轻合金成形

6A02 铝合金异形截面小弯曲半径薄壁管液压成形工艺研究

孙宏博，杨晨
（南京理工大学 机械工程学院，南京 210094）

摘要：目的 研究 6A02 铝合金异形截面薄壁管的液压成形过程，改进管件的成形质量。**方法** 使用 Abaqus 软件进行数值模拟，通过考察管件壁厚分布情况、管件轴线的最小弯曲半径及管壁与模具贴合情况，研究了内压、轴向进给量、加载路径及合模过程中的内压与进给对成形质量的影响，并提出了合模力–轴向进给–内压三者同时配合的加工方法。**结果** 通过数值模拟确定了无轴向进给情况下管件薄弱处发生破裂时的内压为 7.5 MPa，发生起皱前的最大轴向进给量为 2 mm，最低整形内压为 80 MPa。确定了在合模过程中进给 0.75 mm、合模后继续按照特定加载路径进行内压提升和轴向进给、最后施加 80 MPa 的整形压力的情况下成形效果最好。通过此路径加工出的管件最小壁厚为 0.42 mm，最大减薄率为 16%，轴线最小弯曲半径为 1.258 mm，与模具间隙面积为 0.065 mm^2。**结论** 适当的内压–轴向进给可以实现较好的成形质量。在合模过程中，施加与合模力相配合的轴向进给和内压能增加管件弯曲处薄弱部分的补料量，改善管件在合模后的壁厚分布情况，进一步提升管件最终成形质量。

关键词：液压成形；薄壁管；小弯曲半径；6A02 铝合金；加载路径
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2023.05.001
中图分类号：TG394 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2023)05-0001-09

Hydroforming Process of 6A02 Aluminum Alloy Thin-walled Tube with Special Section and Small Bending Radius

SUN Hong-bo, *YANG Chen*
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: The work aims to study the hydroforming process of 6A02 aluminum alloy thin-walled tube with special section and improve the forming quality of tube. Abaqus was used for numerical simulation and the effects of internal pressure, axial feed rate, loading path form and internal pressure and feed in the process of die closing on the forming quality were studied by investigating the parameters such as the distribution of tube wall thickness, the minimum bending radius at the tube axis and the

收稿日期：2022–11–10
Received: 2022-11-10
作者简介：孙宏博（1997—），男，硕士生，主要研究方向为管件液压成形工艺及设备。
Biography: SUN Hong-bo (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: the hydraulic forming process and equipment of pipe fittings.
通讯作者：杨晨（1976—），男，博士，副教授，主要研究方向为管材内高压成形、微型管件液压成形工艺、微型板材液压胀形工艺。
Corresponding author: YANG Chen (1976-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: tube hydroforming, micro tube hydroforming, and micro sheet metal hydroforming.
引文格式：孙宏博，杨晨. 6A02 铝合金异形截面小弯曲半径薄壁管液压成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 1-9.
SUN Hong-bo, YANG Chen. Hydroforming Process of 6A02 Aluminum Alloy Thin-walled Tube with Special Section and Small Bending Radius[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 1-9.

fitting condition between tube and die. Then, a processing method of simultaneously considering die closing force, axial feed and internal pressure was proposed. Through numerical simulation, it was determined that the internal pressure when the weak part of the tube broke without axial feed was 7.5 MPa, the maximum axial feed before wrinkling was 2 mm, and the minimum internal pressure for forming was 80 MPa. The best forming effect could be achieved when the feed was 0.75 mm during the die closing process, the internal pressure lifting and axial feed were continued according to the specific loading path after the die closing and the forming pressure of 80 MPa was finally applied. After processed by this loading path, the minimum tube thickness was 0.42 mm, the maximum thinning rate was 16%, the minimum bending radius of the axis was 1.258 mm, and the clearance area with the die is 0.065 mm^2. Proper internal pressure-axial feed can achieve better forming quality. During the die closing process, applying the axial feed and internal pressure corresponding to the die closing force can increase the feeding amount of the weak part at the bend of the tube, improve the wall thickness distribution of the tube after die closing, and further enhance the final forming quality of the tube.

KEY WORDS: hydroforming; thin-walled tube; small bending radius; 6A02 aluminum alloy; loading path

随着现代工业技术的不断发展，为了实现产品成本和能耗的降低，对高强度、低质量零件的需求越来越大，管件液压成形技术通过将管件制成各种空心零件，能在维持构件力学性能的同时降低整体质量，因此得到了迅速发展[1-4]。管件液压成形技术是一种先进的现代塑性加工技术，以无缝管件或焊接管件为原料，通过专门的液压设备向管材内注入液体并逐渐增加管内液体的压力，同时在管材的两端施加轴向载荷进行补料，2 种外力的共同作用使管材在给定的型腔内发生塑性变形，最终管壁与模具型腔内壁贴合，得到形状与精度均符合要求的中空零件[5-8]。与传统的冲压、焊接工艺相比，采用管件高压液压成形工艺制造的零件具有质量轻、节约材料、模具费用低、后续机加处理流程少、生产效率高等优点[9-11]。

