

基于改进Johnson-Cook模型的5083P-0铝合金 动态本构关系研究

李恒奎¹ 张光瀚² 赵晓春³ 肖守讷² 朱志武²

(1 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266111)

(2 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

(3 中国铁路济南局集团有限公司青岛机车车辆监造项目部, 青岛 266111)

文 摘 为研究5083P-0铝合金在高应变率下的力学行为及本构模型,通过RPL100材料试验机和分离式霍普金森压杆(SHPB),对5083P-0铝合金进行了准静态及应变率范围950~3 000 s⁻¹的冲击动态压缩实验。结果显示随着应变率的增加,5083P-0铝合金的屈服强度、流动应力增加,应变硬化率减小,具有应变硬化效应,正应变率效应以及热软化效应。对其塑性变形原理进行分析发现,滑移系的作用导致材料发生较大的塑性变形,同时由于绝热温升的产生,材料表现出应变硬化与热软化机制相竞争的情况。在Johnson-Cook模型的基础上对应变率项进行改进,并引入绝热温升,改进的Johnson-Cook模型能够较好地描述该材料的应变率效应并能准确地描述其流动应力。最后采用新的应变率进行补充实验,通过对比验证了模型的合理性。

关键词 5083P-0, 铝合金, 冲击动态, SHPB, 本构模型

中图分类号: TG146.21

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.003

Dynamic Constitutive Relation of 5083P-0 Aluminum Alloy Based on Improved Johnson-Cook Model

LI Hengkui¹ ZHANG Guanghan² ZHAO Xiaochun³ XIAO Shoune² ZHU Zhiwu^{2*}

(1 CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111)

(2 State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(3 Qingdao Locomotive and Vehicle Supervision and Construction Project Department, China Railway Jinan Bureau Group Co., Ltd., Qingdao 266111)

Abstract In order to study the mechanical behavior and constitutive model of 5083P-0 aluminum alloy at high strain rate, the RPL100 material testing machine and the split Hopkinson pressure bar (SHPB) were used for quasi-static experiments and impact dynamic compression experiments with strain rates ranging from 950 to 3 000 s⁻¹. The results show that with the increase of strain rate during compression, the yield strength, strength limit and flow stress of 5083P-0 aluminum alloy increase, and the strain hardening rate decreases. It has strain strengthening effect, obvious positive strain rate effect and thermal softening effect. The plastic deformation mechanism of the material is analyzed, it is found that the sliding system leads to large plastic deformation of the material. At the same time, due to the adiabatic temperature rise, the material shows the competition between strain hardening and thermal softening. Based on the Johnson-Cook model, the variability term is improved, and the adiabatic temperature rise is introduced. The improved Johnson-Cook model can better describe the strain rate effect of the material and accurately predict its flow stress. Finally, the new strain rate is used to supplement the experiment, and the

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 国家科技计划项目(2016YFB1200505-009); 国家自然科学基金(11672253); 机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金(SV2019-KF-19)

第一作者简介: 李恒奎, 1977 出生, 硕士, 教授级工程师, 主要从事材料动态力学行为研究工作

通信作者: 朱志武, 1974 出生, 博士, 教授, 主要从事材料冲击动态力学性能关键技术研究工作。E-mail: zzw4455@163.com

rationality of the model is verified by comparison.

Key words 5083P-0, Aluminum alloy, Impact dynamic, SHPB, Constitutive model

0 引言

铝合金材料因其具有低密度,高强度和高塑性等优良性能而广泛应用于日常生活、工业生产以及高速列车车体结构中^[1-4]。在对铝合金的使用过程中,不可避免地可能会受到冲击动态载荷的作用,如车辆碰撞、列车零部件间的撞击等^[5]。经验表明,冲击动态载荷条件下与准静态载荷条件下材料的力学性能会有所不同。铝合金材料会出现随着应变率的增大,屈服应力与流动应力提高、应变硬化率降低等现象。因此,对于铝合金在冲击动态载荷下的力学性能亟待研究。

随着冲击动态力学发展以及实验设备的革新,国内外学者也更加系统地研究了各牌号铝合金材料的冲击动态力学性能。诸多研究表明,铝合金材料的力学性能会随着不同的合金成分、含量以及加工硬化、热处理的不同,而产生不同的力学性能。然而,关于研究5083P-0铝合金力学性能的文章甚少,特别是其冲击动态力学性能的研究。

