新淬火状态铝合金板的成形极限

高宏志 周贤宾

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 论述了硬铝合金成形工艺中应变路径、固溶热处理和时效过程对成形极限的影响,由试验得到了单向拉伸预应变和固溶热处理后时效过程中的成形极限图 FLD(Forming Limit Diagram),重点研究了固溶热处理后时效过程中成形极限的变化,并得到了铝合金在时效过程中的成形极限应力图 FLSD(Forming Limit Stress Diagram). 结果表明,原始退火状态材料的成形极限高于新淬火状态材料的成形极限,且新淬火状态材料的成形极限随时效时间增加而降低,原因主要在于固溶热处理过程中材料组织状态的变化和应变硬化指数 n 在时效过程中的降低;成形极限应变的降低导致成形极限应力也随时效时间增加而降低.

关 键 词: 铝合金; 板料成形; 成形极限图; 成形极限应力图; 固溶热处理; 自然时效

中图分类号: TG 389; V 261.2^{+}8

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)09-1083-04

Forming limits for as-quenched aluminum alloy sheet

Gao Hongzhi Zhou Xianbin

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

Abstract: FLD (forming limit diagram) was influenced by the material properties as well as forming process, such as strain path and heat-treatment states, etc. Some experimental FLDs were constructed for 2D12 aluminum alloy in the annealed, pre-strained and various aging time conditions after solution heat-treatment by rigid punch bulging. Based on the experimental results, the FLSD (forming limit stress diagram) was determined. By comparing and analyzing the FLD and FLSD, it is indicated that the FLD of annealed condition is higher than the FLD after heat-treatment and the aging hardening lowers the FLD. The results mainly depend on the metallurgical structure transformation during solution heat treatment and the decrease of hardening value n with aging. Furthermore, aging hardening lowers the FLSD mostly because it lowers the FLD. The result may be available for the sheet forming process design and numerical simulation.

Key words: aluminum alloys; sheet metal forming; forming limit diagram; forming limit stress diagram; solution heat treatment ; aging

铝合金具有高比强度和比刚度等优良的性能,是飞机的主要结构材料,其使用量达到飞机结构重量的 60% ~80%[1]. 尽管新材料不断出现,但铝合金在飞机上的应用仍将具有不可取代的优势.

可热处理强化的硬铝合金是 Al-Cu-Mg 系变形铝合金的总称. 大多数硬铝合金制件必须经过淬火时效方可使用,但淬火会引起制件的变形,因而成形件淬火后必须校形. 自然时效开始阶段,材料仍然具有接近于退火状态的良好塑性,这种不稳定的状态称为新淬火状态,生产上利用新淬火状态的塑性可进行各种成形加工和校形.

板料的成形极限受拉伸变形失稳,即板料本身塑性变形能力的限制. 上世纪 60 年代,Keeler 提出了成形极限图 FLD(Forming Limit Diagram),并由 Goodwin 加以完善. FLD 是板料在不同变形

收稿日期: 2005-10-25

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20040006022)

作者简介: 高宏志(1974-),男,河北蔚县人,博士生,gaohongzhi@yeah.net.

方式下的集中性失稳极限应变在面内主应变图上构成的条带形区域或曲线,它全面反映了板料从单向拉伸到双向等拉应力作用范围内的局部成形极限. FLD 的提出为研究板料的成形性能建立了基础. 此后,各国的研究人员对 FLD 进行了大量研究,并积极将其应用于工业生产.

充分了解材料在各种状态下的成形性能和成形极限,对于成形加工和有限元仿真具有重要意义. 目前对铝合金在多工序成形中,特别是在新淬火状态成形中材料的成形性能和成形极限了解不够,阻碍了铝合金成形工艺的改进和数值模拟的应用,通常对新淬火状态铝合金成形过程进行数值模拟使用的是退火状态铝合金材料的性能和成形极限,因而不能得到正确合理的结果[2].

本文分析了硬铝合金多工序成形过程中成形极限的影响因素,通过试验给出了铝合金在单向拉伸预变形和固溶处理后时效过程中的成形极限,可为铝合金成形工艺提供指导,并为有限元仿真提供更准确的材料力学模型.

1 影响铝合金成形极限的主要因素

成形极限不仅与材料的性能和状态有关,还与材料厚度及成形工艺有关,表现在应变路径和应变梯度的影响上. 中间具有热处理工序的成形过程,在热处理后材料成形极限会发生某些变化,对于可热处理强化的铝合金,固溶处理后的时效过程也会引起成形极限的变化.

