DOI: 10.3901/JME.2013.18.099

省力液压成形的原理与途径*

王仲仁¹ 苑世剑¹ 汤泽军² 张琦³

(1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001;

2. 南京航空航天大学机电学院 南京 210016;

3. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 为了适应现代工业对高质量、轻量化以及低成本零件的要求,作为金属成形中重要工艺方法的液压成形获得快速的发展。由于该方法利用液体作为传力介质或模具,因此可以通过对液体介质的实时控制,来实现对工艺参数的精确控制,并且,液体作为传力介质亦可节省成形所需模具。然而,采用液压成形往往需要大吨位的设备,限制了该成形方法的应用。证明对于液压成形所需设备合模载荷等于液体压力乘以其作用方向的投影面积,它与冲头的形状无关。液压成形中实现省力的途径主要有三种:一是减少投影面积,二是降低材料的流动应力,三是采用合适的预制坯。针对于无模胀球、护环液压胀形及管材内高压成形,介绍省力成形的原理及液压成形用省力柱方法和“以推代胀”等方法的具体省力措施。

关键词: 省力成形 球形容器 液压胀形 内高压成形

中图分类号: TG394

Theory and Method of Less-loading Hydroforming

WANG Zhongren¹ YUAN Shijian¹ TANG Zejun² ZHANG Qi³

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150001;

2. Mechanical and Electrical College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016;

3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: In order to obtain the demands of parts with high quality, lightweight and less cost, hydroforming, as an important metal forming process, is developed fast. Because the liquid is used as the pressure transfer medium, the process parameters can be controlled precisely by online real-time controlling the liquid. And also, the need of forming dies can be reduced. However, It restricts the use of hydroforming process that the heavy hydroforming press is required. It is proven that the forming load for hydroforming equals the liquid pressure times projection area along the pressure action direction, and it is irrelevant with punch shape. There are three ways of less-loading hydroforming: Decreasing the projection area, decreasing the material flow stress and adopting appropriate preform. It is also indicated the concrete less-loading method for dieless hydro-bulging spherical vessels, for hydro-bulging protective ring and internal high pressure forming. Some practical application of less loading hydroforming is given too.

Key words: Less-loading forming Spherical vessel Hydro-bulging Tube hydroforming

0 前言

液压成形是指利用液体作为传力介质或模具使工件成形的一种塑形加工技术。按照成形零件的

不同,可以分为管材内高压成形、板材液压成形和壳体液压成形。由于液压成形采用液体作为传力介质,因此在板材液压成形和壳体液压成形中,可以实现少模或无模成形。目前,板材液压成形已经用于小批量汽车零部件及航空、航天零件的制造中。1985年由哈尔滨工业大学王仲仁教授发明的球形容器无模液压成形技术是壳体液压成形的典型代

* 国家自然科学基金资助项目(50275034, 59975022)。20120919收到初稿, 20130325收到修改稿

表, 该成形技术已经应用于大型储水罐和装饰球的制造。随着世界各国对节能降耗和减少环境污染要求, 汽车轻量化技术越来越受到重视。在汽车制造业中, 减轻汽车重量的方法之一是结构轻量化设计, 可在车身结构上采用管类构件来代替实体截面构件。因此, 管材内高压成形成为近 20 年金属成形中的研究的热点领域之一。该成形方法可以由圆形管材坯料整体成形出轴线为二维或三维曲线的异形截面空心零件^[1]。

然而, 采用液压成形制造大零件时, 往往需要吨位很大的设备, 限制了该成形方法的应用。例如, 目前我国管材内高压成形压机最大载荷为 60 MN, 板材液压成形用压机可达 100 MN。本文分析了影响液压成形所需载荷的影响因素。针对于无模胀球、护环液压胀形及管材内高压成形, 介绍了省力成形的原理及液压成形用省力柱方法和“以推代胀”等方法的具体省力措施。