影响管材液压成形件成形质量的因素很多，包括内压、轴向进给量、摩擦因数等[12-15]。国内外学者也进行了丰富的研究。李晓冬等[16]研究了 5052 铝合金材质 T 形三通管内高压成形规律，通过数值模拟分析了模具过渡圆角半径、摩擦因数对成形的影响。日本学者 Hajime 等[17]通过动态显式有限元程序对外径 2 mm、壁厚 0.2 mm 的管材在锥形腔和圆柱形腔模具中的变形行为进行了评估，阐明了小直径管材在液压成形中的成形缺陷和成形极限与内压和轴向压缩位移的关系。异形截面的管件成形时容易出现因材料流动困难而造成的变形不均匀，并发生失效。当管件的壁厚较薄时，也极易在成形过程中出现起皱现象。另外，对具有弯曲轴线的管件进行液压成形时，必须先通过弯管工艺对管件进行预弯曲才能进一步进行液压成形[18-22]，这样不但降低了加工过程的效率，而且受制于弯曲成形工艺，很难对小弯曲半径管件进行成形加工。为了改进这些缺陷、解决生产工艺方面的问题，本文对 6A02 铝合金异形截面小弯曲半径薄壁管件的液压成形过程进行了分析，提出了一种在合模同时对管件进行预成形，之后再进行内高压胀形的新型工艺流程，并通过 Abaqus 软件进行了加工过程的数值模拟，研究了管件成形内压、轴向进给量、加载曲线及加载路径等因素对管件成形工艺的影响。

1 有限元模型建立

成形后管件的理想几何形状如图 1 所示。零件长度为 426 mm，宽度为 22 mm，最大高度为 9.74 mm，壁厚为 0.5 mm。管件截面为不规则形状，并且管件的轴线存在弯曲，弯曲半径约为 1 mm，因管件为异形截面方管且壁厚薄，难以通过普通弯管工艺进行加工。管件左右两端的轴线具有 0.5 mm 的距离差，进一步增加了成形难度。为了对管件成形过程进行模拟，需要确定加工前的管坯尺寸。根据表面积相同原理及截面周长相同原理，确定了液压成形管坯为 9.5 mm×22 mm 的长方形截面方管。

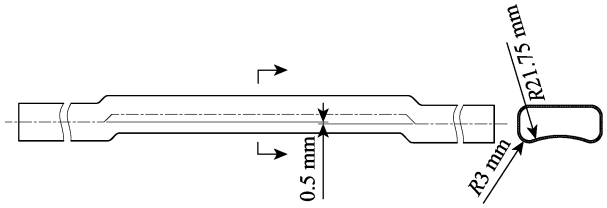


图 1 管件的理想几何形状

Fig.1 Ideal geometrical shape of tube

由于铝合金本身难成形、易开裂[23-24]，并且该管件还具有壁厚薄、异形截面、整体形状细长、轴线存在弯曲且弯曲半径小、弯曲中心较为接近的特点，难以通过传统的管件弯曲工艺和内高压胀形工艺进行加工制造，因此，提出了一种利用合模力进行预成形的加工工艺。具体的成形过程如下：先利用液压机的合模力对管件进行预成形压制，将管件中段的轴线弯折部分以及管件的截面形状大致加工出来；然后向管件内部注入高压液体，同时冲头进行轴向进给补料，使管件变形、管壁与模具贴合，最终成形为所需的几

何形状。因为对成形后管件的壁厚分布情况、弯折处的弯曲半径以及管壁与模具的贴合情况有较为严格的要求，所以本文对管件的加工过程进行了数值模拟，研究各种因素对管件成形后的壁厚、管壁与模具贴合情况的影响，并找出成形质量最好的加载路径。管件液压成形模型如图 2 所示。

