Research of Materials Science
Volume 5, 2016, PP.32-38

Research on Superplastic Bulging Processing for 5083 Aluminum Alloy

Zhang Chen[1†],Di Wei[1], Zhou Yingli [1],Liu Chenfeng[1],Zhou Yongsong[2], Wu Feng[3]

1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Advanced Manufacture Technology Center, Beijing 100083, China

2. Jiangsu Institute, China Academy of Machinery Science & Technology, Jiangsu Changzhou 213000

3. Changzhou Tiantai aviation materials Technology Co. Ltd, Jiangsu Changzhou 213002

†Email: 261955880@qq.com

Abstract

In order to research superplastic forming performance of 5083 aluminum alloy sheet, experiments on tensile properties of 5083 aluminum alloys under different temperature of 485℃, 505℃, 525℃ were carried out with the static material test system, the mechanical properties and microstructure of the high temperature were studied by microstructure analysis, thus the best process route of superplastic forming was established. The superplastic forming process of 5038 aluminum alloy part was simulated using Abaqus software, and the superplastic forming experiment was conducted. Tests showed that the bulging process under the temperature of 485℃ will conduct a better forming part and the Maximum thinning ratio can reach to 50%.

Keywords: 5083 Aluminum Alloy; Superplastic Bulging; Thinning Ratio

5083 铝合金超塑气胀成形工艺研究*

张臣[1]，邸伟[1]，周英丽[1],刘晨枫[1]，周永松[2]，吴锋[3]

1. 机械科学研究总院先进制造技术研究中心，先进成形技术与装备国家重点实验室，北京 100083

2. 机械科学研究总院江苏分院，江苏 常州 213100

3. 常州天泰航材科技有限公司，江苏 常州 213002

摘　要：为了研究 5083 铝合金板材的超塑气胀成形性能，通过单向拉伸实验测试了 5083 合金在 485℃、505℃、525℃温度下的应力－应变曲线，对不同温度条件下的材料显微组织进行了分析，并通过 Abaqus 有限元模拟软件对工艺路线进行优化，确定了锥筒形零件的超塑成形工艺路线，试制了 5083 铝合金锥筒形零件。试验结果表明，在温度 485℃条件下对 5083 铝合金薄板进行超塑气胀成形，锥筒零件成形结果良好，最大减薄率为 50%。

关键词：5083 铝合金；超塑气胀成形；减薄率

引言

超塑成形技术是航空领域多年来重点发展和应用的一种复杂构件先进成形技术，能有效减轻结构重量和提高材料利用率，为设计提供更大的自由度以及对成形模具材料和设备的要求不高等优点[1-3]。与传统的冲压工艺相比，超塑成形工艺可以有效减少回弹，降低模具制造成本，简化工序。

5083 铝合金是 Al-Mg 系不可热处理强化合金，具有较高的强度及塑韧性，优良的可加工性、抗腐蚀性及焊接性等优点，是广泛应用于超塑成形的铝合金之一[4-7]。但 5083 铝合金在室温下存在着冷成形延伸率低且回弹较大等缺点，即便在高温状态下冲压，其塑性也很难满足要求，从而导致成形件质量不佳。故使用超塑成形工艺使材料在低弹性模量及高延伸率的状态下气胀成形是解决该问题的有效途径。

本试验通过对商用 5083 铝合金板材的高温力学性能和显微组织进行研究，结合有限元仿真模拟，制定

了超塑成形工艺路线，完成了锥筒形零件的试制，并测试了成形零件壁厚分布，为今后复杂结构件的成形提供了参考。

1 实验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用材料为 5083 铝合金板材，厚度 1.5mm，供货状态为 H32，化学成分见表 1。

表 1 5083 铝合金化学成分（质量分数，%）

Tab.1 Chemical composition of 5083 Al alloy(mass fraction,%)

元素	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Al
质量分数	2.97	0.066	0.156	0.02	0.364	0.013	0.006	0.012	余量