近年来,由于高铁迅速发展,铝合金材料的冲击动态力学性能逐步得到国内外研究者的广泛重视,并获得了较多的成果。目前对于铝合金动态力学性能的研究往往集中在实验部分上,通常情况下铝合金材料具有较弱的应变率敏感性,但一些研究表明铝或者铝合金在某些条件下应变率敏感性会增强。对于大部分铝合金,如7150^[6]、3004^[7]、6061^[8]铝合金都具有明显的应变率强化效应,即当温度一定时,屈服应力和流动应力随着应变率的增大而明显增大。还有研究表明不同牌号的铝合金材料应变率敏感性会有所不同,如7050,2024等铝合金表现为应变率不敏感^[9-10];而3004、2219等铝合金表现出应变率敏感性^[11-12]。

国外对5083铝合金进行了较早的研究^[13-14],国内已对5083铝合金的超塑性^[15]、高温本构^[16]和中低应变率^[17]的力学性能进行了研究。对于5083的本构研究方面,高宁^[18]、晏宁^[19]等对5083铝合金进行了宽应变率下的实验,通过Johnson-Cook(J-C)模型和Zerilli-Armstrong(Z-A)模型合理描述了5083铝合金的拉伸“V”型率效应特征,并引入损伤变量将J-C模型改进,使模型得以描述5083的软化效应。

5083P-0铝合金的准静态力学性能可以从材料手册中获得,但其冲击动态力学性能很难获得。鉴于此,本文通过冲击动态压缩实验获取5083P-0铝合金应力应变曲线,进而揭示该材料在不同应变率加载条件下的冲击动态力学性能。

1 实验及原理

5083P-0铝合金动态压缩实验利用分离式霍普金森压杆完成,采用圆柱形试样,尺寸为 $\Phi 6\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。实验原理如图1所示。

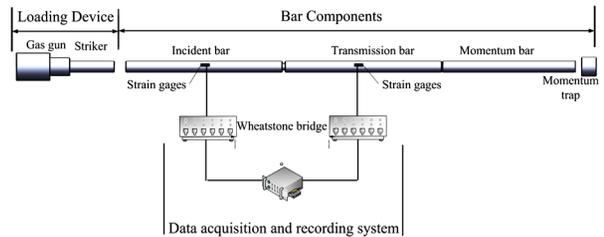


图1 SHPB设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SHPB equipment

分离式霍普金森压杆由入射杆、透射杆和吸收杆组成,其中压缩实验设备的入射杆直径14.5 mm、长度400 mm,透射杆直径14.5 mm、长度为525 mm,最大撞击速度为60 m/s。此外,还包括超动态应变仪、高速摄像头以及外部数据采集系统。实验后将得到的波形采用二波法处理^[20]。实验时,首先调整汽缸的气压,子弹受汽缸内的压力进而发出,通过控制气压来控制子弹的速度,进而控制了加载应变率,加载气压与子弹射出速度的关系曲线如图2所示。

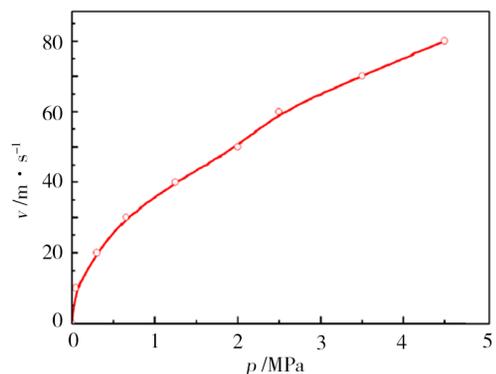


图2 气压压强与子弹速度关系图

Fig. 2 Relationship between air pressure and bullet velocity

由一维应力波理论并引入均匀性假设^[21],得到材料的应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 、应变 $\varepsilon(t)$ 和应力 $\sigma(t)$:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \varepsilon_r \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{A}{A_s} E \varepsilon_1 \quad (3)$$

式中, l_s 、 A_s 分别为试样的长度和横截面积, A 、 E 分别

为压杆的横截面积、弹性模量, ρ 为压杆的密度, ε_i 为入射应变波、 ε_r 为反射应变波、 ε_t 为输出杆上的透射应变波, C_0 为应力波在杆中的传播速度。

由此得到试样的应力、应变、应变率与时间的关系, 进而得到应力、应变、应变率三者之间的相互关系。

2 实验过程及结果

冲击动态压缩实验加载应变率分别为: 950、1 500、2 000、3 000 s^{-1} , 在每个加载应变率下进行两次重复实验, 若一致性不好, 再进行第三次实验。压缩应力应变曲线及塑性段应力应变曲线如图 3、图 4 所示。

