

1420 铝锂合金典型构件超塑成形研究

Study on Superplastic Forming of Typical Structure of 1420 Al-Li Alloy

海军驻北京地区航空军事代表室 王晓亮
中航工业北京航空制造工程研究所 盖鹏涛

[摘要] 采用超塑成形工艺制备了 1420 铝锂合金盒形结构试验件。通过有限元模拟及微观组织观察,分析了温度对 1420 铝锂合金超塑性的影响,超塑成形后试验件的壁厚分布及材料的超塑成形断裂机制。结果表明:有限元模拟能够很好地预测超塑成形后试验件的壁厚分布;当成形温度为 520℃ 时,1420 铝锂合金表现出良好的超塑性变形能力;在超塑成形过程中,随着变形量的增加,材料内部空洞的交连和聚合是导致 1420 铝锂合金最终破坏的主要机制。

关键词: 1420 铝锂合金 盒形结构 超塑成形 微观组织 空洞

[ABSTRACT] Box-like structures of 1420 Al-Li alloy are prepared by superplastic forming. Influence of temperature on superplasticity of 1420 Al-Li alloy, wall thicknesses of box-like structures and fracture mechanism are investigated by means of finite element simulating and microstructure observation. The results show that wall thicknesses of box-like structures can be forecasted well by using finite element simulating method and the superplasticity of 1420 Al-Li alloy is good at 520℃ and increase of deforming of material during superplastic forming induces join and polymerization of cavities in the material that results in fracture of 1420 Al-Li alloy.

Keywords: 1420 Al-Li alloy Box-like structure Superplastic forming Microstructure Cavity

Al-Li 合金是一种综合性能好、具有巨大开发潜力的轻质合金,用其取代普通 Al 合金可使构件的质量减轻 10%~15%,而刚度提高 15%~20%,因此它被认为是 21 世纪航空航天飞行器理想的结构材料^[1-3]。

最具有代表性的 Al-Mg-Li 系合金是前苏联研制的 1420Al-Li 合金。它是一种中强铝锂合金,具有较好的抗腐蚀性能和优良的焊接性能,但该合金的塑性差,使得其加工工艺和成型比较困难^[4]。超塑成形技术优异的成形能力以及在改善结构效率方面的巨大潜力,使得超塑成形技术成为解决铝锂合金薄壁、复杂外形零件成

形的有效方法。本文采用超塑成形技术制备了 1420 铝锂合金典型结构件,对 1420 铝锂合金的超塑成形性能及断裂机理进行了分析和研究。

1 试验过程

1.1 试验材料

超塑成形试验所采用的合金为西南铝业提供的普通 1420 铝锂合金,板材厚度为 2.5mm,合金的化学成分见表 1。

表1 1420铝锂合金主要化学成分 %

Mg	Li	Zr	Ti	Cu	Fe	Si	Na	Al
5.30	2.12	0.11	0.1	0.05	0.07	0.03	0.0006	余量

1.2 超塑成形试验

(1) 盒形件超塑成形过程有限元模拟。

利用 Marc 有限元分析软件,对盒形件超塑成形过程进行有限元模拟,预测盒形件壁厚分布情况,为成形试验提供参考。根据 1420 铝锂合金材料特性,有限元模拟参数设定为:常数 $K=268\text{MPa}$,应变速率敏感性指数 $m=0.48$,摩擦系数 $\mu=0.3$ 。

(2) 盒形件超塑成形试验研究。

采用盒形超塑成形模具进行试验,如图 1 所示,型



图1 盒形超塑成形模具

Fig.1 Box-like die for superplastic forming

腔深度分别为 35mm 和 40mm。超塑成形过程分为 3 个变形过程：第一个过程是自由成形过程；第二个过程是靠模成形过程；第三个过程是填充过程。盒形件超塑成形过程加压曲线如图 2 所示，根据 1420 铝锂合金材料特点和超塑成形温度范围，设定超塑成形温度分别为 500℃、520℃、540℃。利用光学显微镜和测厚仪对超塑成形后盒形件的壁厚分布情况和材料的微观组织进行分析，寻求铝锂合金最佳成形工艺条件。

