

文章编号: 1001-1455(2011)01-0081-07

# 7A04 铝合金的本构关系和失效模型\*

张 伟,肖新科,魏 刚

(哈尔滨工业大学高速撞击研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 使用万能材料试验机、扭转试验机和 Taylor 撞击实验研究了高强铝合金 7A04 在常温至 250 °C 的准静态、动态本构关系和失效模型。基于实验结果,修改了 Johnson-Cook 强度模型中的应变强化项以及 Johnson-Cook 失效模型中的温度软化项,并结合数值模拟标定了模型参数。实验结果表明,7A04 铝合金的应变和应变率强化效应不显著,失效应变随温度的增加、应力三轴度的减小和应变率的减小而增加。

**关键词:** 固体力学;失效模型;Taylor 撞击;7A04 铝合金;Johnson-Cook 模型;本构关系

**中图分类号:** O347.3      **国标学科代码:** 130·15      **文献标志码:** A

超高强度铝合金作为一种重要的结构材料,以优异的机械性能广泛应用于航空和航天工业,并开始在汽车和其他工业被越来越多地采用<sup>[1]</sup>。7A04 是一种 Al-Zn-Mg-Cu 系高强度超硬铝型合金,可热处理强化。传统的穿甲防护材料中经常使用钢材,而相对于钢材而言,超硬铝合金具有比强度高、密度低的特点,因此使用铝合金作为防护材料将会降低防护结构的负荷从而提高机动性。目前,对 7A04 的研究主要集中在腐蚀性能上<sup>[1-3]</sup>。高玉华<sup>[4-5]</sup>对 7A04(即 LC4)的准静态和动态拉压性能进行了实验研究,结果表明 7A04 是应变率不敏感材料。赵寿根等<sup>[6]</sup>使用 SHPB 研究了 LC4CS 的动态力学性能,得到了 C-S 模型参数,证实了 LC4CS 的应变率敏感性很小,徐勇<sup>[7]</sup>研究了 LC4 的高温变形规律,并拟合出具有较高精度的高温本构模型。还需对 7A04 的本构关系和失效模型进行系统的、同时包含不同温度和应变率的研究。

本文中,使用万能材料试验机对 7A04 在常温至 250 °C 的准静态力学行为进行研究,并同时使用 Taylor 撞击实验研究应变率敏感性,结合扭转和压缩实验获得 7A04 的失效应变与应力状态(应力三轴度)的关系。基于实验结果,修改 Johnson-Cook 强度模型中的应变强化效应项和 Johnson-Cook 失效模型中的温度软化项,并结合数值模拟获得相应的模型参数,修改后的 Johnson-Cook 模型的预测结果与实验吻合比较。

## 1 7A04 的力学性能实验

实验所用原材料为直径 25 mm 的 7A04 棒料,由东北轻合金有限责任公司提供,热处理状态满足 F、H112、R。铝合金材料的其他化学成分的质量分数分别为: $w(\text{Si})=0.6\%$ , $w(\text{Fe})=0.7\%$ , $w(\text{Cu})=0.05\%$ , $w(\text{Mn})=1.0\%$ , $w(\text{Zn})=0.10\%$ 。

### 1.1 准静态实验及结果

光滑圆棒试样名义直径为 6 mm,标距段长 30 mm。使用万能材料试验机 Shimadzu AG-I 进行了室温和 100、150、200、250 °C 的准静态拉伸实验。使用视频引伸计 DVE-101 跟踪标距段的伸长量,室温和高温实验跟踪的标距段的长度分别为 20 和 25 mm,名义应变率为  $1.11 \text{ ks}^{-1}$ 。

图 1 给出了实验中的载荷位移曲线,图 2 给出了屈服强度和失效应变随温度的变化,以及对应的拟合曲线。失效应变定义为  $\epsilon_f = \ln(A_0/A_f)$ ,其中  $A_0$ 、 $A_f$  分别为试样的初始面积和拉断后断口的面积。

\* 收稿日期: 2009-12-07; 修回日期: 2010-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072072)

