

5A06 铝合金板材超塑气胀成形数值模拟

毕宝鹏, 王勇

(北京机电研究所, 北京 100083)

摘要: **目的** 改善 5A06 铝合金板材超塑性气胀成形件壁厚分布。**方法** 采用 MARC 有限元分析方法, 对商业供货态 5A06-O 铝合金板材 (原始厚度为 2 mm) 的超塑性成形进行数值模拟分析。**结果** 优化后的反吹预减薄变形, 使杯形件最终壁厚分布大大改善, 最薄处壁厚从单纯正吹胀形时的 0.65 mm 提高到了 0.94 mm, 壁厚均匀性指数达到 0.079。**结论** 合理的反胀形模具可以增加最小壁厚, 达到提高壁厚均匀性的目的。

关键词: 5A06 铝合金; 正反胀形; 壁厚均匀度

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.016

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)06-0099-05

Numerical Simulation on 5A06 Aluminum Alloy Sheet by Superplastic Gas Bulging Forming

BI Bao-peng, WANG Yong

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: **Objective** Improvement of 5A06 aluminium alloy plate superplastic gas bulging forming wall thickness evenness. **Methods** The results of commercial supply state 5A06-O aluminum alloy sheet's (original thickness 2 mm) superplastic forming show that the uneven distribution of wall thickness of forming parts by using the method of MARC finite element analysis. **Results** The results show that the optimized blow the thinning deformation is greatly improve the cylindrical pieces of the final wall thickness distribution, the most in thin wall thickness from the simple was blowing bulging of increased by 0.94 mm, 0.65 mm wall thickness evenness index is 0.079. **Conclusion** Reasonable the bulging die can increase the minimum wall thickness, achieve the goal of increasing wall thickness evenness.

KEY WORDS: 5A06 aluminum alloy; positive and negative bulging forming; wall thickness evenness

超塑性成形是特种塑性成形工艺之一。在常规条件下, 大多数材料由于塑性较低或者弹性回复严重, 难以进行塑性成形, 如多数钛合金、某些铝合金和镁合金、金属基复合材料、金属间化合物、陶瓷等, 但在超塑性状态下, 则很容易成形出形状复杂的

薄壁构件。迄今为止, 超塑性成形已经在很多方面得到了应用, 如超塑性板材气胀成形、等温锻造、超塑性挤压及差温拉深等^[1-3]。超塑性气胀成形是超塑性在板材成形加工中的典型应用。其基本原理是^[4-5]: 将被加热至超塑温度的金属夹紧在模具上,

收稿日期: 2014-10-2

基金项目: 国家国际科技合作专项资助(2013DFR70860)

作者简介: 毕宝鹏(1989—), 男, 山西人, 硕士生, 主要研究方向为铝合金超塑性成形技术。

并在其一侧形成一个封闭的空间,在气体压力下使板材产生超塑性成形,并逐步贴合在模具型腔表面,形成与模具型面相同的零件。在胀形过程中,由于板坯周边材料被模具压紧不参与变形,零件面积增加完全由板坯变薄来实现,应力和应变场分布不均匀性造成最终零件壁厚的明显差异。

表1 5A06 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of 5A06 alloy in wt%

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Be	Ti	其他		Al
								单个	合计	
6.42	0.62	0.13	<0.1	<0.1	<0.2	<0.005	0.05 ~ 0.10	0.05	0.1	Bal.

2 5A06 铝合金杯形件的有限元分析

5A06 铝合金杯形件形状如图 1a 所示,其中侧壁部分要求厚度均匀,壁厚最薄处要求大于 0.85 mm。借助 MSC. Marc 模拟软件对 5A06 铝合金杯形件气胀成形过程进行模拟分析,通过不同的措施改善零件的壁厚均匀性,从而更好地指导实际生产过程中该零件的气胀成形工艺的制定。