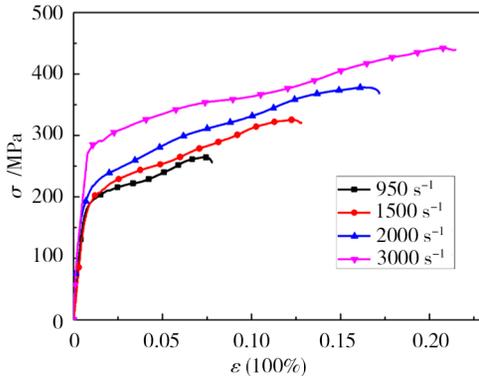


图 3 冲击压缩加载下的应力应变曲线

Fig. 3 Stress strain curves under impact compression loading

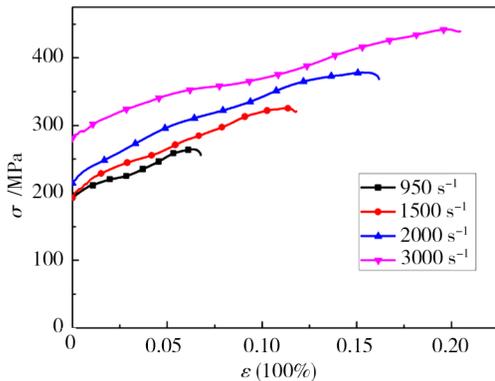


图 4 冲击压缩加载下塑性段的应力应变曲线

Fig. 4 Stress strain curves of plastic section under impact compression loading

由图 3、图 4 可以看出, 在冲击动态下 5083P-0 铝合金不同应变率的应力应变曲线在弹性阶段基本重合, 而屈服应力随着应变率的增加有一个明显的提升, 而在塑性阶段, 随着应变率的升高流动应力明显升高。说明在高应变率下 5083P-0 铝合金表现出明显的应变率效应。与此同时, 随着应变不断增加应力也在不断增加, 该材料在动态压缩加载下表现出明显的应变硬化效应, 塑性变形所示的屈服强度的应变率依赖性可以通过热激活位错理论来解释。曲线后半段出现应变软化现象, 是由于高速冲击会使材料内部产生绝热温升, 导致材料出现应变软化现象, 该段曲线表现出应变硬化与热软化机制相竞

争的情况。

为了更好地说明 5083P-0 铝合金的力学性能, 根据 GB/T7314—2005 要求^[22], 准静态压缩实验采用圆柱形试样, 尺寸为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。采用 RPL100 材料试验机完成 5083P-0 铝合金的准静态压缩实验, 加载应变率为 0.01 s^{-1} 。将准静态曲线与动态曲线进行对比, 如图 5 所示。

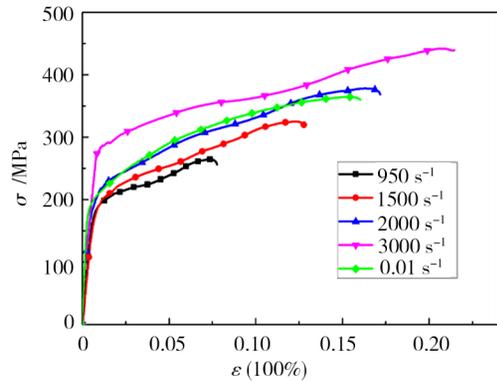


图 5 5083P-0 铝合金准静态与动态实验曲线对比

Fig. 5 Comparison of quasi-static and dynamic experimental curves of 5083P-0 aluminum alloy

可以看出在应变率低于 $2\ 000 \text{ s}^{-1}$ 时, 材料的动态屈服强度明显低于材料静屈服强度。根据晏宁、高宁的研究^[11-12]可知, 对于 5083 铝合金当应变率小于 10 s^{-1} 时, 材料表现出负应变率效应, 屈服应力随应变率变大而变小; 当应变率大于 10 s^{-1} 时, 材料表现为正应变率效应, 屈服应力随应变率变大而变大。因此当材料处于低应变率时的屈服强度反而高于 950 s^{-1} 、 $1\ 500 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的屈服强度。说明无论是准静态还是动态压缩下 5083P-0 铝合金都有很大的塑性变形。对于大部分金属而言, 发生塑性变形主要由孪生和滑移共同作用, 由于铝合金为面心立方晶体, 其发生孪生时所需的临界分解剪切应力比滑移大, 一般情况可以忽略孪生对其塑性变形的影响。因此 5083P-0 铝合金塑性变形机理主要是晶粒的滑移, 在冲击荷载作用下, 试样内部晶粒发生滑移、变形。随着参加滑移的晶粒越来越多, 起作用的滑移系也越来越多, 最终扩散到试样内部的全部滑移系, 试样发生较大的塑性变形。