1.2 试验方法

高温单向拉伸试验是将 1.5mm 厚的 5083 铝合金板材按照 GB/T24172-2009（金属超塑性材料拉伸性能测定方法）沿轧制方向加工成如图 1 所示的标准板状试样，选取 3 组温度（485℃、505℃、525℃）和 4 组应变速率（0.0005s^{-1}、0.001s^{-1}、0.02s^{-1}、0.13s^{-1}），采用恒应变速率法在万能拉伸试验机上进行高温拉伸试验。为研究板料各向异性性能，根据结果选定合适的成形温度及应变速率，并沿轧制方向、垂直轧制方向及与轧制方向呈 45°角方向分别取样拉伸。拉伸结果取 3 个试样的平均值。

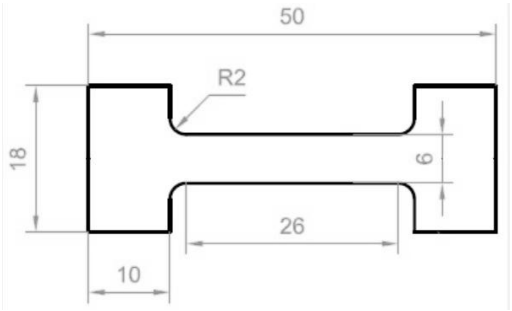


图 1 5083 铝合金拉伸标准试样

Fig.1 Tensile specimen of 5083 Al alloy

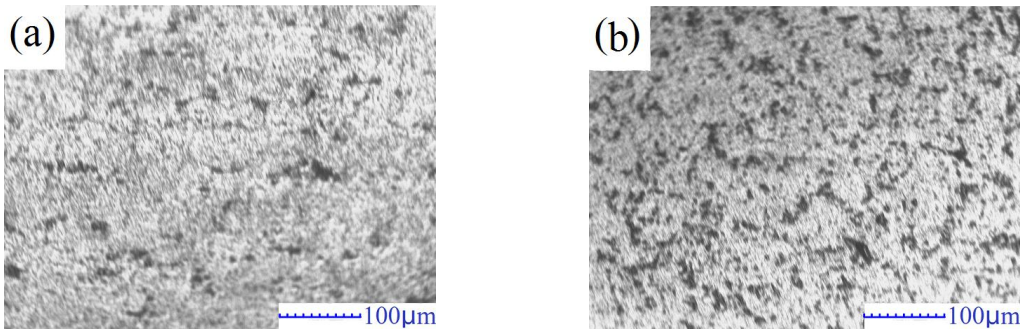
金相试样使用金相切割机切成 10mm×10mm×1.5mm 的薄片，镶样后按照 320#、400#、600#、800#、1000#、1500#的砂纸依次打磨，细磨完成后使用 M0/1（W1）的金刚石研磨膏在尼龙布上抛光 20 分钟。抛光后进行腐蚀，腐蚀液为 HF：HNO_3：H_2O=1:3:7（体积比）。腐蚀后使用金相显微镜进行显微组织观察。

在通过高温拉伸试验得到延伸率较高的温度及应变速率后，结合该温度下合金的显微组织分析，通过 Abaqus 有限元模拟软件进行 5083 铝合金的成形分析，从而从温度控制，气体胀形压力-时间曲线方面优化工艺路线，最后在 800T 超塑成形试验机下进行锥筒形件的试制。

2 试验结果与分析

2.1 板材原始组织金相分析

将实验用原始板材进行粗磨、细磨、抛光等工序，在金相显微镜下进行显微组织形貌分析，观测结果如图 2 所示。



(a)Original microstructure　　(b)Heat treatment structure

图 2 5083 铝合金组织

Fig.2 The microstructure of 5083 Aluminum alloy

由图 2 可知，原始材料平均晶粒大小约为 40－60um。经过 485℃保温 1 小时板材的平均晶粒大小约为 60—80um，说明材料在高温下晶粒长大趋势明显，所以应避免使板材长时间处于高温环境下，以免晶粒长大造成塑性下降，影响产品的成形质量。