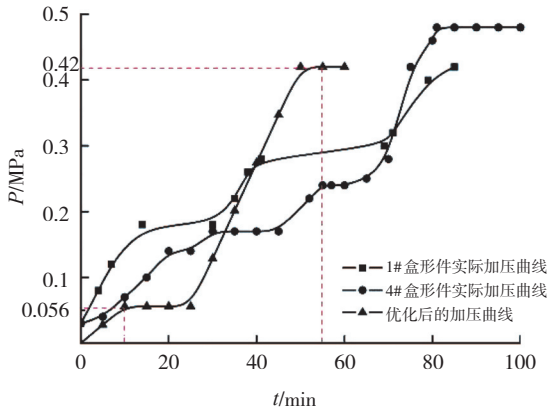


图2 盒形件超塑成形预定加压曲线

Fig.2 Box-like pieces of superplastic forming a predetermined pressure curve

1.3 微观组织分析

将变形前后试样加工成金相试样，使用水砂纸对制好的金相试样进行粗磨、精磨，然后再进行机械抛光。显微组织的侵蚀采用 Keller 试剂：2mlHF+10mlHNO₃+88mlH₂O，使用 OLYMPUS-BX41M 型金相显微镜观察焊缝形貌，进行微观组织分析。

2 结果与分析

2.1 盒形件超塑成形过程有限元模拟

在弹塑性有限元模型基础上，利用 Marc 软件对 1420 铝锂合金超塑成形后的壁厚分布情况进行预测，有限元模拟所采用的几何模型如图 3 所示。应变硬化模型采用 Backofen 流变方程： $\sigma = K\epsilon^m$ ，针对 1420 铝锂

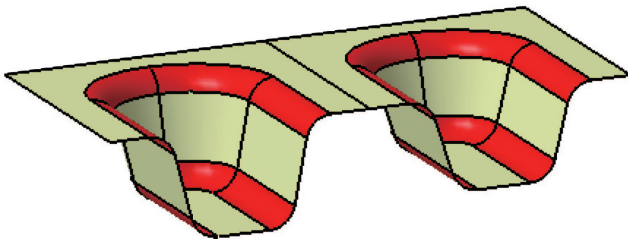


图3 模拟区域

Fig.3 Areas simulated of box-like structure

合金，通过速度突变法测得材料参数 K 值为 268MPa， m 值为 0.48。模拟过程中定义板料为变形体，模具为刚体，板料与模具之间为接触连接。采用库仑摩擦模型，摩擦系数设为 0.3。

为预测 1420 铝锂合金盒形件超塑成形性能及成形后材料的壁厚分布特征，试验前利用 Marc 有限元分析软件对盒形件超塑成形过程进行有限元模拟，模拟区域如图 3 所示，两个盒形加强筋的高度分别为 40mm 和 35mm。总体来说，超塑成形过程中板料受拉应力作用，凹模底角位置的板料所受的拉应力最大，等效应变也最大（见图 4），因此该位置变形最大。如图 5 所示，两个型腔内厚度最薄位置均在凹模底角处，该位置最后贴模，受摩擦等因素的影响，该位置材料的厚度减薄量最大，两个型腔最薄位置厚度分别为 0.69mm 和 0.82mm。

