DOI: 10.11883/1001-1455(2017)05-0871-08

宽应变率范围下 2A16-T4 铝合金动态力学性能*

惠旭龙,白春玉,刘小川,牟让科,王计真
(中国飞机强度研究所结构冲击动力学航空科技重点实验室,陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究 2A16-T4 铝合金的动态力学性能,利用电子万能试验机、高速液压伺服试验机及霍普金森压杆(SHPB)装置进行常温下准静态、中应变率和高应变率的动态力学性能实验,得到不同应变率下的应力应变曲线,基于修正的 Johnson-Cook 本构模型对它进行拟合,并分析材料中应变率力学特性对模型应变率敏感参量的影响。结果表明:2A16-T4 铝合金在应变率 10^{-4}～10^{2} s^{-1} 范围内应变率敏感性较弱,而在 10^{2}～10^{3} s^{-1} 范围内应变率敏感性较强,且应变率强化效应随塑性应变的增大而减小;同时,在 10^{-4}～10^{3} s^{-1} 范围内具有较强的应变硬化效应,且应变硬化效应随应变率的增大而减小;此外,修正 Johnson-Cook 本构模型的拟合结果与实验结果吻合很好,能够很好表征材料的动态力学行为,且考虑材料中应变率力学特性可提高本构模型参量的准确性。

关键词: Johnson-Cook 模型;高速液压伺服试验机;中应变率;2A16-T4 铝合金;应变率效应
中图分类号: O347.1 **国标学科代码:** 13015 **文献标志码:** A

由于具有比强度高和耐腐蚀能力强等优点,2A16-T4 等铝合金材料在飞机结构中得到大量应用。而飞机在使用过程中不可避免受到飞鸟、跑道上碎石、冰雹以及轮胎碎片等外来物的撞击,为提高飞机的安全性并尽可能减轻飞机重量,就需要了解材料在不同应变率下的动态力学特性,获得材料准确的动态本构关系。

随着霍普金森实验技术的发展,对铝合金动态力学性能的研究也不断深入。研究表明,铝合金的塑性流动应力具有明显的应变率敏感性,而热激活位错运动是塑性流动行为的机理[1]。D. L. Holt 等[2]发现纯铝在室温下表现出一定的应变率敏感性。王洪欣等[3]发现 3004 铝在应变率 0.000 5～2 000 s^{-1} 范围内有明显的应变率强化效应;然而,也有学者发现铝合金的应变率敏感性并不明显。张伟等[4-5]通过电子万能试验机、扭转试验机、霍普金森拉杆等装置,发现 2A12 和 7A04 铝合金的应变强化效应和温度软化效应显著,而应变率强化效应不明显。张正礼[6]结合电子万能试验机和 Hopkinson 杆实验,也发现 2024 铝合金是应变率不敏感材料;此外,还有学者发现铝合金的应变率敏感性与应变率范围和温度有关。朱耀[7]通过实验发现,AA7055 铝合金在常温下的应变率敏感性不明显,而在高温下应变率敏感性较强。谢灿军等[8]发现,7075-T6 铝合金在应变率 500 s^{-1} 范围内应变率敏感性不明显,而当应变率超过 1 000 s^{-1} 后出现了明显的应变率强化效应,并基于实验结果拟合了修正的 Johnson-Cook 本构方程。杨超等[9]也发现,5083H111 铝合金材料在低应变率情况下存在应变率软化效应,在中低应变率范围内存在应变率软化再强化特性,在高应变率情况下又表现出明显的应变率强化效应。

上述研究表明,尽管在准静态(10^{-4}～10^{-2} s^{-1})和高应变率(10^{2}～10^{4} s^{-1})范围内对铝合金的动态力学性能进行了大量研究,但关于应变率效应实验结果的规律并不一致。而基于实验数据的经验型 Johnson-Cook 本构模型及其修正形式也被广泛应用于材料动态本构模型的构建中,但研究主要集中在准静态和高应变率区间,由此得到的材料本构模型不具备完备性,且到目前为止还未见关于 2A16-T4 铝合金动态力学性能的研究报道。因此,很有必要对较宽应变率范围下 2A16-T4 铝合金的动态力学性能进行研究,了解它在不同应变率范围内的应变率敏感特性,构建较完备的动态本构模型。

