

文章编号: 1001-1455(2009)03-0306-06

# 5A06 铝合金的动态本构关系实验\*

林木森, 庞宝君, 张 伟, 迟润强

(哈尔滨工业大学高速撞击研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 运用材料试验机和分离式霍普金森压杆装置(SHPB)对 3 种不同加工及热处理状态的 5A06 铝合金在常温~500 °C、应变率为  $10^{-4}$ ~ $10^3$  s<sup>-1</sup> 下的力学行为进行了实验研究。基于 Johnson-Cook (JC) 本构模型, 通过实验数据拟合得到了每种状态下材料的本构模型参量。对 Johnson-Cook 本构模型中的应变率强化项作了修正, 修正后的 Johnson-Cook 本构模型与实验数据基本吻合, 从而确立了 3 种状态下 5A06 铝合金的动态本构关系。

**关键词:** 固体力学; 动态本构关系; 霍普金森压杆; 5A06 铝合金; Johnson-Cook 本构模型

**中图分类号:** O347.4      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

## 1 引 言

5A06 铝合金是一种国产的延性合金材料, 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, 在航空航天、交通运输、船舶和汽车制造、海洋工程等领域应用广泛。5A06 铝合金构件在复杂工作环境中可能会受到各种动态载荷的作用, 掌握它的动态力学性能十分重要。国外对铝镁合金动态力学性能的研究工作开展得较早<sup>[1-3]</sup>, 但这些成果只能对国产 5A06 铝合金的研究提供定性参考; 国内对 5A06 铝合金的研究较多集中在超塑性<sup>[4-5]</sup>、焊接性能<sup>[6]</sup>和抗腐蚀<sup>[7]</sup>等方面, 对其动态力学性能的研究报道不多。王礼立等<sup>[8]</sup>利用自制霍普金森杆对 LF6R(5A06-H112)的应力-应变关系进行了研究, 结果表明 LF6R 为应变率不敏感材料; 管公顺等<sup>[9]</sup>开展了单层 5A06 铝合金板高速撞击实验研究; 吴大方等<sup>[10]</sup>对 5A06 铝合金在瞬态热冲击条件下的力学性能进行了研究。

上述研究表明, 对 5A06 铝合金在较宽温度和应变率范围的动态本构关系研究较少。在实际工程应用中, 会对材料进行不同的加工及热处理, 掌握加工及热处理状态对 5A06 铝合金动态力学性能的影响也十分重要。目前, 国内文献中还未见对 5A06 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参量的公开报道。

本文中运用材料试验机对 3 种不同加工及热处理状态的 5A06 铝合金进行静态压缩性能测试(常温~500 °C), 得到他们在准静态载荷下的应力应变曲线, 利用 SHPB 对其动态本构关系进行研究, 分析加工及热处理状态对其动态力学性能的影响, 拟合得到相应的 Johnson-cook 本构模型参量, 通过与实验数据对比对 Johnson-Cook 本构模型进行修正。

## 2 5A06 铝合金力学性能实验

实验所用的 5A06 铝合金由东北轻合金公司提供。材料的具体化学成分(质量分数)为: Mg(5.8%~6.8%), Mn(0.5%~0.8%), Ti(0.02%~0.10%), Be(0.000 1%~0.005%), 其余为 Al。

选取直接经过热挤压成形的 5A06-H112 状态、5A06-O 状态(5A06-H112 状态在 370~390 °C 退火 2 h)和经过冷拔处理的 5A06-C 状态(5A06-H112 状态棒料经过截面积减少 13%左右冷拔处理, 定义为 5A06-C)进行研究。

\* 收稿日期: 2008-01-28; 修回日期: 2008-08-05

基金项目: 国家空间碎片专题研究基金项目(kjsp06211)

作者简介: 林木森(1979—), 男, 博士研究生。

## 2.1 静态实验及结果分析

运用 Instron5569 材料试验机和 Instron5500R 热模拟试验机开展了 3 种不同加工及热处理状态的 5A06 铝合金准静态压缩实验,得到了准静态条件下材料的应力应变关系及其随温度的变化规律。试件尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,长径比为 2;压缩应变率为  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ;压缩温度分别为常温、200、400 和 500  $^{\circ}\text{C}$ ;高温压缩试件在被加热到预定温度后保温 2 min 开始实验,试件两端面涂有石墨,以减小摩擦对所受应力状态的影响。