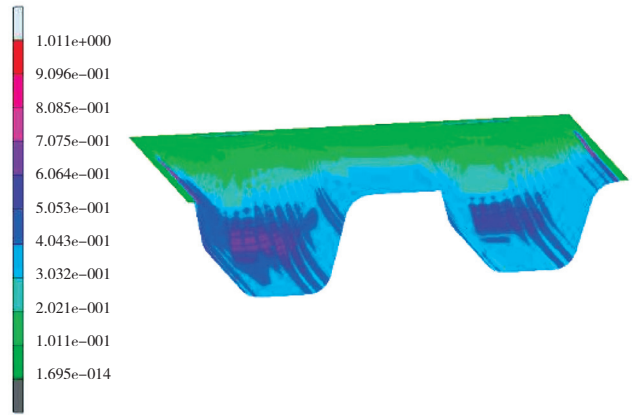


图4 等效应变图

Fig.4 Diagram of equivalent strain

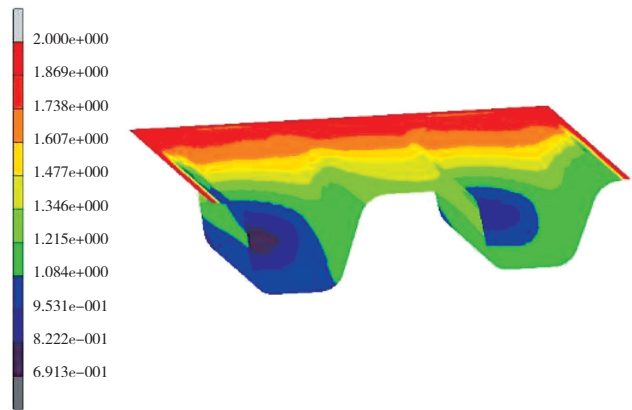


图5 厚度分布图

Fig.5 Diagram of thickness distribution

2.2 盒形件超塑成形试验研究

为进一步验证 1420 铝锂合金的超塑成形性能，研究变形工艺参数对 1420 铝锂合金超塑成形性能的影响

响,在有限元模拟基础上,开展了盒形件超塑成形试验。超塑成形试验结果表明,1420 铝锂合金的超塑性对温度比较敏感,当超塑变形温度为 500℃时,材料的超塑变形能力受到限制,变形量最大的底角位置未能完全贴模(见图 6 (a))。变形温度的升高,提高了原子的自由能,促进了晶界滑移及晶界扩散的能力。当成形温度为 520℃时,1420 铝锂合金表现出良好的超塑性变形能力(见图 6 (b)),但由于盒形件的深宽比较大,帽高为 40mm 的盒形单元最终贴模的圆角部位出现微裂纹(见图 7),帽高 35mm 的盒形单元表面质量良好。超塑变形温度过高($T=540^{\circ}\text{C}$),晶粒长大严重,材料甚至发生过烧,使材料的超塑成形性能迅速下降(见图 6 (c))。

1420 铝锂合金超塑成形过程中,受摩擦等因素的影响,成形零件的壁厚分布不均匀,最后贴模的底角位置壁厚减薄量最大。利用测厚仪对超塑成形后盒形零件的壁厚进行测量,帽高为 35mm 的盒形单元最薄位置的厚度为 0.86mm(图 8 (a)),帽高为 40mm 的盒形单元壁厚减薄量最大的底角位置厚度为 0.7mm(见图 8 (b)),超塑成形后盒形件的壁厚分布与有限元模拟结果非常接近。

2.3 超塑变形断裂机理分析

1420 铝锂合金超塑变形机制以晶界滑移为主,细小、等轴的晶粒组织虽然能够保证滑移顺利进行,但三角晶界处变形协调比较困难,成为位错塞积的主要场所,容易产生应力集中,当应力集中达到一定程度而不能及时松弛掉时,便会在其周围产生空洞(图 9)。

通常超塑性材料对空洞具有很高的容忍性,超塑变形过程中,当一定程度的空洞呈细小而弥散状独立存在时,对晶界滑移非常有利,因为当晶界滑动到三角晶界处难以进行时,可以借助空洞来松弛应力以提高塑性。但是如果材料内部空洞很多或尺寸较大时,会严重影响材料的变形能力。因此,超塑变形过程中空洞的存在并不是导致材料破坏的直接原因。

依据帽高为 40mm 盒形件的有限元模拟和实测的壁厚分布结果,对 520℃超塑变形后盒形件不同位置取 a~f 共 6 个分析试样进行微观组织观察(图 10)。图 11 展示了 a~f 6 个分析试样的光学显微镜微观组织图,从图中可以看出,在变形量较小的位置没有发现空洞等微观组织缺陷(图 11 (a)、(b));随着变形量的增加,材料内部出现空洞(图 11 (c)、(d));变形量继续增大,材料内部空洞化程度逐渐加剧,空洞沿拉伸轴方向呈线条状