2.2 高温单向拉伸试验

图 3 为 5083 铝合金在 485℃、505℃、525℃三个温度和 0.0005s^{-1}、0.001s^{-1}、0.02s^{-1}、0.13s^{-1} 四个应变速率下的高温拉伸试验结果，由图可知，随着温度升高和应变速率的降低，5083 铝合金流变应力逐渐减小。

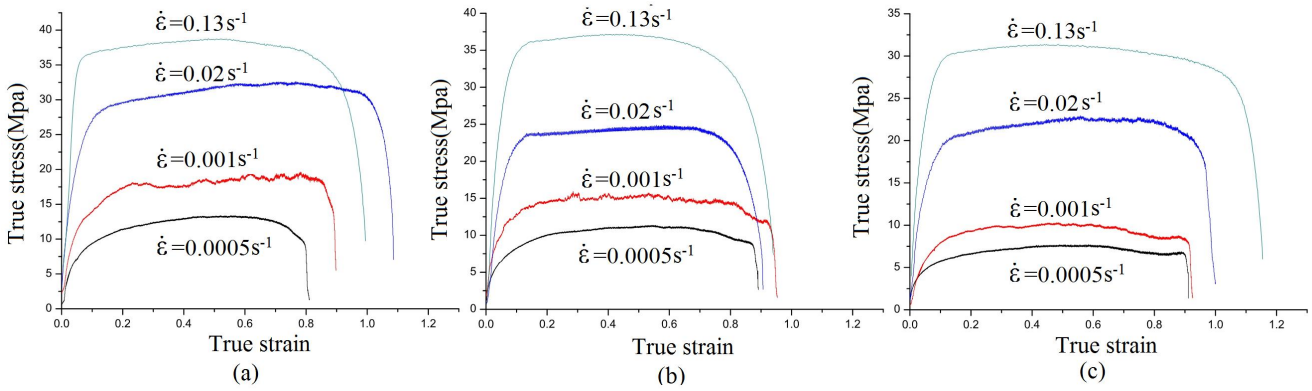


图 3　5083 铝合金超塑性拉伸试验结果

Fig.3 Results of superplastic tension tests for 5083 aluminum alloy

(a) T=485℃; (b) T=505℃; (c) T=525℃

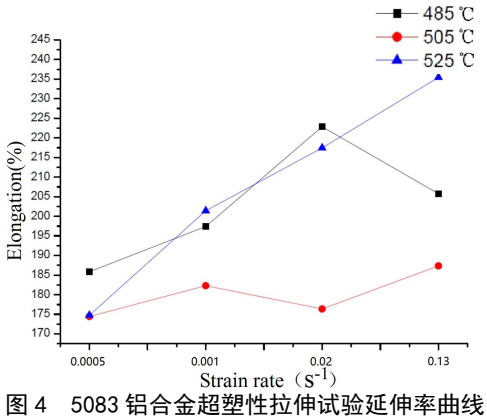


图 4　5083 铝合金超塑性拉伸试验延伸率曲线

Fig.4 Curves of elongation of superplastic tension tests for 5083 aluminum alloy

图 4 为 5083 铝合金延伸率随温度、应变速率变化曲线，由于试验板料晶粒并非超塑性细晶材料，晶粒较为粗大，故延伸率随温度和应变速率变化的规律性表现不明显。在温度为 525℃，应变速率为 0.13s^{-1} 的条

件下，材料延伸率最大，为 235.45%。在 485℃与 525℃材料的延伸率在各个应变速率下均优于 505℃。在低速拉伸状态下，485℃的延伸率相对较好。图中可以看出，材料在温度为 485℃，低速变形时材料延伸率能够保持在 185%以上，能够满足成形所需变形量的要求。