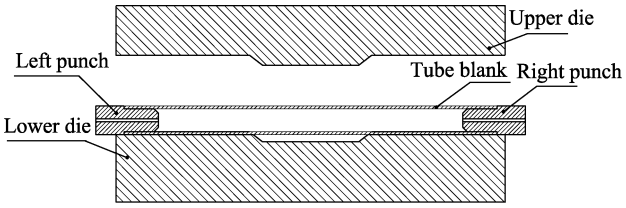


图 2　管件液压成形模型
Fig.2 Hydroforming model of tube

使用 SolidWorks 软件建立管件及模具的有限元模型，后续数值模拟过程使用 Abaqus 软件。首先利用 SolidWorks 软件中的曲面绘制功能，绘制出上、下模的成形表面以及两侧冲头的模型，之后将这些模型作为壳单元导入 Abaqus 中并设置其为离散刚体。管坯则直接在 Abaqus 中作为壳单元绘制出来，并将壁厚设置为 0.5 mm。其次按照 6A02 铝合金材料参数设置截面性质，弹性模量为 69 GPa，泊松比为 0.33，屈服强度为 240 MPa，抗拉强度为 295 MPa，断后伸长率为 12%，因为管件和模具都为轴对称结构，所以为了节省计算时间，将模具、冲头和管坯模型都剖分成两半，并且使用对称约束，只对半边进行模拟。最后，为模拟成形过程，在管件两端的冲头模型上施加轴向位移，模拟左右两侧冲头的进给，并对管件内部表面施加压力载荷，模拟向管件内注入高压液体的成形过程。由于管件长度较长，为防止摩擦力影响进给必须对管件与模具间的接触面进行润滑，所以将管件和模具之间接触表面的摩擦因数设置为 0.06。管件成形有限元模型如图 3 所示。

图 3　管件成形有限元模型
Fig.3 Finite element model of tube forming

2　结果与讨论

2.1　仅内压作用下管件成形情况

成形后管件的截面周长为 58.43 mm，由于异形截面难以通过常规方法计算出最大成形压力，故根据周长相等原理，参考截面周长与本型管件相同的圆管成形压力，确定本型管件的大致成形压力。根据文献[25]可计算得出，与本型管件相同周长的半径为 9.3 mm 的圆截面管件初始屈服压力为 27.8 MPa。参考此数据，设定合模后管件成形内压为 30 MPa。模拟结果显示，管件在弯曲处发生了明显开裂现象，此处的壁厚随内压变化曲线如图 4 所示。可以看出，管件在内压 7.5 MPa 时即发生开裂。合模后管件的形状变化如图 5 所示，其中位置 1 首先受到合模压力产生变形，相当于对此部分表面进行了拉深，而位置 1 则是拉深成形中最易开裂处，并且由于受到合模力及内压的共同作用，管件中间部分的材料在内压升高时受到相对较大的摩擦力，难以进行材料的流动及补料。同时，位置 2 在合模后管壁与模具间产生了较大空间，内压升高时管坯在此处会产生较大变形，需要大量材料流入，如果右侧的材料无法及时补充进来，就会消耗位置 1 处的材料，造成弯折部分补料严重不足、产生破裂。由于弯折部位产生破裂时管件内压过低，此时管件其他部分尤其圆角部位尚未充分变形，所以在仅施加内压的情况下无法实现零件的成形，必须配合轴向进给对薄弱部分进行充分补料。

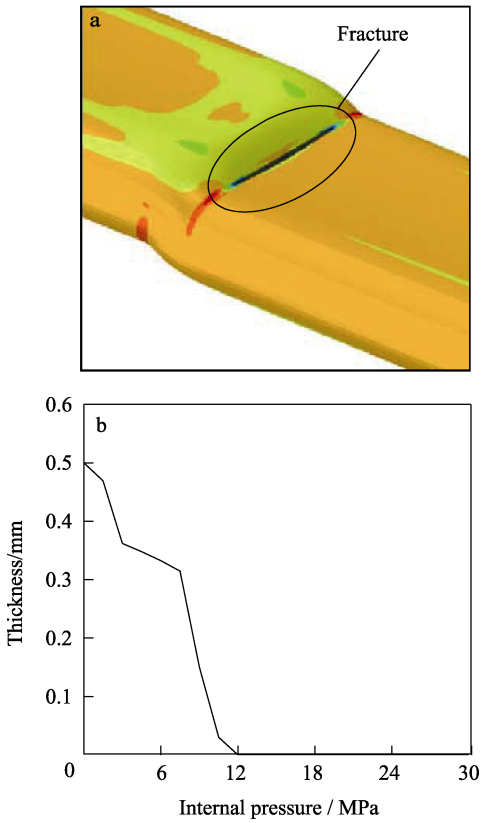


图 4　破裂位置（a）及破裂处壁厚随内压变化曲线（b）
Fig.4 Change curve of fracture location (a) and wall thickness at fracture location (b) with internal pressure

