

# 薄壁件液压成形新技术

New Technology of Hydro Forming of Thin-Wall Component

哈尔滨工业大学 苑世剑 刘欣 徐永超

飞机、汽车等运输工具对减轻质量和降低成本的需求促进了液压成形技术的不断发展。液压成形技术近十多年来在工业生产中得到了广泛应用,逐步成为薄壁零件制造的主流技术之一。

飞机、直升机等航空器使用的薄壁件包括异型截面管件和复杂曲面钣金件。目前,异型截面管件的制造技术主要为半管成形再焊接,但存在焊接变形大、废品率高和可靠性差等问题。小型复杂曲面钣金件制造技术主要为落锤砸压成形,它的主要问题是废品率高、尺寸精度一致性差,以及材料内部组织损伤影响零件的疲劳性能。

随着高性能铝合金和钛合金的广泛应用,同时镁合金的使用也逐渐增多,材料塑性成形难度越来越大,既有材料性能提高带来的困难,也有结构形状复杂带来的困难。例如,铝合金的强度由150MPa提高到530MPa,塑性由30%降低到10%。零件结构形状复杂表现为超薄壁、空心大截面差、高次函数空间曲面或非回转体零件等结构形式。因此,面向高性能轻质材料和复杂形状结构的塑性成形技术得到迅速发展。

本文重点介绍适合航空工业制造异型截面管件和复杂曲面钣金件

的管材内高压成形、热态内压成形、充液拉深和液体凸模拉深等塑性成形新技术。

## 变径管内高压成形技术

变径管内高压成形是以管材坯料,通过管材内部施加高压液体和轴向补料把管材压入到模具型腔使其成形为所需工件,把管材的圆截面变为矩形、梯形、椭圆形或其他异型截面,如图1所示。其特点是,通过轴向补料,可以减少壁厚减薄,提高成形极限,一次整体成形异型截面管件,没有焊缝,提高了可靠性。

用内高压成形技术制造的异型双锥形管件,材料为不锈钢1Cr18Ni9Ti,最大膨胀率达到

110%,接近材料均匀延伸率的3倍。由于为非对称形状,塑性变形不均匀,容易导致局部变薄开裂,因此需要特殊形状的预成形坯。用内高压成形的飞机管路系统铝合金变径管,管材采用5A02铝合金,规格为 $\Phi 65\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 。该管材如通过直接胀形仅可达10%的截面膨胀率,而零件截面差达到35%,为了保证成形件的壁厚分布,提出利用“有益皱纹”改善壁厚分布的方法。采用“有益皱纹”方法大大改善了成形性能,膨胀率达到35%,壁厚减薄不大于10%。小型侦察机发动机使用的空心双拐曲轴内高压成形件,钢管壁厚4mm,减薄率为10%,与实心轴相比减重57%,与机械加工相比节约材料86%。

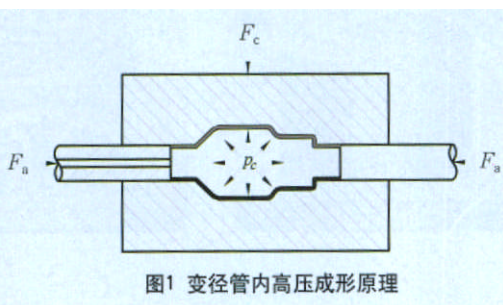


图1 变径管内高压成形原理

## 弯曲轴线变截面管件内高压成形

弯曲轴线管件内高压成形工艺过程包括弯曲、预成形、内高压成形等主要工序。

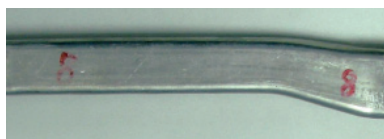
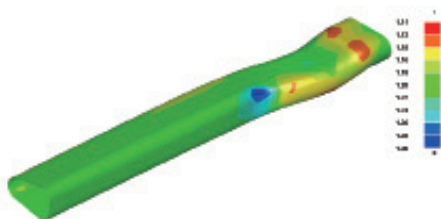


图2 弯曲轴线铝合金变截面管件及其壁厚分布



由于构件的轴线为二维或三维的曲线,需要先经过弯曲工序,将管材弯曲成和零件轴线相同或相近的形状。为了确保管材能顺利放到模具内,弯曲后一般要进行预成形。图2为一个铝合金变截面管件,其成形过程为弯曲—预成形—内高压成形,以获得各个不同位置的多个截面形状,其最大减薄率为7.5%。