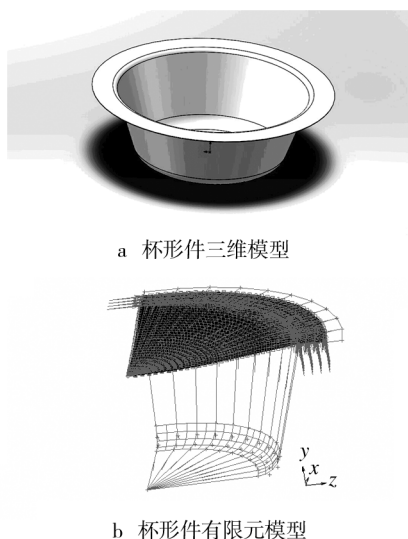


图1 5A06 铝合金杯形件

Fig.1 5A06 aluminum alloy cup shaped parts

2.1 有限元模型的建立

基于 5A06 铝合金杯形件是轴对称的,为了节省计算时间,用胀形模具的 1/4 模型进行分析。预成形模具型腔曲线由 AutoCAD 软件建立,通过

1 试验

试验所采用的材料为西南铝业提供的供货态 5A06-O 铝合金,板材厚度为 2.0 mm,合金的化学成分见表 1。

METANT 的接口导入,然后旋转扩展生成型腔曲面。图 1b 所示为其气胀成形有限元几何模型,采用 75 号 shell 单位对坯料进行网格划分。在成形过程中板料和模具之间有相对滑动,选用 COULOMB 的 BILINEAR 摩擦模型,即基于位移增量的双线性库仑摩擦,摩擦因数设定为 0.4。采用刚塑性模型来计算杯形件的成形,在不考虑应变硬化作用下,该模型即为 Backofen 方程^[6-7]。

2.2 气胀成形的基本过程及分析

超塑性胀形过程一般包含 3 个阶段,即自由胀形阶段、贴模阶段、充填阶段^[8]。图 2 为 5A06 铝合金杯形件气胀成形有限元分析过程。从图 2a, b 中可知,板料从未贴模的部位开始自由胀形,与模具接

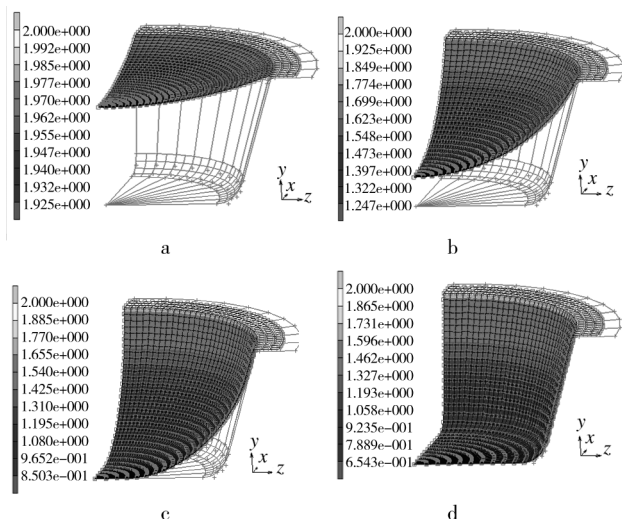


图2 5A06 铝合金杯形件气胀成形有限元分析过程

Fig.2 Finite element analysis of 5A06 aluminum alloy cup shaped produced by parts gas bulging forming

触的倒角处优先变形,板料中部变形比较缓慢。随着变形的继续,最先变形的部分完全贴模。由于模具接触的摩擦作用,变形速率变慢,主要变形区转到板料中部,中心位置厚度逐渐变薄(图2c,d中);随着变形的继续,凹面加大,板料开始与模具底部接触,与模具接触的部分逐渐扩大,球顶部分为厚度不断减薄的半球,直至半球顶点与模具接触为止。接下来为填充阶段,此阶段从板料与模具侧壁、底面同时相切到完全贴模为止。

图3是5A06铝合金杯形件气胀成形壁厚分布,从图3可见,杯形件壁厚自上而下逐渐变薄,这是由于气胀成形自身的特点决定的。在成形过程中,当板料与模具接触后,模具与板料的摩擦力极大地限制了材料的流动,特别是在高温条件下,材料的粘性增大,摩擦因数的作用加剧。由图3可知,厚度最大的是最先与模具接触的倒角处,几乎没有变形。变形最大、厚度最小的是最后与模具接触的底部倒角处,壁厚最薄为0.64 mm,这与壁厚最薄处要求大于0.85 mm还有一定差距,所以需要采取有效的措施,增加壁厚的均匀性和最薄处的厚度。

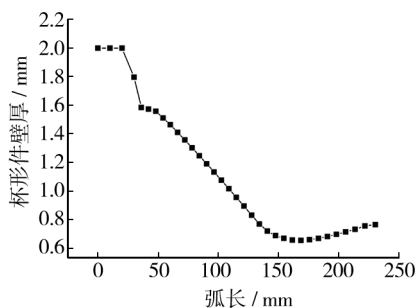


图3 5A06 铝合金杯形件气胀成形的壁厚分布

Fig. 3 Wall thickness distribution of 5A06 aluminum alloy cup shaped parts produced by parts gas bulging forming

