

铝合金拉伸性能及其本构模型

白浩龙 谢逸 刘贤龙 (通讯作者) 丁俊凡 陶璐 任鸣钟

(湖北汽车工业学院材料科学与工程学院)

摘要: 在应变速率分别为 0.01、0.05、0.1、1, 温度分别为 300、350、400、450、500℃的情况下对铝合金 6061 进行热拉伸性能与 Johnson-Cook 本构模型研究。基于实验与模型构建进一步揭示温度、应变速率等条件对铝合金 6061 热成形力学性能的影响规律。结果表明铝合金拉伸性能良好。

关键词: 6061 铝合金; 拉伸; Johnson-Cook 本构模型

1 引言

铸造铝合金作为传统的金属材料, 具有比重低、比强度高、易加工、成本低、散热性能和耐腐蚀性能好, 生产零件灵活、简单, 易于批量生产等特点, 广泛应用于航空、航天、汽车、机械等行业。随着现代工业的发展, 对铸造铝合金, 特别是对具有较高抗拉强度和延伸率综合力学性能的铸造铝合金的需求越来越大。然而现有方法加工的铸造铝合金拉伸性能一般, 无法满足市场的需求。

6061 牌号的材料主要合金元素为 Mg 和 Si, 是应用最为广泛的铝合金之一。6061 铝合金的主要合金, 是经热处理预拉伸工艺生产的高品质铝合金产品, 其镁、硅合金特性多, 具有加工性能极佳、优良的焊接特点及电镀性、良好的抗腐蚀性、韧性高及加工后不变形、材料致密无缺陷及易于抛光、上色膜容易、氧化效果极佳等优良特点。镁铝 6061-T651 是 6 系合金的主要合金, 是经热处理预拉伸工艺的高品质铝合金产品; 镁铝 6061 具有加工性能极佳、良好的抗腐蚀性、韧性高及加工后不变形、上色膜容易、氧化效果极佳等优良特点。为了更好地了解 6061 铝合金的拉伸力学性能, 我们在试验涉及的应变速率范围内对其进行拉伸试验, 研究它的应力、屈服点、抗拉强度以及断裂应变与应变速率的敏感相关性, 建立了相关的本构方程, 以期工程上的车身结构轻量化分析提供基础数据支撑。

2 试样制备与实验方法

板料成形性是指板料对冲压加工的适应能力。研究表明, 板料成形性和材料性能参数之间存在着相关性。一旦二者的相关性被确定, 一种材料只需经过简单的拉伸试验结果, 就可准确地评估板料的成形性。对传统汽车用钢板来说, 硬化指数越大, 胀形性越好; 厚向异性系数越大, 拉深性能越好。钢板的这种相关性对于有色金属是不适合的^[5]。随着铝合金在车身上使用的增加, 系统地研究高强度铝合金板料的材料性能与其成形性之间的对应关系, 对汽车覆盖件生产有着重要的意义。^[6]为进一步完成实验研究, 我们选用 25 组 6061 铝合金棒材, 分别在应变速率分别为 0.01、0.05、0.1、1, 温度分别为 300、350、400、450、500℃下采用 Geleeble-3500 万能试验机, 升温速率为 60℃/min, 拉伸至断裂。

在达到预设温度后保温 3min, 然后进行热拉伸, 拉伸完成后迅速进行水冷。实验结束后采用电子测量器和洛氏硬度计, 分别测量其延伸率和拉伸后的硬度。具体数值见表 1。并在 DEFROM-3D 中建立圆柱拉伸模型, 将建立的热拉伸高温流变曲线作为输入, 将预测的结果与实验结果进行对比, 验证有限元模型的准确性和适用性。利用 Johnson-Cook 本构模型进行数据拟合。