图 5　合模后管件形状变化示意图
Fig.5 Schematic diagram of tube shape change after die closing

2.2 轴向进给量对成形质量的影响

为了使管件能顺利成形，需要在保持一定管件内压的情况下对管件两端施加轴向进给，最后通过整形压力使管件弯曲部位达到满足要求的弯曲半径。管件最难成形的圆角部位为中间部分弯折处向模具侧凹陷的圆角，即图 5 中的位置 2、3。参照文献[25]可得出，当圆角弯曲半径为 2 mm 时，需要的整形内压为 73 MPa。由于管件轴线弯曲情况较复杂且为异形截面，所以以计算出的整形压力为基础，设置整形内压为 80 MPa。由于管件形状细长，如果进给阶段管内存在较大内压，会导致管壁与模具间摩擦力增大、进给难以传递至管件中间部分，造成补料困难引起开裂，所以设定轴向进给时管件内压为 5 MPa。对于管件轴向补料量的确定，假设成形前后管坯壁厚不变，根据表面积相等原理可计算得出理想补料量为 7 mm，考虑到管件几何形状的复杂性，生产实践中常将补料量取为理想补料量的 0.6~0.8 倍，故将总补料量取值为 4 mm，即左右分别进给 2 mm。但在模拟中发现，补料 2 mm 时管件会出现严重起皱现象，这是因为本项目中管件截面形状复杂，轴线形状不规则且不对称，进给对管件造成的变形不均匀，加上管件壁厚较薄，对进给量更加敏感。另外管件左右两侧轴线在竖直方向上有一定的距离差，导致在轴向进给过程中管件补料更容易积累在左侧弯折部位，造成左侧局部进给量过大、更易产生起皱。通过模拟确定了管件最大轴向进给量应低于 2 mm 后，为了进一步研究起皱前轴向进给量对成形质量的影响，分别设置轴向进给量为 0.75、1、1.25、1.5 mm。不同进给量对应壁厚分布云图如图 6 所示。可以看出，壁厚最薄位置位于管件 2 个发生弯折的区域，管件其余部位壁厚都较为均匀，所以选择管壁上一条通过 2 个薄弱区域的线段，在其上选择适当间隔点作为壁厚测量节点，如图 7a 所示，并绘制出管件弯曲处的壁厚分布曲线，如图 7b 所示。从图 6 和图 7b 可以看出，随着轴向进给量的增加，管件弯曲部分各节点处的壁厚减薄量都有所降低，说明轴向进给可以改善管件成形后的壁厚分布情况。在定义的壁厚测量路径中，节点 1、节点 28 为管壁最薄位置，而靠近管件侧面的节点 21 附近区域壁厚有所增加，这是因为节点 21 处管件发生了轴线弯曲，轴向进给在较小内压作用下会沿进给方向

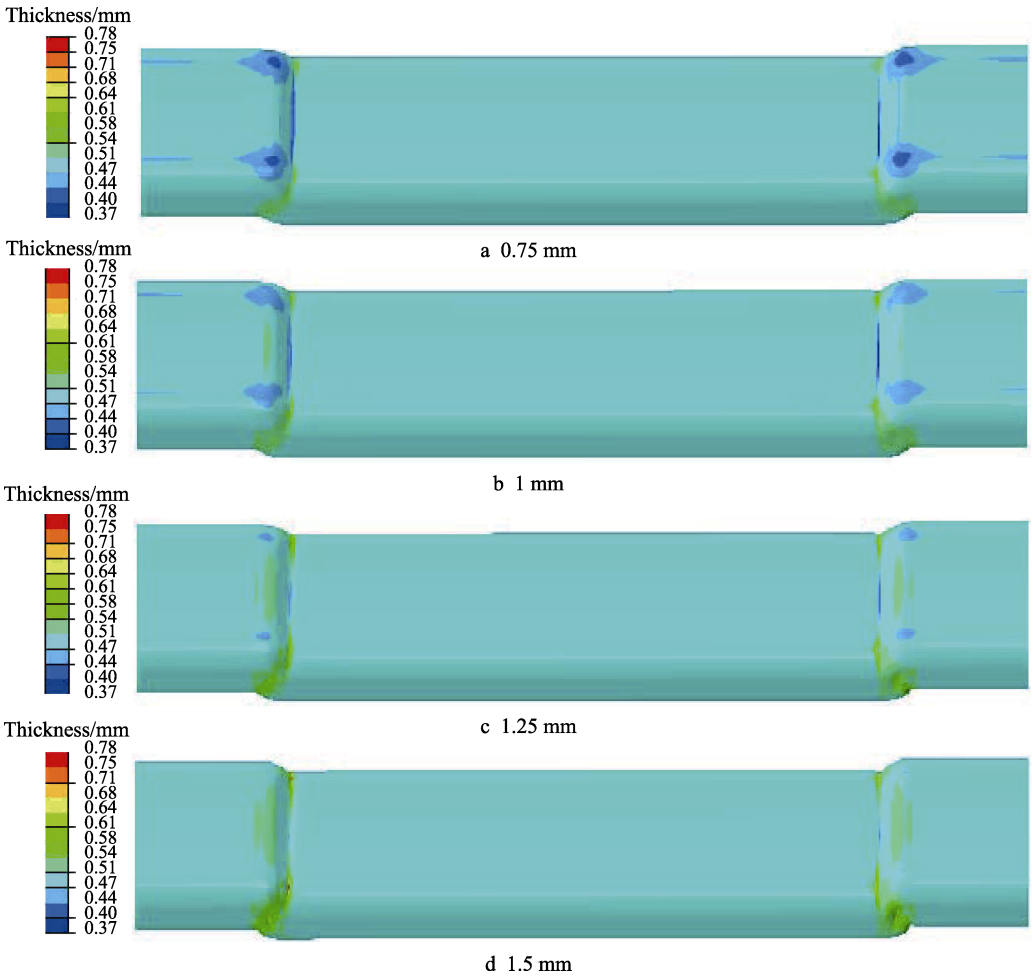
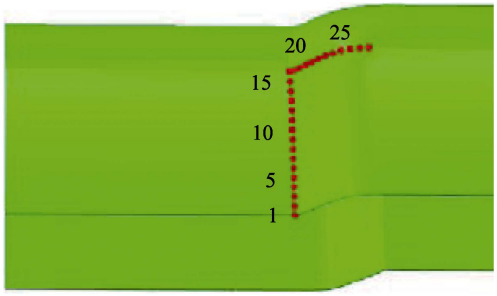
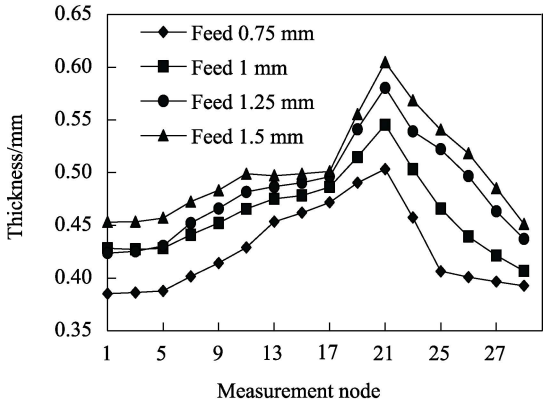