* **收稿日期:** 2016-02-02; **修回日期:** 2016-08-13
第一作者: 惠旭龙(1989—),男,硕士,助理工程师,742839400@qq.com。

1 动态力学性能实验

1.1 准静态拉伸

准静态拉伸实验平台为 INSTRON 8801 电子万能试验机(见图 1),拉伸载荷通过试验机自带的载荷传感器测得,传感器量程为 100 kN,拉伸应变通过接触式引伸计测得,夹头加载速度为 2 mm/min。2A16-T4 铝合金准静态真实应力应变曲线如图 2 所示,在塑性段应变硬化效应较强,试件在准静态拉伸载荷作用下发生拉伸破坏,未出现明显的颈缩现象(见图 3)。



图 1 电子万能试验机

Fig. 1 INSTRON 8801 test system

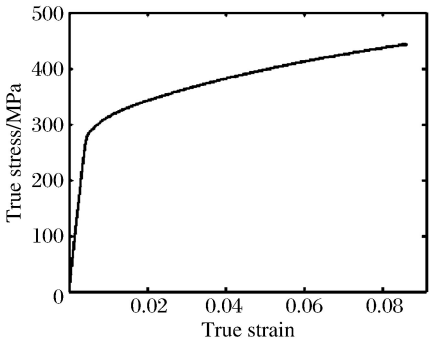

图 2 真实应力应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curve

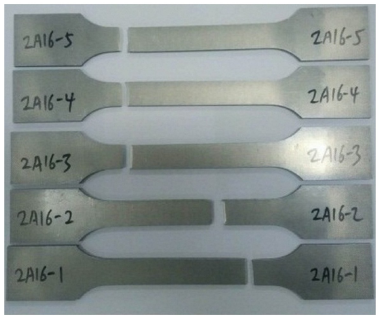

图 3 准静态下试件破坏结果

Fig. 3 Failure results in quasi-static state

1.2 中应变率拉伸

相比材料的准静态及高应变率力学性能实验,材料的中应变率力学性能实验最难实现。主要是因为,在这个速率范围内的加载会引起加载链的共振问题,使实验过程中的关键参数不易采集。而传统的气锤、落锤等装置都具有在冲击过程中速度逐渐变低、应变率不恒定的缺点。相比于这些装置,高速液压伺服材料试验机具有横速率加载、实验重复性好及加载稳定等优点。因此,采用 INSTRON VHS 160 高速液压伺服试验机(见图 4)作为材料中应变率力学性能的测试平台。

对于应变的测试,传统的引伸计和应变片测试方法受测量方式和量程的限制而无法使用,而基于高速摄像技术的非接触测试和分析系统(见图 5)可用来测试高速拉伸过程中试件表面的应变场。通过在试件的标距段喷涂散斑,利用高速摄像机实时采集目标区域散斑图像的变形情况,结合非接触分析软件计算试件的位移场,进而得到试件表面的应变场(见图 6)和动态拉伸应变数据(见图 7)。

对于拉伸载荷的测量,较低应变率下可通过压电传感器直接得到,但应变率高于 10 s^{-1}时,试验机系统的共振效应会导致测试结果发生很大幅度的振荡而失真[10],此时压电传感器的测量结果已无法反映材料的真实力学特性。为解决这个问题,在试件非标距段两侧的对等位置沿拉伸方向粘贴应变片,利用应变片间接测量试件的载荷数据,可提高测试结果的准确性[11-12](见图 8)。