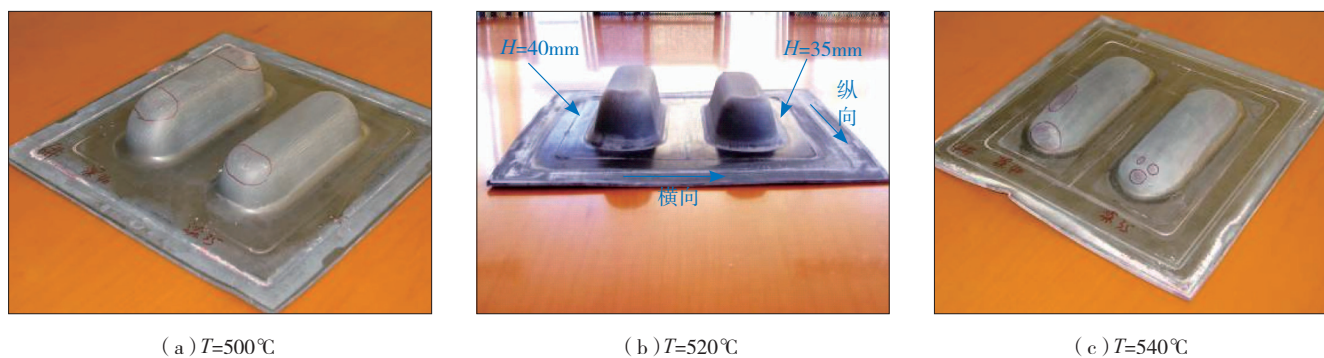


图6 不同温度条件下盒形件超塑成形试验结果对比

Fig.6 Experiment results of superplastic forming box-like structures at different temperatures

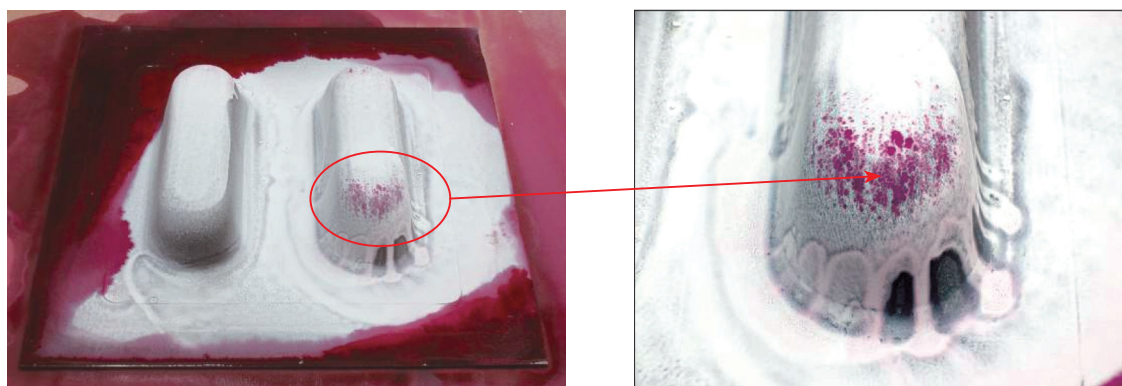
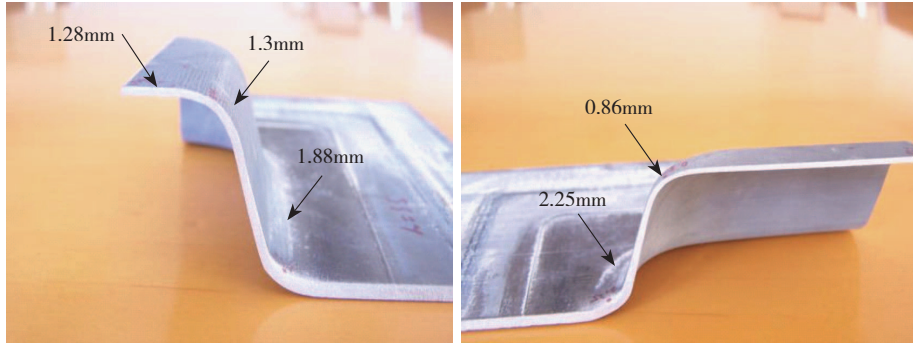
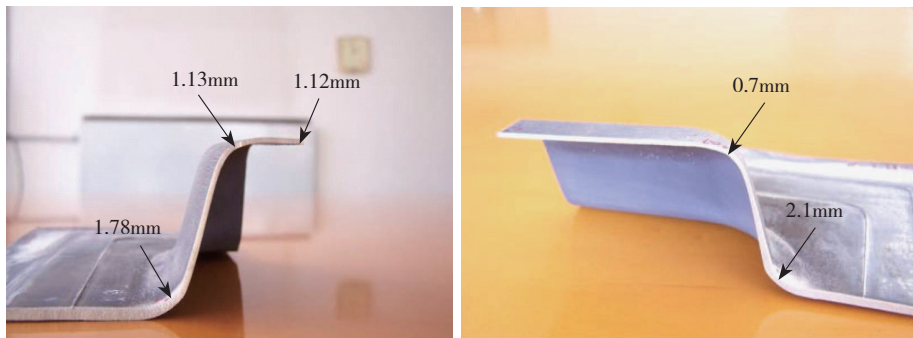