3 Johnson-Cook 本构模型

就冲击动力学而言, 模拟材料力学响应的本构方程是否标准将严重影响到分析结果的准确性。Zerilli-Armstrong (Z-A) 和 Johnson-Cook (J-C) 模型的推导都是基于经验和半经验模型, 它们所涉及的材料常数比物理模型更少, 并且只需要有限的材料试验数据, 因此可以更有效地用来预测材料的力学性能。目前 Johnson-Cook 模型是经验模型中使用最广泛的模型之一^[23-30], 其包括 5 个材料常数, 其中应变率硬化项和温度软化项

是最为重要的部分。为了提高Johnson-Cook模型的准确性,本文对模型进行了一些修改,结合Johnson-Cook应变率强化项和温度项改进,为高强度合金材料的流动应力提供精确的估计。

Johnson-Cook模型应力应变关系可表示为^[31]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (4)$$

式中, $(A + B\varepsilon_p^n)$ 、 $(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$ 、 $(1 - T^{*m})$ 分别为描述材料加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应。其中 σ 为 Von-Mises 流动应力。 A 为参考应变率和参考温度下的屈服强度, B 、 n 分别为材料硬化模量和硬化指数, C 为材料应变率敏感(强化)系数, m 为材料温度软化指数, 各参数均由实验获得。 ε_p 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。 $T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$ 为无量纲化的温度项, T_m 、 T_r

分别为材料的熔点温度(730 °C)和室温(20 °C), A 在此参考温度下测定。

根据前文中的实验数据来拟合 Johnson-Cook 本构方程的各参数。

3.1 确定参数 A 、 B 和 n

式(4)右边第一个括号项表示 $T = T_r$ 及 $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$ 时的 σ - ε 关系。参数 A 为材料在参考应变率下的屈服强度, 通常将准静态实验的应变率定为参考应变率, 即 A 为准静态实验条件下的屈服强度。但是由于 5083P-0 存在负应变率效应, 若取准静态实验的屈服强度作为参数 A 的值, 会导致动态屈服强度低于准静态屈服强度的曲线无法拟合。根据晏宁的研究^[12] 5083 铝合金在低应变率到中应变率过程中存在负应变率效应, 材料的屈服强度逐渐降低, 在应变率为 10 s^{-1} 时到达最小, 为 149 MPa。而在中应变率到高应变率的过程中, 存在正应变率效应, 材料的动态屈服强度逐渐提高。因此在试样的初始温度条件下, 即 $T = 20 \text{ °C}$ 时, 选取应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 10 \text{ s}^{-1}$ 为参考应变率, 根据参考应变率下实验测量所得 σ - ε 曲线即可确定 A 、 B 和 n 。此时, 式(4)可简化为:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (5)$$

首先可以确定 A , 即材料参考应变率下的屈服应力为 149 MPa。

其次确定 B 和 n , 将式(5)两边同时取对数, 并带入 A 可以得到关系式:

$$\ln(\sigma - 149) = n \ln \varepsilon + \ln B \quad (6)$$

做出 $\ln(\sigma - A)$ - $\ln \varepsilon$ 曲线, 曲线的截距为 $\ln B$, 斜率为 $n(\tan \alpha)$, 于是可以得到 B 和 n 的值。

3.2 参数 C 的确定

从 J-C 模型中可以看出当塑性应变零, 且实验处

于室温条件下时, 此时的应力为动态屈服应力, J-C 模型变成:

$$\sigma_y = A(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (7)$$

常温下 5083P-0 铝合金的屈服应力与应变率的关系做出了 σ_y - $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 图, 如图 6 所示, 根据求解 n 的过程, 利用式(7)便可拟合出参数 C 。

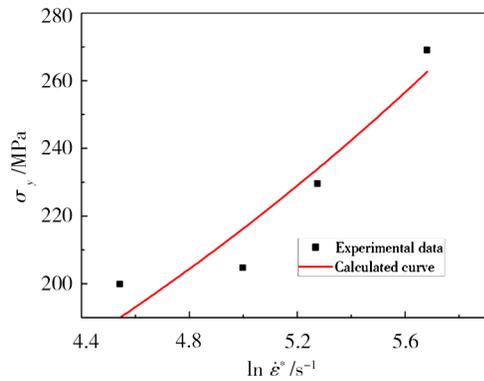


图6 Johnson-Cook 本构模型参数 C 的拟合

Fig. 6 Fitting parameter C of Johnson-Cook constitutive model

通过准静态常温高温实验, 冲击动态实验, 得到参数如表 1 所示。

表 1 J-C 本构方程参数

Tab. 1 Parameters of J-C constitutive equation

A/MPa	B/MPa	C	n	m
149	366	0.56	0.66	1.2

将两组参数值代入式(4)中, 得到 5083P-0 铝合金的 Johnson-Cook 本构方程为:

$$\sigma = (149 + 366\varepsilon_p^{0.66})(1 + 0.56 \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^{1.2} \right] \quad (8)$$