图 6 不同进给量对应壁厚分布云图

Fig.6 Cloud map of wall thickness distribution corresponding to different feeds



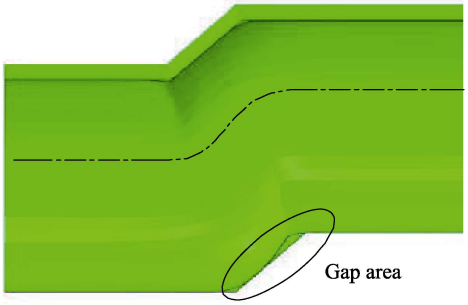
a 壁厚测量点



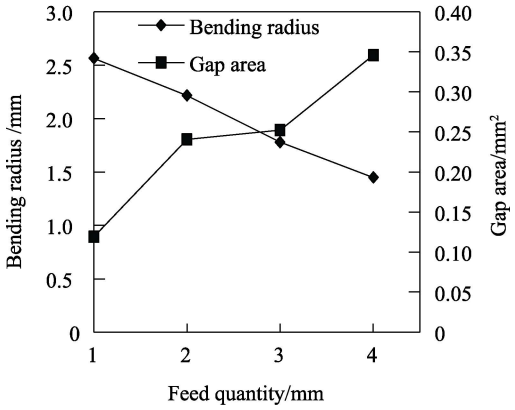
b 壁厚分布

图 7　壁厚测量节点及壁厚曲线

Fig.7 Wall thickness measurement nodes and wall thickness curve: a) wall thickness measurement nodes; b) wall thickness distribution



a 成形效果测量截面



b 弯曲半径及间隙面积曲线

图 8　轴向进给对弯曲半径及模具贴合情况的影响

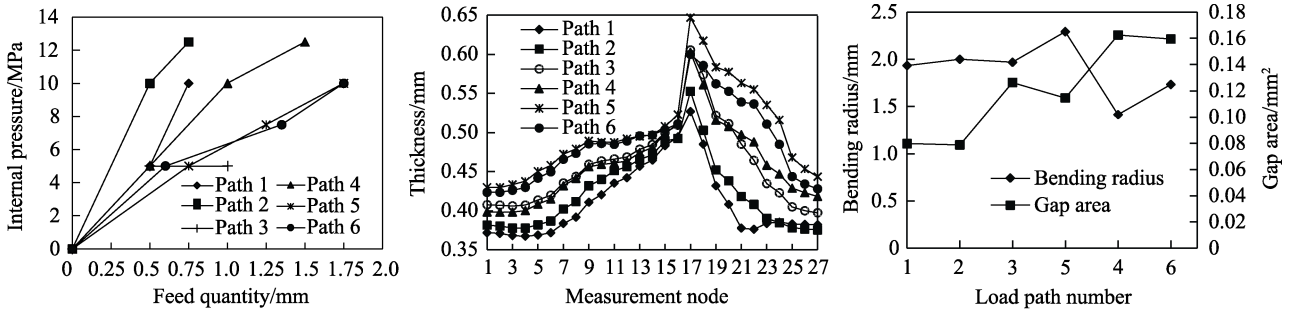
Fig.8 Effect of axial feed on bending radius and die fitting: a) measurement section of forming effect; b) curve of bending radius and clearance area