图7 520℃超塑成形后盒形件的表面微观裂纹

Fig.7 Surface microcracks of box-like structures by superplastic forming at 520℃



(a) 高为 35mm 盒件 1/4 部分的横向(左)和纵向(右)剖切面图



(b) 高为 40mm 盒件 1/4 部分的横向(左)和纵向(右)剖切面图

图8 520℃超塑成形后盒件壁厚分布情况

Fig.8 Thickness distribution of box-like structures by superplastic forming at 520℃

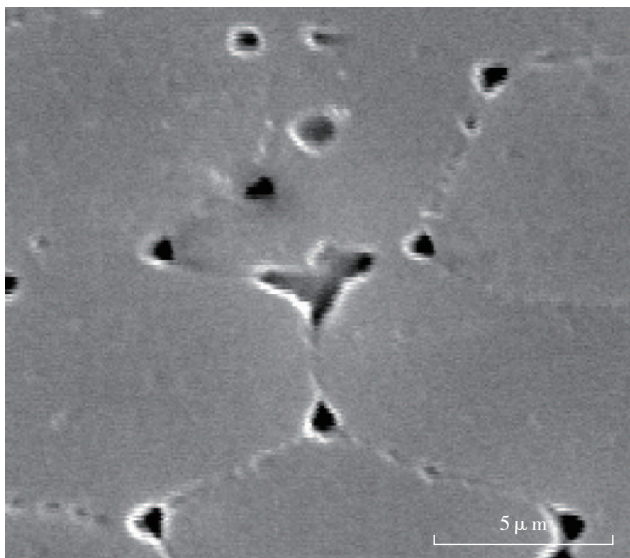


图9 超塑成形后三角晶界处产生的空洞

Fig.9 Cavities produced in triangular grain boundaries

分布(图 11 (e)),并在拉应力作用下,沿着平行于拉伸轴方向的晶界长大,当长大到一定程度时,相邻空洞发生交连(图 11 (e),(f))。因此 1420 铝锂合金超塑拉伸过程中空洞长大是晶界滑移量增大和空位向晶界扩散共同作用的结果。

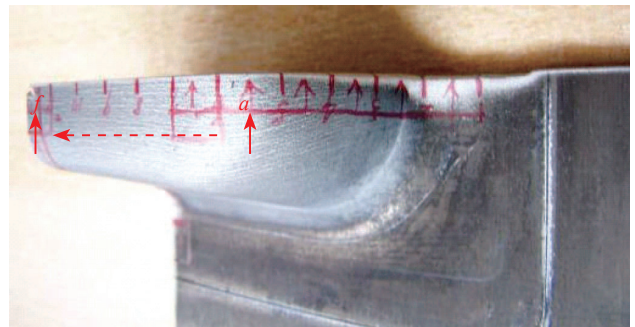


图10 盒形件金相试样取样位置

Fig.10 Positions sampled on 40mm high box-like structure for optical microscope analysis

由于空位容易向平行拉应力方向的晶界扩散,从而在拉应力方向形成定向的空位流,不断向空洞中心聚集,使空洞得以沿平行于拉伸轴方向长大。同时,空洞的出现大大降低晶界滑动的界面阻力,促使晶粒继续滑动,晶界滑动量的增加反过来促使空洞的长大,两者综合作用使空洞沿拉伸轴方向分布,如图 11 (e)所示。从图 11 (f)可以看出,试样近断口处的空洞已经充分长大,大部分空洞发生交连和聚合,使材料的承载能力急剧下降,当空洞交连和聚合达到一定程度时,发生材