1.1 应变路径对成形极限的影响

由试验得到的 FLD,一般是线性或近似线性应变路径的,而在实际生产中,应变路径通常都不是线性的,因而人们花费了大量时间和精力来研究应变路径对成形极限的影响. 现阶段对复杂应变路径的研究仍然集中在双线性应变路径上. 大量的研究似乎得到相似的结论,即单向拉伸的预应变使得成形极限升高,而双向拉伸的预应变使得成形极限降低. 图 1 和图 2 所示为 Al2008-T4 铝合金在单向拉伸和双向等拉预应变后成形极限的变化[3]. 其中,ε_1 和 ε_2 分别为试件的第一主应变和第二主应变,用真实应变量表示. 预单向拉伸的成形极限是在垂直于板料轧制方向预单拉后(预单拉量以 e 表示),以垂直于轧制方向为第一主应变方向得出的;预双拉的成形极限是在双向等拉后,以垂直于轧制方向为第一主应变方向得出的. 图 2 所示的双向拉伸预应变是指双向等拉的第一主应变,由于材料的各向异性,双向等拉的应力引起的面内主应变并不相等. 图 3 示出了作者所作的 2D12 铝合金原始状态及其沿轧制方向预拉伸 6% 后的 FLD. 材料的预拉伸在北京航空航天大学的数控三轴加载试验机上进行,预拉伸沿轧制方向,预变形的不均匀性误差值不超过 0.78%. FLD 是采用刚性凸模胀形试验,以板料轧制方向作为第一主应变方向作出的普通型 FLD,用工程应用变量表示. 由图 3 可见,单向预拉伸对拉-压变形状态下的成形极限影响较小,而对拉-拉变形状态下的成形极限影响较大,这与文献[3]基本一致,且与理论计算的结论一致[4]. 而对于平面应变预变形的影响,至今尚无定论[3,5].

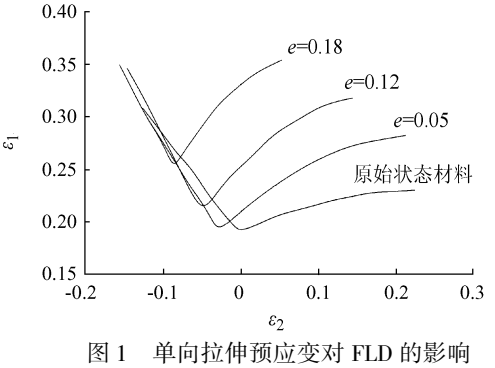


图 1 单向拉伸预应变对 FLD 的影响

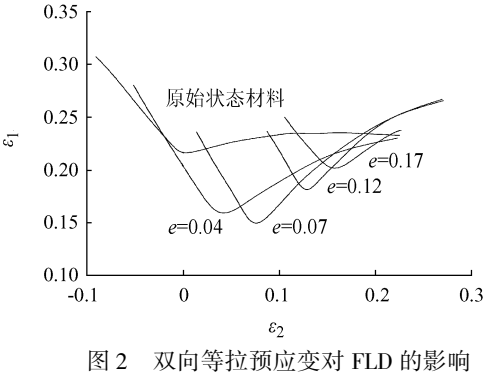


图 2 双向等拉预应变对 FLD 的影响

1.2 热处理、自然时效对成形极限的影响

由于硬铝合金都要进行淬火时效,因而对热处理后和时效过程中的材料真实成形极限的了解就很重要.

本文所用试件在沈阳飞机制造公司的生产条件下淬火,然后立即放入冷藏箱,冷藏温度低于 -20℃,在北京航空航天大学的实验室中作成形极限试验.

原始状态材料的网格采用了丝网印刷的方法,使用 ASAME 网格应变分析仪测量;新淬火状态材料的网格采用了快速贴膜的方法. 试件从冷藏箱取出后迅速清洗表面并贴上应变网格膜,等待试验. 校验表明,两种方法的误差相差不大.

本文试验了 3 种时效状态,即自然时效 15 min、45 min 和 90 min. 时效时间从试件温度升

高到室温时算起. 试件采用聚四氟乙烯薄膜和黄油润滑,目的是尽量减少摩擦,使不同宽度试件的成形极限点分布于 FLD 的不同位置. 试件胀形至出现裂纹时停机.