图 4 高速液压伺服试验机

Fig. 4 INSTRON VHS 160 test system

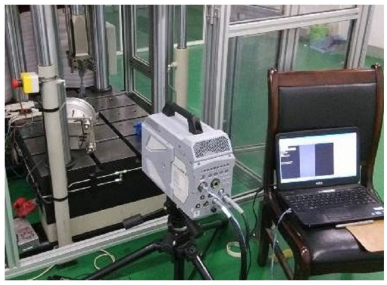

图 5 非接触分析系统

Fig. 5 DIC system

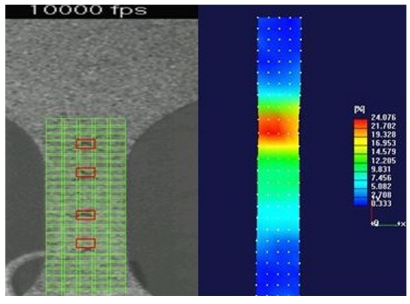

图 6 试件表面应变场

Fig. 6 Strain field of specimen's surface

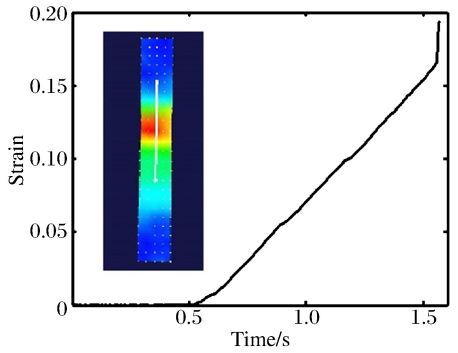

图 7 动态拉伸应变结果

Fig. 7 Strain result of dynamic tensile process

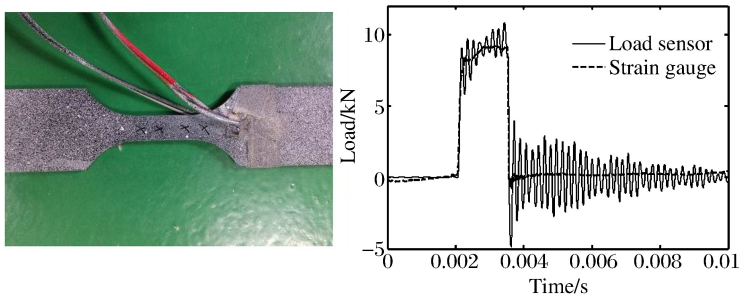

图 8 载荷间接测试方法

Fig. 8 Indirect loading measurement

高速摄像机和数采系统同时触发，采样率相同，可以获得同步的载荷与应变信号，经数据处理得到 2A16-T4 铝合金中应变率下的真实塑性应力应变曲线，如图 9 所示。可知在应变率 $10^{-4}\sim10^{2}$ s^{-1} 范围内应变率敏感性较弱，随着应变率的增加，材料的流动应力和动态屈服强度增加很小，流动应力仅强化 3%左右。但应变硬化效应较强，随着塑性应变的增加，材料的流动应力明显提高。

为研究应变率和应变对材料流动应力的影响，取不同应变率下参考塑性应变为 0.03、0.08 和 0.12 时的流动应力进行分析，如图 10 所示（准静态下塑性应变 0.12 的流动应力值为外插结果）。可以看出，流动应力均随应变率的增大而缓慢增加，表现出较弱的应变率强化效应。在相同应变率下，流动应力均随应变的增大而增大，表现出较强的应变硬化效应。当塑性应变为 0.03、0.08、0.12 时，应变率强化效应分别为 5.8%、3.0%、2.5%；当应变率为 0.000 4、0.032、0.065、10、130、350 s^{-1} 时，应变硬化效应分别为 15.8%、15.0%、15.0%、14.8%、13.8%、13.2%。可以看出，材料的应变率强化效应随塑性应变的增大而减小（用 0.032 s^{-1} 和 350 s^{-1} 计算），材料的应变硬化效应随应变率的增大而减小（用应变 0.03 和 0.08 计算）。在高速拉伸载荷作用下，材料的应变硬化和热软化同时进行，一方面，它具有一定的应变硬化作用，另一方面，较高应变率变形时载荷作用时间极短，试件内由塑性变形能转化的热量无法耗散，导致的试件温升使试件产生一定的热软化，且应变率越高热软化效应越强，所以材料的应变硬化效应随应变率的增大呈现出减小的趋势（见图 11）。