作者简介: 张 伟(1964—),男,博士,教授,博士生导师。

需要说明的是,由于材料性能在 200 °C 时具有一定的离散性(如图 2 所示),图 1 并未给出所有实验的结果。

由图 2 可知,7A04 的失效应变随温度的升高显著增加,屈服强度随温度的升高而降低:当温度从室温增加到 100 °C 时,强度下降不明显;温度为 200 °C 时,材料的屈服强度离散性较大;当温度为 250 °C 时,强度仅为常温的 52.2%。实验中断口均表现为显示了塑性断裂的杯锥口状。

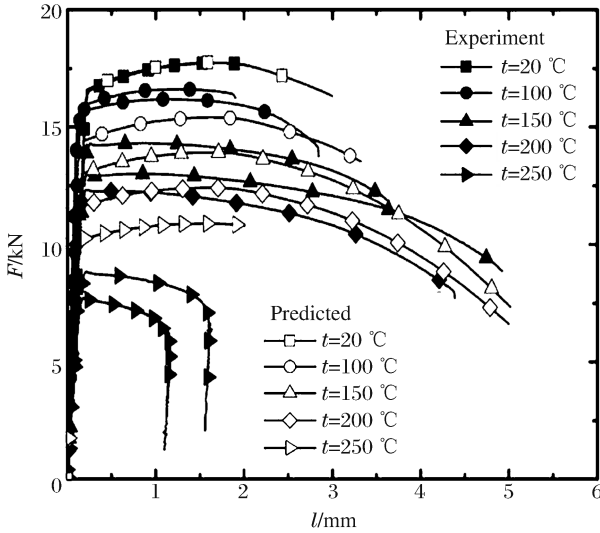


图 1 不同温度下 7A04 的载荷-位移曲线  
Fig. 1 Load-displacement curves of 7A04 at various temperature

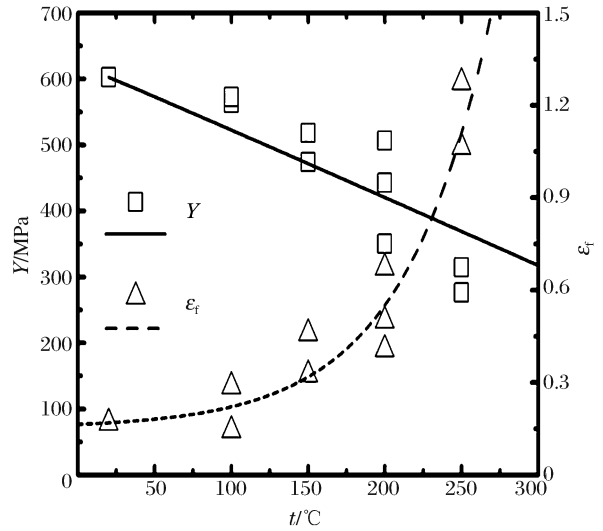


图 2 屈服强度和失效应变随温度的变化  
Fig. 2 Variations of yield strength and fracture strain versus temperature

通常认为失效应变极大地依赖于应力三轴度(即  $\sigma^* = \sigma_H / \sigma_{eq}$ ,  $\sigma_H$  为静水压力,  $\sigma_{eq}$  为等效应力)。进行了常温压缩、扭转和缺口拉伸实验。压缩实验中,使用试验机 Instron 5500 对名义直径为 12.40 mm、长径比分别为 0.8、1、1.5 和 2 的圆柱试样进行了压缩实验,得到的平均压缩屈服强度为 603.6 MPa,这与常温拉伸屈服强度 602.5 MPa 十分接近,实验中长径比 0.8 和 1 的试样未断裂,长径比为 1.5 和 2 的试样沿加载方向 45° 方向断裂,如图 3(a)所示。使用电子扭转试验机,获得了直径为 6 mm 的光滑圆棒试样的扭矩-转角曲线,如图 4 所示,实验发现断口平整,如图 3(b)所示。缺口拉伸试样直径为 6 mm (缺口处最小直径),缺口半径分别为 9 和 3 mm,实验得到的载荷位移曲线如图 5 所示,断口形状仍保持为杯锥口状。20 和 30 分别表示数值模拟中试样的半径分别划分的单元数目。

