

基于CAE技术的汽车铝板发动机盖刚度研究

林再新^{1,2}, 胡鹏¹, 鲍益东¹, 赵同跃²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 福特汽车工程研究工程(南京)有限公司 制造部, 江苏 南京 211000)

摘 要:随着汽车产业的发展,轻量化在汽车制造领域占据越来越重要的地位。相较于钢板来说,铝板的塑性低、易回弹,在汽车扣合件的外板中经常存在刚度不足的问题。以铝板发动机盖外板为研究对象,采用有限元法对成形过程中的各工艺参数进行优化,再通过实验验证,较好地解决了铝板成形过程刚度不足的问题。

关键词:铝合金;板料成形;刚度;有限元模拟

中图分类号:TB115.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)01-0215-05

Research on Aluminum Vehicle Hood Outer Insufficient Stiffness Issue Based on Finite Element Simulation

LIN Zaixin^{1,2}, HU Peng¹, BAO Yidong¹, ZHAO Tongyue²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Ford Motor Research & Engineering (Nanjing) Co., Ltd., Manufacture Department, Nanjing 211000, China)

Abstract: With the development of automobile industry, lightweight plays an increasingly important role in the field of automobile manufacturing. Aluminum sheet metal is widely used in automobile industry owing to its high strength, corrosion resistance, good elasticity, excellent impact resistance, easy processing, light weight and high regeneration. Compared with steel plate, however, aluminum plate suffers low plasticity and easily springing-back, which leads to the problems of insufficient stiffness issue in the skin panel of automobile closure parts. Taking hood outer as an example, finite element method was applied to optimize the principal parameters in the forming process. Through the experimental verification, the problem of aluminum hood outer insufficient stiffness issue was solved. Therefore, the achievement has certain reference value for stamping engineering practical application.

Keywords: aluminum; sheet metal forming; stiffness; finite element simulation

0 引言

随着节能减排及环保要求的提升,汽车轻量化成为汽车制造领域的主要发展趋势。相关研究表明,汽车每减轻10%的质量,燃油效率提高8%~10%,排放量降低约4%^[1-2]。由此可见,降低汽车自身的质量对于汽车行业的可持续、绿色发展有十分重要的意义。铝合金材料具有密度小、强度高、抗腐蚀性强、可回收循环利用等诸多优点。另外,铝合金弹性高,安全性高,发生碰撞时吸能效果好,铝合金吸能约是钢的1.5倍^[3]。因此,采用铝合金板材替代传统低碳钢板作为车身材料,可达到减重效果,并可回收和循环利用,是一种非常优良的轻量化材料,被越来越多地应用到汽车车身制造中。

随着有限元法的日趋成熟,板料成形的数值模拟技术在制造业尤其是汽车行业中的应用也越来越广泛。有限元软件Autoform具有计算速度快、容易操作等优点,尤其在工艺方案的优化和复杂型面的模具设计方面具有独特的优势,在汽车冲压行业应用广泛^[4]。

由于发动机盖形状特征少,通常会有拉延不充分而导

致的强度不足问题,而铝合金材质的发动机盖强度问题尤为严重。

本文中的铝板CAE模拟是以Autoform模拟的发动机盖成形结果,与实际生产过程中的成形性和刚度进行对比,并对最终的成形结果进行合理的预测。

1 车身用铝合金板材种类及特点

目前车身铝合金板材主要有两个系列,分别为5000系和6000系,可用于发动机罩、前翼子板、顶盖、车门、行李箱盖、动力电池壳体、车厢底板结构件甚至全铝车身等^[5]。

6000系合金属于热处理可强化铝合金,由于加入了Mg-Si合金元素,具有较高的强度、较好的塑性和优良的耐腐蚀性。此外,6000系是烘烤强化合金,在冲压成形后,经油漆烘烤硬化(baking harden, BH)后可达到强化目的,性能进一步提升^[6]。现阶段,6000系合金是车身板主要材料,如制作汽车底盘、车门等。