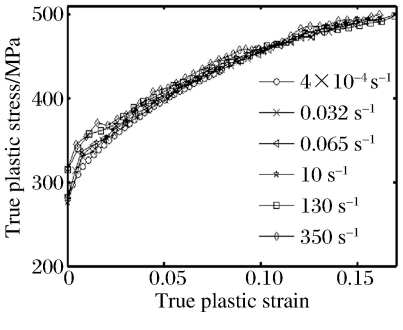

图 9 真实塑性应力应变曲线

Fig. 9 True plastic stress-strain curves

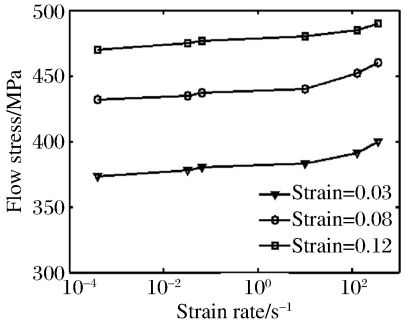

图 10 流动应力与应变率的关系

Fig. 10 Relation of flow stress with strain rates

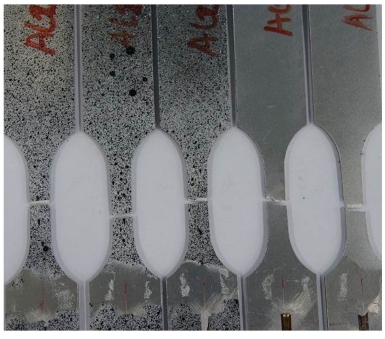

图 11 试件拉伸破坏结果

Fig. 11 Failure result of specimen

1.3 高应变率压缩

高应变率压缩实验平台如图 12 所示，由发射装置、输入杆和输出杆组成。采用应变片测量输入杆中的入射、反射脉冲和输出杆中的透射脉冲，根据测量数据结合一维应力波理论和均匀性假设，计算试件的应力、应变和应变率[13]。试件尺寸为∅8 mm×8 mm，共进行 3 种应变率（1 000、2 000、3 000 s^{-1}）下的动态压缩实验。

2A16-T4 铝合金真实塑性应力应变曲线如图 13 所示，可以看出，它在应变率 $10^{-4}\sim10^{3}$ s^{-1} 范围内表现出明显的应变率强化效应，随着应变率的增加，流动应力强化 50%左右。这与它在中应变率范围内的应变率敏感特性明显不同，表明 2A16-T4 铝合金在常温下的应变率敏感特性与应变率范围有关。在应变率 350 s^{-1} 以内，应变率敏感性较弱，而当应变率超过 1 000 s^{-1} 以后，材料的应变率敏感性明显增强。该特性与文献[8]中对 7075-T6 铝合金动态力学特性的研究结果相似。此外，2A16-T4 铝合金在高应变率范围内的应变硬化效应依然很明显。

为研究应变率和应变对材料流动应力的影响，取不同应变率下参考塑性应变为 0.03、0.08 和 0.12 时的流动应力进行分析，如图 14 所示。可以看出，流动应力均随应变率的增大而迅速增加，表现出较强的应变率强化效应。在相同应变率下，流动应力均随应变的增大而增大，表现出一定的应变硬化效应。当塑性应变为 0.03、0.08、0.12 时，应变率强化效应分别为 18.3%、16.1%、11.7%；当应变率为 0.000 4、1 000、2 000、3 000 s^{-1} 时，应变硬化效应分别为 15.8%、12.2%、11.9%、10.1%。可以看出，材料的应变率强化效应随塑性应变的增大而减小(用应变率 1 000 s^{-1} 和 3 000 s^{-1} 计算)，应变硬化效应随应变率的增大而减小(用应变 0.03 和 0.08 计算)，变化规律与中应变率范围下的结果相同。