3.3 改进的 Johnson-Cook 本构模型

由图 6 不难发现, σ_y 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 之间并不是完全的线性关系, 高应变率下强化效应更加显著, 单纯用线性变化关系来描述并不合适, 因此对模型中的应变率强化项作适当修正。假设两者存在指数对应关系, 如公式(9)所示, 对 J-C 模型进行改进, 并对实验点进行拟合, 见图 7。

$$\sigma_y = A \left\{ 1 + \exp \left[C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + d \right] \right\} \quad (9)$$

可以看出, 该指数能更好的描述 σ_y 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 的关系, 因此将 J-C 模型的应变率项进行改进, 得到改进后的 J-C 模型:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left\{ 1 + \exp \left[C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + d \right] \right\} \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

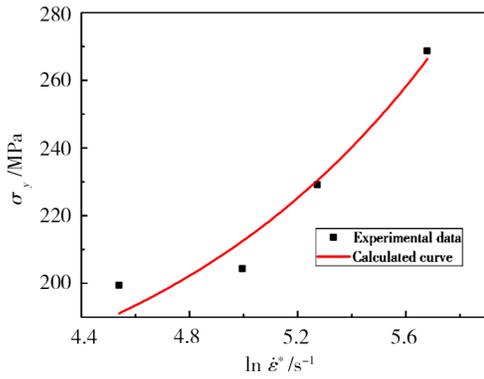


图7 σ_y 与 $\ln \dot{\varepsilon}^*$ 拟合关系

Fig. 7 The fitting relationship between σ_y and $\ln \dot{\varepsilon}^*$

模型中各参数值见表2。

表2 改进后J-C模型各参数值
Tab. 2 Parameters of improved J-C model

A/MPa	B/MPa	C	n	d	m
149	366	0.889 6	0.66	-5.298 8	1.2

由式(10)可以看出模型并没有考虑高应变下材料绝热温升的因素。在高速冲击条件下,由于变形速度过快,能量迅速增加,由此产生的热量无法在短时间内向外界传递,此过程可视为绝热条件。而该温度为材料内部温度,温度的测量是实验的难点所在。根据文献[33-34]对于高应变率下材料绝热温

升的研究,如果材料变形是在等温环境有热交换的情况下进行的,则流动应力将高于没有绝热的情况。通过间接方法,可以确定变形过程中材料内部温升,即在实验后用量热法测量储存的能量:

$$\eta \Delta W \approx \Delta Q \quad (11)$$

$$\eta \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \rho C_u \Delta T \quad (12)$$

$$\Delta T(\varepsilon) = \frac{\eta}{\rho C_u} \int_0^{\varepsilon} \sigma_e d\varepsilon \quad (13)$$

式中, ΔW 为所做的功, ΔQ 为产生的热量, η 为塑性功热转换系数, σ_e 为真实应力, ε 为真实应变, C_u 为室温比热, ρ 为材料密度, ΔT 为绝热温升。

表3 各加载应变率对应的绝热温升

Tab. 3 Adiabatic temperature rise corresponding to each loading strain rate

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	$\Delta T/^\circ C$	$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	$\Delta T/^\circ C$
950	31	2 500	75.5
1 500	49.5	3 000	90.5

将5083P-0铝合金的密度 2.70 g/cm^3 、室温比 $0.9 \text{ (J/kg}\cdot^\circ\text{C)}$ 、塑性功热转换系数 0.9 代入式(13)并结合实验曲线计算可得到各加载应变率下的绝热温升,如表3所示。各加载应变率下实验与理论对比图见图8。

将J-C在考虑绝热温升后再次改进:

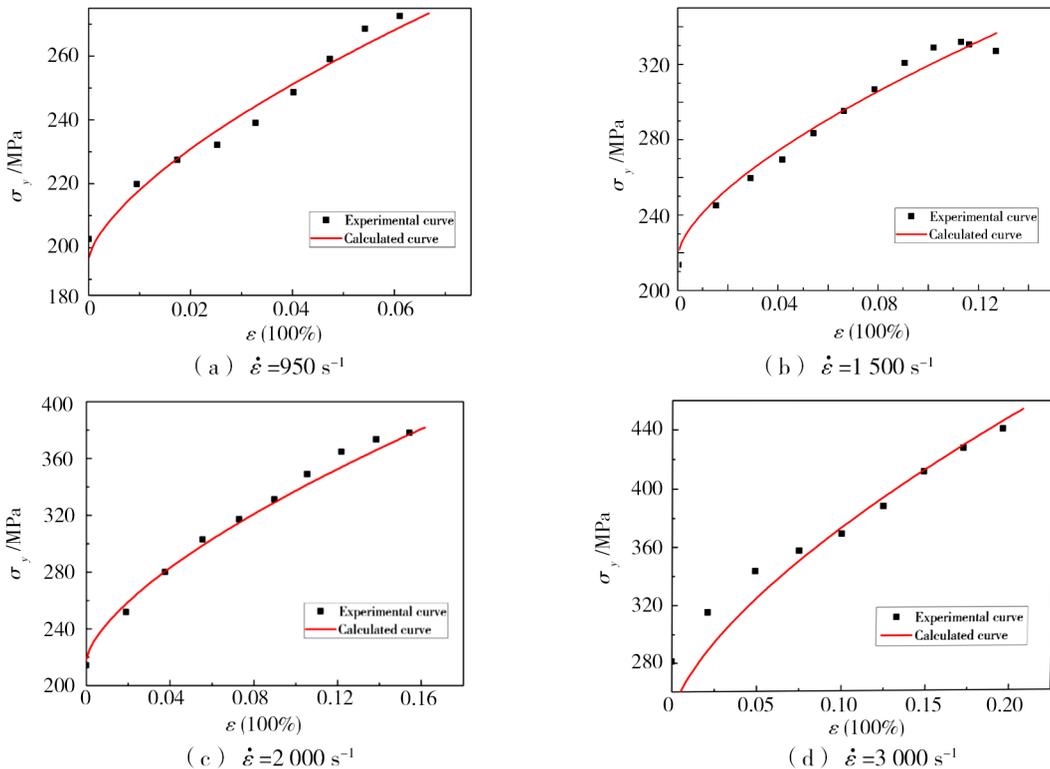


图8 不同应变率下的压缩实验与理论曲线对比图

Fig. 8 Comparison of experimental and theoretical curves under different strain rates

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left\{ 1 + \exp \left[C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) + d \right] \right\} \left[1 - \left(\frac{\Delta T}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (14)$$

分析图8中四种加载应变率的对比结果可以得出:改进J-C模型的理论实验曲线拟合良好,反映了应变率效应和绝热温升软化效应对5083P-0铝合金动态压缩过程中流动应力影响趋势,改进J-C模型可较好地描述5083P-0铝合金的动态压缩力学性能。具体表现为:改进J-C模型能更准确地描述各应变率条件下的材料屈服点以及各应变率下的应变率强化效应,同时该模型可以表述材料热软化效应,很好地反映高应变率下应变硬化与热软化机制相竞争的情况。

4 模型的合理性验证

为了验证模型的合理性与应用性,进行一次补充实验,采取与前文不同的应变率进行实验。得到塑性段的应力应变图,如图9所示。

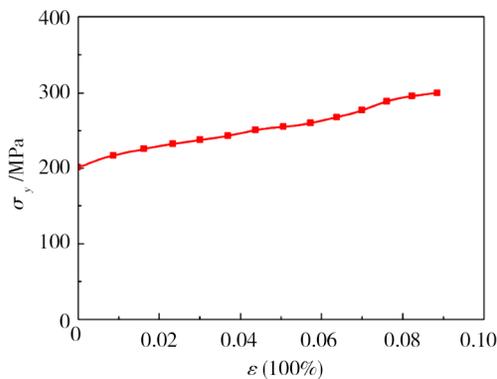


图9 1300 s⁻¹应变率下的5083P-0压缩应力-应变曲线

Fig. 9 5083P-0 compressive stress-strain curve at 1300 s⁻¹ strain rate

将1300 s⁻¹的应变率代入到式(14),得到1300 s⁻¹应变率下的5083P-0的本构方程理论曲线,将实验与理论曲线进行对比,如图10所示。

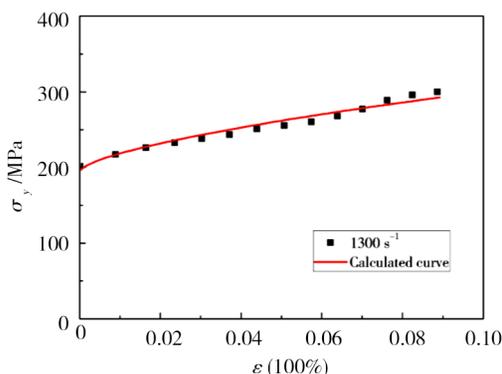


图10 1300 s⁻¹应变率下的压缩实验曲线与理论曲线对比图

Fig. 10 Comparison of compression experimental curve and theoretical curve at 1300 s⁻¹ strain rate

