

5A90 铝锂合金热态下的成形极限图及其计算模型

马高山, 万敏, 吴向东

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 为了获得 5A90 铝锂合金板材在加热状态下的成形极限图, 采用自行开发研制的热环境通用板材成形性能实验机以及网格应变自动测量分析系统, 进行 5A90 铝锂合金板材在 10 mm/min 的变形速度和 25~300 °C 变形温度范围内的成形极限图实验, 研究了变形温度对成形极限曲线的影响规律。结果表明, 5A90 铝锂合金的成形极限曲线对温度表现出显著的敏感性, 其位置的高低并随温度的升高而显著上升。同时, 在实验数据的基础上建立了 5A90 铝锂合金在不同变形温度下的成形极限计算模型, 为成形极限曲线的计算和预测提供了重要的依据。

关键词: 铝锂合金; 温热变形; 成形极限图; 计算模型

中图分类号: TG 386; V 261

文献标识码: A

Forming limit diagram and calculating model for 5A90 Al-Li alloy sheet at elevated temperature

MA Gao-shan, WAN Min, WU Xiang-dong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The hot sheet formability test machine and the grid measurement and analysis system were used to determine the forming limit diagram (FLD) of 5A90 Al-Li alloy sheet at various temperatures. The effects of forming temperature on the FLD were investigated experimentally at the forming speed of 10mm/min and in the forming temperature range of 25–300 °C. The results show that the forming limit strain of 5A90 Al-Li alloy increases with increasing temperature. Furthermore, the FLD calculating model of 5A90 Al-Li alloy is built, which is the important foundation to predict the FLD of Al-Li alloy at any temperature.

Key words: Al-Li alloy; warm and hot deformation; forming limit diagram; calculating model

成形极限图(Forming Limit Diagram, 简称为 FLD) 作为判断和评定板材成形性的最为综合和直观的方法, 在工业上得到了广泛的应用, 是评价板料成形性能优劣和解决板材冲压问题的一个非常有效的工具^[1]。成形极限曲线位置的高低反映了材料在各种应力状态下局部极限变形能力的大小, 其位置越高则材料的成形性能越好。

铝锂合金作为一种新型的铝合金材料, 由于具有优良的综合性能而在航空航天领域得到广泛的应用^[2]。实验表明, 在铝中加入 1% 的锂, 密度可降低

3%, 弹性模量提高 6%; 加入 2% 的锂, 密度降低 10%, 弹性模量提高 25%~35%^[3], 这是添加其他轻金属元素如铍、镁所不及的。而且, 铝锂合金具有高的比强度和比刚度、高弹性模量等特点, 用其代替常规的高强度铝合金可使结构质量减轻 10%~20%, 刚度提高 15%~20%^[4], 因此把它用作结构材料潜在经济效益极大, 被认为是 21 世纪飞行器的主要结构材料。

然而, 铝锂合金在室温下的塑性较差, 难以采用传统的冷成形工艺生产复杂零部件, 给其应用带来一定的困难。有研究表明, 对于较难成形的轻质合金材

料,如镁合金、铝锂合金等,其塑性随成形温度的升高有明显的改善^[5-7]。因此,研究铝锂合金在热态下的成形极限,对于掌握其变形能力、确定优化的工艺参数等具有重要的意义。

1 实验

1.1 实验材料与试样尺寸

实验用材为 5A90 铝锂合金板材。5A90 铝锂合金是一种新型国产化合金材料,它具有中等强度、低密度、出色的焊接性能和腐蚀抗力等特点。实验用板料厚度为 1.5 mm,其化学成分如表 1 所列。

表 1 5A90 铝锂合金板材化学成分

Table 1 Chemical composition of sheet alloy used (mass fraction, %)

Mg	Li	Zr	Cu	Ti	Fe	Si	Al
5.20	2.10	0.11	0.03	0.05	0.07	0.03	Bal.