### 整体三通管件内高压成形

以管材为坯料通过内高压成形可以直接加工出整体结构的三通管,其原理是向管内充满液体,并施加一定的压力,然后左右冲头施加轴向力补料,同时中间的冲头后退,最终形成所需零件。整体三通管解决了半管焊接和插焊存在的问题。

图3为铝合金三通管。管材直径100mm,壁厚2.5mm,最大高度(支管最高点到主管轴线距离)120mm,最小厚度1.92mm(减薄率23.2%)。铝合金三通管成形难度非常大,成形初期容易在支管顶部开裂及在主管端部起皱。



图3 铝合金Y型三通管

### 铝合金和镁合金管材热态内压成形

热态内压成形是将加热到一定温度的专用耐热油充入到经过预热的模具型腔,通过加热和冷却装置将模具及液体的温度控制在合适范

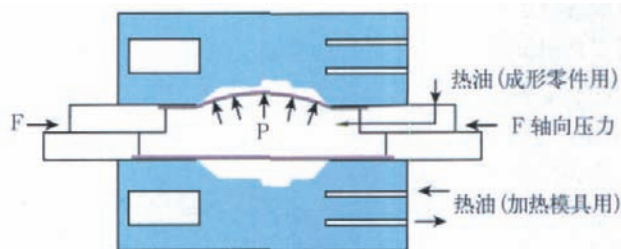


图4 管材热态内压成形

围内,然后按照设计的加载路径进行成形,如图4所示。哈工大研制的热态内压成形装置介质最高加热温度315℃,压力100MPa,完全适用铝合金和镁合金零件的成形。

图5所示是用热态内压成形技

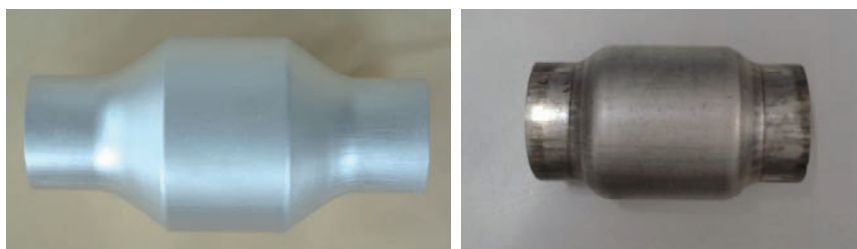


图5 用热态内压成形技术试制的铝合金(左)和镁合金(右)变径管

术试制的铝合金和镁合金变径管。铝合金变径管材料为5A02,管材尺寸直径65mm,壁厚1.5mm,膨胀率达到70%(变形区最大直径110mm);而前面介绍在室温下,采用“有益皱纹”作为预制坯的最大膨胀率只能达到35%。镁合金变径管材料为AZ31B,管材尺寸直径

44mm,壁厚1.8mm,在175℃温度下获得了膨胀率达到30%的管件,而该镁合金管材在室温下几乎不能变形。

### 曲面板材零件充液拉深

充液拉深是利用液体作为传力介质代替凹模,使板材成形到刚性凸模上的一种板料成形方法。充液拉深主要优点是提高成形极限和减少成形道次。对于锥形零件,采用普通拉深工艺需要6道次和6套模具,而且各道次之间还需要退火;而采用充液拉深工艺仅需要1道次,大大简化了工艺,节约模具费用。对于圆筒

形件,普通拉深1个道次最大拉深比为2,而充液拉深1个道次拉深比达到2.6,有时接近3。

瑞典AP&T公司用充液拉深技术制造的典型零件

和德国斯图加特大学用充液拉深技术制造的铝合金复杂曲面零件(曲面零件材料为铝合金6016,厚度为1.1mm)。

### 液体凸模拉深成形

随着压边力伺服控制技术和高压密封技术的进步,近年来以液体做为凸模的液压拉深技术得到了迅速发展。在德国,这种技术也称为板料高压成形。主要工艺特点是,压边力随内压适时变化,在成形初期,内压较低时,压边力较小,以利于板料拉入模具内;在成形后期,当板料全部

拉到模具内时,提高压边力保证密封,这时增加内压对零件进行整形。整形最高压力可达 150MPa,因此可以获得深度较大、形状复杂、尤其是局部具有小过渡圆角的零件。过去类似的工艺中,由于压边力实时控制困难,为了保证密封,在初期施加的压边力较大,使板料不易拉入模具内,实际上成为纯胀形,因此成形的零件深度小、壁厚减薄不均匀且形状简单。图 6 是采用液体凸模拉深技术成形的典型复杂零件,该件材料为硬铝合金,塑性差,采用普通拉深需要 2 次退火才能完成。