2.3 改进5A06 铝合金杯形件壁厚均匀性的措施

为了改善超塑性气胀成形零件壁厚分布,可供选择的主要方法有:正反胀成形、覆盖成形、凸模成形、顶塞协助成形、涂层控温成形、坯料预成形等方法^[9-12]。文中采用正反胀成形,增加壁厚的均匀性和最薄处的厚度。正反胀形先将板料反向自由吹胀到略大于凹模深度,以便增加顶部材料的变薄,然后再正向加压直至贴模。这样能在一定程度上起到变形分散、缓解凹模圆角处变薄过于集中的问题,如图

4所示。

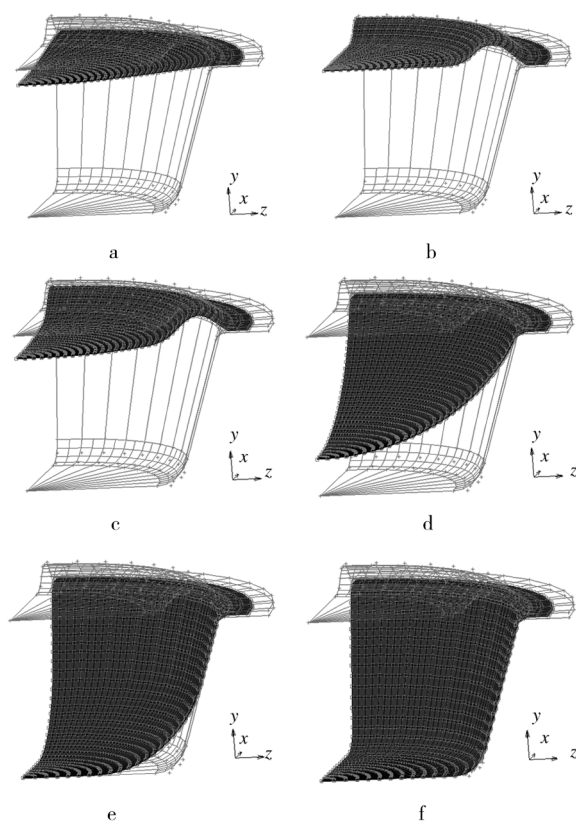


图4 5A06 铝合金杯形件正反胀成形有限元分析过程

Fig. 4 Finite element analysis process of 5A06 aluminium alloy cup shaped parts produced by positive and negative bulge forming

预成形模具形状设计是正反胀成形工艺的关键。5A06 铝合金杯形件正向成形时,板料在模具侧壁上的贴模先后次序不同,贴模越晚,减薄越多。通过查阅国内外相关文献^[13-15],可知,正反胀形预成形模具在预成形过程中,应对板料在下模贴模较早的部分进行预先减薄,以使最终工件壁厚比较均匀。5A06 铝合金杯形件预成形模具基本形状如图5所示,其中 (a, b) 是圆弧的圆心, R_1 和 R_2 分别是圆角半径。通过改变圆弧大小、 R_1 和 R_2 ,共设计了10种

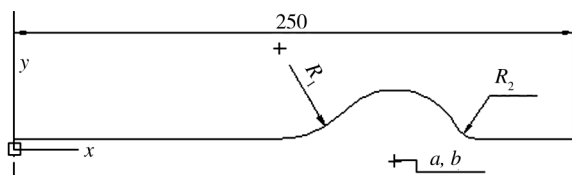


图5 预成形模具的基本形状

Fig. 5 Basic shapes of preform die

不同预成形模具形状,如图 6 所示。

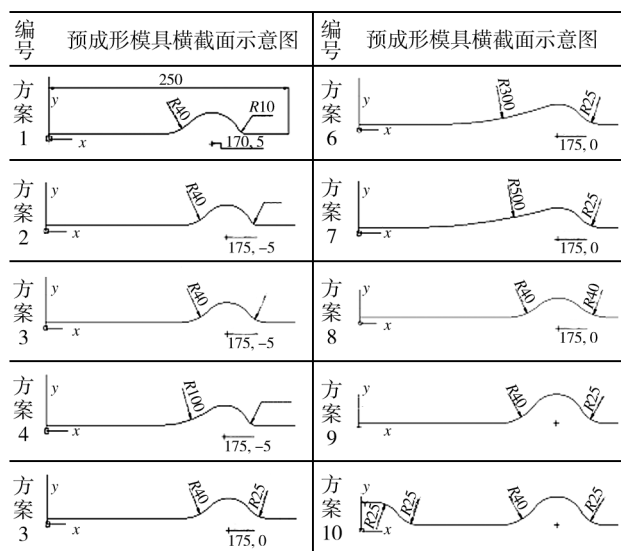


图 6 预成形模具横截面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of preform die shape cross section