要获得不同比例应变加载路径下的极限应变,通常采用两种方法,一种是改变试样与凸模接触面间的润滑条件,另一种是采用不同宽度的试样。由于在一定温度下可用的润滑剂品种也仅为石墨、二硫化钼等少数几种,且其润滑效果差别并不大,因此,本文采用改变试样宽度的方法进行 FLD 实验。实验试样的形状及尺寸可参考文献[8],将板材沿轧制方向制成所需成形极限试样,试样长度为 176 mm,宽度范围为 20~176 mm,宽度间隔 20 mm。

1.2 实验设备

采用北京航空航天大学研制的热环境通用板材成形性能实验机 BCS-50AR 研究热态下的板材成形极限。如图 1 所示,它是一种专门用于鉴定金属板材塑性成形性能的实验机系统,可进行常温到 900 °C 之间的多种成形性能实验,适用于超高强钢板、镁合金、钛合金、铝锂合金等难成形板材的成形性能实验。BCS-50AR 实验机系统的主要技术参数如表 2 所列。

表 2 BCS-50AR 实验机主要技术参数

Table 2 Major technical parameters of BCS-50AR

Maximal force value/kN	Holding force range/kN	Punch velocity range/(mm·min ⁻¹)	Measuring precision			Cooling system mode	Vacuum system vacuum/Pa	Heating temperature/°C
			Forming force/%	Holding force/%	Displacement/mm			
500	6-50	0-200	<2	<5	0.02	Auto-circulation	0.1	25-900



图 1 BCS-50AR 热环境通用板材成形性能实验机

Fig.1 Hot sheet formability test machine of BCS-50AR

1.3 实验方法

通常,确定成形极限图的方法有两种:理论计算和实验确定。其中实验确定成形极限图的方法中最常用的一种就是半球形刚性凸模胀形实验^[1],本研究即采用此种方法,实验用凸模外径为 $d100$ mm。由于实际的热成形中成形速度都比较小,因此实验时凸模采用 10 mm/min 恒定的变形速度,温度区间为 25~300 °C。

材料在一定温度下变形时摩擦的影响要比室温下复杂得多^[9-10],为了尽量减小摩擦对实验的影响,应采用耐高温的良好润滑剂。目前,适用于较高温度下变形的润滑剂品种很少,较常用的润滑剂是石墨基润滑剂,一般用于不太高的温度^[11]。本研究的实验是在不太高的温度下进行的,故在实验中采用胶体石墨作为润滑剂。

网格分析技术是目前测定板材 FLD 的主要方法,其原理是在变形前的平板毛料表面上印制圆形或方形网格,成形后再测量这些网格的变形,通过变形前后网格形状和尺寸的变化来计算应变值的大小。本研究采用制网快、适合于加热环境、精度较高的电化学腐蚀法来制取坐标网格,采用北京航空航天大学开发的网格应变自动测量分析系统 GMAS^[12]来测量表面极限主应变。这套 GMAS 系统可利用两个或更多的二维图像对变形的网格进行三维立体分析,测量的应变值准确可靠,应变测量精度在±2%以内。

2 变形温度对 FLD 的影响分析

根据拟定的实验条件进行了 3 种温度下的成形极限试验, 实验后的成形极限试样如图 2 所示。图中所示为同一种温度下不同宽度的试样胀形后的结果, 试样在不同的部位发生了不同程度的变形, 并最终产生了细颈或破裂现象。

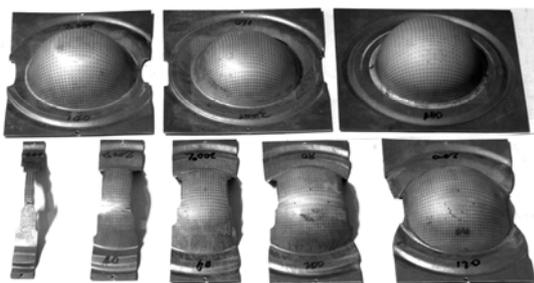


图 2 实验后的成形极限试样实物图

Fig.2 Specimens after FLD tests

通常, 镁合金和铝锂合金等在室温变形时, 其集中性失稳都是紧接着分散性失稳的发生而发生的, 而在提升变形温度的情况下, 其塑性会有相应的提升。这是由于分散性失稳发生后塑性变形依然可以持续一段时间, 然后才达到集中性失稳^[13-14]。因此, 相应地, 在一定温度下变形获得的成形极限曲线根据网格的分布可分为 3 种: 安全区成形极限曲线、细颈区成形极限曲线和破裂区成形极限曲线。本研究在 200 °C 的变形温度下进行了大量的实验, 得到了变形温度 200 °C 下的 3 种成形极限曲线, 如图 3 所示。由图中各曲线比较可以看出, 破裂区成形极限曲线最高, 其次是细