3 种状态 5A06 铝合金在准静态常温压缩下的真应力应变曲线如图 1(a)所示,图中曲线表明,经过冷拔加工的 5A06-C 铝合金屈服应力为 235.4 MPa,比 5A06-H112 铝合金的屈服应力(218.3 MPa)提高了 7.8%,提高幅度并不明显;经过退火的 5A06-O 铝合金的应力应变曲线在 5A06-H112 铝合金和 5A06-C 铝合金的曲线之下,屈服应力为 168.4 MPa,比 5A06-H112 铝合金的屈服应力下降了 22.9%。

3 种状态 5A06 铝合金在准静态高温压缩下的温度-屈服应力关系曲线如图 1(b)所示,图中曲线表明,3 种状态 5A06 铝合金的屈服应力均随温度的升高而降低;当温度从常温上升到 200  $^{\circ}\text{C}$ 时,5A06-H112、5A06-O 和 5A06-C 铝合金的屈服应力和常温比分别下降了 8.6%、3.4% 和 11.2%;在 200~400  $^{\circ}\text{C}$ 之间,他们的屈服应力均下降明显;当温度到达 500  $^{\circ}\text{C}$ 时,其屈服应力分别仅为常温下的 6.6%、8.4% 和 6.9%;3 种状态 5A06 铝合金的屈服应力随温度升高逐渐接近,在 500  $^{\circ}\text{C}$ 时相差小于 4%。

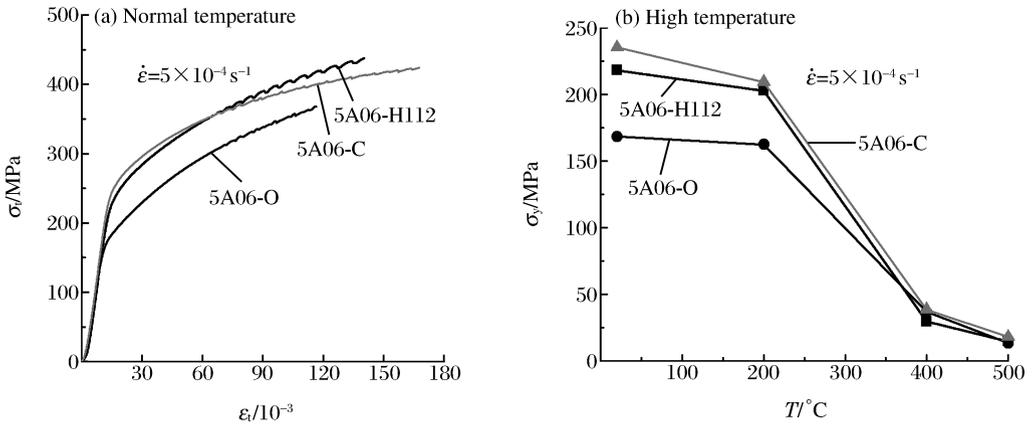


图 1 5A06 铝合金在准静态压缩下的应力应变和温度-屈服应力曲线

Fig. 1 Stress-strain and temperature-yield stress curves of 5A06 Al alloy under quasi-static compression

## 2.2 动态实验结果及分析

运用 SHPB 开展了 3 种状态 5A06 铝合金的常温动态压缩实验,得到了平均应变率在  $1\ 400 \sim 4\ 200 \text{ s}^{-1}$  的材料动态压缩力学性能。实验试件尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,长径比为 0.6;每种状态材料的动态压缩实验进行了 4 组,每组实验 3 次,取 3 次实验的平均值作为实验结果,试件在经过动态压缩后均未发生断裂破坏。示波器记录的实验典型波形如图 2 所示。由原始数据计算所得的 5A06-O 的应力-应变曲线及拟合曲线如图 3 所示。

3 种状态的 5A06 铝合金在不同应变率下的应力应变曲线如图 4(a)~(c)所示,在同一应变率  $3\ 300 \text{ s}^{-1}$  下的应力应变关系曲线如图 4(d)所示。

由图 4(a)~(c)可以看出,3 种状态下材料的动态屈服应力均随压缩应变率增加而增加,但增加的幅度并不明显。在  $\dot{\epsilon} \approx 4\ 100 \text{ s}^{-1}$  时,5A06-H112、5A06-O 和 5A06-C 铝合金的动态屈服应力相对准静态屈服应力分别增加了 17.1%、22.9% 和 26.8%。材料进入塑性阶段后,5A06-H112、5A06-O 铝合金在不同应变率下的流变应力幅值差较屈服点的幅值差减小,曲线更靠近;而 5A06-C 铝合金的流变应力随应变率的增加而增加的趋势较 5A06-H112、5A06-O 明显,各曲线之间也保持一定的间距。这表明 5A06-H112、5A06-O 铝合金为应变率不敏感材料,与王礼立等<sup>[8]</sup>等给出的结论一致;而 5A06-C 铝合金