由图 6 可知,方案 1 中,圆弧半径相对于其他方案比较大;方案 2~4 中,圆弧半径是一样的,其中方案 2 和 4 中 R_1 不同,方案 1 和 3 中 R_2 不同;方案 5~8,圆弧半径一样,其中方案 5~7 中 R_1 不同,方案 5 和 8 中 R_2 不同;方案 9~10,方案 9 同其他方案的圆弧半径都不一样,方案 10 独特之处在于在模具中部也预成形。

用最小壁厚 a 、壁厚平均值 δ 、壁厚均匀度 θ 3 个变量来描述正反胀形对壁厚分布的改善作用。其中壁厚 θ 值是指沿着成形件的母线方向测若干壁厚,求均方差。最小壁厚 a 、壁厚平均值 δ 越大、壁厚均匀度 θ 值越小,则成形件的壁厚分布越均匀。表 2 为正反胀形的最小壁厚、壁厚平均值及壁厚均匀度。

由表 2 可知,正胀形时壁厚均匀度最小为 0.1967,最薄处的厚度为 0.6471 mm。通过比较,采用正反胀形对壁厚的均匀性的增加是必然的,因为反胀形将正胀过程中最早贴模的区域减薄了,对此区域的减薄程度决定了正胀过程中集中区的位置,合理地减薄,可以使该区域在正胀成形结束的时候厚度适中,并且可以将多余的材料向下聚,从而使底部倒角处的壁厚增大,从而达到增加壁厚均匀性的目的。从模拟的结果看,正反向胀形所得制件的最

表 2 5A06 铝合金杯形件正反胀形壁厚均匀度

Table 2 Wall thickness distribution of 5A06 aluminium alloy cup shaped parts produced by parts gas bulging forming mm

编号	成形完后 最薄处厚度	壁厚 平均值	壁厚 均匀度
正胀形	0.64	1.11	0.1967
方案 1	0.82	1.13	0.1071
方案 2	0.89	1.18	0.0954
方案 3	0.89	1.12	0.0897
方案 4	0.87	1.10	0.1032
方案 5	0.94	1.14	0.0790
方案 6	0.78	1.10	0.1183
方案 7	0.69	1.08	0.1350
方案 8	0.86	1.13	0.0899
方案 9	0.81	1.14	0.0800
方案 10	0.58	1.07	0.1180

小壁厚位置也在底部圆角处,预成形模具对杯形件最早贴模的部分进行了预减薄,使得正胀过程中该处变形抗力减小,并且可以将多余的材料向下聚。其中方案 10 不但没有增大最薄处厚度,反而使最薄处的厚度与最大的厚度差距更大,不能满足工艺要求。方案 1、方案 6、方案 7 和方案 9 由于 R_2 处的圆角过大或者过小,虽然使壁厚均匀性增加了,但是不符合工艺要求。方案 2、方案 3、方案 4、方案 5 和方案 8 对于板料的预成形以及板料减薄、壁厚均匀度的控制较为合理,其成形效果较好。其中方案 5 对于板料的预成形以及板料减薄、壁厚均匀度的控制最优,其成形效果最好,所以选择方案 5 的模具作为 A06 铝合金杯形件正反胀形预成形模具。

5A06 铝合金杯形件正反胀形预成形模具设计合理,可以明显提高成形件的壁厚均匀度,提高制件的质量,从而为更好地指导实际生产过程中该零件的气胀成形工艺奠定基础。

3 结论

1) 超塑性气胀成形件,壁厚分布极不均匀,很难满足实际生产过程中工艺要求,必须采取有效措施增加壁厚均匀性。

2) 与正向胀形相比,正反胀形可以显著提高 5A06 铝合金杯形件的成形能力,使最薄处壁厚从

0.64 mm,提高到0.94 mm,使壁厚均匀度从0.19降低到0.0790,使壁厚平均值增大,符合工艺要求。

3) 正反胀形中的预成形过程中,最早贴模部分的减薄直接决定了正胀过程中变形区的集中位置。合理的反胀形模具,可以使该区域在正胀成形结束的时候厚度适中,并且可以将多余的材料向下聚,从而使底部倒角处的壁厚增大,从而达到提高壁厚均匀性的目的。