补料但在弯折处流动性减弱，所以在管件产生弯曲的过程中材料会在此处堆积。通过图 6 也可以发现，随着进给量的增大，侧面管壁的褶皱现象会更加明显。

施加 1.5 mm 轴向进给时管件成形后弯曲处沿对称轴线平面剖开的截面如图 8a 所示。可以看出，在施加轴向进给进行成形后，除了侧面管壁的起皱之外，管件弯折处下半部分虽未产生明显褶皱，但对模具的贴合程度也会降低。为了考察管壁与模具间的贴合情况，测量了管件弯曲处管壁与模具未贴合部分的间隙面积作为衡量管件成形效果的依据。同时，测量了管件弯曲处轴线最小弯曲半径作为成形质量的另一评价标准。此截面处的间隙面积和最小弯曲半径越小，说明管件的成形质量越好。为了保证成形质量，管件的未贴合间隙面积必须小于 0.1 mm^2，轴线的最小弯曲半径必须小于 2 mm。不同进给量下管壁与模具的间隙面积及轴线最小弯曲半径曲线如图 8b 所示。可以看出，随着进给量的增加，轴线最小弯曲半径随之降低，而管壁与模具的间隙面积不断增大。通过本系列模拟实验可知，通过施加轴向进给可以使管件完成成形，但过低的轴向进给量会使管件壁厚减薄量过大，而过高的轴向进给量又易产生起皱。仅施加轴向进给的加工方法虽然能避免管件薄弱处开裂、改善壁厚分布情况，但会造成管壁与模具不贴合的情况，必须进一步改善加工工艺。

2.3　加载路径形式对成形质量的影响

为了进一步提升管件的成形质量，需要改进成形工艺。根据 2.1、2.2 节中的模拟结果，确定了内压、轴向进给量的合理区间。以这些参数为基础，使轴向进给和内压相配合，以实现补料和变形之间的相互协调，进一步提升成形质量。因此设计了多种形式的加载曲线，以研究不同内压–轴向进给配合方式对成形质量的影响。按照不同的轴向进给量、管件内压及加载规律设定了 6 种加载路径，如图 9a 所示。按照每种加载路径加工后，还会对管件内部再施加 80 MPa 的整形内压。各加载路径对应的壁厚分布、弯曲半径及管壁与模具的间隙面积如图 9b、图 9c 所示。对比不同路径的模拟结果可以看出，与只进行轴向进给的情况相比，按指定加载路径成形可以实现更好的壁厚分布，因为在内压的配合下材料的流动能力得到提升，管件变形较大部位可以获得更适当的补料量。通过结果也可以看出，与仅施加进给时的成形影响规律相似，总进给量越大，壁厚分布情况和弯曲半径成形效果越好、模具贴合情况越差，但总体来看，成形参数与仅施加轴向进给时的参数相比改善明显。加载路径 5 的壁厚减薄程度最低，最小厚度为 0.424 mm，减薄率仅有 15.3%，弯曲半径也符合加工要求，但管壁与模具的间隙面积较大，不满足小于 0.1 mm^2 的加



a 加载路径 b 壁厚分布曲线 c 弯曲半径及间隙面积曲线

图 9 加载路径对管件成形质量的影响

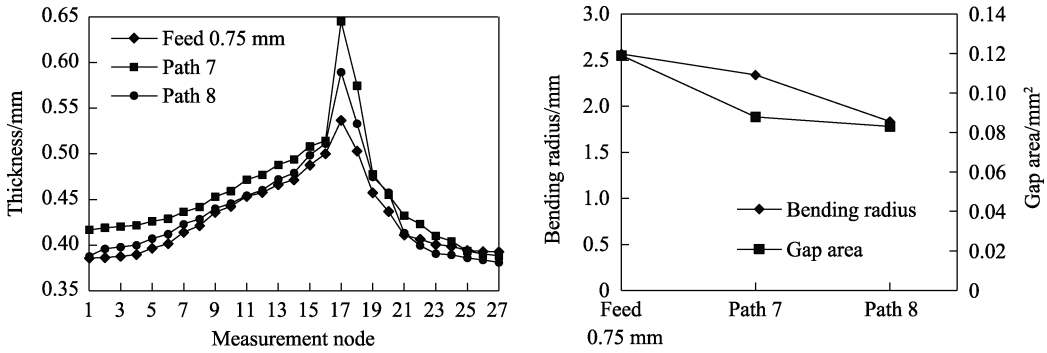
Fig.9 Effect of loading path on tube forming quality: a) loading path; b) curve of wall thickness distribution; c) curve of bending radius and clearance area