下面以汽车覆盖件外板常用的钢板CR4和6000系铝板6061为例,对两种材料分别进行板料拉伸试验和板

料成形极限试验。

1.1 板料拉伸试验

拉伸试验被用来测定材料在承受轴向拉伸载荷下的成形性能,包括屈服强度、抗拉强度、强化系数、硬化指数、各向异性、延伸率等。本次试验设备为 UTM5504X 电子万能试验机,额定载荷为 50 kN,精度等级为 0.5 级,拉伸速度为 13 mm/min。为了保证试验数据尽可能的精准,采用加引伸计的室温拉伸。当拉伸试验机判断试件断裂时,自动停止拉伸。图 1 为各试样拉伸变形图,计算机记录引伸计的变形情况和载荷的大小,实时进行数据输出,将试验得到的数据进行相关处理,得到低碳钢和铝板的真实应力应变曲线,如图 2 所示。



图 1 拉伸试验后试样

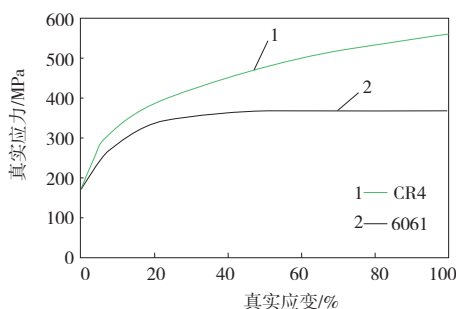


图 2 铝合金与钢的应力-应变曲线

1.2 板料成形极限试验

在板料变形过程中,板面内两个主应力比例发生变化时,相应的两个主应变的极限值也会发生变化,这些数值从本质上体现出材料的性能。通过改变面内两个主应力的比例,得到多种应力状态下对应的两个主应变的极限值,然后将数值偏大的主应变作为纵坐标、数值偏小的主应变列为横坐标建立坐标系,由获得的点构成的曲线叫做成形极限图 FLD(forming limit diagram),也叫成形极限曲线 FLC(forming limit curve)。其目的是测定材料不发生塑性失稳破坏时的极限应变值。本次实验设备为 NHMA80 金属板材成形性能试验机,图 3 为材料破裂后的试样,图 4 为实验测得的铝合金与钢的成形极限图。

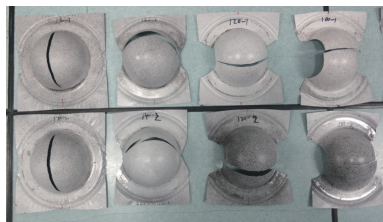


图 3 成形极限试验后的试样

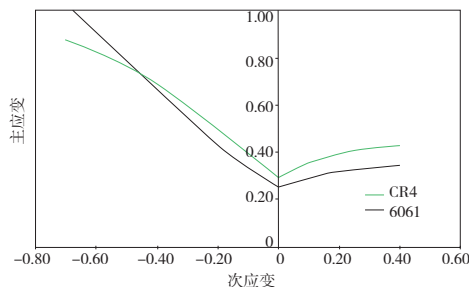


图 4 铝合金与钢的 FLD 曲线

通过板料拉伸试验和板料成形极限试验,最后进行数据处理获得低碳钢 CR4 和铝合金 6061 的材料参数性能,如表 1 所示。

表 1 钢板与铝板材料性能比较

参数	低碳钢 CR4	铝合金 6061
σ_s/MPa	171.0	170.3
σ_b/MPa	316.5	275.5
n	0.236	0.226
r	1.75	0.628
f_{FLC_0}	0.293	0.251

表 1 中: σ_s 为屈服强度; σ_b 为材料的强度极限; n 为硬化指数; r 为塑性应变比; f_{FLC_0} 为单向最大应变。由此可以发现,铝板塑性远低于钢板,抗拉强度低,延伸性差,易产生开裂缺陷。模拟调试过程中,为提高零件刚度,需要在保证成形不开裂的情况下,使零件产生足够的塑性变形。