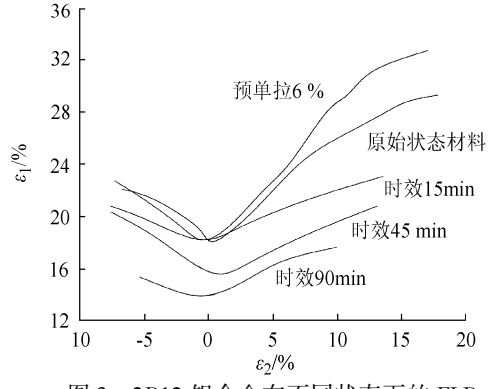


图 3　2D12 铝合金在不同状态下的 FLD

图 3 示出了原始状态和新淬火状态 2D12 铝合金的成形极限图. 由图可见:

1) 固溶热处理后材料的成形极限曲线 FLC (Forming Limiting Curve)低于原始状态材料,原因可能是材料组织状态不同引起的基本成形性能指标和材料塑性流动以及失稳规律的差异;

2) 随着时效时间增加,新淬火状态材料的 FLC 降低. 以平面应变状态为例,时效 45 min 时 ε_1 比时效 15 min 约降低 15%,时效 90 min 时 ε_1 比时效 45 min 约降低了 8%. 这与时效过程中的应变硬化指数 n 减小有关. 试验表明,n 随时效时间的延长而减小[2],一般而言,FLC 随 n 的升高而升高,并且单向拉伸和双向等拉附近极限应变的增加率明显高于平面应变;厚向导性系数 R 对 FLD 的影响不如 n 显著,由于材料的加权平均 R 基本不变,R 对 FLC 影响甚微.

2　铝合金的成形极限应力图

FLD 在应用中的最大限制是它与应变路径有关. 事实上,极少产品在成形过程中是线性加载路径,更不用说复杂件成形和多工序成形了,因而线性应变路径的 FLD 将不再适用. 1977 年,Kleemola 和 Pelkkikangas 指出,成形极限只由最终的应力状态决定[6]. 就是说,如果板料的成形极限是由失稳时刻的应力状态唯一决定的,成形极限将与应变路径无关. 1982 年,法国 ESIA 大学的 Arrieux 等人提出了成形极限应力图 FLSD(Forming Limit Stress Diagram),作为修正 FLD 的方法[7]. 他用实验确定了线性和双线性应变路径下的 FLD,应变路径反映了应力历史,采用 Von Mises 屈服准则和 Drucker 公式计算出对应 FLC 各点的极限主应力 σ_{11} 和 σ_{22},将它们画在 $\sigma_{11}-\sigma_{22}$ 平面上,建立了 FLSD. 1987 年,Arrieux 采用 Hill'79 屈服准则,将计算 FLSD 扩展到各向异性材料. 此后,学者们针对非线性应变路径的 FLSD 进行了广泛的研究. 但由于极限应力无法直接测量,FLSD 不能直接用于生产实际. 近年来随着数值模拟技术的发展应用,使得 FLSD 的应用成为可能.

一般认为,对于复杂应变路径,FLSD 为一条唯一的曲线[4,8,9].

本文采用文献[8]介绍的方法和试验实测的应变硬化系数 K 以及 n 和 R,计算了新淬火状态 2D12 铝合金的 FLSD,如图 4 所示. 由图可见:

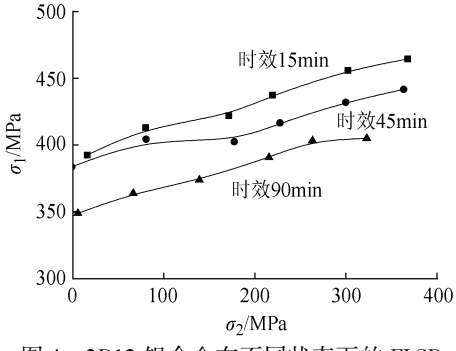


图 4　2D12 铝合金在不同状态下的 FLSD

1) 新淬火状态的铝合金的 FLSD 接近直线,仅在对应平面应变点附近稍有转折,与文献[8]的观察一致. 参考文献[4]指出,按照 C-H 失稳准则计算出的 FLD 转换为 FLSD 时在平面应变处有转折,而且与屈服准则无关. 作者对成形极限应变曲线转换为成形极限应力曲线的计算表明,在平面应变处成形极限应力曲线的导数不连续,理论分析表明了当 FLC 的导数在平面应变处不连续时导致 FLSD 在平面应变处的导数不连续,使得成形极限应力曲线在平面应变处出现转折. 这种现象的出现是由 FLC 的形状决定的.