1 液压成形载荷的计算方法与省力的思路

在具体分析不同液压成形方法之前先以环形件液压胀形为例阐明液压成形时载荷的计算方法。环形件液压胀形如图 1 所示, 液体介质的压力为 p , 现分析作用在凸模上的载荷, 凸模的工作面由两部分组成, 一部分是直径为 d 的圆平面, 另一部分是曲面, 前者的作用力 F_1 可以由压力乘以面积求得, 对于后者 F_2 则需要利用力的投影关系。

$$F = F_1 + F_2 = \frac{\pi p d^2}{4} + \int_S p \cos \alpha dS \quad (1)$$

式中, 右端积分号内 $p \cos \alpha dS$ 的物理概念是压力在工具运动方向上的投影乘以其所作用的微面积 dS , 将其积分可得载荷 F_2 。根据帕斯卡定律“加在密闭液体任一部分的压强, 必然按其原来的大小, 通过液体向各个方向传递”, 所以每一瞬时各处的压强 p 相等。于是 $\int_S p \cos \alpha dS$ 可以写成 $p \int_S \cos \alpha dS$ 。可以有如下表达, 各处压力在工具运动方向上的投影乘以其所作用的微面积之和等于压力乘以各处面积在与工具运动方向垂直面上的投影之和, 简称“以面积的投影代替压力的投影”。由于接触面上各处的方向不同, 即使对于相同压力数值的投影值也是变化的, 因此, 通过力的投影计算起来比较繁琐, 但

接触面的投影则比较直观且易于计算。例如对于图 1 环形件液压胀形所分析的情况, 可以直接写为

$$F = p \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2)$$

图 1 环形件液压胀形时受力简图

应当强调的是根据“以面积的投影代替压力的投影”这一原则, 在液压成形中对于不同的工具形状都可使用。图 2 表示直径相同但冲头前端形状不同, 由于未改变接触面的投影。即用式(2)求出的结果和采用平冲头的结果一致^[1]。由上述分析可知, 液压成形省力可通过降低成形所需液体压力和减少液体作用的总投影面积来实现。

图 2 不同工具形状的液压胀环

2 球形容器的省力成形方法

采用球形容器的常规方法来制造三类球形压力容器(要求最严格的容器)的主要工序流程如图 3 所示。由图 3 可见, 共有两次下料, 第一次为压片前的平板下料, 第二次为压片后的曲面下料。若预组装时发现有些瓣片的尺寸形状不符合要求, 要再进行模压校正。常规方法制造工序多, 模压时的载荷大。

模压法的载荷可以用式(3)计算

$$F = p_m S \quad (3)$$

式中, F 为模压力; p_m 为平均单位面积上的压力; S 为投影面积。

图3 用传统方法制造球形容器的主要工序流程图

由塑性理论可知摩擦力对平均压力影响很大,而且工件越薄这种影响越显著^[1]。对于直径为 d 、厚度为 δ 的圆盘压缩,平均压力随着 d/δ 增大而急剧增加,远大于材料的流动应力。大直径球的球瓣压制面积也大,因此总压力必然很大,成形设备通常为千吨级。球形容器无模胀形方法由王仲仁等^[2-3]于 1985 年发明,此后其进行了创造性的研究并在液化气球形贮罐、球形水塔大型建筑装饰制造得到了应用^[4-8]。

用无模液压胀形法制造球形容器的主要工序流程如图 4 所示。与传统制造方法相比,无模液压胀形法制造球形容器具有以下的主要优点。

(1) 不用压力机,初始投资少。

(2) 不用模具,成本低,生产周期短。

(3) 产品变更容易。

(4) 无需打压试验,因为球壳胀形压力远超过压力试验的数值。

图4 无模液压胀形法制造球形容器的主要工序流程图

图 5 为用无模液压胀球法制成的 200 m^3 液化气储罐,材料为 16MnR,直径为 7.1 m ,壁厚为 24 mm 。由图 5 可见它是橘瓣式球形液化气储罐^[6]便于实现自动焊。

图5 无模液压胀球法制成的 200 m^3 液化气储罐

由图 6 可见,左右两个半球受力是平衡的, F 的数值等于压力乘以半球在水平方向上的投影,该力由壳体的环形面积承受,可以写成式(4)的形式

$$p \frac{\pi}{4} d'^2 = \sigma_s \pi d \delta \quad p = \frac{4\sigma_s \delta}{d'} \quad (4)$$

式中, p 为液体压力; δ 为板厚; σ_s 为材料流动应力; d' 为球壳直径。

图6 壳体液压胀形时力的平衡示意图

由式(4)可见壳体胀形压力随着厚度增大而增高,随着直径增大而下降,即随 d'/δ 增大而下降。从数量级上看,液压胀形时单位面积上的作用力远低于材料的流动应力 σ_s , 即 $p \ll \sigma_s$, 这是由于壳体的直径要远大于壳体的厚度。而对于板料在模具中压缩, $p_m \gg \sigma_s$, 由此可见,液压胀形所需的压力远小于模板间压缩成形所需的压力。另外,要强调的是液压胀形时,壳体左半球和右半球受内部液压作用的合力通过壳体本身得以平衡,整个球体既是被变形的工件,又是向工件施力的设备,由此可以理解不需要压力机和模具的情况下,仍可以成形出大直径球形壳体。