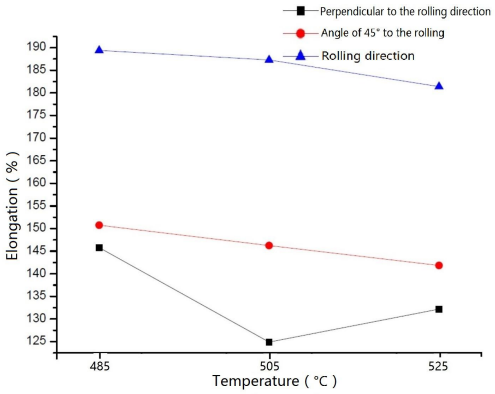


图 5　5083 铝合金延伸率与温度关系曲线

Fig. 5　Curves of elongation vs. temperatures of 5083 aluminum alloy

图 5 为材料在温度 485℃，应变速率 0.001s^{-1} 下的各向异性试验结果，其中沿轧制方向、垂直轧制方向及与轧制方向呈 45°角方向分别取样拉伸。图中可知材料在轧制方向延伸率较高，在 180%以上，与轧制方向呈 45°角方向延伸率略高于垂直轧制的方向，在 125%以上。故在高温下材料的各向异性对不会对材料成形起到过大影响。

综上可知，此材料在温度为 525℃，应变速率为 0.13s^{-1} 时达到最佳延伸率 235.45%，但超塑成形着重关注材料低速变形的力学性能，故应选用在低速拉伸下塑性较好的 485℃作为成形温度。此外材料在较高温度加热时，在模腔升温过程中且易产生局部过热导致吹胀时发生破裂，为了防止模具在放料或开模后升温时产生局部过热，成形试验选定 485℃作为成形温度。

2.3　基于 Abaqus 的数值模拟分析

为使材料在气胀加压阶段的应变速率能够保持在超塑性较好的的范围内（0.001S^{-1} 左右），从而得到相应的压力-时间曲线。使用 Abaqus 有限元模拟软件，采用锥角为 80°的锥筒形模具对 5083 铝合金超塑成形性能的分析及模拟，模具图见图 6。采用了四边形壳单元，使用显式分析步，气体胀形载荷和压边载荷选用面力，气胀载荷施加于压边部位以里的位置，方向垂直板料指向模面。

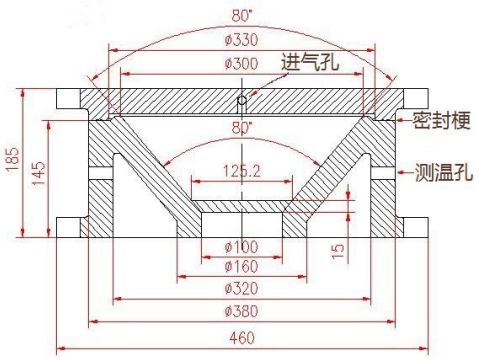


图 6　超塑气胀成形模具

Fig. 6　Superplastic air-bulge forming dies

超塑气胀成形过程一般分为三个阶段：自由胀形阶段、贴模阶段、充填阶段。各个阶段超塑成形过程如图 7 所示。由图 7 可知，在板料的自由胀形阶段和贴模阶段，材料的底部承受的 3 向拉应力较大。从而底部