图 12 SHPB 装置

Fig. 12 SHPB setup

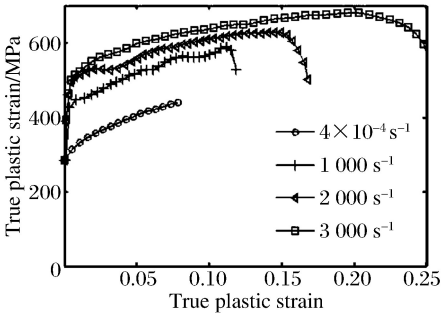

图 13 真实塑性应力应变曲线

Fig. 13 True plastic stress-strain curves

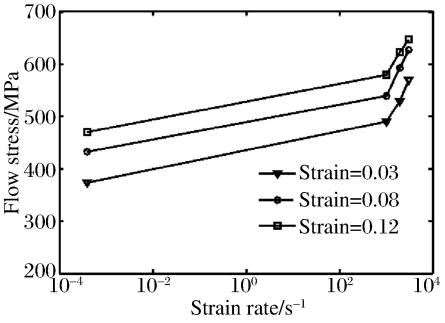

图 14 流动应力与应变率的关系

Fig. 14 Flow stress vs strain rate

2 Johnson-Cook 本构关系拟合

Johnson-Cook 模型[14]用于描述材料流动应力与应变、应变率及温度之间的关系。它采用连乘的形式将应变效应、应变率效应和温度效应综合处理，具体形式为：

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

式中：σ 为等效应力；B、n 为应变硬化系数；A 为参考应变率和参考温度下的屈服应力；ε 为等效塑性应变；C 为应变率敏感系数；$\dot{\varepsilon}_{e}^{*}$ 为量纲一应变率，$\dot{\varepsilon}_{e}^{*}=\dot{\varepsilon}_{e}/\dot{\varepsilon}^{0}$，$\dot{\varepsilon}^{0}$ 为参考应变率；m 为温度敏感性系数；$T^{*}=(T-T_{r})/(T_{m}-T_{r})$ 为量纲一温度，T_{m} 为材料熔点，T_{r} 为参考温度。

2.1 Johnson-Cook 本构模型的修正

由实验结果可知，2A16-T4 铝合金在中应变率范围下应变率强化效应较弱，而在高应变率范围下应变率强化效应较强，流动应力与对数应变率近似成指数关系(见 15)。考虑到标准 Johnson-Cook 模型将材料流动应力与对数应变率描述为线性形式，因此，需对应变率项进行修正。

W. J. Kang 等[15]、G. R. Cowper 等[16]和 H. Huh 等[17]针对 Johnson-Cook 模型的应变率项进行了修正，分别为：

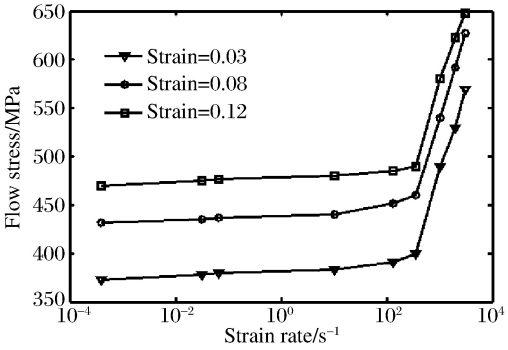

图 15 材料流动应力与应变率关系

Fig. 15 Relation of flow stress with strain rates

$$\sigma = 1 + C(\ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))^P \tag{2}$$

$$\sigma = 1 + (\dot{\varepsilon}_e^*/C)^{1/P} \tag{3}$$

$$\sigma = 1 + C_1 \ln\dot{\varepsilon}_e^* + C_2(\ln\dot{\varepsilon}_e^*)^2 \tag{4}$$

采用新的应变率项后对实验结果的拟合效果更好。考虑 2A16-T4 铝合金在低、中、高应变率范围内的应变率敏感特性，选择式(2)作为应变率项的修正形式。

2.2　本构模型参数的确定

实验均在室温下进行，参数拟合时不考虑温度项 m，只有 5 个待定材料参数 A、B、n、C 和 P。

选取参考应变率 4×10^{-4} s^{-1} 的实验数据，拟合参数 A、B、n，在室温、参考应变率下，式(1)简化为：

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \tag{5}$$

根据参考应变率下的应力应变曲线结合 matlab 软件，拟合得参数 $A=289$ MPa、$B=500$ MPa、$n=0.52$。

通常认为金属材料的力学性能具有较好的各向同性，因此在结果分析中没有区分拉伸与压缩。利用室温不同应变率下的应力应变数据拟合参数 C、P。室温下 Johnson-Cook 本构模型可简化为：

$$\sigma = \sigma_0(1 + C(ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0))^P) \tag{6}$$

式中：σ_0 为参考应变率下的屈服应力；σ 为不同应变率下的屈服应力。

为研究材料中应变率力学特性对应变率敏感参量的影响，对以下 3 种情况进行分析：(1)只考虑准静态和中应变率实验数据；(2)只考虑准静态和高应变率实验数据；(3)综合考虑准静态、中应变率和高应变率实验数据。