从图10看到,在新的应变率下该模型也能对实验曲线进行很好的拟合与描述,说明改进后的J-C模型可以对不同工况下的5083P-0铝合金进行预测与描述,验证了模型的合理性与应用性。

5 结论

对5083P-0铝合金进行了冲击动态加载实验,得到其不同应变率下的应力-应变曲线。通过对J-C模型改进,得到了更加适用于5083P-0铝合金的冲击动态本构模型。相关的研究结论如下:

(1)通过5083P-0铝合金在准静态和冲击动态加载下的压缩实验可以看出,流动应力随着应变的增加而明显增加,5083P-0铝合金具有明显的应变硬化现象;在冲击压缩实验中随着应变率的增加,5083P-0铝合金的屈服应力及流动应力逐渐增加,说明冲击压缩时具有应变率效应;

(2)5083P-0铝合金冲击动态加载下曲线后半段出现应变软化现象,是由于高速冲击会使材料内部产生绝热温升,导致材料出现应变软化现象,该段曲线表现出应变硬化与热软化机制相竞争的情况;

(3)通过对材料屈服应力与应变率的研究,改进J-C模型中的应变率项,并引入绝热温升对温度项进行改进,使得该模型可以在冲击加载条件下对各应变率范围都能进行很好的拟合。最后添加新的应变率进行补充实验和合理性验证,通过理论和实验曲线的对比,验证了模型的合理性。

参考文献

- [1] 李行旦. 商用飞机用铝合金结构材料的发展[J]. 上海有色金属, 1994, 15(3): 161-168.
LI Xingdan. The development of aluminum alloy structural materials for commercial aircraft [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1994, 15(3): 161-168.
- [2] 刘静安, 周昆. 航空航天用铝合金材料的开发与应用趋势[J]. 铝加工, 1997, 29(6): 51-59.
LIU Jingan, ZHOU Kun. Development and application trend of aluminum alloy materials for aerospace [J]. Aluminum Processing, 1997, 29(6): 51-59.
- [3] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 76-81.
YANG Shoujie, DAI Shenglong. Review and prospects of the development of aviation aluminum alloys [J]. Materials Review, 2005, 19(2): 76-81.
- [4] 宋仁国. 高强度铝合金的研究现状及发展趋[J]. 材料导报, 2000, 14(1): 20-27.
SONG Renguo. Research status and development trend of high-strength aluminum alloys [J]. Materials Review, 2000, 14(1): 20-27.
- [5] 吴一雷, 李永伟, 强俊, 等. 超高强度铝合金的发展与应用[J]. 航空材料学报, 1994, 14(1): 50-58.

WU Yilei, LI Yongwei, QIANG Jun, et al. Development and application of ultra-high strength aluminum alloy [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1994, 14(1): 50-58.

[6] 寇琳媛, 金能萍, 张辉. 7150 铝合金高温热压缩变形流变应力行为[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 44-48.

KOU Linyuan, JIN Nengping, ZHANG Hui. Flow stress behavior of 7150 aluminum alloy during high temperature compression deformation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 44-48.

[7] 王洪欣, 查晓雄. 3004 铝的动态力学性能及本构模型[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 40-46.

WANG Hongxin, CHA Xiaoxiong. Dynamic mechanical properties and constitutive model of 3004 aluminum[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(5): 40-46.

[8] 刘军, 杨黎明, 谢书港. 6061 铝合金的动态拉伸性能及其本构模型[J]. *机械工程材料*, 2017, 41(3): 49-53.

LIU Jun, YANG Liming, XIE Shugang. Dynamic tensile properties and constitutive model of 6061 aluminum alloy [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2017, 41(3): 49-53.

[9] 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 Yuhua. The constitutive relationship of aluminum alloy LC4 and LY12CZ under high strain rate tension and compression[J]. *Materials Science and Technology*, 1994, 2(2): 24-29.