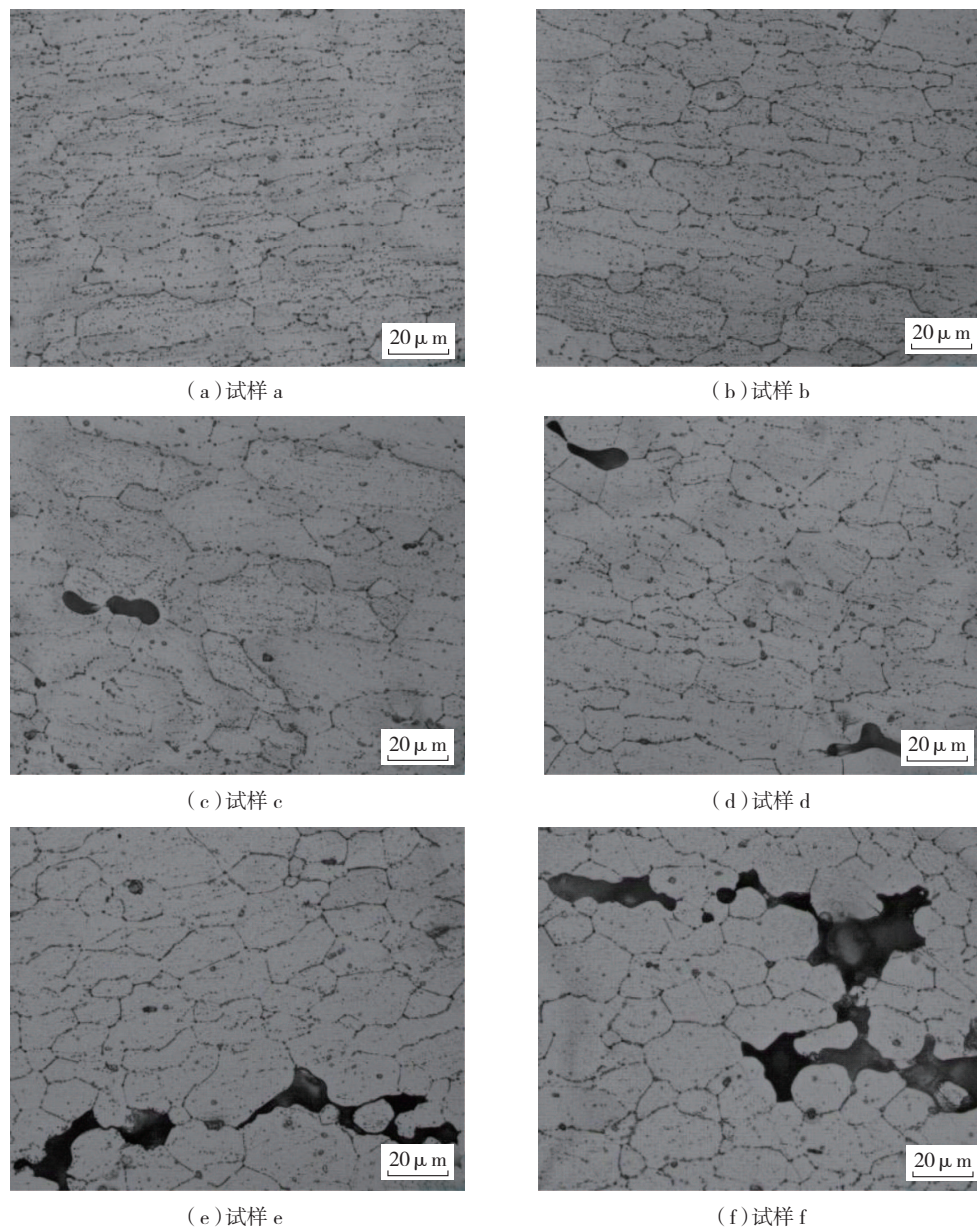


图11 520°C超塑成形后材料的微观组织 (帽高40mm)

Fig.11 Microstructure of 40mm high box-like structure by superplastic forming at 520°C

料的断裂。离断口越近,大尺寸的空洞越多,空洞的交连现象越严重。因此,空洞的交连和聚合是导致1420铝锂合金最终断裂的主要机制。

3 结论

(1) 1420铝锂合金的超塑性对温度比较敏感,当成形温度为520°C时,1420铝锂合金表现出良好的超塑性变形能力,并且通过有限元模拟可以很好地预测超塑成形后零件的壁厚分布情况。

(2) 超塑成形后,随着变形量的增加,1420铝锂合金内部空洞化程度加剧,当空洞交连和聚合达到一定程度时,会发生材料的断裂。因此,空洞的交连和聚合是

导致1420铝锂合金超塑成形最终破坏的主要原因。

参考文献

- [1] 尹登峰,郑子樵. 铝锂合金研究开发的历史与现状. 材料导报,2003,17(2):18-20.
- [2] 杨守杰,陆政,苏彬,等. 铝锂合金研究进展. 材料工程,2001(5):44.
- [3] 黄兰萍,范运强,李世晨,等. 铝锂合金的研究和应用. 材料导报,2002(5):20-23.
- [4] Park J W, Kim J W, Chung Y H. Grain refinement of steel plate by continuous equal-channel angular process. Scripta Materialia, 2004(51): 181-184.

(责编 亦非)