参考文献

- [1] 张凯峰,王国峰. 先进材料超塑成形技术[M]. 北京:科学出版社,2012.
ZHANG Kai-feng, WANG Guo-feng. Advanced Material Molding Technology[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 邵清安,李治华,孙立群,等. 航空发动机塑性成形技术的应用与展望[J]. 航空制造技术, 2014(7): 34—39.
TAI Qing-an, LI Zhi-hua, SUN Li-qun, et al. The Aircraft Engine Application and Prospect of Plastic Forming Technology[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2014(7): 34—39.
- [3] Jarrar Firas S, Hector Jrlouis G, Khraisheh, et al. New Approach to Gas Pressure Profile Prediction for High Temperature AA5083 Sheet Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(6-7): 825—834.
- [4] 吴诗淳. 金属超塑性变形理论[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
WU Shi-chun. Metal Superplastic Deformation Theory[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.
- [5] 冯超,孙丹丹,陈火红,等. 全新 Marc 实例教程与常见问题解析[M]. 北京:中国水利重点出版社,2012.
FENG Chao, SUN Dan-dan, CHEN Huo-hong, et al. New Marc Instance Tutorial and Common Problem Analysis[M]. China Water Conservancy Key Press, 2012.
- [6] 陈火红,杨剑,薛小香. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
CHEN Huo-hong, YANG Jian, XUe Xiao-xiang. New Marc Finite Element Instance Tutorial[M]. Mechanical Industry Publishing House, 2004.
- [7] 周兆峰,陈明和,王大刚,等. 钛合金舵体芯板超塑成形/扩散连接工艺的有限元分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 191—195.
ZHOU Zhao-feng, CHEN Ming-he, WANG Da-gang, et al. Titanium Alloy Wheel Body Core Board Molding/Dif-
- fusion Bonding Process of Finite Element Analysis[J]. Journal of Thermal Processing. Lancet, 2014(2): 191—195.
- [8] LUCKEY J R G, FRIEDMAN P, WEINMANN K. Design and Experimental Validation of a Two-stage Superplastic Forming Die[J]. Journal of Material Processing Technology, 2009, 209(4): 2152—2160.
- [9] ABU-FARHA F. Reverse Bulging in Hydro/Pneumatic Sheet Metal Forming Operation[C]. ASME Conference Proceedings, 2010(49460): 761—769.
- [10] 张凌云. 改善超塑性气压胀形零件壁厚分布的工艺方法[J]. 金属成形工艺, 2002, 20(4).
ZHANG Ling-yun. Improve the wall thickness distribution of superplastic gas pressure bulging parts process[J]. Metal forming technology, 2002, 20(4).
- [11] 蔡云,童国权,葛永成. 铝合金超塑性气胀成形壁厚分布工艺研究[J]. 模具工业, 2009(3): 23—24.
CAI Yun, TONG Guo-quan, GE Yong-cheng. Aluminum Alloy Superplastic Gas Bulging Forming Wall Thickness Distribution Technology Research[J]. Journal of Mold Industry, 2009(3): 23—24.
- [12] 蒋少松,张凯峰,吴海峰,等. 变摩擦正反超塑成形壁厚均匀的 TC4 钛合金深筒形件[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(6): 1079—1084.
JIANG Shao-song, ZHANG Kai-feng, WU Hai-feng, et al. Changing Friction are Overhauling Molding Thickness Uniformity of TC4 Titanium Alloy Deep Cylindrical Pieces[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 33(6): 1079—1084.
- [13] Paul D Edwards, Daniel G Sanders, RAMULU M, et al. Thinning Behavior Simulations in Superplastic Forming of Friction Stir Processed Titanium 6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(4): 481—487.
- [14] Paul D Edwards, Daniel G Sanders, RAMULU M, et al. Thinning Behavior Simulations in Superplastic Forming of Friction Stir Processed Titanium 6Al-4V[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(4): 481—487.
- [15] 王刚,张治朋,张建凯,等. 镁合金板材正反向快速气压胀形试验[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(1): 43—47.
WANG Gang, ZHANG Zhi-peng, ZHANG Jian-kai, et al. Magnesium Alloy Sheet to Rapid Pneumatic Bulging Test[J]. Journal of Plastic Engineering, 2013, 20(1): 43—47.