

高温合金薄壁壳体成形工艺分析



■ 航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司（黑龙江 150000） 李海凤 何永亮

扫码了解更多

摘要：本文以直升机发动机配套零件的GH3030高温合金材料为例，通过对材料性能和零件结构的分析，阐述了高温合金薄壁壳体的成形理论，提出了成形过程中的关键影响因素以及改进后的工艺方案。



工程师 李海凤

高温合金能在550℃以上高温氧化和燃气腐蚀条件下承受复杂应力并长期可靠地工作，具有优异的高温强度性能及良好的抗氧化和抗热腐蚀性能，已成为航空制造领域热部件不可替代的关键材料。

该类材料的传统加工方式为采用落压成形工艺进行加工，利用落锤的冲击力将金属板料压制成为所需要的曲面零件，成形过程中需要灵活地垫橡皮、层板，逐次、逐渐地成形，并且在成形过程中要随时穿插平褶、消皱，“收”料，“放”料以及穿插多次的中间退火和去氧化皮工序等辅助加工步骤，消耗了大量的生

产周期和制造成本。并且由于高温合金具有较高的屈服强度和抗拉强度，成形时容易产生褶皱和成形卸载后回弹量大等缺陷，导致产品合格率低。加之新型号机型的热部件外形结构复杂度要远高于其他机型，传统高温合金成形工艺已无法满足科研生产的要求。

1.通过材料性能分析及零部件加工特点选取工艺方案

(1) 高温合金材料性能。以固溶强化型镍基高温合金GH3030为例，该材料为国内航空制造中应用于某型号直升机的发动机尾

喷管组件，材料厚度0.8mm，其力学性能如表1所示。

(2) 零部件加工特点。该型号直升机尾喷管组件是由具有自由曲面外形的薄壁壳体零件经研合焊接组成（见图1、图2），此类零件外形复杂、曲度大，存在凹凸曲面，并且对零件外形精度要求高。

(3) 制定工艺方案。拉形成形工艺方法通常适用于材料具有一定塑性、表面积大、曲度变化缓和而光滑、质量要求高的双曲度蒙皮零件。拉深成形则是利用具有一定圆角半径的拉深模，将

表1 GH3030材料力学性能

牌号	材料状态	试验温度	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ (%)
GH3030	冷轧+固溶	室温 (20℃)	≥ 265	≥ 685	≥ 30



图1 发动机尾喷管数模图



图2 APU排气管数模图

平板毛坯或开口空心毛坯冲压成容器状零件的加工工艺。根据发动机尾喷管尺寸较大、APU排气管尺寸较小的结构特点，笔者创新性地运用拉形工艺对零件特点与蒙皮零件相似的尾喷管进行加工，采用拉深成形对APU排气管进行加工，以证实并寻求两种工艺方案的可行性和差异。

2. 高温合金薄壁壳体拉形成形分析

(1) 拉形成形过程分析。根据试制情况可知，高温合金发动机尾喷管拉形形成的主要成形缺陷是回弹量大。根据材料的变形过程，零件拉形工艺过程可分为三种，如表2所示。

从三种工艺过程看，第一种拉形过程回弹量是最小的，因此发动机尾喷管的拉形成形过程分为预拉伸→弯曲→拉伸→补拉四个阶段，如图3所示。具体为：①预拉伸阶段：钳口夹紧毛坯料两端，使毛坯料张紧，产生约1%的拉伸变形。②弯曲阶段：毛坯料与拉形模脊背贴合，钳口下拉，产生弯曲变形。③拉形阶段：钳口继续向下用力，毛坯料受拉力而产生塑性变形，直至与拉形模型面完全贴合。④补拉阶段：补加切向拉力，使毛坯料的边缘材

料所受的拉应力超过屈服点，再使毛坯料较均匀地产生约0.5%的拉伸变形。目的是减少零件的回弹和残余应力，提高准确度和获得光滑流线。

(2) 拉形成形变形量分析及工艺改进。板料在拉形模型面各点的变形量主要取决于零件的形状，而型面区和过渡区变形量的大小则取决于摩擦力，直接影响板料的变形量和变形量分布。因此对成形过程中摩擦力的控制是主要因素，板料传力区摩擦力应尽量小，而变形集中区的摩擦力则可大一些。

摩擦力对拉形过程的影响

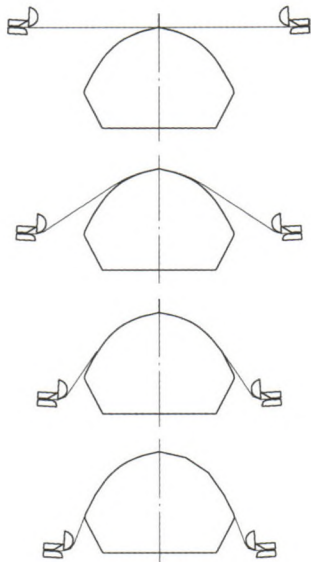


图3 尾喷管的拉形成形过程

分析如下。①弯曲阶段：毛坯料在预拉力作用下与拉形模脊背接触，背脊部位的单位作用力最大，而摩擦力却最小，拉形塑性变形集中在背脊部位。②拉形阶段：随着贴合面的扩展，背脊顶部的作用力增加不多，而摩擦力大增，变形抵抗力和附加应力也随变形量的增加而增加。毛坯料与拉形模表面贴合的成形区逐渐增大，悬空部分的传力区逐渐缩小，一直缩小到拉形模边缘与钳口之间部分。③补拉阶段：拉形模两侧的圆角阻力和圆角会引起弯曲应力，因此拉形模两侧圆角或钳口出口处为危险断面。如图4所示。为了使整个板料都产生一定的拉形塑性变形。阻力角 α 应取值 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。