2 铝板刚度不足问题原因分析

铝板冲压件很容易出现刚度不足的问题,尤其是像发动机盖外板这些成形特征少的扣合件外板。本文从回弹和塑性变形准则两个方面阐述铝板刚度不足产生的原因。

a) 回弹理论

回弹是弯曲成形中普遍存在的现象,是由卸载过程中内力重新分布引起的。根据塑性理论,回弹角可表示为

$$\Delta\theta \approx -3 \frac{s}{E} \cdot \frac{\rho_0}{t} \theta \quad (1)$$

其中: s 为屈服应力; E 为弹性模量; t 为板料厚度; θ 为弯曲角度; ρ_0 为回弹前的曲率。由式(1)可知,板材的回弹量主要由材料的弹性模量决定的。铝材的弹性模量 E 为钢板的 1/3,故变形中弹性应变占比大,回弹比钢板要大 3 倍左右。如图 5 所示,同样的应变条件下卸载,铝板的回弹比普通钢板要大得多。

铝板要尽量避免二次成形或整形,回弹的整改一般在拉伸过程中实施。根据这一特点,在设计铝合金冲模时必须充分考虑。根据回弹现象,需要使铝板件产生足够的塑性变形,以控制回弹量。

b) FLD 分区

有限元软件 Autoform 根据板料的材料性能和主次应

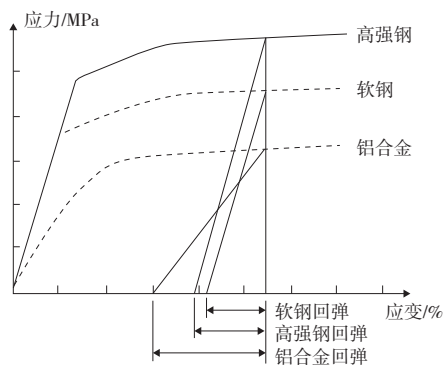


图5 铝板、软钢和高强钢的应力-应变曲线

变状态将 FLD 分为 7 个区域,如图 6 所示,分别为:破裂区(crack)、破裂危险区(risk of crack)、过度减薄区(excessive thinning)、安全区(safe)、拉伸不充分区(insufficient stretching)、起皱趋势区(wrinkle Tendency)和起皱区(wrinkle)。

其中将拉伸不充分评判准则分为两类:

1)板料的厚度方向应变 $\varepsilon_t \leq 2\%$ (此值为 required thinning,即图 6 中区域 5)。

2)板料受压应力作用,但主、副应变都很小(≤ 0.001) (此值为 acceptable thickening,即图 6 中区域 6)。

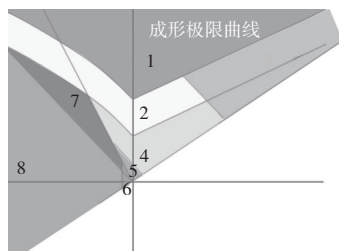


图6 成型极限图

3 CAE 分析设置及结果分析

仿真过程中所采用的材料为铝 6061,板料厚度为 0.9 mm,板料尺寸为 2 162 mm×1 757 mm,其主要力学参数见表 1。在 Process generator 中,选取增量计算法(incremental)进行模拟,根据实际生产经验分别对 Blank(毛坯的尺寸、形状、材料性能等)、Tools(凸模、凹模及压边圈的初始位置)、Lube(润滑条件)、Drawbead(拉伸筋)、Process(凸模、凹模及压边圈的运动过程和压边力)等参数进行定义,压边圈行程为 175 mm,压边力为 125 t,摩擦系数为 0.17,拉伸筋采用真实筋的形式,拉伸的总成形力为 265 t,所建立拉伸模拟的几何模型,如图 7 所示。



图7 拉伸初始位置结构图

采用真实拉伸筋进行模拟,成型过程稳定没有起皱趋势,型面部分都显示已达到塑性变形,成型极限图 8 中显示为绿色。由于采用了真实拉伸筋进行模拟,在拉伸筋区域超过 FLD 曲线,显示开裂风险,根据以往分析和现场经验,这些区域开裂风险可控。检查滑移线,没有进入产品外观面内部。综合分析 Autoform 模拟结果,认为可以开始启动加工和调试工作(因本刊为黑白印刷,有疑问之处可咨询作者)。