2) 随着时效时间的增加,成形极限应力降低. 主要原因在于随时效时间增加,成形极限应变降低(图 3);对计算公式的分析表明,K 与成形极限应力成正比,K 增大,成形极限应力增大;n 增大,成形极限应力减小;成形极限应变增大,成形极限应力也增大. 新淬火状态材料的 K 随时效时间增加而升高,成形极限应变和 n 随时效时间增加而降低,这 3 个因素的综合影响使得成形极限应力随着时效时间而降低.

3　结　论

1) 研究了铝合金在双线性变加载路径之下 FLD 的变化,单向拉伸的预应变使得材料的成形

极限升高,并且单向拉伸预应变对成形极限右半部影响较大;

2) 2D12铝合金原始状态的成形极限高于新淬火状态材料的成形极限;

3) 在新淬火状态下,时效时间对材料的成形极限有显著影响,2D12铝合金的成形极限随时效时间增加迅速降低,以时效45 min为例,平面应变状态的 ε_1 比时效15 min约降低15%;

4) 新淬火状态材料的成形极限应力曲线随着时效时间的增加而显著降低,但都保持近似的直线形状.

致谢 本实验得到了沈飞公司板金分厂的大力协助,及李小强博士研究生、陈劼实博士研究生等的大力帮助,在此表示真诚的感谢!

参考文献 (References)

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第三卷)[M]. 北京:中国标准出版社,2002
Aeronautical Materials Handbook of China Compilation Committee. Aeronautical materials handbook of China(third volume)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002(in Chinese)

[2] 高宏志,周贤宾,李东升. 硬铝合金预拉伸、热处理后成形性能的正交试验研究[J]. 航空材料学报,2004,24(4):1-7
Gao Hongzhi, Zhou Xianbin, Li Dongsheng. Drthogonal test study of formability for 2D12 alumininm alloy after pre-stretch and solution heat-treatment[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004,24(4):1-7(in Chinese)

[3] Graf A, Hosford W. Effect of changing strain path on forming limit diagram of Al2008-T4[J]. Metallurgical Materials Transaction,1993,24A(9):2503-2512

[4] 谢英,万敏,韩非. 成形极限应变与成形极限应力的转换关系[J]. 塑性工程学报,2004,11(3):55-58
Xie Ying, Wan Min, Han Fei. Transformation relation between limit strain and limit stress in sheet metal forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004,11(3):55-58(in Chinese)

[5] Obermeyer E J, Majlessi S A. A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts[J]. Journal of Materials Processing Technology,1998(75):222-234

[6] Kleemola J, Pelkkikangas M T. Effect of an intrinsic forming limit of steel copper and brass[J]. Sheet Metal Industry,1977(63):591-599

[7] Arrieus R, Bdrin C, Boivin M. Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic sheets[C]//P Timossi. 12th Biennial IDDRG Congress. Santa Margherita: International Deep Drawing Research Group, 1982:61-71

[8] 张京,周贤宾. 板料成形极限应力图的研究[C]//中国机械工程学会锻压学会. 第七届全国锻压学术年会. 北京:航空工业出版社,1999: 299-302
Zhang Jing, Zhou Xianbin. Study of forming limit stress in sheet metal forming[C]//Chinese Mechanical Engineering Society Forging and Stamping Institution. The 7th China Conference on Foging and Stamping. Beijing: Aviation Industry Press,1999: 299-302(in Chinese)

[9] Gronostajski J. Sheet metal forming limits for complex strain paths[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1984(10):349-362

(责任编辑:彭 徽)

(上接第1058页)

参考文献 (References)

[1] 王占林. 飞机高压液压能源系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004
Wang Zhanlin. Aircraft high pressure hydraulic energy system[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautic press,2004(in Chinese)

[2] 翟培祥. 斜盘式轴向柱塞泵设计[M]. 北京:煤炭工业出版社,1987
Zhai Peixiang. Design of swashplate axial pistion pump[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1987(in Chinese)

[3] 郭卫东,王占林. 斜盘式轴向柱塞泵实际流量的分析研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1996,22(2):223-227
Guo Weidong, Wang Zhanlin. A analysis for the real flowerate of a swashplate axial piston pump[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautic, 1996,22(2):223-227(in Chinese)

[4] 谢三宝. 飞机液压系统热力学模型与数字仿真[D]. 北京:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,2004
Xie Sanbao. Thermal model of aircraft hydraulic system and digital simulation[D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautic,2004(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)