, et al. Springback Control of Mechanical Bulging Axle housing Based on Mold Compensation Method [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(4):31-35.

- [9] 李海梅,刘永志,申长雨,等. 注塑件翘曲变形的 CAE 研究[J]. 中国塑料,2003(3):53—58.
 LI Hai-mei, LIU Yong-zhi, SHEN Chang-yu, et al. Study on the Warpage of Injection Molded Parts by CAE[J]. China Plastics,2003(3):53—58.
- [10] SHOEMAKER J. Moldflow Design Guide: A Resource for

Plastics Engineers [M]. Carl Hanser GmbH Co, 2006: 35-27.

- [11] LIAO S J, CHANG D Y, CHEN H J, et al. Optimal Process Conditions of Shrinkage and Warpage of Thin-Wall Parts[J]. Engineering and Science, 2004, 44(5): 819-832.
- [12] 李海梅,申长雨,陈静波,等. 粘弹性本构关系在注塑模 CAE 中的应用[J]. 郑州工业大学学报,1999,20
 (2):12—14.
 LI Hai-mei, SHEN Chang-yu, CHEN Jing-bo, et al. Appli-

cations of Viscoelastic Constitutions for CAE of Injection Molding[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1999, 20(2):12—14.

- [13] 夏源,李聪. 某汽车零件注塑模设计及成形过程 CAE 分析[J]. 精密成形工程,2012,4(4):31—35.
 XIA Yuan,LI Cong. Design of Injection Mould and Forming CAE Analysis for Automobile Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2012,4(4):31—35.
- [14] 李海梅,顾元宪. 注塑的翘曲变形分析与成型尺寸预测[J]. 中国机械工程,2002,13(10): 820—823.
 LI Hai-mei, GU Yuan-xian. Warpage Analysis and Numerical Prediction of Molding Dimensions for Injection Molded Parts [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13 (10):820—823.
- [15] 杨雪春,董懿琼,彭伟,等.U型件回弹控制模具补偿法的研究[J].锻压技术,2009,34(1):42—45 YANG Xue-chun,DONG Yi-qiong,PENG Wei,et al. Research on Die Compensation Method Based on Springback Control of U-shaped Part[J]. Forging & Stamping Technology,2009,34(1):42—45.

(上接第26页)

[13] 刘大博,杨守杰,王克鲁,等.2D70 铝合金热变形行为 及加工图[J].中国有色金属学报,2013,23(8): 2077—2082.

> LIU Da-bo, YANG Shou-jie, WANG Ke-lu, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of Aluminum Alloy 2D70[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013,23(8):2077—2082.

[14] 郎利辉,许爱军,李涛,等.基于单向拉伸的防锈铝合金温热力学性能研究[J].航空材料学报,2011,32
 (1):15—19.

LANG Li-hui, XU Ai-jun, LI Tao, et al. Research on

Warm and Hot Mechanical Property of Corrosion-resisting Aluminum Alloy Sheet Based on Uniaxial Tensile Test [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 32 (1): 15—19.

 [15] 张志,郎利辉,李涛,等.高强度铝合金7B04-T6板材温 拉伸本构方程[J].北京航空航天大学学报,2009,35
 (5):600-603.

ZHANG Zhi, LANG Li-hui, LI Tao, et al. Constitutive Equations of High Strength Aluminum Alloy Sheet [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(5):600-603.