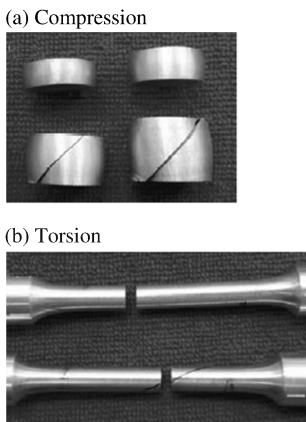


图 3 压缩和扭转载荷下的变形和断裂形式  
Fig. 3 Deformation and fracture patterns in compression and torsion experiments

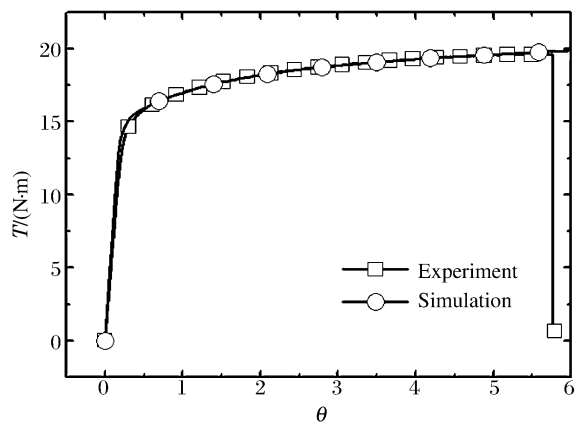


图 4 扭矩-转角曲线  
Fig. 4 Torque-angle in the torsion experiment

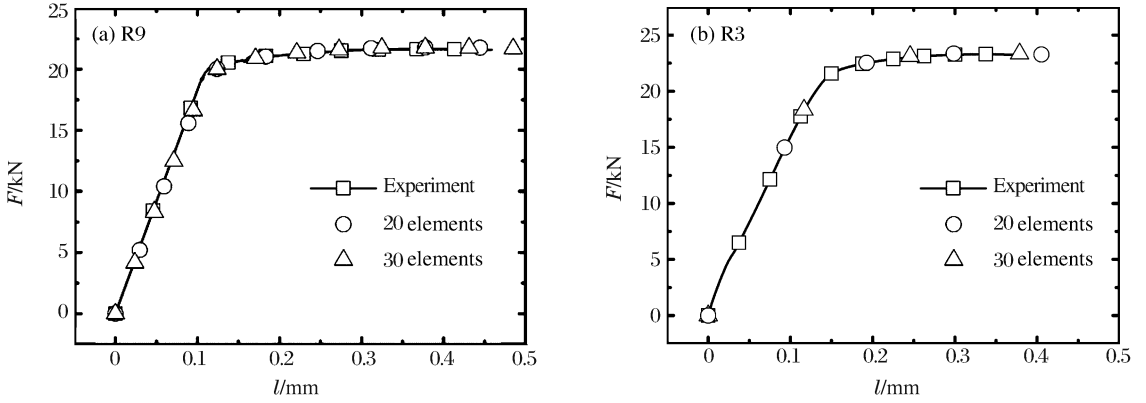


图 5 缺口试样的载荷位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of notched specimens

### 1.2 Taylor 撞击实验和结果

Taylor 撞击实验经常被用于获取或者校验材料参数<sup>[8-10]</sup>。使用直径 12.62 mm、长度 50.82 mm 的弹体垂直正撞击厚 25 mm、直径 250 mm 的装甲钢靶,得到了弹体的剩余长度和弹体头部直径随撞击速度的变化数据,如表 1 所示。实验中钢靶未见明显变形。