由于冷拔加工使其材料组织结构发生了变化,对应变率的敏感性有所增加。由图4(d)可以看出,材料的加工及热处理对其动态屈服强度的影响。在 $\dot{\epsilon}=3\,300\text{ s}^{-1}$ 时,经过冷拔的5A06-C铝合金的动态屈服强度比5A06-H112铝合金提高了17%,而经过退火的5A06-O铝合金的动态屈服强度则比5A06-H112铝合金降低了19%。这表明,5A06铝合金虽然具有不可热处理强化的特点,但是可以通过冷加工的方式使其动态力学性能提高,而热处理在改善其组织均匀性的同时也相应降低了其强度。

由图还可看出,3种状态材料在不同应变率下的应力应变曲线之间呈现出大致平行的趋势,这表明他们的应变强化行为与应变率无关。3种状态材料在动态压缩下均有明显的屈服平台,其中5A06-C铝合金在屈服平台内的流变应力幅值变化最大,而5A06-O铝合金的变化最小。

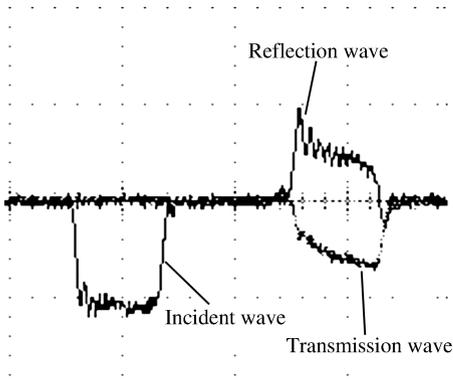


图2 示波器记录的动态压缩实验典型波形  
Fig. 2 Typical experimental waves of dynamic compression by oscilloscope