表 1 实验的数据

组别	变形温度/℃	应变速率/s ⁻¹	变形量/%	拉伸率/%	组别	变形温度/℃	应变速率/s ⁻¹	变形量/%	拉伸率/%
1	300	0.01	拉伸	6.71%	14	450	1	拉伸	7.56%
2	350	0.01	拉伸	6.44%	15	500	1	拉伸	8.12%
3	400	0.01	拉伸	6.71%	16	300	0.05	拉伸	6.52%
4	450	0.01	拉伸	6.75%	17	350	0.05	拉伸	7.20%
5	500	0.01	拉伸	6.82%	18	400	0.05	拉伸	5.08%
6	300	0.1	拉伸	7.84%	19	450	0.05	拉伸	5.67%
7	350	0.1	拉伸	4.96%	20	500	0.05	拉伸	5.01%
8	400	0.1	拉伸	6.44%	21	300	0.5	拉伸	5.71%
9	450	0.1	拉伸	6.73%	22	350	0.5	拉伸	5.09%
10	500	0.1	拉伸	6.59%	23	400	0.5	拉伸	5.47%
11	300	1	拉伸	6.72%	24	450	0.5	拉伸	6.29%
12	350	1	拉伸	6.71%	25	500	0.5	拉伸	5.01%
13	400	1	拉伸	7.32%					

对断裂后的铝合金铁棒先进行两次取样, 然后进行显微硬度测试, 结果表明, 断裂后的铝合金硬度符合标准要求。

3 Johnson-Cook 本构模型

Johnson-Cook 模型可以描述大变形、高应变速率、高温条件下金属的塑性行为, 可以用式(1)表征金属的流变应力。与应变、应变速率以及温度之间的关系。

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) (1 - T^{*m}) \quad (3.1)$$

式中: A 为材料在准静态条件下的屈服强度; B 和 n 为加工硬化参数; C 为应变速率敏感系数; T* 为无量纲温度; m 为温度敏感系数; e 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率。

由于 J-C 模型可以解耦为三个相互独立的应变硬化方程, 应变率硬化方程和温度软化方程, 各个方程中的参数在参考应变率、参考温度下, 可以分别将应变率和温度的影响消除掉, 从而将 J-C 模型解耦, 得出独立的应变硬化方程、应变率敏感性方程和温度软化方程。

(1) 在参考应变率和参考温度下, 由于 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$, $T = T_m$, 根据公式(4)得 $\dot{\epsilon}^* = 1$, $T^* = 1$, J-C 模型简化为

$$\sigma = A + B\epsilon^n \quad (3.2)$$

式中 A 为屈服强度, 可直接通过常温准静态下的应力-应变曲线观察得到, 以 $\ln \epsilon$ 为横坐标, $\ln(\sigma - A)$ 为纵坐标作出一条直线, 直线斜率即为 n, 直线的 y 坐标轴截距为 $\ln B$ 。经计算可得, A 为 372Mpa, B 为 249.21, n 为 0.6435。

(2) 在参考应变率下, 由于 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$, 由方程(4)得 $\dot{\epsilon}^* = 1$, J-C 模型简化为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 - T^{*m}) \quad (3.3)$$

以 $\ln(1 - \frac{\sigma}{A + B\epsilon^n})$ 为横坐标, $\ln T^*$ 为纵坐标作出一条直线, 直线斜率即为 m。

当真应变变为 0.025 时求得 m 为 0.18

(3) 在参考温度下, 由于 $T = T_0$, 高速率成形时试样处于绝热状态, 高速率塑性变形会造成一定的温度软化效应, 根据方程 (2) 和方程 (4), 不同应变率下的相对温度可以算出,

$$T_{\dot{\epsilon}}^* = \frac{\Delta T_{\dot{\epsilon}}}{T_m - T_0}$$

式中, $T_{\dot{\epsilon}}^*$ 为不同应变率下求出的相对温度, $\Delta T_{\dot{\epsilon}}$ 为不同应

变率下的绝热温升。再以 $\frac{\sigma}{(A+B\dot{\epsilon}^n)(1-T_{\dot{\epsilon}}^*)^m}$ 为横坐标, $\ln \dot{\epsilon}^*$ 为纵坐标作出一条直线, 直线斜率即为 c。