表 1 Taylor 撞击实验结果

Table 1 Taylor impact experiment results

No	m/g	h <sub>0</sub> /mm	d <sub>0</sub> /mm	v <sub>0</sub> /(m/s)	h <sub>r,exp</sub> /mm	d <sub>c,exp</sub> /mm	h <sub>r,cal</sub> /mm			d <sub>c,cal</sub> /mm		
							15	30	60	15	30	60
1	17.968	50.82	12.62	176.5	48.47	14.64	—	48.45	48.42	—	14.59	14.61
2	17.971	50.50	12.62	184.5	48.29	14.81	48.02	48.01	48.01	14.87	14.89	14.90
3	17.951	50.82	12.60	191.7	47.63	15.70	48.19	48.19	48.19	15.06	15.10	15.11
4	17.963	50.79	12.62	199.6	47.76	15.60	47.77	47.82	47.77	15.32	15.29	15.33
5	17.955	50.83	12.62	201.9	47.62	15.37	47.71	47.75	47.70	15.40	15.37	15.41
6	17.964	50.82	12.62	204.3	47.69	15.56	47.64	47.68	47.63	15.49	15.45	15.50
7	17.982	50.82	12.62	211.3	47.42	15.74	47.43	47.47	47.42	15.75	15.71	15.75
8	17.956	50.85	12.63	221.5	47.69	16.44	—	—	—	—	—	—

## 2 7A04 的本构模型和失效模型

### 2.1 本构关系

由于 Johnson-Cook 强度模型的简单形式包含了应变率和温度效应的影响,并且可以对金属材料的本构关系给出比较理想的预测。尝试在 J-C 强度模型的基础上描述 7A04 的力学行为。J-C 模型表达式为

$$\sigma_{eq} = (A + B\epsilon_{eq}^n)[1 + C \ln(\dot{\epsilon}_{eq}^*)][1 - (T^*)^m] \tag{1}$$

式中:A 为材料在参考应变率和参考温度下的屈服强度;B 和 n 为应变强化系数,C 为应变率敏感系数;m 为温度软化系数; $\sigma_{eq}$  为等效应力; $\epsilon_{eq}$  为等效应变; $\dot{\epsilon}_{eq}^*$  为量纲一等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_{eq}^* = \dot{\epsilon}_{eq} / \dot{\epsilon}_0$ , $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ ,为量纲一温度, $T_r$ 、 $T_m$  分别为参考温度(293 K)和材料的熔点(878 K),T 为当前温度。

#### 2.1.1 准静态力学行为

使用 J-C 模型对对常温下光滑圆棒试样等效应力-等效应变曲线进行拟合,得到  $A = 602.5 \text{ MPa}$ , B

$=732.1 \text{ MPa}$ ,  $n=0.753$ , 该组参数记为 J-C 1。需要注意的是实验过程中试样出现了轻微的径缩(图 1 常温实验中载荷出现下降), 拟合过程中只使用颈缩前的数据。如果考虑颈缩失稳条件的话, 需要满足  $d\sigma_{\text{eq}}/d\epsilon_{\text{eq}}=\sigma_{\text{eq}}$ , 那么  $B=314.5 \text{ MPa}$ ,  $n=0.482$ , 该组参数记为 J-C 2。为考察 J-C 模型的预测结果, 使用这 2 套参数分别对准静态常温下的拉伸实验进行计算, 在 ABAQUS/STANDARD 中建立二维轴对称计算模型, 固定试样的一端, 对另一端施加位移(第 2.2 节对缺口试样的模拟方法相同)。图 6 给出了模拟得到的载荷-位移曲线与实验的对比。由图可知, 2 组参数都可以给出与实验一致性较好的预测, 但是参数 J-C 1 不能预测颈缩现象, 而参数 J-C 2 虽然可以预测到颈缩, 但是对材料刚进入屈服时的载荷的预报比实验高。

因此使用分段形式的表达式代替 J-C 模型中  $A+B\epsilon_{\text{eq}}^n$ , 在颈缩前采用 Voce 形式, 即

$$\sigma_{\text{eq}} = A + A_1 [1 - \exp(-\epsilon_{\text{eq}}/t_1)] \quad \epsilon_{\text{eq}} < \epsilon_u - A/E \quad (2)$$

式中:  $A_1$  和  $t_1$  为材料参数;  $A$  与 J-C 模型中的含义相同,  $E$  为弹性模量。颈缩后的屈服应力表示为

$$\sigma_{\text{eq}} = \sigma_u [\omega(1 + \epsilon_{\text{eq}} - \epsilon_u + A/E) + (1 - \omega)(\epsilon_{\text{eq}}/\epsilon_u)^{\epsilon_u}] \quad \epsilon_{\text{eq}} \geq \epsilon_u - A/E \quad (3)$$