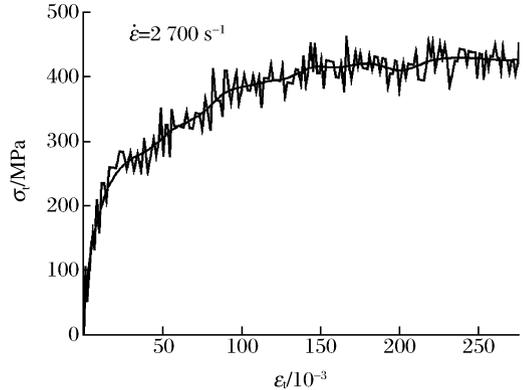


图3 5A06-O的应力应变计算曲线和拟合曲线  
Fig. 3 Stress-strain curves of 5A06-O

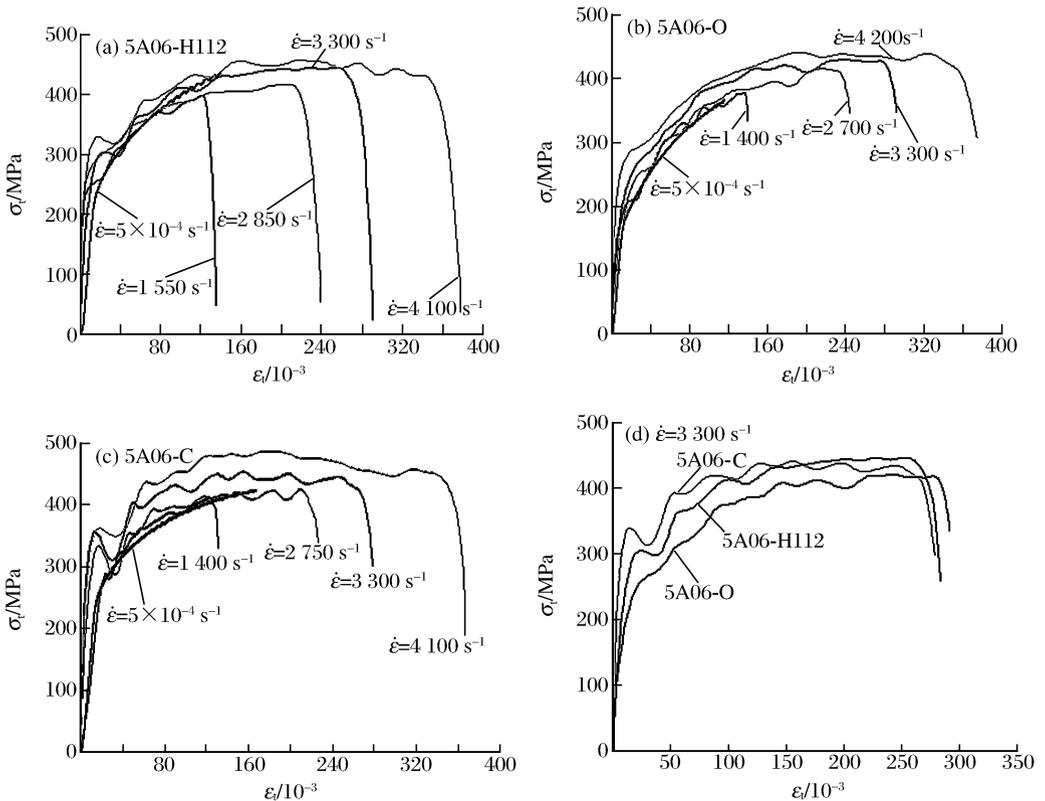


图4 5A06铝合金动态压缩应力应变曲线

Fig. 4 Dynamic compressive stress-strain curves of 5A06 Al alloy

### 3 5A06 铝合金的本构模型

#### 3.1 模型的选择及参量的确定

目前,人们已提出了多种本构模型来描述金属材料的动态响应行为,如 Johnson-Cook 模型、Campbell 模型等经验本构模型及 Steinberg-Guinan 模型、Zerilli-Amstrong 模型等基于物理学的本构模型。其中 Johnson-Cook 模型能较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应,由于形式简单,具有清晰的物理解释,且参数较少,在工程中得到了广泛的应用,如动力学程序 LS-DYNA、MSC、Dytran 和 ABAQUS/explicit 均采用了该模型。本文中也采用 Johnson-Cook 模型来描述 5A06 铝合金在一维应力状态下的动态本构关系。

Johnson-Cook 本构模型的表达式如下<sup>[11]</sup>

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \tag{1}$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  和  $m$  为待定参数,需要根据不同应变率和不同温度条件下的应力应变关系实验曲线拟合得到;  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ , 其中  $\dot{\epsilon}_0$  为准静态应变率,这里取  $\dot{\epsilon}_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $\epsilon$  为等效塑性应变;  $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ,  $T_r$  为室温,取  $T_r = 293 \text{ K}$ , 5A06 铝合金熔点  $T_m = 853 \text{ K}$ 。

由于静态实验为等温过程,而 SHPB 实验为绝热过程。在拟合中考虑了绝热过程中的温升效应所造成的软化效应,其温升

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c_p} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \tag{2}$$

式中:  $\eta$  为塑性功转化成热的因子;  $\rho$  为材料密度;  $c_p$  为材料比定压热容。

利用准静态常温实验和 SHPB 实验获得的屈服点-应变率关系拟合得到参数  $A$ 、 $C$ ; 利用准静态高温实验拟合得到参数  $m$ ; 将  $A$ 、 $C$  代入,同时考虑温升的影响,拟合得到  $B$ 、 $n$ 。通过静、动态实验拟合得到的 3 种状态 5A06 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参量如表 1 所示。

表 1 3 种状态 5A06 铝合金的 Johnson-Cook 模型参量

Table 1 Johnson-Cook model parameters of 5A06 Al alloy in three states

材料	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$n$	$m$
5A06-H112	218.3	704.6	0.0157	0.62	0.93
5A06-O	168.4	950.5	0.0165	0.71	1.08
5A06-C	235.4	622.3	0.0174	0.58	1.05

#### 3.2 修正的 Johnson-Cook 本构模型

图 5 给出了部分拟合数据与实验值的比较。由图可见,Johnson-Cook 本构模型并不能很好地描述 3 种状态 5A06 铝合金的应力应变行为,因此对其中的应变率敏感系数  $C$  进行修正,取  $C$  为  $\dot{\epsilon}$  的函数,即  $C = f(\dot{\epsilon})$ 。相应的 Johnson-Cook 本构模型表达式修正为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + f(\dot{\epsilon}) \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \tag{3}$$