C 为 0.07635。

(4) 参数优化: 由于 J-C 模型只是一个经验方程, 步骤 (2) 和步骤 (3) 中作出的图形并不一定是一条理想的直线, 因此只能确定 c 和 m 的取值范围, 此时需通过一种约束优化程序来减小模型预测值和实验值之间的误差。Matlab 在非线性回归和参数优化方面有着强大的功能, 可以将实验值和预测值的均方根误差设为目标函数, c 和 m 设为自变量, (2) 和 (3) 中得到的 c 和 m 的最大值和最小值设为边界, 通过非线性回归函数 lsqnonlin 或遗传算法函数 gaool 等就能算得最佳 c 值和 m 值。计算得出, $c=0.07635$, $m=0.18$ 。

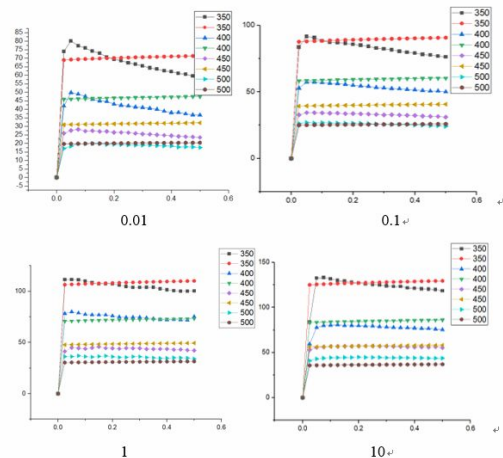
最终获得的 6061 铝合金高速率 J-C 本构模型为:

$$\sigma = (372 + 249.21\dot{\epsilon}^{0.6433}) (1 + 0.07635 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T_{\dot{\epsilon}}^{*0.18})$$

检验 (左边为实际测量数据, 右边为拟合计算数据) 如下图:



4 结果讨论



为了科学的评估四种 6011 高速率本构模型的预测性能, 本文

运用了以下几种统计分析指标, 即相关系数 R, 平均相对误差 AARE, 均方根误差 RMSE 和标准偏差 NMBE, 它们的表达式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 (P_i - \bar{P})^2}}$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \times 100\%$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - P_i)^2}$$

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - P_i)}{\sum_{i=1}^N E_i}$$

其中, E_i 为实验值, P_i 为预测值, \bar{E} 和 \bar{P} 分别为实验值和预测值的平均值, N 为试验中的数据总数。R 反映了实验值和预测值之间的线性关系, AARE 和 RMSE 反映了本构模型的预测精度, NMBE 反映了预测值与实验值的偏差, 若为正则预测值平均小于实验值, 若为负则预测值平均大于实验值。温度在 450℃时的相关性最强。而 NMBE 反映出实验值与预测值的偏差较小, 这四个参数进一步说明神经网络在描述 6011 拉伸时应力应变关系的优越性。

5 结论

6061 铝合金热变形, 在同一应变速率下, 变形温度越高, 流变应力越低; 在同一变形温度下, 应变速率越大, 流变应力越大。这主要是因为, 在应变速率不变的情况下, 随变形温度的升高, 热激活能的作用不断显现出来, 原子内能上升, 各种缺陷运动势能全下降, 使位错等缺陷易于开动, 位错运动所需要的应力下降, 宏观表现为流变应力降低。6061 铝合金虽能获得较高的强度, 但具有严重的晶间腐蚀倾向。

参考文献:

- [1] 赵冠琳. 基于 Gleeble 和 Zwick 2 种设备下的铝合金拉伸性能对比[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(01): 62-65
- [2] 李文瀚. 外界因素对铝合金拉伸性能检测结果的影响及相应措施[J]. 铝加工, 2021(06): 64-68.

课题: 湖北汽车工业学院大学生创新创业训练计划项目 DC2021047