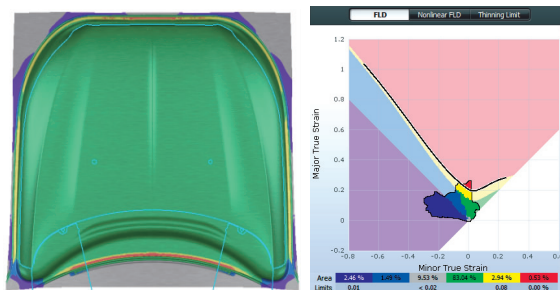


图8 CAE 成形图及 FLD 图

成形后主次应变数值如图 9 所示。

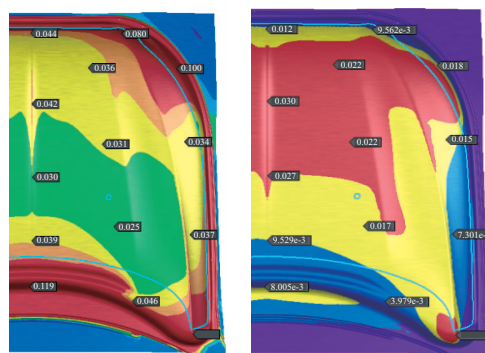


图9 主应变及副应变值

如图所示,基于 Autoform 模拟的主次应变值,等效应变都 >0.03 ,其中主应变高于 0.025,副应变高于 0.15,满足工程实际评判准则,模拟结果可以接受。

4 现场实验及 CAE 结果对比

模具加工后,在进行冲压调试前需要对压边圈和上模进行研合,保证冲压过程各模具之间没有间隙,且材料是能够均匀流动。图 10 为现场冲压后零件成型图,将压边力设置为 125 t。

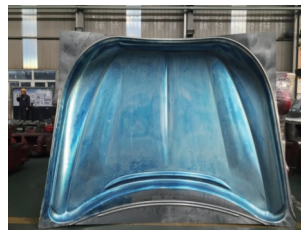


图10 拉伸后零件状态

现场通过测量板件边缘到拉伸筋的距离对比进料情

况。从图 11 可知,相较于 CAE 分析结果来说,现场实际情况板料进料更多,此时存在零件拉延不充分的缺陷。

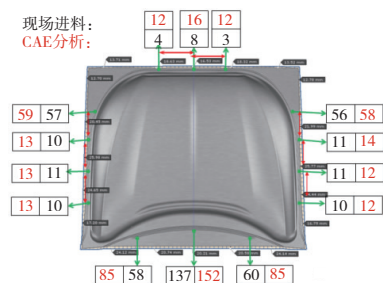


图 11 拉延材料进料与 Autoform 结果对比

为进一步确定成型零件缺陷,对零件中心部位进行零件厚度测量,结果如图 12 所示,这 4 个区域的板料变薄情况没有达到 CAE 模拟的结果。

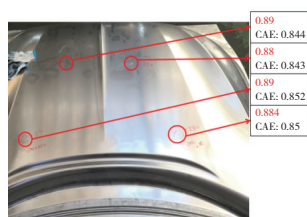


图 12 拉延材料变薄与 Autoform 结果对比

通过 CMM 检测零件在检具上的偏差量,如图 13 所示,这 4 个点超出覆盖件表面偏差 1 mm 的公差要求,零件的刚度不足,塌陷严重。

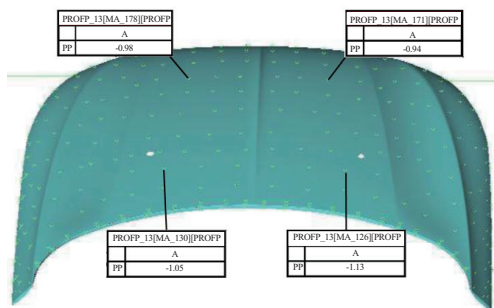


图 13 CMM 测量报告

对板料印刷网格拉延后进行了 FLD 测试,测量点位及测量数据如图 14 所示。

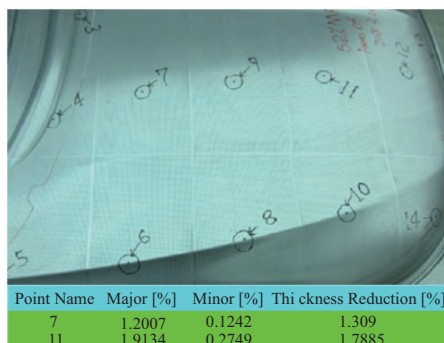


图 14 FLD 测试结果

图 14 中,点 7 和点 11 的厚向应变值分别是 1.309% 和 1.789%,零件中心部位明显没有达到足够的塑性变形。综上所述,该零件不满足实际生产要求,需要对成形工艺参数进行适当的调整。