利用(3)式重新对 3 种状态下材料的本构模型参数  $C$  进行拟合,其他参数仍采用前面所确定的值,得到修正后的 5A06 铝合金的 Johnson-Cook 本构模型为

5A06-H112

$$\sigma = (218.3 + 704.6\epsilon^{0.62})(1 + 10^{-4}\dot{\epsilon}^{0.5} \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^{0.93}] \tag{4}$$

5A06-O

$$\sigma = (168.4 + 950.5\epsilon^{0.71})(1 + 7.5 \times 10^{-5}\dot{\epsilon}^{0.6} \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^{1.08}] \tag{5}$$

5A06-C

$$\sigma = (235.4 + 622.3\epsilon^{0.58})(1 + 2 \times 10^{-5}\dot{\epsilon}^{0.75} \ln \dot{\epsilon}^*) [1 - (T^*)^{1.05}] \tag{6}$$

拟合结果与实验结果的对比如图 6 所示。由图可见,修正后的 Johnson-Cook 本构模型的计算结果

与实验值符合得更好,因此,用修正后的 Johnson-Cook 本构模型来描述 3 种状态下 5A06 铝合金的本构关系是比较合适的。

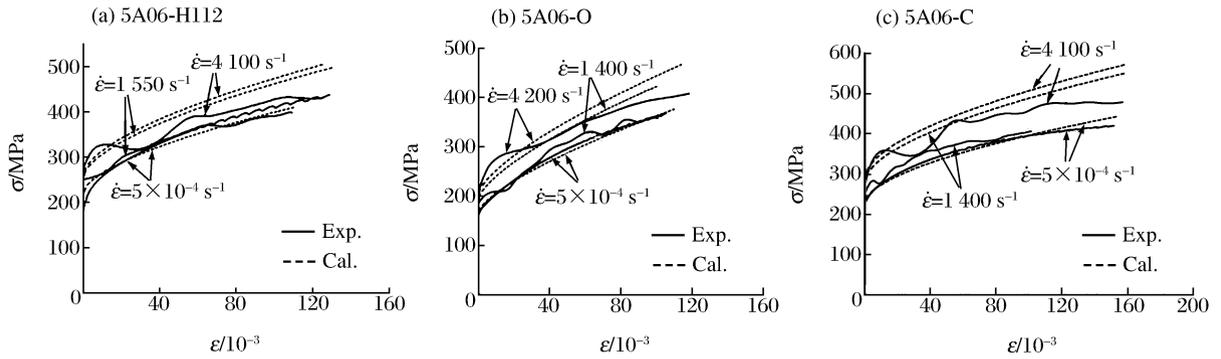


图 5 Johnson-Cook 本构模型的拟合结果

Fig. 5 Fitted results by the Johnson-Cook constitutive model

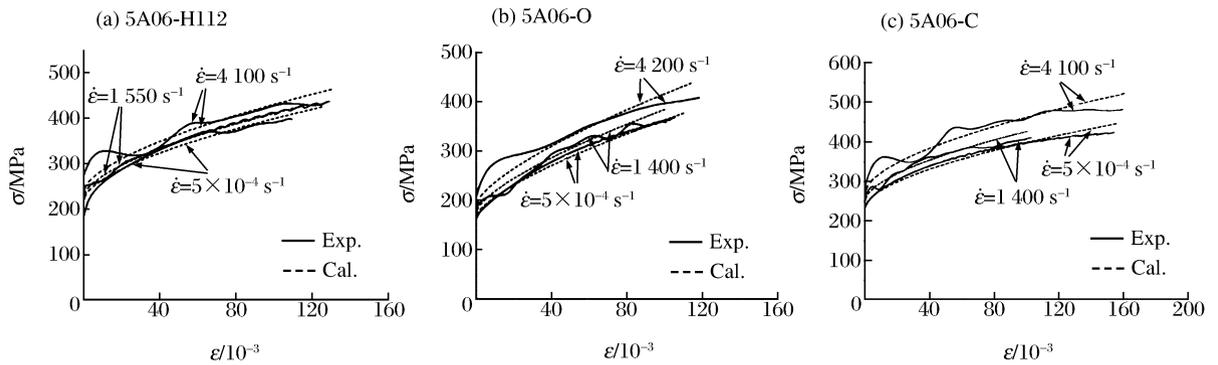


图 6 修正后 Johnson-Cook 本构模型的拟合结果

Fig. 6 Fitted results by the modified Johnson-Cook constitutive model

## 4 结论

利用静态常温、高温实验和 SHPB 的实验,对 3 种加工和热处理状态的 5A06 铝合金本构关系进行了研究,分析了加工及热处理状态对其力学性能的影响。拟合得到了每种状态下材料的 Johnson-Cook 本构模型参量,并对其中的参数进行了修正,使修正后的本构模型与实验结果吻合得更好。