式中:  $\sigma_u$  和  $\epsilon_u$  为颈缩时的真实应力和应变;  $\omega$  介于  $0 \sim 1$  之间的权值。当  $\omega=1$  时, 颈缩后的屈服强度以颈缩点处的切线为斜率而线性增加; 当  $\omega=0$  时, 颈缩后的屈服强度以  $K\epsilon^n$  的幂函数形式增加( $K$  和  $n$  为硬化参数); 当  $\omega$  介于  $0 \sim 1$  之间时, 屈服强度时两者的线性组合。可以调整  $\omega$  通过数值模拟得到颈缩后的应力应变曲线。该方法<sup>[11]</sup>已被证明简单且有效。

实验结果表明,  $E=69.35 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_u=681.5 \text{ MPa}$ ,  $\epsilon_u=0.0638$ ; 通过对颈缩前的应力应变关系拟合得到  $A_1=119.0 \text{ MPa}$ ,  $t_1=0.05$ ; 通过使用 2 维轴对称模型的数值模拟, 可确定  $\omega=0.1$ 。图 7 给出了此时的预测结果, 同时给出了半径方向划分 20 个和 30 个单元的预测结果。可以看出, 预测结果与实验吻合非常好。对比图 6 可知, 本文的模型可改进预测结果。

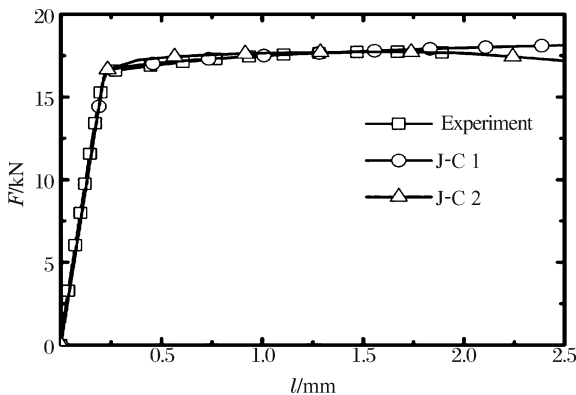


图 6 实验和 J-C 强度模型载荷位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves between the test result and J-C strength model predictions

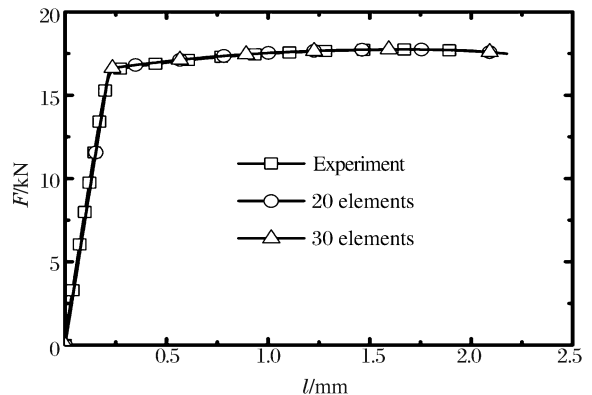


图 7 实验和改进模型载荷位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves between the test result and the proposed model

### 2.1.2 温度对屈服强度的影响

由图 2 中屈服强度随温度的变化曲线, 采用 J-C 模型中温度软化项, 可以得到温度软化参数  $m=1.015$ , 拟合效果如图 2 所示。使用本文的本构模型对不同温度下光滑试样的单向拉伸实验进行了数值模拟, 得到的载荷位移曲线如图 1 所示。由图 1 可见, 本文的本构模型可以对高温下的材料行为给出合理的预测。同时由图 1 还可见, 温度为  $100$  和  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 模型预测与实验结果存在一定差别, 这是由于采用的本构模型中温度软化项无法对所有温度下的屈服点给出更好的拟合结果造成的(如图 2 所示)。而对所有温度下的屈服点给出更好的拟合则需要一个新的函数形式和引入更多的材料参数。