工要求。综合考虑壁厚及成形效果，按照加载路径 5、6 进行加工可以有效改善壁厚分布情况、降低管件薄弱部位的壁厚减薄率，但管壁与模具的贴合效果无法满足要求，而按照加载路径 1、2 进行加工，可以满足管件的形状要求，但壁厚减薄较大。按照加载路径 3 进行加工，管件的壁厚分布较好但间隙面积和轴线弯曲半径都较大。按照加载路径 4 进行加工，关键的壁厚及间隙面积都较为适宜，但轴线弯曲半径过大。综合考虑各因素，确定加载路径 5 为成形质量相对较好的加载路径。

2.4 合模阶段的进给和内压对成形质量的影响

虽然 2.3 节中按加载路径 5 进行加工时壁厚分布情况较好，但管壁与模具的贴合程度较差，无法满足加工要求。为了进一步提高管件成形质量，提出一种在合模阶段施加轴向进给及内压的新工艺。合模阶段的进给受模具表面摩擦力的影响较小，在管件弯曲的同时进行补料，能使管件在弯曲预成形过程中就得到补料，弯曲后壁厚变化更小，为后续成形打下良好的基础。而在合模过程中施加的内压则能为管件变形过程提供支撑力，使管壁的受力情况得到改善，减轻管件发生起皱的趋势，从而改善管件的圆角成形情况及管壁与模具的贴合情况。为了验证以上原理，确定合模进给对成形效果的影响，设置了 2 种进给情况的对比实验。为了与 2.2 节中单独进给 0.75 mm 的情况进行对比，新设计了加载路径 7：首先在管件合模阶段施加 0.75 mm 进给，合模后再施加 80 MPa 的成形内压。新设计的加载路径 8 除了合模阶段进给 0.75 mm 之外还施加了 5 MPa 内压，并在合模后同样施加 80 MPa 内压完成整形。合模阶段进给对成形质量的影响如图 10 所示。与仅在合模后施加 0.75 mm 进给的工艺对比可知，2 种加载路径能有效改善壁厚分布情况及成形质量，符合理论推测的结果。

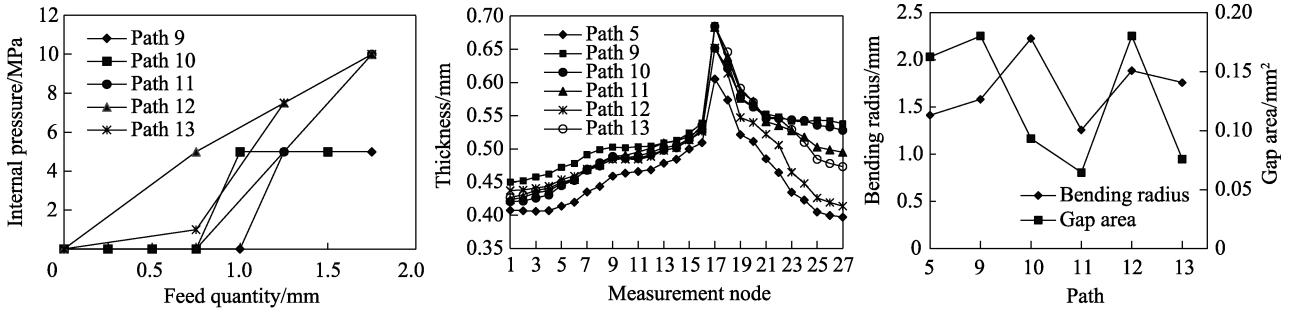
为了使该管件达到最好的液压成形质量，综合考虑了合模阶段内压及进给、合模后加载路径形式，重新设计了包含合模阶段进给及内压的 5 种加载路径如图 11a 所示。各加载路径对应的壁厚分布情况、弯曲半径及管壁与模具的间隙面积如图 11b、图 11c 所示。可以得出，合模阶段的进给和内压能明显提高管件的成形质量，与加载路径 5 相比，壁厚分布更加均匀，减薄量也明显减少。路径 9、路径 10 中节点 27 处甚至出现了壁厚增加的情况，这是因为在这些加载路径下管件轴线弯曲处在合模进给过程中发生了良性起皱现象，在合模后的加载过程中进给量与内压的配合也比较合适，使良性皱纹得到展平，造成了弯曲处的壁厚增加。综合考量管件壁厚分布情况、最小弯曲半径及模具贴合情况，可以确定路径 11 为最合适的加载路径。



a 壁厚分布曲线 b 弯曲半径及间隙面积曲线

图 10 合模阶段进给对成形质量的影响

Fig.10 Effect of feed in die closing stage on forming quality: a) curve of wall thickness distribution; b) curve of bending radius and clearance area



a 加载路径　　b 壁厚分布曲线　　c 弯曲半径及间隙面积曲线

图 11　按合模进给加载路径加工的成形质量

Fig.11 Forming quality processed according to the feed loading path in die closing: a) loading path; b) curve of wall thickness distribution; c) curve of bending radius and clearance area