本文中所得的 3 种加工及热处理状态下 5A06 铝合金的本构模型可以作为实际工程应用的参考,但考虑到拟合模型参数所用的实验数据是在一定应变、应变率和温度范围内的,因此,其适用范围还有待于进一步拓展。

## 参考文献:

- [1] Kanel G I, Ragorenov S V, Bogatch A A, et al. Spall fracture properties of aluminum and magnesium at high temperature[J]. Journal of Applied Physics, 1996,79:8310-8317.
- [2] Mukai T, Kawazoe M, Higashi K. Strain-rate dependence of mechanical properties in AA5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion[J]. Materials Science & Engineering: A, 1998,247(1-2):270-274.
- [3] Kawazoe M, Shibata T, Mukai T, et al. Elevated temperature mechanical properties of A 5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion[J]. Scripta Materialia, 1997,36(6):699-705.
- [4] 罗子健,郭乃成,龚泉源. LF6 铝合金超塑性研究[J]. 航空学报,1987,8(7):384-391.  
LUO Zi-jian, GUO Nai-cheng, GONG Quan-yuan. A study of the superplasticity of LF6 aluminium alloy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1987,8(7):384-391.

- [5] 龙霓东. LF6 超塑性变形断裂研究[J]. 航空材料学报, 1997, 17(2): 32-39.  
LONG Ni-dong. Deformation in LF6[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1997, 17(2): 32-39.
- [6] 赵慧杰, 何松, 耿红滨. 真空热循环作用下 LF6 合金焊接接头的拉伸性能和微观组织[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 33-39.  
ZHAO Hui-jie, HE Song, GENG Hong-bin. Tensile properties and microstructure of LF6 alloy welded joint subjected to thermal cycling[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 33-39.
- [7] 赵月红, 林乐耘. 不同加工及表面处理状态 LF6 铝镁合金的深海腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2001, 1: 27-31.  
ZHAO Yue-hong, LIN Le-yun. Corrosion behaviors of LF6 Al-Mg alloy with different processing and surface treatment in deep seawater[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 1: 27-31.
- [8] 王礼立, 胡时胜. 铝合金 LF6R 和纯铝 L4R 在高应变率下的动态应力应变关系[J]. 固体力学学报, 1986(2): 2-10.  
WANG Li-li, HU Shi-sheng. Dynamic stress-strain relations of Al alloy LF6R and Al L4R under high strain rates [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1986(2): 2-10.
- [9] 管公顺, 庞宝君, 迟润强, 等. 单层 5A06 铝合金板高速撞击实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(2): 144-150.  
GUAN Gong-shun, PANG Bao-jun, CHI Run-qiang, et al. Experimental investigation of high-velocity impact on 5A06 single sheet plate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(2): 144-150.
- [10] 吴大方, 宋昊, 李永亭, 等. 铝-镁合金 5A06 在瞬态热冲击条件下的力学性能研究[J]. 实验力学, 2006, 21(5): 591-595.  
WU Da-fang, SONG Hao, LI Yong-ting, et al. A study on mechanical properties of 5A06 Al-Mg alloy at transient heating[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(5): 591-595.
- [11] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, The Netherlands, 1983.

## Experimental investigation on a dynamic constitutive relationship of 5A06 Al alloy

LIN Mu-sen<sup>\*</sup>, PANG Bao-jun, ZHANG Wei, CHI Run-qiang  
(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Helongjiang, China*)

**Abstract:** Dynamic mechanical behaviors of 5A06 Al alloy by three kinds of processes and heat treatments were studied with the split Hopkinson pressure bar (SHPB) and static material test system over a wide range of strain rates and temperature. The Johnson-Cook constitutive relationship parameters were determined through these experiments. The strain-rate hardening term in the Johnson-Cook constitutive model was modified. The modified Johnson-Cook constitutive model is in agreement with the experimental data for 5A06 Al alloy.

**Key words:** solid mechanics; dynamic constitutive relationship; SHPB; 5A06 Al alloy; Johnson-Cook model

\* Corresponding author: LIN Mu-sen  
Telephone: 86-451-86417978-13

E-mail address: xiaolinhit@sina.com