### 2.1.3 高应变率下的力学行为

模型中除应变率敏感系数  $C$ , 其他参数已全部确定, 使用 ABAQUS/EXPLICIT 建立 2 维轴对称模型对 Taylor 撞击实验进行模拟, 获得  $C$  与弹体的剩余长度和头部镦粗直径的关系, 比较模拟与实验的

结果可以确定  $C$ 。

撞击过程中的温升表达为  $\Delta T = \frac{\chi}{\rho c_p} \int \sigma_{eq} d\epsilon_{eq}$ , 其中,  $\rho$  为材料密度,  $c_p$  为比热,  $\chi$  为塑性功转热系数, 通常认为  $\chi = 0.9$ 。由材料手册,  $\rho = 2.85 \text{ t/m}^3$ ,  $c_p = 921 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

装甲钢靶板由于在撞击中变形很小, 本构关系采用双线性硬化模型, 并忽略应变率对强度的影响, 不考虑在撞击过程中的温升。即

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \sigma_0 + E_t(\epsilon - \epsilon_0) & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E$  和  $E_t$  分别为弹性模量和切线模量,  $\sigma_0$  为屈服强度,  $\epsilon$  为真应变,  $\epsilon_0$  为初始屈服点的应变。计算中,  $E = 204 \text{ GPa}$ ,  $E_t = 15 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_0 = 1.9 \text{ GPa}$ 。

数值模拟得到  $C = 0.014$ , 数值模拟得到的弹体撞击后的头部直径和剩余长度见表 1。表 1 中给出了 3 组数值模拟的结果, 弹体半径方向依次划分为 15、30 和 60 个单元。

### 2.2 失效模型

由前述实验可知, 7A04 是一种延性材料, 因此可以尝试采用 Johnson-Cook 失效模型来拟合失效应变与应力三轴度、温度以及应变率的关系。但由图 2 可知, 失效应变随温度的升高并不呈现线性关系, 因此修改 Johnson-Cook 失效模型为

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}_{eq}^*) [1 + D_5 (1 - \exp(D_6 T^*))] \quad (5)$$

式中:  $D_1 \sim D_6$  为材料参数。

根据准静态的光滑圆棒拉伸实验、缺口拉伸实验、压缩实验和扭转实验可得到失效应变随应力三轴度的变化, 即得到  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$ 。根据 P. W. Bridgman<sup>[12]</sup> 的分析, 可近似取拉伸试样中的应力三轴度表示为  $\sigma_{max}^* = 1/3 + \ln[1 + a/(2R)]$ , 扭转和压缩的应力三轴度分别为 0 和  $-1/3$ 。由于断口直径或者面积的精确测量比较困难, 对于拉伸和扭转实验, 采用得到的本构关系对实验进行数值模拟, 然后找到对应实验发生断裂的时间点, 得到的最大等效应变即为相应的失效应变。该方法有许多成功的应用<sup>[13-14]</sup>。

对扭转实验的模拟采用二维轴对称模型, 固定试样的一段, 对另一端施加扭角。对得到的断裂应变拟合得到  $D_1 = 0.059$ ,  $D_2 = 0.246$ ,  $D_3 = -2.41$ 。图 8 给出了数值模拟得到的断裂应变, 图中的曲线是拟合得到的预测值。数值模拟得到的载荷位移曲线与实验具有较好的一致性, 见图 4、图 5 和图 7, 因此可以认为模拟得到的失效应变与实际实验值一致。需要说明的是, 在扭转实验的模拟中使用拉伸得到的本构关系计算时得到的扭矩比实验值大, 将拉伸得到的本构关系中初始屈服后的屈服应力等比例缩小至 0.725 倍时可得到与实验一致的结果。这说明, 7A04 棒材的强度与应力状态有关系。为方便工程分析, 本文中仍认为材料是各项同性的。