球壳胀形中作用于球壳内的压力由液压泵供给,如图 7 所示。被加压的液体注入密闭容器中后,

随着液体压力逐渐增大,壳体由弹性变形逐步过渡到塑性变形,从而实现无模成形。

图7 充液加载系统简图

1. 水箱 2. 压力泵 3. 闸阀 4. 管道 5. 压力表
6. 液体入口 7. 被胀形壳体

虽然用通过式(4)计算出的压力 p 乘以球的横截面面积所得总作用力 F 通常都很大,但这不是设备通过模具直接施加的,而是根据密闭容器中的帕斯卡原理来实现的,如图8所示作用在柱塞泵很小面积 S_1 上的压力 p 均匀地传到大面积 S_2 容器中的各处。由于液体压力 p 相等

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad (5)$$

由式(5)可见,力的放大倍数为

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1} \quad (6)$$

图8 液压传动的省力原理

因此,当面积比 S_2/S_1 越大,则力的放大越显著,万吨水压机就是基于该原理研制出的。如果将图8中的大液压缸换成封闭壳体,即得到类似于图7的加载系统。不过此时封闭壳体已不单纯是像液压机那样施加力并承受载荷,其自身也是被变形的工件。两者的共同点是通过压力不大的泵,来施加吨位载荷。

3 护环冷态胀形的省力成形方法

护环是压紧装配在汽轮发电机转子两端的无磁性钢环,是发电设备的大型关键零件之一。由于在转子高速旋转过程中,它要承受很大的离心力,

相应地要求有很高的强度,如果发生护环开裂将引起整个机组毁坏,所以还要求有足够的伸长率与冲击韧度。其材料性能是通过液压胀形使材料发生变形所产生的冷作硬化来实现的。对于已知的环形件胀形^[9],如图9所示,可以根据解析计算,在一些塑性力学的文献中^[1, 10],均已给出成形时所需要作用在内壁上的压强

$$p = \sigma_s \ln \frac{D''}{d''} \quad (7)$$

式中, D'' 和 d'' 分别为环形件的外径和内径。

图9 环形件液压胀形简图

式(7)可以理解为,实现内压胀形时的压力 p 的理论值,而实际成形所需压力比式(7)计算值高5%~10%。

对于护环的液压胀形方法,又可以分为全液压法成形,减压法成形以及采用专用模具的液压成形法等。对于用图10所示的全液压法成形而言,根据帕斯卡定律,可以得知加在密闭液体任一部分的压强,必然按其原来的大小,由液体向各个方向传递。因此,若采用全液压胀形方法,在胀形中对滑块所要施加的压力^[1]

$$F = S_{\text{punch}} p = \frac{\pi D_p^2 \sigma_s}{4} \ln \frac{D''}{d''} \approx \frac{\pi d^2 \sigma_s}{4} \ln \frac{D''}{d''} \quad (8)$$

式中, D_p 为液压作用在锥形冲头上的等效直径,该直径可近似等于护环胀形后的内径 d'' 。

图10 护环液压胀形法

由于护环的尺寸大,且护环所用不锈钢材料的流动应力高,一般的压力机往往难以达到所需的总压力,此时省力胀形成为关键技术。为了减少作用

在机器滑块上的压力,在成形过程中加入了省力柱,并为了防止偏载,在冲头上方采用了球形垫,其工作原理如图 11 所示。应该指出的是此时液体压力仍需要满足式(7)的要求,但轴向的承压面积已经由于省力柱的存在,而使总的压力减小很多,其数值为 $F = p\pi(d^2 - d_c^2)/4$, 其中 d_c 为省力柱的直径。因此,省力柱的使用可以显著降低液压机所承受的压力。以上两种方法都是在大型水压机下压过程中,构成密闭空间,使其内液体压力增加,足以使环形工件扩径,而且在此过程中,仍需要保持端面的密封。本质上就是要作用于环形件径向的压力足够大,可以使环形件胀形,并且减少内压作用在轴向力的成形方法。于是生产中有一种外补液压法胀形,如图 12 所示。它在一个特制的承力框架内,固定液压胀形的模具,该模具带有省力柱,由超高压源不断向护环内注入超高压液体,使其发生胀形,材料产生应变硬化。由于承力框架比液压机的制造方法简单,且制造成本低,是一种经济适用的选择。