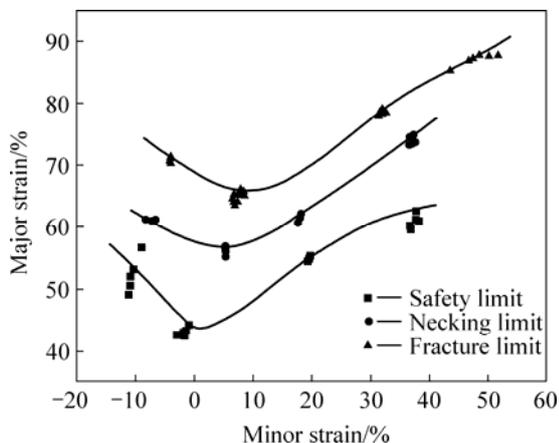


图 3 变形温度 200 °C 下的 3 种成形极限曲线

Fig.3 Three kinds of FLDs obtained at 200 °C

颈区成形极限曲线, 安全区成形极限曲线最低。破裂区成形极限曲线反映了铝锂合金的最大成形性能, 但比较难以测量; 细颈区的成形极限曲线比较难以得到, 需要进行大量的实验; 而安全区的成形极限曲线最容易得到, 反映的数据偏低, 但可以比较有效地控制实际成形中的拉伸失稳与破裂问题, 具有很大的实用价值。因此, 在使用成形极限图时通常采用安全区的成形极限图。

变形温度对成形极限图有着很大的影响, 铝锂合金在不同变形温度下的成形极限曲线如图 4 所示。由图可知, 铝锂合金的成形极限曲线对变形温度极其敏感, 随变形温度的升高而显著上升。铝锂合金在室温下的塑性较差, 成形极限曲线很低; 变形温度提升到 200 °C 时, 成形极限曲线相对室温的上升幅度很大, 其塑性也显著提高; 变形温度为 300 °C 时, 其成形极限曲线进一步升高, 但升高幅度有所减弱。这说明当变形温度升高到一定阶段的时候, 成形极限曲线开始逐渐对变形温度的敏感性降低。

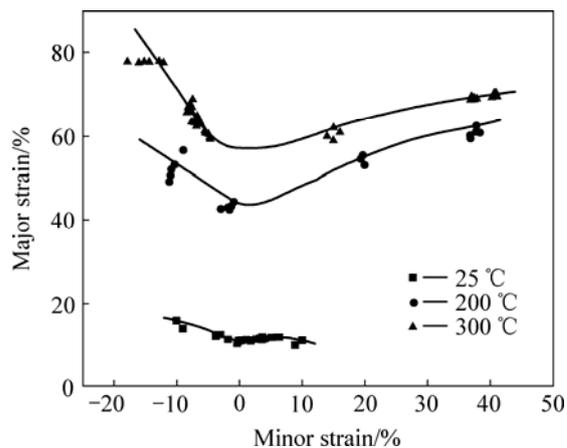


图 4 5A90 铝锂合金板材在不同温度下的 FLD

Fig.4 FLDs for 5A90 Al-Li alloy sheet obtained at various temperatures

3 FLD 计算模型的建立

由图 4 中 3 种变形温度下的成形极限实验数据和成形极限曲线的结果, 可以进行如下合理假设: 假设对于同一种金属材料, 不同变形温度下的成形极限图的形状类似, 位置高低的差别仅决定于平面应变点的位置。在以上假设的基础上, 结合文献[15]中预测 FLD 的方法, 并在其基础上进行相应的改进, 可将铝锂合金成形极限图的左半部分图形看作直线形式, 而将其右半部分图形看作幂指数形式。以上述假设和实际的