### 液压成形技术的发展趋势

飞机、汽车等运输工具对减轻质量和降低成本的需求促进了液压成形技术的不断发展。液压成形技术近十多年来在工业生产中得到了广泛应用,逐步成为薄壁零件制造的主流技术之一。

对于内高压成形或管材液压成形,主要发展趋势为:

(1) 超高压成形。目前,工业生产中使用的内高压成形机的增压器最高压力一般为 400MPa。为了适应更复杂的结构形状和精度、更大壁厚和高强度材料(超高强钢、钛合金和高温合金等),就需要更高的内压,内压将发展到 600MPa,甚至 1000MPa。

(2) 热态内压成形。为了解决高性能铝合金、镁合金等轻合金材料室温塑性低、成形困难的问题,采用加热加压介质成形加工异型截面零件是内高压成形发展的一个重要方向。目前,以耐热油做为介质的温度可以达到 300℃,压力达到 100MPa,完全能满足铝合金和镁合金管材成形的需要。热态内压成形的主要问题是成形时间长、效率低。对于钛合金,需要在温度达到 600℃ 以上成形,目前的耐热油达不到这个温度,但采用气体做为成形介质是一个很

好的解决方案。

(3) 超临界尺寸零件成形。随着飞机对结构轻量化需求的进一步提高,使用的管材直径越来越大,壁厚越来越薄,径厚比(直径与厚度之比)可能超过 150,而目前部件的临界径厚比为 100,成形难度越来越大。

(4) 新成形工艺不断发展。拼焊管内高压成形,将不同厚度或不同材料管材焊接成整体,然后再用内高压成形加工出结构件,可以进一步减轻结构质量;采用两端直径不同的锥形管,制造特殊结构零件;采用双层管内高压成形制造轿车双层排气管件;还可以采用初始截面形状为非圆形的型材管做为一种预制坯,成形出所要求的零件;内高压成形与



图6 铝合金复杂曲面零件

连接等工艺复合,把几个管材或经过预成形的管材放在内高压成形模具内,通过成形和连接工艺复合加工为一个零件,进一步减少零件数量,提高构件整体性。

对于板材液压成形,主要发展趋势为:

(1) 进一步提高成形极限和零件质量的成形新技术向着主动径向加压充液拉深和正反加压充液拉深、预胀充液拉深和热态充液拉深技术方向发展。主动径向加压充液拉深,除充液室内液体压力作用外,在板料法兰区径向独立施加液压,拉深过程中辅助推动板料向凹模口内流动,可以进一步提高零件成形极限,实现更

深、更复杂零件的成形。正反加压充液拉深,在成形批料的上表面施加液压来配合充液拉深,可以部分甚至全部抵消液室压力导致的反胀,尤其适合成形过程中具有较大悬空区的锥形件等的成形,允许施加更大的液室压力,抑制减薄,提高成形极限。预胀充液拉深,先预胀、再拉深,实现应变硬化以达到提高大型零件整体刚度的目的,可因此省去加强筋板,适合大吉普和商用车的顶盖成形。热态充液拉深,将材料的温热性能与充液拉深的技术优势结合起来,可使铝合金及镁合金等成形性能差的轻体材料成形能力得到提高,促进其在航空航天领域的应用。

(2) 低塑性材料的拉深成形。高性能铝合金、镁合金和超高强度钢等材料强度提高、塑性降低,如铝合金、镁合金板材厚向异性指数小、硬化指数低,与钢相比,更易产生破裂和起皱的倾向,普通冲压工艺往往需要多道工序,工艺繁琐。充液拉深技术可以弥补低塑性材料成形性能方面的不足,节省工序、提高效率。

(3) 大型复杂型面零件成形。大型复杂型面零件普通冲压成形往往需要与零件形状尺寸一致的凸模及与型腔相配的凹模,模具成本高,试模周期长。充液拉深成形只需凸模,凹模型腔可以简化,液室压力起到软凹模的作用使板材贴模,显著降低模具成本,模具调试简单。

(4) 与普通拉深工艺复合,提高效率。普通拉深成形出零件的大部分形状,再用液压成形加工出局部需要的特殊形状;或者先充液拉深成形出零件,再用普通成形工艺,如带孔坯料翻边时先拉深,然后液室压力卸载进行翻边,获得较高的直壁。

(责编 侧卫)