图 11 带减立柱液压胀形护环示意图

图 12 护环外补液胀形法示意图

4 管材内高压的省力成形技术

4.1 管材内高压成形原理

管材内高压是近年来发展很快的一种结构轻

量化成形技术^[11],直轴线变径管件内高压成形的原理如图 13 所示。

图 13 直轴线变径管内高压成形示意图

当管材放入模腔后上下模合紧,两轴向冲头内移的同时向管材内部施加高压液体,如图 13 所示。在管端被密封后内压逐步增加,此时模腔内的管材直径增大,与此同时两冲头实施轴向进给补料,以避免管壁严重减薄而导致破裂,此阶段被称为成形阶段,成形阶段后期管材的大部分(除圆角部分外)已经贴模,如图 13b 所示,最后的一个阶段是整形阶段,在此阶段冲头停止进给,内压继续增高直至圆角部分也贴模,如图 13c 所示。从横截面来看可能成形出如图 13d 所示的各种截面形状,这主要靠相应部位的模具形状保证。内高压成形所需的内压力、两端的轴向推力、轴向位移量都是随时间而变化的,即所谓加载曲线,它要根据管料的材质、直径、壁厚和零件形状确定^[17]。

4.2 减小内高压成形所需液体压力的途径

管材内高压成形所需的内压力是由制件最小曲率半径决定的,对于圆角半径为 r 的圆柱胀形(图 14),所需内压力 p 的理论值为^[1]

$$p = \sigma_s \frac{\delta}{r} \quad (9)$$

图 14 圆柱胀形简图

由式(9)可以看出,胀形所需压力随着管材厚度和其材料流动应力的增加而增加,随着圆角半径的增加而减小。在管材给定的条件下,可以看出所需成形的最小圆角半径决定了成形所需的压力。采用合适的预制管坯可以减少胀形所需压力。

图 15 表示采用内凹形的预制坯,可以用较低的压力制造壁厚较均匀的方截面工件。采用内凹的管坯易于使金属在内压下向圆角部位流动,这可以从图 16 看出。此时实质上是改变了成形机制,圆角的成形主要不是靠胀形实现,而是靠中部内凹的金属贴模时产生的推力推动金属充填凹模圆角即“以推代胀”,因此可以实现在较低的压力下制成棱角清晰的工件。

(a) 内凹形预制坯

(b) 方截面工件

图 15 采用预成形坯液压胀形方截面管件

图 16 “以推代胀”成形圆角部位的示意图

当然减少内压力的方法还可以通过热成形来实现,即管材在高温下成形,这样可以降低材料的流动应力,进而降低成形所需的压力。近年来铝合

金和镁合金的热态内高压成形已受到普遍的重视。应当强调指出的是,减小内压的结果,不仅可以减小合模压力,还可以减小进给缸的推力。

4.3 减小内高压成形轴向进给力途径

对于内高压成形虽然合模力有时可以达到 50 MN 或者更大,但轴向进给缸的吨位一般不超过 2 MN,因此很难制造出直径大于 100 mm 的工件。

图 17 为一直径为 220 mm 的不锈钢接头内高压成形件,该件以往是由管件焊接而成,因薄壁件焊接变形导致成形精度降低。如果采用常规的内高压成形方法来设计模具,该零件的成形难度大,这是因为零件的直径大和成形压力高,于是进给缸的压力太大,超出机器的许可范围。为了解决该问题采用了类似带省力柱胀形护环的模具工作原理,如图 18 所示,成形过程中左右两个进给冲头互相结合构成“省力柱”,这样就会降低成形压力作用在进给缸方向上的面积,从而降低进给缸的压力^[12]。由于采用了这种方法,在实际的成形中可以使轴向液压缸的进给力下降一倍多。在哈尔滨工业大学液力成形中心,成功用内高压成形,使该零件制造成功并投入生产,其原因就是由于采用了省力芯轴,减少液压的直接作用面积。

图 17 不锈钢 Ω 接头

图 18 不锈钢 Ω 接头进给缸省力原理

对于较长的工件,特别是轴线不是直线的工件,采用省力柱的结构有一定的难度,此时比较实用的方法就是将管材两端进行缩颈,制造一个直径较小的工艺用接头,等成形结束后再将其切除。这类工件在成形中所用的轴向力,由小直径的工艺接头确定,这对于扩大成形品种时,受到液压机轴向进给缸压力限制的企业,无疑是一个非常宝贵的措施。图 19 表示这种工件成形后切去的端头。