实验数据为基础,可建立起铝锂合金的成形极限计算模型。为此,FLD的左、右两个部分可写成如下形式:

$$\begin{cases} e_1 = a \times e_2 + F_0 \\ e_1 = b \times (e_2)^c + F_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 e_1 为工程主应变, e_2 为工程次应变, F_0 为成形极限图的最低点,它代表了板材成形过程中的平面应变状态。

基于式(1),通过对实验数据点进行拟合计算,从而可以得到各个温度下铝锂合金的成形极限曲线公式中的各参数如 F_0 、 a 、 b 和 c 等的值,如表3所列。将各个温度下通过模型计算得到的成形极限曲线和试验点进行对比,如图5所示,由图可知,拟合计算曲线可以比较准确的表达实际的成形极限曲线。

表3 成形极限计算模型公式中各参数值

Table 3 Values of parameters in FLD model

Temperature/°C	F_0	a	b	c
25	0.110	-0.484	0.032	0.443
200	0.421	-1.619	0.328	0.579
300	0.531	-1.626	0.300	0.642

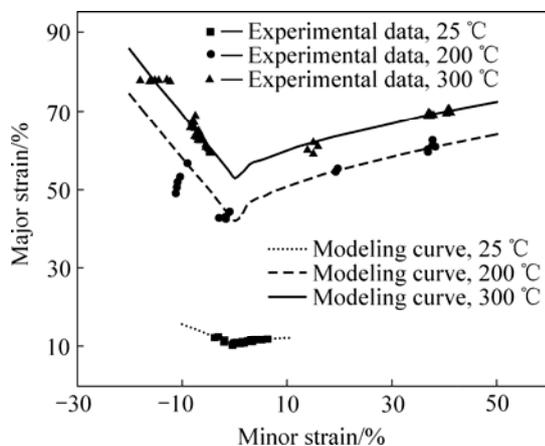


图5 不同温度下的模型曲线与实验数据

Fig.5 Modeling curves and experimental data at various temperatures

由于变形温度的不同,成形极限图的位置和具体形状也会发生相应的改变,据此可知,式(1)中计算成形极限曲线方程中的参数也会随着变形温度的变化而改变。为了统一成形极限理论计算模型,应在计算模型中包含变形温度这一参数,从而建立完整的铝锂合金成形极限计算模型。

由表3可以看出,成形极限计算公式中的各个参数随温度发生相应的变化,因此,可通过回归计算将

各参数转换为变形温度的函数,从而建立变形温度下的成形极限曲线模型。以温度作为变量,由表3中求得各参数作为函数,通过差分进化算法对已知数据进行多项式拟合,即可得到5A90铝锂合金在变形温度下的成形极限计算模型中各参数表达式,分别如下各式:

$$F_0 = 0.421 \times \ln(T - 137.68) - 2.03 \quad (2)$$

$$a = -0.033 \times \ln(T - 298) - 1.44 \quad (3)$$

$$b = 0.0078 \times \ln(T - 298) + 0.272 \quad (4)$$

$$c = 0.468 \times \ln(T + 220.8) - 2.482 \quad (5)$$

以上各式中, T 均为绝对温度。将以上各参数 F_0 、 a 、 b 和 c 的表达式回代入式(1)中即得到5A90铝锂合金在任一温度下的成形极限计算模型。

4 结论

1) 基于研制的热环境通用板材成形性能实验机BCS50AR和网格应变自动测量分析系统GMAS,进行了加热状态下成形极限实验,获得了不同变形温度下的铝锂合金成形极限图。