目前，应变率敏感参数 C 大多通过对不同应变率下的屈服应力进行拟合得到，而 2A16-T4 铝合金的应变率强化效应与应变有关，因此依次取 2A16-T4 铝合金塑性应变 0.03、0.08、0.12 时的流动应力与应变率关系(见图 15)进行分析。分析结果见表 1。可以看出，3 种情况下的拟合结果之间有较大的区别，但各自的拟合结果与实验结果吻合很好，如图 16 所示。

表 1　2A16-T4 铝合金应变率参数拟合结果

Table 1　Fitted results of strain rate sensitive parameters

情况	C	P	C	P	C	P	$\overline{C}$	$\overline{P}$
	$\varepsilon=0.03$		$\varepsilon=0.08$		$\varepsilon=0.12$			
1	2.3×10^{-3}	1.29	1.80×10^{-3}	1.04	1.20×10^{-3}	0.95	1.77×10^{-3}	1.093
2	4.9×10^{-9}	6.69	4.75×10^{-9}	6.60	4.72×10^{-9}	6.55	4.79×10^{-9}	6.630
3	1.9×10^{-11}	8.71	1.82×10^{-11}	8.63	1.78×10^{-11}	8.58	1.83×10^{-11}	8.660

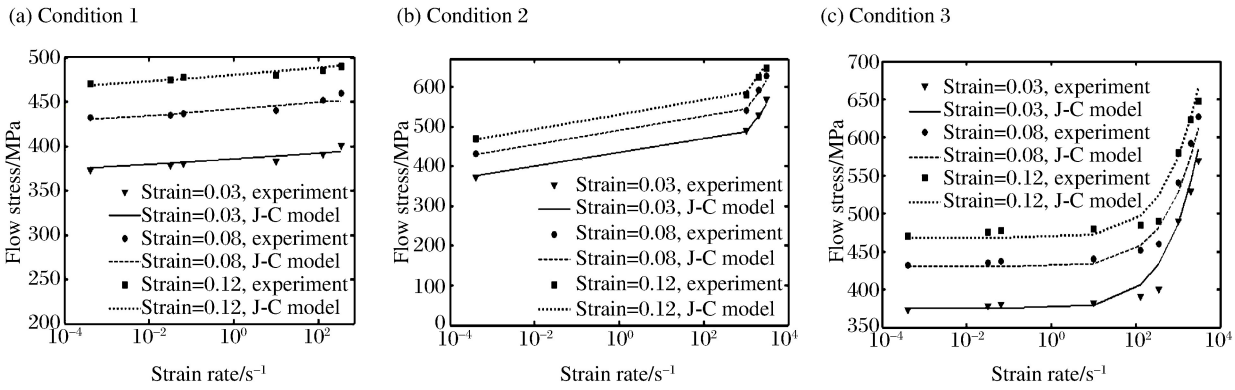

图 16　2A16-T4 铝合金应变率敏感性拟合结果与实验结果对比

Fig. 16　Comparison of fitted results of Johnson-Cook model with experiment results for 2A16-T4

2.3 材料中应变率力学性能数据对率相关参数的影响

由于材料中应变率力学性能实验技术普及程度不高，对材料动态力学性能的研究主要集中在准静态和高应变率范围内。此时，只能利用高应变率实验数据得到的 Johnson-Cook 本构模型，通过内插或外推方法得到其他应变率下的结果。

而实际情况中，材料在不同应变率范围内的应变率敏感性不一定相同，利用内插或外推法可能会与实际结果产生一定的误差。

图 17 为利用高应变率实验结果拟合的 Johnson-Cook 本构模型外推得到的材料中低应变率力学特性与真实结果的对比，可以看出，外推法对较低应变率数据预测结果较好，但对较高应变率的预测值偏高(预测值偏差大小与所选本构方程有关)。因此，为得到能覆盖材料由准静态到高应变率全范围力学特性的本构模型参数，必需综合考虑材料准静态、低、中、高应变率实验数据。由此得到的材料修正 Johnson-Cook 本构模型参数分别为 $A=289$ MPa、$B=500$ MPa、$n=0.52$、$C=1.83\times10^{-11}$、$P=8.66$，修正本构模型拟合结果与实验结果的对比如图 18 所示。