图 19 带缩颈工艺端头的内高压成形件

对上述内高压成形若干省力措施进行分析后可以看出, 虽然目前工业实用的超高压系统已经可达 600 MPa, 但是从工艺角度看, 仍应该尽量降低成形中所需的液体压力, 避免工件圆角部位减薄量太大, 采用合理的预成形工艺为终成形“以推代胀”或“以推为主, 以胀为辅”创造条件。并且内压值的下降是成形中合模力及轴向推力下降的基础。减少轴向受力面积仍然是减小轴向推力、生产大直径工件的有效途径。除了对于长度短工件可以采用减压芯轴外, 对于较长工件采用端头缩颈法(例如径向旋转锻造)使两端头的直径减小, 成形后再切除, 这不失为一个实用措施。

5 结论

液压成形比起通常固体模具成形, 由于摩擦力很小, 因而载荷可大幅度减低。液压成形的变形力等于压力乘以其所作用曲面在沿模具作用方向的投影面积的数值, 与曲面的形状无直接关系, 这就简化了载荷的计算。减少压力的作用面积时载荷将按比例地降少, 这对护环胀形及内高压成形均适用。对于无模胀球, 属于封闭壳体的自由胀形, 壳体既是被变形的工件又是承受力的载体, 胀形所需的压力随直径增大而下降, 随厚度增加而增大。

参 考 文 献

- [1] 王仲仁, 张琦. 省力与近均匀成形原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
WANG Zhongren, ZHANG Qi. Less-loading and approaching uniform forming: Theory and application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [2] 王仲仁, 苑世剑, 曾元松. 无模胀球技术原理与应用[J]. 机械工程学报, 1999, 35(4): 64-66.
WANG Zhongren, YUAN Shijian, ZENG Yuansong. Principle and application of the dieless hydro-bulging spherical vessels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(4): 64-66.
- [3] WANG Z R, WANG Tao, KANG Dachang, et al. The hydrobulging technology of spherical pressure vessels[J]. Pressure Vessel Technology, 1988, 9: 1199-1206.
- [4] WANG Z R, ZHANG Shihong, DONG Jianling, et al. A research on integrally hydrobulging spherical

vessels[C]//Proc. of NAMRCX VIII, USA, 1990, 5: 30-34.

- [5] WANG Z R, ZHI Y S, ZENG Y S, et al. The experimental research and FEM simulation of hydrobulging the centre part of the container head[C]// Proc. of 5th ICTP, Columbus, 1996: 967-970.
- [6] YUAN S J, WANG Z R. Safety analysis of 200 m³ LPG spherical tank manufactured by the dieless hydro-bulging technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 70: 215-219.
- [7] WANG F Z, YUAN S J, ZENG Y S, et al. Research into the dieless hydro-forming of non-uniform thickness spherical vessels[J]. International Journal of Machine tools and Manufacture, 1997, 37(8): 1123-1130.
- [8] HU W L, WANG Z R. Deformation analysis of intergrated hydrobulge forming spherical vessel by different preform type[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 275-283.
- [9] 中国机械工程学会塑性工程学会. 锻压手册, 锻造卷[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
The Chinese Mechanical Engineering Society Plastic Engineering Society. Forging and forming handbook, forging volume[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [10] 王仲仁, 苑世剑, 胡连喜, 等. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
WANG Zhongren, YUAN Shijian, HU Lianxi, et al. The elastic and plastic mechanics foundation[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.
- [11] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
YUAN Shijian. Modern hydroforming technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [12] 苑世剑, 韩聪, 王小松. 空心变截面构件内高压成形工艺与装备[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 21-27.
YUAN Shijian, HAN Cong, WANG Xiaosong. Hydroforming processes and equipments of hollow structures with various sections[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 21-27.

作者简介: 王仲仁, 男, 1934 年出生, 教授。主要研究方向为塑性理论与金属成形工艺。发明了无模液压胀形新方法、曾任载人航天用空间环境模拟器 KM6 真空容器研制项目总工程师, 神舟系列飞船及其他大型航天器升空前均在其中进行性能测试。已获国家科技进步二等奖三项、国家发明四等奖一项, 著有《省力与近均匀成形-原理及应用》等图书 5 本。

E-mail: zrwang2005@126.com