2) 不同的测量部位对成形极限试验的结果影响较大,应采用合理的测量方法和选取合适的测量部位。

3) 5A90铝锂合金的成形极限曲线对变形温度表现出显著的敏感性,其位置的高低并随变形温度的升高而显著上升,但当变形温度达到一定值时,敏感性有所降低。

4) 对5A90铝锂合金的成形极限图进行了分析,建立了5A90铝锂合金在各个温度下的成形极限计算模型,从而为铝锂合金成形极限图的预测提供了重要的依据。

REFERENCES

- [1] MOSHKSAR M M, MANSORZADEH S. Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141: 138-142.
- [2] MENG L, ZHENG X L. Overview of the effects of impurities and rare earth elements in Al-Li alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1997, 237: 109-118.
- [3] RIOJA R J. Fabrication methods to manufacture isotropic Al-Li alloys and products for space and aerospace applications[J]. Mater Sci Eng A, 1998, 257: 100-107.
- [4] XUN Yu-wei, ZHUN Yi-yuan, MAO Wen-feng, CUI Jain-zhong.

- Superplastic forming technology of aircraft structures for Al-Li alloy and high-strength Al alloy[J]. *Journal Materials Processing Technology*, 1997, 72: 183-187.
- [5] TAKUDA H, ENAMI T, KUBOTA K, HATTA N. The formability of a thin sheet of Mg-8.5Li-1Zn alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 101: 281-286.
- [6] TAKUDA H, MORISHITA T, KINOSHITA T, SHIRAKAWA N. Modeling of formula for flow stress of a magnesium alloy AZ31 sheet at elevated temperatures[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 1258-1262.
- [7] 马高山, 万敏, 吴向东. 5A90 铝锂合金热态下本构关系研究[J]. *塑性工程学报*, 2007, 14(3): 68-71.
- MA Gao-shan, WAN Min, WU Xiang-dong. Research on the constitutive relationship of 5A90 Aluminum-lithium alloy at hot forming temperature[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2007, 14(3): 68-71
- [8] 万敏, 胡运斌, 谢英, 张平, 许成喜, 袁胜. 飞机蒙皮铝合金板材成形极限及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(1): 180-183.
- WAN Min, WU Xiang-dong, XIE Ying, ZHANG Ping, XU Cheng-xi, YUAN Sheng. Forming limit of aircraft skin aluminum alloy sheets and its applications[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 180-183.
- [9] 吴惠祥, 杨忠, 毛万华. 高低温环境下摩擦系数的高准确度测试[J]. *数据采集与处理*, 2004, 19(1): 111-114.
- WU Hui-xiang, YANG Zhong, MAO Wan-hua. High-precision test for friction coefficient at high and low temperatures[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2004, 19(1): 111-114.
- [10] 乔玉林, 梁志杰, 孙晓峰, 小豆岛明. 热轧钢/热轧钢摩擦副干摩擦高温摩擦行为的研究[J]. *金属热处理*, 2006, 31(1): 30-32.
- QIAO Yu-lin, LIANG Zhi-jie, SUN Xiao-feng, AZUSHIMA A. The high temperature tribological behaviors of hot rolling steel/steel pairs at dry friction[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(1): 30-32
- [11] 李艳, 陈芳雷. 温热挤压用润滑剂实验研究[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(17): 12-13, 37.
- LI Yan, CHEN Fang-lei. Experiment study of special lubricant for warm-hot extrusion[J]. *Hot Working Technology*, 2006, 35(17): 12-13, 37.
- [12] 万敏, 吴向东, 李胜, 吕晓东. 网格应变分析技术及系统[J]. *锻造与冲压*, 2006(10): 34-37.
- WAN Min, WU Xiang-dong, LI Sheng, LÜ Xiao-dong. Grid strain analysis and system[J]. *Forging and Metalforming*. 2006(10): 34-37.
- [13] DOEGE E, DRODER K. Sheet metal forming of magnesium wrought alloys—formability and process technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115: 14-19.
- [14] LI Dao-ming, GHOSH A. Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures[J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 352: 279-286.
- [15] 陈新平, 汪承璞. 一种预测左半部成形极限图的简单方法[J]. *金属成形工艺*, 2000, 18(4): 4-6.
- CHEN Xin-ping, WANG Cheng-pu. Approach for predicting the limit draw strain of the forming diagram[J]. *Metal Forming Technology*, 2000, 18(4): 4-6.

(编辑 何学锋)