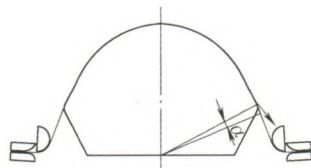


图4 阻力角

3. 高温合金薄壁壳体拉深成形分析

(1) 拉深成形缺陷分析。根据试制情况知，APU排气管零件拉深成形的主要成形缺陷也是回弹量较大，如图5所示。

表2 三种拉形工艺过程比较

工艺过程	成形件状态	毛坯料受力状态
预拉伸，先弯曲后拉伸，再补拉	①回弹量较小，无初始扭曲变形。②残余应力小或无，受摩擦影响	①预拉应力值为屈服极限。②弯曲中预拉应力为定值。③总拉力使剖面最小应力为屈服极限
先拉伸后弯曲，再补拉	①无摩擦影响，无初始扭曲变形。②回弹量较大，有残余应力	①切向拉力使弯曲后剖面最小应力为拉伸屈服极限。②弯曲中切向拉力为定值
先弯曲后拉伸，再补拉	①回弹量较小，残余应力小或无。②受摩擦影响，有初始扭曲变形	切向拉力使剖面最小应力为拉伸屈服极限

产生回弹的主要原因是由于材料的屈服强度较高，发生塑性变形所需的拉应力较高，导致双曲度薄壁壳体零件结构拉深成形时材料受拉应力不足，载荷卸去后，弹性形变恢复，零件发生较大回弹。

(2) 高温合金拉深工艺改进。
①增加工艺补充面。零件未增加工艺补充面时的情况如图6所示。为了增加材料在拉深成形过程中的拉应力，使材料产生充分的塑性变形，减小回弹，对双曲度薄壁壳体零件结构增加工艺补充面，如图7所示。底面两端尺寸外延并呈大尺寸圆角，形成不规则圆弧形底部，使底面由单向受拉应力变成双向受拉应力状态；增加侧壁面直壁高度，拉深时沿凹模周边形成一定的深度；凹模圆角半径取较小值，增加材料流动的变形阻力；凸缘面设置拉深筋，阻碍材料向凹模里流动。增加工艺补充面的零件结构改变了拉深成形过程中应力应变状态，主要变形区由凸缘材料的拉压变形改变成底部和侧壁材料的拉胀变形，塑性变形程度显著提高。
②增大展开尺寸并加以辅助工序。展开料除增加相应工艺补充面尺寸外，还要使拉深完成后凸缘边缘在拉深筋以外，以保证拉深筋在拉深全过程中起到增加材料流动阻力的作用。拉深成形后进行退火工序，以减少残余应力。

4.结语

综上所述，高温合金复杂外形结构薄壁壳体零件的加工难点主要在于成形后的回弹，通过对拉形成形过程和变形量的分析以

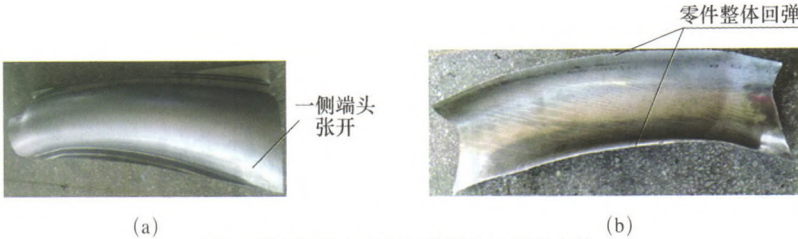


图5 试制阶段APU排气管零件回弹报废件

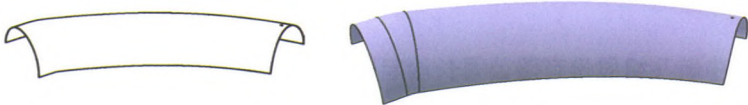


图6 零件未增加工艺补充面

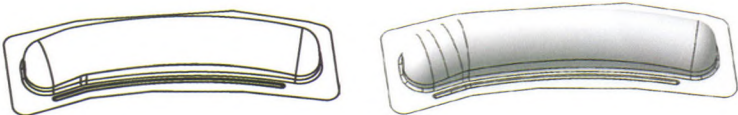


图7 增加工艺补充面的零件成形图

及对拉深成形缺陷的分析，分别在对高温合金的应用上进行了改进优化，成功制定了GH3030高温合金薄壁零件的成形工艺方案，证实了该方法的可行性。并初步总结了两种工艺方法的差异之处（见表3），以供参考。

参考文献：

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册（第2卷）[M]. 北京：中国标准出版社，2002：188~191.
[2] 板金冲压工艺手册编委会. 板金冲压工艺手册[M]. 北京：国防工业出版社，1989.

表3 拉形成形和拉深成形工艺特点比较

	拉形成形工艺	拉深成形工艺
零件成形方式	逐步缓慢变形	一次冲压成形
工艺研究重点	在于成形过程的改进	在于对模具和下料的改进
适用零件尺寸	结构尺寸较大	结构尺寸较小
材料利用率	低	高
模具结构	凸模结构，较简单	凸凹模结构，复杂
生产效率	速率较低，适用于小批生产	速率高，适用于批量生产

MW（收稿日期：20180716）

专家点评

本文中薄壁壳体的成形难度较大，作者创新性地运用两种成形工艺对同一类型的高温合金零件进行加工，并通过工艺改进，解决了变形量和成形缺陷难题。文章的亮点在于抓住关键，开门见山，根据零件的材料性能和加工特点选取合理的工艺方案，明确解决问题的方向和方法，不走弯路。