可以看出，所有应变率下拟合结果与实验结果均吻合很好，证明了本文所得修正 Johnson-Cook 本构模型预测 2A16-T4 铝合金动态力学行为的准确性。

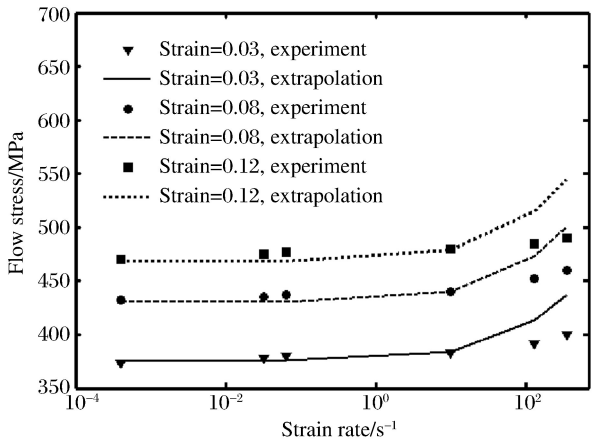

图 17 外推结果与实验结果的对比

Fig. 17 Comparison of extrapolated results with experimental results

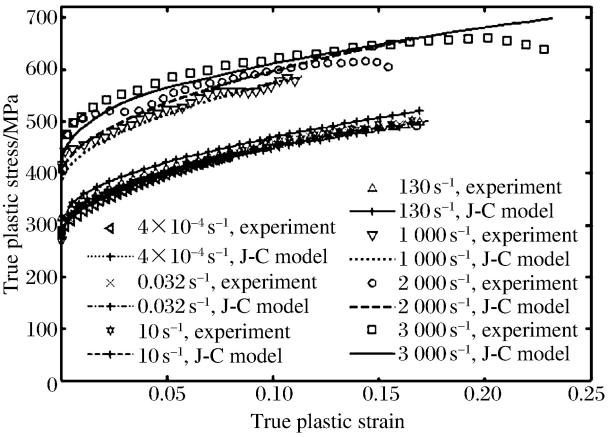

图 18 拟合结果与实验结果的对比

Fig. 18 Comparison of fitted results with experimental results

3 结 论

通过实验方法研究了较宽应变率范围下 2A16-T4 铝合金的动态力学特性，基于实验结果拟合得到修正 Johnson-Cook 本构模型，并分析了材料中应变率力学特性对率相关参量的影响。主要结论如下：

(1)2A16-T4 铝合金在常温下的应变率敏感性与应变率范围有关，在应变率 $10^{-4}\sim10^{2}$ s^{-1} 范围内率敏感性较弱，而在 $10^{2}\sim10^{3}$ s^{-1} 范围内率敏感性很强，且应变率强化效应随应变的增大而减小；

(2)2A16-T4 铝合金在应变率 $10^{-4}\sim10^{3}$ s^{-1} 范围内具有较强的应变硬化效应，且应变硬化效应随应变率的增大而减小；

(3)2A16-T4 铝合金的流动应力与应变率和应变相耦合，但在中应变率范围内主要受应变的影响，而在高应变率范围内同时受应变率和应变的影响；

(4)基于实验结果拟合得到修正的 Johnson-Cook 本构模型的预测结果与实验数据吻合很好，且考虑材料中应变率力学特性可提高应变率相关参量的准确性。

参考文献：

[1] 赵寿根，何著，杨嘉陵，等. 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 Shougen，He Zhu，Yang Jialing，et al. Experiment investigation of dynamic material property of aluminum alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2007，33(8)：982-985.

[2] Holt D L，Babcock S G，Green S J，et al. The strain-rate dependence of the flow stress in some aluminum alloys [J]. Transactions of the ASM：Transactions Quarterly，1967，60(2)：152-159.

[3] 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，2011，39(5)：39-42.
Wang Hongxin，Zha Xiaoxiong. Dynamic mechanical behavior and constitutive model of 3004 aluminum alloys[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology，2011，39(5)：39-42.

[4] 张伟，魏刚，肖新科，等. 2A12 铝合金本构关系和失效模型[J]. 兵工学报，2013，34(3)：276-282.
Zhang Wei，Wei Gang，Xiao Xinke，et al. Constitutive relation and fracture criterion of 2A12 aluminum alloys[J]. Acta Armamentarii，2013，34(3)：276-282.