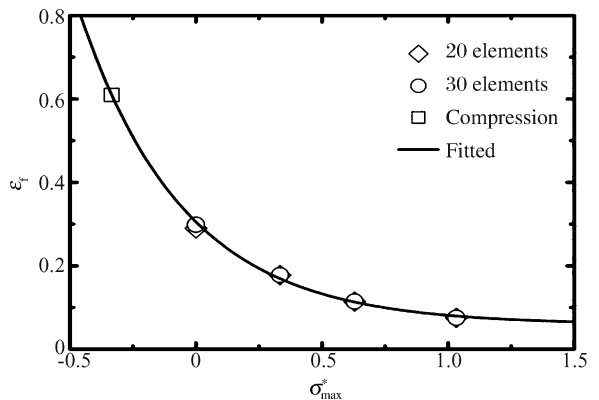


图 8 断裂应变随应力三轴度的变化

Fig. 8 Fracture strain versus stress triaxiality

对不同温度下光滑圆棒拉伸实验的断裂应变(见图 2)进行拟合得  $D_5 = -0.1$ ,  $D_6 = 10.0$ 。图 2 中的间断线为拟合值。

到目前为止, 失效模型中的参数除了应变率相关系数  $D_4$  未知, 其余参数全部已经得到。因此,  $D_4$  可以通过 Taylor 实验中临界开裂的实验反算得到。由表 1 可知, 临界开裂速度为 221.5 m/s, 使用 ABAQUS/EXPLICIT 模拟时发现  $D_4 = -0.1$  时可得到与实验一致的实验现象, 撞击头部的变形和开裂如图 9 所示。

至此, 得到了模型中的所有参数。在文献[15]中, 使用本文中提出的本构模型和失效模型以及得到

的材料参数,再现了 Taylor 撞击实验中出现的几种变形和断裂形式(包括破碎),验证了本文工作的有效性。

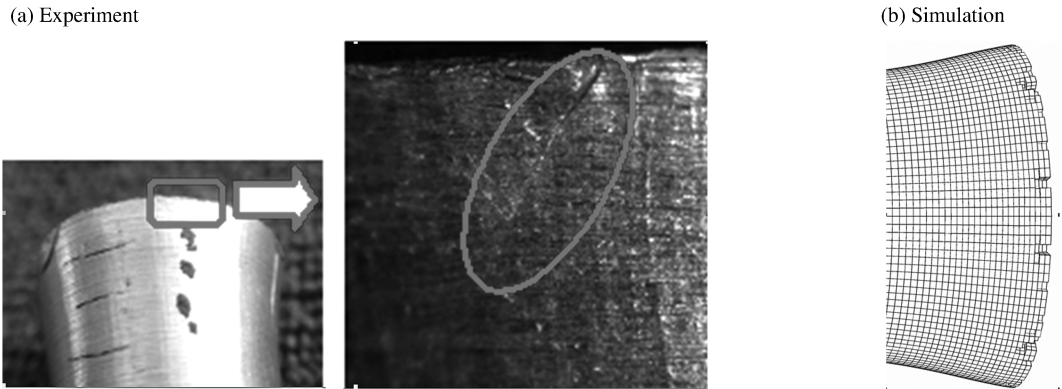


图9 实验和数值模拟的变形和开裂的对比

Fig. 9 Comparison of the deformation and fracture obtained in experiment and predicted by numerical simulation

### 3 结论

使用万能材料试验机、扭转试验机和 Taylor 撞击实验,并结合数值模拟,研究了 7A04 的准静态、动态以及高温本构关系和失效模型。实验结果表明:7A04 的应变强化效应不明显,应变率敏感性较弱,温度软化效应明显;失效应变随应力三轴度增加而减小,随温度升高而增加,随应变率增加而减小。

基于实验结果对 Johnson-Cook 强度模型中的应变强化项进行了修改,使用了 2 个函数分别描述径缩前和径缩后的屈服行为。修改后的模型给出了与实验吻合很好的预报结果。