5 基于实践对比后的整改方案

针对现场情况与 CAE 模拟结果不匹配的问题,经过多次实验测试整改发现 CAE 分析结果与实际生产现场不同的主要原因有两点:

- 1) 实体拉延筋的高度与 CAE 中虚拟筋的系数不匹配,需将拉延筋高度增加 1 mm。
- 2) 压边力过大,材料流动阻力过大,应调整压边力减小到 120 t。

通过修正拉延筋高度和压边力大小,现场拉延的材料进料量和材料变薄量与 CAE 分析结果基本匹配,如图 15 所示。调整后的结果如图 16、图 17 所示。

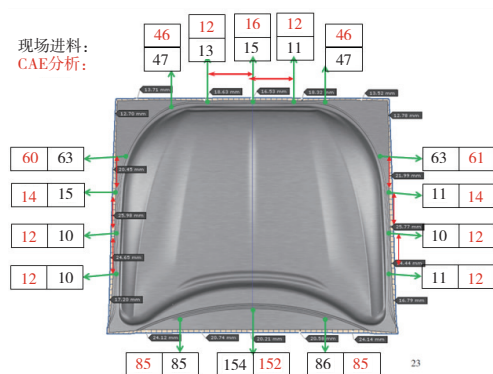


图 15 调整后拉延材料进料情况

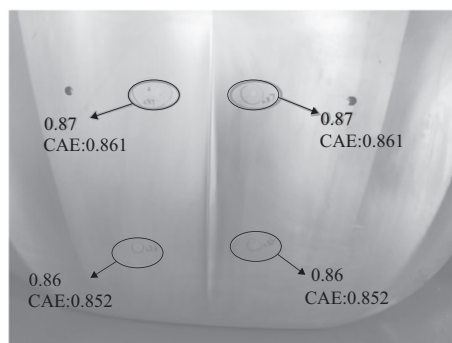


图 16 调整后拉延零件变薄对比

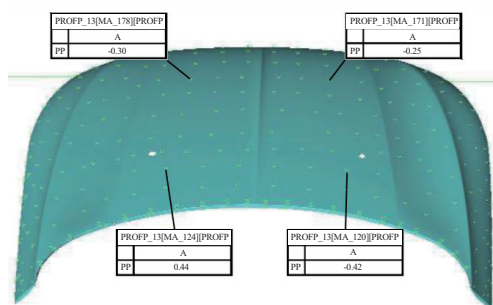


图 17 调整后 CMM 测量报告

对板料印刷网格拉伸后进行了 FLD 测试,测量点位及测量数据如图 18 所示。

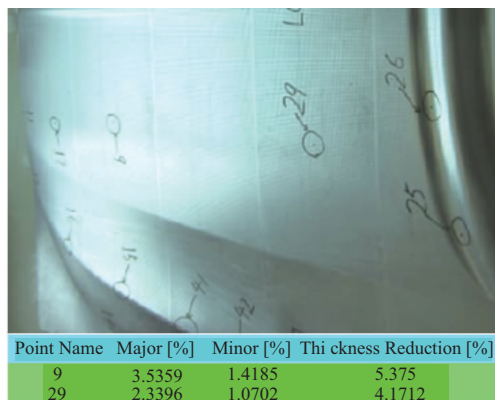


图 18 调整后 FLD 测试结果

从图 17 的 CMM 零件测量报告中可以看出,零件的刚度明显提升,零件偏差量由整改前的 1.1 mm 降到 0.4 mm,符合零件公差要求。

图 18 中点 9 和点 29 的厚度方向应变分别是 5.375% 和 4.171%,与整改前零件的应变对比,整改后板件的应变达到 2% 以上,满足了基本的塑性变形基本要求,保证了零件的刚度。