[5] 张伟，肖新科，魏刚. 7A04 铝合金的本构关系和失效模型[J]. 爆炸与冲击，2011，31(1)：81-87.
Zhang Wei，Xiao Xinke，Wei Gang. Constitutive relation and fracture model of 7A04 aluminum alloys[J]. Explosion and Shock Waves，2011，31(1)：81-87.

[6] 张正礼. 2024 铝合金动态力学本构模型构建[J]. 沈阳航空航天大学学报，2014，31(2)：47-50.
Zhang Zhengli. Construction of dynamic mechanical constitutive model of 2024 aluminum[J]. Journal of Shenyang Aerospace University，2014，31(2)：47-50.

[7] 朱耀. AA 7055 铝合金在不同温度及应变率下力学性能的实验研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

[8] 谢灿军，童明波，刘富，等. 7075-T6 铝合金动态力学试验及本构模型研究[J]. 振动与冲击，2014，33(18)：100-114.
Xie Canjun，Tong Mingbo，Liu Fu，et al. Dynamic tests and constitutive model for 7075-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Vibration and Shock，2014，33(18)：110-114.

[9] 杨超，朱涛，肖守讷. 列车车体铝合金动态力学性能及其对吸能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2015，46(7)：2744-2749.
Yang Chao，Zhu Tao，Xiao Shoune. Dynamic mechanical properties of aluminum alloy used in carbodies of trains and effect on energy absorption[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2015，46(7)：2744-2749.

[10] Yatnalkar R S. Experimental investigation of plastic deformation of Ti-6Al-4V under various loading conditions [D]. The Ohio State：The Ohio State University，2010.

[11] Wood P K C，Schley C A，Kenny S，et al. Validating performance of automotive materials at high strain rate for improved crash design[C]// 9th International LS-DYNA Users Conference. Detroit，2006.

[12] 白春玉，刘小川，周苏枫，等. 中应变率下材料动态拉伸关键参数测试方法[J]. 爆炸与冲击，2015，35(4)：507-512.
Bai Chunyu，Liu Xiaochuan，Zhou Sufeng，et al. Material key parameters measurement method in the dynamic tensile testing at intermediate strain rate[J]. Explosion and Shock Waves，2015，35(4)：507-512.

[13] 余同希，邱信明. 冲击动力学[M]. 北京：清华大学出版社，2011.

[14] 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. The Hague，Netherlands，1983：541-547.

[15] Kang W J，Cho S S，Huh H，et al. Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulation [J]. International Journal of Vehicle Design，1999，21(4)：424-435.

[16] Cowper G R，Symonds P S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams[R]. Division of Applied Mathematics，Brown University，1957.

[17] Huh H，Kang W J，Han S S. A tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metals[J]. Experimental Mechanics，2002，42(1)：8-17.

Dynamic mechanical properties of 2A16-T4 aluminum alloy at wide-ranging strain rates

Xi Xulong, Bai Chunyu, Liu Xiaochuan, Mu Rangke, Wang Jizhen
(*Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structures Impact Dynamics, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an* 710065 *Shaanxi, China*)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical properties of 2A16-T4 aluminum alloy, experiments for the alloy at quasi-static, intermediate, and high strain rates were performed using an electronic multi-purpose testing machine, a high velocity hydraulic servo-testing machine and a split Hopkinson press bar (SHPB) at room temperature, and the stress-strain curves at different strain rates were obtained, with a modified Johnson-Cook constitutive model fitted. The dynamic mechanical properties at intermediate strain rates and its influence on the constitutive model's parameters were analyzed. The results show that the strain rate hardening effect on the 2A16-T4 aluminum alloy is not obvious between $10^{-4}\sim10^{2}$ s^{-1}, but it is obvious between $10^{2}\sim10^{3}$ s^{-1}, decreasing with the increase of the plastic strain. In addition, this effect is obvious between $10^{-4}\sim10^{3}$ s^{-1}, decreasing with the increase of the strain rate. Moreover, the fitted results of modified Johnson-Cook constitutive model agree well with the experiment results, representing well the alloy's dynamic mechanical properties, which can improve the precision of the model's rate-sensitive parameters over a wide range of strain rates.

Keywords: Johnson-Cook constitutive model; high velocity hydraulic servo-testing machine; intermediate strain rates; 2A16-T4 aluminum alloy; strain rate effect

(责任编辑 丁 峰)