实验结果显示,失效应变与温度的增加不成线性关系。通过修改 Johnson-Cook 失效模型中的温度软化项改进了预测结果。

强度和失效模型中的应变率敏感性参数是通过 Taylor 撞击实验的数值模拟得到的,直接测量还需要借助 Hopkinson 拉伸实验进行研究。

### 参考文献:

- [1] 刘继华,李获,郭宝兰,等. LC4 高强铝合金的慢应变速率拉伸试验[J]. 材料科学与工艺,2001,9(1):37-41.  
LIU Ji-hua, LI Di, GUO Bao-lan, et al. Slow strain rate tension test of high-strength aluminum alloy 7075[J]. Materials Science and Technology, 2001,9(1):37-41.
- [2] 钱建刚,李获. LC4 高强铝合金的腐蚀性能研究[J]. 腐蚀与防护,2002,23(8):340-343.  
QIAN Jian-gang, LI Di. Corrosion behavior of high-strength aluminum alloy LC4[J]. Corrosion and Protection, 2002,23(8):340-343.
- [3] 王振尧,马腾,韩薇,等. LC4 铝合金在模拟污染大气环境中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2005,25(6):321-325.  
WANG Zhen-yao, MA Teng, HAN Wei, et al. Corrosion behavior of Al alloy LC4 in simulated polluted atmospheric environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005,25(6):321-325.
- [4] 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):25-29.  
GAO Yu-hua. Dynamic compression and tension properties of Al alloy LC4 and LY12CZ at high strain rates[J]. Materials Science and Technology, 1994,2(2):25-29.
- [5] 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):62-66.  
GAO Yu-hua. An experimental study of rate-dependence material-Alloys LC4 and LY12CZ[J]. Shanghai Journal of Mechanics, 1995,16(1):62-66.
- [6] 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 Shou-gen, HE Zhu, YANG Jia-ling, et al. Experiment investigation of dynamic material property of aluminium alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007,33(8):982-985.
- [7] 徐勇. LC4 铝合金高温变形规律的探讨[J]. 上海金属, 2004,26(4):5-7.
- XU Yong. Study on the deformation of aluminum alloy LC4 at high temperature[J]. Shanghai Metals, 2004,26(4):5-7.
- [8] Allen D J, Rule W K, Jones S E. Optimizing material strength constants numerically extracted from Taylor impact data[J]. Experimental Mechanics, 1997,37(3):333-338.
- [9] Hawkyard J B, Eaton D, Johnson W. The mean dynamic yield strength of copper and low carbon steel at elevated temperatures from measurements of the “mushrooming” of flat-ended projectiles[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1968,10(12):929-948.
- [10] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005,25(5):451-456.
- CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, TAO Jun-lin, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):451-456.
- [11] Ling Y. Uniaxial true stress-strain after necking[J]. AMP Journal of Technology, 1996,5:37-48.
- [12] Bridgman P W. Studies in large plastic flow and fracture[M]. London: McGraw-Hill Publishing Co, 1952.
- [13] Bao Y, Wierzbicki T. A comparative study on various ductile crack formation criteria[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 2004,126(3):314-324.
- [14] Wierzbicki T, Bao Y, Lee Y, et al. Calibration and evaluation of seven fracture models[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005,47(4-5):719-743.
- [15] XIAO Xin-ke, ZHANG Wei, WEI Gang, et al. Experimental and numerical investigation on the deformation and fracture modes in the Taylor test[J]. Materials and Design, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.

## Constitutive relation and fracture model of 7A04 aluminum alloy<sup>\*</sup>

ZHANG Wei, XIAO Xin-ke, WEI Gang

(Hyper Velocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150008, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The quasi-static and dynamic constitutive relation as well as the fracture model of 7A04 aluminum alloy, from room temperature to 250 °C, were investigated by using a universal testing machine, a torsion testing machine and the Taylor impact test. Based on the experimental results, the strain hardening term of the Johnson-Cook strength model and the temperature softening item in the Johnson-Cook fracture model were modified. The material constants were calibrated by a combination of experimental tests and numerical simulations. Experimental results show that both the strain and strain rate hardening effect are not significant and that fracture strain increases with the increase of temperature and the decrease of either stress triaxiality or strain rate.

**Key words:** solid mechanics; fracture model; Taylor impact; 7A04 aluminum alloy; Johnson-Cook model; constitutive relation

\* Received 7 December 2009; Revised 15 April 2010

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11072072)

Corresponding author: ZHANG Wei, zhangdawei64@hotmail.com