6 结语

扣合件外板零件形状特征少,为保证零件的刚度,达到强度变形的要求,前期 CAE 分析时需要保证零件中心区产生足够的塑性变形,尤其是铝板合金。CAE 和现场零件都要达到 2% 以上的塑性变形,调试过程必须参考 CAE 模拟的状态,对比材料的流入量与 CAE 结果相匹配。从零件在检具上的塌陷量及 FLD 实验测量的主次应变上都能够很好地判断零件的塑性变形状态及刚度要求。

参考文献:

- [1] 梁峰. 浅谈奥迪铝车身技术[J]. 科技资讯, 2017, 15(23): 85-86.
- [2] 张支亮. 铝合金材料在车门冲压成形工艺优化研究[J]. 世界有色金属, 2018(7): 191, 193.
- [3] 李颖, 李超. 铝合金板材力学性能和冲压成形研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(12): 2850-2853.
- [4] 李英, 焦洪宇, 牛曙光. 基于 Autoform-Sigma 的汽车顶盖后横梁冲压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2015, 40(9): 16-20.
- [5] 吴琼兴. 汽车覆盖件用铝板成形特性及应用[J]. 模具工业, 2017, 43(1): 48-52.
- [6] 李硕本. 冲压工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

收稿日期:2019-11-20

(上接第 187 页)

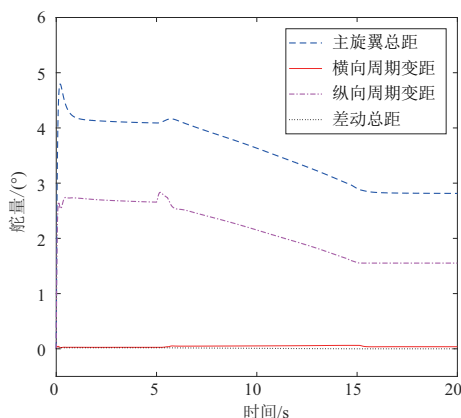


图 9 直升机操纵仿真曲线

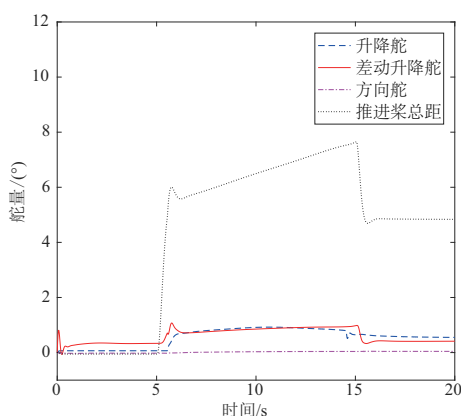


图 10 飞机操纵量仿真曲线

4 结语

本文主要研究了复合式高速直升机过渡模式的操纵特性,提出基于操稳性和推进功率最优的控制分配方法,设计过渡模式自适应 PID 控制器。仿真验证该控制器能够保证复合式高速直升机平稳、快速地完成低速模式与高速模式的切换,过渡过程中直升机姿态保持良好,指令跟踪迅速,为后期工程应用奠定了良好基础。

参考文献:

- [1] 陈铭, 武梅丽文, 曹飞. 复合式直升机技术特点及发展概述[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 94-101.
- [2] 黄晶, 李俨, 赵凯瑞, 等. 鸭式旋翼/固定翼飞机过渡模式控制律设计[J]. 飞行力学, 2012, 30(6): 523-526.
- [3] FLORES G, LOZANO R. Transition flight control of the quad-tilting rotor convertible MAV[C]//2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2013: 789-794.
- [4] 邓云霏. 一种倾转定翼无人机的动力学建模与控制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [5] 邓彦敏, 陶然, 胡继忠. 共轴式直升机上下旋翼之间气动干扰的风洞实验研究[J]. 航空学报, 2003, 24(1): 10-14.
- [6] 段赛玉, 陈铭. 复合式共轴直升机飞行动力学数学模型研究[J]. 飞机设计, 2011, 31(3): 13-17, 36.
- [7] 王强, 陈铭, 徐冠峰. 复合式共轴直升机过渡模式的操纵策略[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 458-466.

收稿日期:2019-12-05