[10] 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 Yuhua. Experimental study on the strain rate-related mechanical properties of aluminum alloy LC4 and LY12CZ [J]. *Shanghai Mechanics*, 1995, 16(1): 61-66.

[11] 王洪欣, 查晓雄. 3004 铝的动态力学性能及本构关系[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 39-42.

WANG Hongxin, CHA Xiaoxiong. Dynamic mechanical properties and constitutive relationship of 3004 aluminum [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Journal of Natural Science)*, 2011, 39(5): 39-42.

[12] 郭伟国, 田宏伟. 几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流动本构模型[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(1): 6-61.

GUO Weiguo, TIAN Hongwei. Strain rate sensitivity and plastic flow constitutive model of several typical aluminum alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(1): 6-61.

[13] BENALLAL A, BERSTAD T, BØRVIK T. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the portevin-le chatelier 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第3期

effect[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24: 1916-1945.

[14] CLAUSEN A H, BØRVIK T, ODD S, et al. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083-H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, 364: 1-2.

[15] 苗建芸. 5083 铝合金的超塑性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

MIAO Jianyun. Research on superplasticity of 5083 aluminum alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.

[16] 徐雪峰. 5083 铝合金力学性能及超塑性成形数值模拟与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

XU Xuefeng. Numerical simulation and experimental research on mechanical properties and superplastic forming of 5083 aluminum alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

[17] 徐清波, 陶友瑞, 米芳. 5083 铝合金高温流变本构关系研究[J]. *矿冶工程*, 2013, 33(5): 124-126.

XU Qingbo, TAO Yourui, MI Fang. Research on high-temperature rheological constitutive relationship of 5083 aluminum alloy [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2013, 33(5): 124-126.

[18] 晏宁, 康国政, 朱志武. 5083H111 铝合金宽应变率拉伸动态本构模型[J]. *固体力学学报*, 2014, 35(3): 259-265.

YAN Ning, KANG Guozheng, ZHU Zhiwu. Wide strain rate tensile dynamic constitutive model of 5083H111 aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2014, 35(3): 259-265.

[19] 高宁. 5083 铝合金宽应变率下拉压力学性能及其本构模型描述[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

GAO Ning. The compression properties of 5083 aluminum alloy at wide strain rate and its constitutive model description [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[20] 晏宁. 铝合金材料的动态拉压性能及其本构描述[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

YAN Ning. Dynamic tensile and compression properties and constitutive description of aluminum alloy materials [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[21] KOLSKY H. Investigation of mechanical properties of materials at very high rates of loading [J]. *Proceedings of the Physical Society: Section B*, 1949, 62: 676-700.

[22] 王礼力. 应力波基础[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2005.

WANG Lili. Fundamentals of stress waves [M]. 2nd edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.

[23] GB/T7314—2005. 金属材料室温压缩试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

GB/T7314—2005. Compression test method for metallic

materials at room temperature [S]. Beijing: China Standards Press, 2005.

[24] ZHANG P, WANG Y, XIE Y. A study on the dynamic shock performance of 7055-T614 aluminum alloy based on experimental and simulation[J]. Vacuum, 2018, 157(14): 306-311.

[25] DING S, KHAN S A, YANAGIMOTO J. Constitutive descriptions and microstructure evolution of extruded A5083 aluminum alloy during hot compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 728(25): 133-143.

[26] ZHANG Y, WANG X, WEI C. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1608-1617.

[27] BAI Q, LI H, DU Q. Mechanical properties and constitutive behaviors of as-cast 7050 aluminum alloy from room temperature to above the solidus temperature [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2016, 23(8): 949-958.

[28] ZHANG D, SHANGGUAN Q, XIE C. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 186-194.

[29] MIRZADEH H. Simple physically-based constitutive equations for hot deformation of 2024 and 7075 aluminum alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1614-1618.

[30] DARIDON L, OUSSOUADDI O, AHZI S. Influence of the material constitutive models on the adiabatic shear band spacing: MTS, power law and Johnson-Cook models [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(11): 3109-3124.

[31] GAO N, ZHU Z W. Experimental study of wide strain rates and constitutive model based on damage of 5083 aluminum alloy [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(1): 51-60.

[32] 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 7th International Symposium on Ballistics, 1983, 21: 541-547.

[33] NOBLE J P, HARDING J. Temperature measurement in the tensile Hopkinson bar test measure [J]. Science Technology, 1994(5):1163-1171.

[34] KAPOOR R, NEMAT-NASSER S. Determination of temperature rise during high rate deformation [J]. Mechanics of Materials, 1998, 27: 1-12.