减薄较多。而且在最后圆角的充填阶段，需要比前两阶段更大的气压才能做到完全贴模。通过有限元模拟得到的最佳压力-时间曲线如图 8 所示。

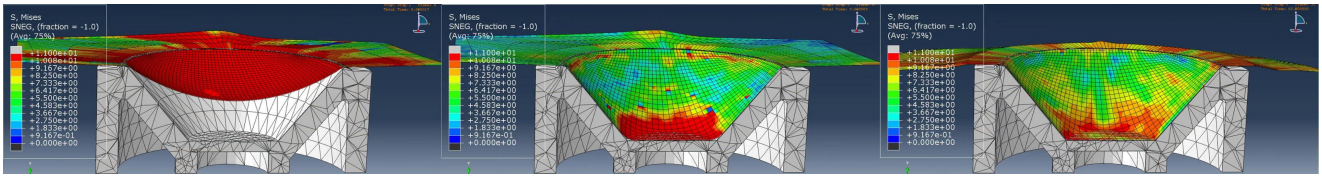


图 7 超塑胀形过程

Fig.7 Superplastic bulging process

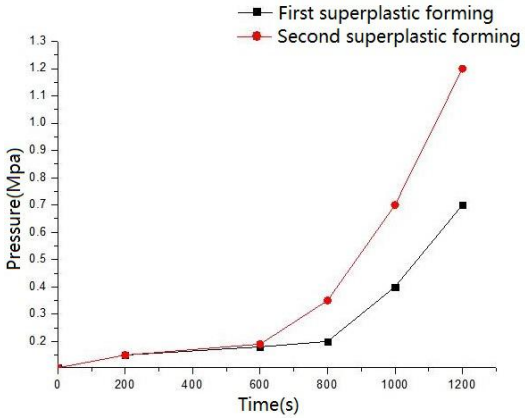


图 8 压力-时间曲线

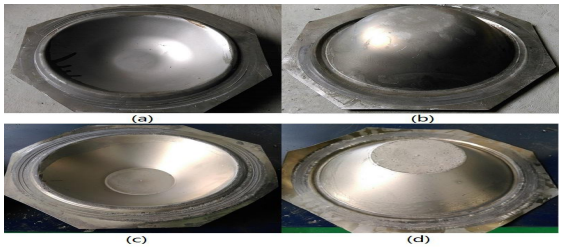
Fig.8 Pressure-time curve

2.4 锥筒形件的气胀成形

根据高温拉伸试验所确定的最佳变形温度及应变速率，结合 Abaqus 有限元模拟的结果，在 800T 超塑成形试验机上进行气胀成形试验。成形温度为 485℃，气胀阶段的压力-时间曲线见图 8，板料成形前涂覆脱模剂，脱模剂选用石墨乳。模具压边力为 100T，加热模具，待模腔温度均匀后放入板料开始气胀成形过程。成形过程为如下，

板料清洗、涂覆脱模剂、模腔到温后放入板料保温 10 分钟、压力机滑块压紧并保温 5 分钟、气胀成形、滑块上行取件并空冷。

按上述试验参数对板料进行了第一次成形，成形结果如图 9(a)(b)所示。由于凹模圆角处贴模情况不佳，随后在相同温度下进行了第二次胀形试验，气胀阶段的压力-时间曲线见图 8，成形结果见图 9(c)(d)。



(a) (b) First forming part; (c) (d) Second forming part

图 9 超塑成形件

Fig.9 Superplastic forming part

由图 9 可以看出两次吹胀成形得到的锥桶形件在成型过程中都能够贴到模具底端，说明该商用 5083 铝合金延伸率能够达到此次成形所需变形量的要求。但是第一件的填充阶段进行的不充分，导致圆角处并未成

形，而第二件在改进气胀曲线之后贴模良好。

对第二件成形件剖开进行厚度测量，并与有限元模拟所得的厚度分布进行对比，结果见图 10。由图 10 可知，模拟结果与实测结果相差不大且趋势相近，说明有限元模拟能够反映板料在胀形时各个位置减薄的趋势，为工艺优化提供参考。通过实际测量，得到成形件减薄最严重的地方在距中心 0~4cm 的范围内，即锥桶底部的平面部分，件体厚度分布不均匀，呈沿底部往侧壁递增的趋势。底部减薄最大，减薄率达到 50%，这是由于底部与模具接触较晚使得流变应力与摩擦力相互作用导致的减薄。

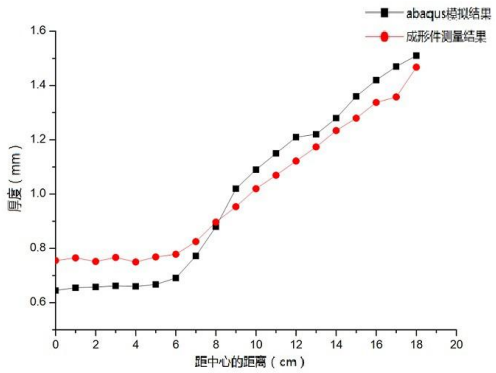


图 10　胀形厚度分布

Fig. 10　Thickness distribution of bulging

胀形试验使用两种压力-时间曲线进行了吹胀成形，第一次气胀成形件的圆角处存在贴模不佳的问题，原因可能是材料所受气压不足以填充圆角并且由于长时间处于高温下，晶粒长大导致材料流变受阻，合金的流动性能变差。所以对该 5083 铝合金来说最理想的成形过程应在成形的贴模阶段后期不断增压，减少材料在过高温度下的保温时间，从而提高圆角填充的速度。这样不仅能保证成形件的质量，同时也能提高生产效率，降低成本。

3　结　论

1）通过多组拉伸试验，获得当前 5083 铝合金薄板的最佳超塑成形工艺参数：485℃，应变速率范围 $0.0005Ss^{-1}$~$0.005s^{-1}$。 在低应变速率下，485℃的延伸率可达到 185%以上。

2）由金相组织分析可知，该板料室温下晶粒大小约为 40-60um，晶粒细化程度较低；加热至 485℃后晶粒大小约为 60-80um，晶粒长大趋势明显，故在高温下成形时不宜保温过长时间。

3）通过 Abaqus 对 5083 铝合金锥桶形件成形过程进行了数值模拟，确定了 485℃温度下的压力-时间曲线。第二次试制应用优化后的曲线，进行了 5083 铝合金锥桶形件的成形试验，实际吹胀厚度分布与模拟结果两者吻合度较好。

4）通过对两次成形件的简单分析可知，材料在成形件底部减薄最为严重，最大减薄率达到 50%。为了得到厚度均匀的成形件，可进行反吹等预处理工艺来减少底部减薄。

参考文献

[1]　Staley J T，Liu John and Hunt W H.Aluminum alloys for aerostructures[J]. Advanced Materials& Processes，1997，(12)：17. 19.

[2]　海锦涛，王仲仁. 国内外超塑性研究近况及发展[J]. 锻压技术，1992，6：35-41

[3]　林兆荣. 金属超塑成形原理及应用[M]. 北京：航空工业出版社，1990：4

[4]　J. C. Huang,T.H.Chuang.Progress on superplasticity and superplastic forming in Taiwan during　1987-1997.Materials Chemistry and Physics. 1999，57: 195-205

[5]　PUAL GREEN W,KULAS Maryanne.Deformation and failure of a superplastic AA5083 aluminum material with a Cu addition.Metallurgical and Materials Transactions A.2006,37A(9):2726-2739

[6]　Verma R，Kim S．Superplastic behavior of copper-modified 5083 Aluminum alloy[J]．Journal of Materials Engineering and

Performance，2007.16(2):185—190

[7] Larry D Hefti.Commercial Airplane Application of Superplastically Formed AA5083 Aluminum Sheet.Journal of Materials Engineering and Performance,2007,16(2):135-142

REFERENCES

[1] Staley J T，Liu John and Hunt W H.Aluminum alloys for aerostructures[J]．Advanced Materials& Processes， 1997，(12)：17．19．

[2] J.T.Hai，Z.R.Wang.The research status and development of domestic and foreign superplasticity[J]. Forging & Stamping Technology，1992，6：35-41

[3] Z.R.Lin.Principle and application of Metal Superplastic Forming[M].Beijing:Aviation Industry Press，1990：4

[4] J. C. Huang,T.H.Chuang.Progress on superplasticity and superplastic forming in Taiwan during 1987-1997.Materials Chemistry and Physics. 1999，57: 195-205

[5] PUAL GREEN W,KULAS Maryanne.Deformation and failure of a superplastic AA5083 aluminum material with a Cu addition.Metallurgical and Materials Transactions A.2006,37A(9):2726-2739

[6] Verma R，Kim S．Superplastic behavior of copper-modified 5083 Aluminum alloy[J]．Journal of Materials Engineering and Performance，2007.16(2):185—190

[7] Larry D Hefti.Commercial Airplane Application of Superplastically Formed AA5083 Aluminum Sheet.Journal of Materials Engineering and Performance,2007,16(2):135-142

【作者简介】



[1]张臣（1991-），男，汉族，机械科学研究总院先进制造技术研究中心，硕士，研究方向为金属超塑性与成型工艺，Email：261955880@qq.com 联系电话：18511302644

*基金项目：“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项资助项目（2014ZX04001-141-04）