3　成形实验

为了验证模拟结果的正确性，搭建了实验平台对 6A02 铝合金异形截面薄壁管进行成形实验研究。实验平台如图 12 所示，主要由模具、轴向进给平台、液压系统及可编程控制器（Programmable Logic Controller，PLC）控制系统组成。成形实验分别按照路径 5 和路径 11 的参数进行加载。实验步骤如下：首先，将管坯放置于下模，之后通过下模上的导向柱将上模与下模组装到一起，并用螺栓压紧，在完成合模、锁模的同时使管件完成预成形；其次，PLC 按照指定加载路径控制液压系统向管内注入液体并驱动轴向进给平台上的丝杠进行轴向进给，成形完成后，PLC 自动控制冲头退出；最后，卸下锁模螺栓及上模，取出管件。合模过程中的进给实验步骤如下：在合模后先不拧紧螺栓，而是先施加指定的进给，拧紧螺栓后再经 PLC 控制按照指定加载路径成形。不同路径下成形的管件如图 13 所示，在管件上表面预测壁厚变化较大处取 10 个测量点，测量出的实际壁厚分布情况及 Abaqus 模拟结果的壁厚分布情况如图 14 所示，可以看出，实验的壁厚分布情况与模拟结果基本一致。

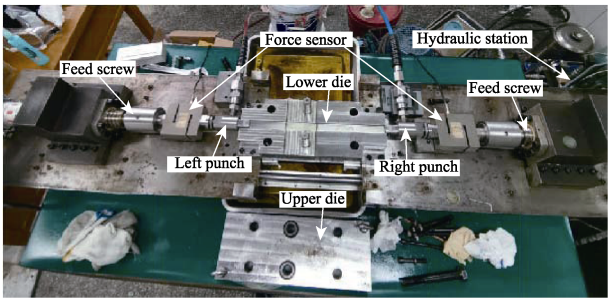
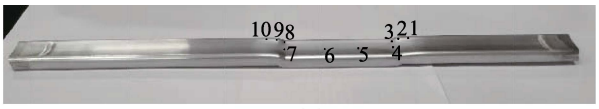


图 12　实验平台

Fig.12 Forming experiment bench

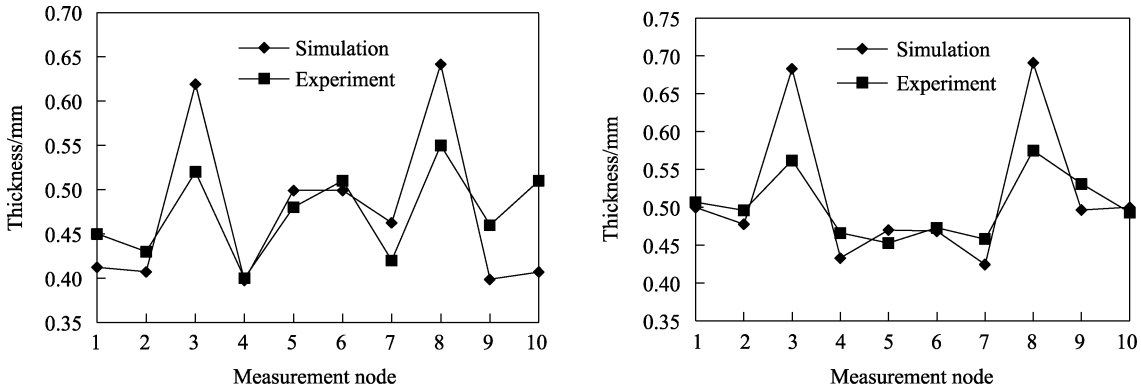


a 路径 5

b 路径 11

图 13　不同路径下成形的管件

Fig.13 Tubes formed in different paths: a) path 5; b) path 11



a 路径 5　　b 路径 11

图 14　实验结果与模拟结果的对比

Fig.14 Comparison between experimental results and simulation results: a) path 5; b) path 11

4 结论

1）对于 6A02 铝合金异形截面小弯曲半径薄壁管，通过数值模拟确定了管件在无轴向进给情况下薄弱处发生破裂时的内压为 7.5 MPa，发生起皱前的最大轴向进给量为 2 mm，最低整形内压为 80 MPa。通过数值模拟确定了在不发生起皱的前提下，轴向进给量越大，管件的壁厚减薄程度和管壁最小弯曲半径越小，但与模具的贴合情况越差。

2）适当的内压与轴向进给配合可以明显提升管件的成形质量。当总轴向进给量为 1.5 mm、总内压增加至 12.5 MPa、内压和进给按照加载路径 5 施加时，成形质量相对较好。此路径下管壁最大减薄率为 15.3%，最小弯曲半径为 1.414 mm，与模具间隙面积为 0.16 mm^2。按此路径成形的实验结果与模拟结果较为一致，验证了数值模拟的可靠性。

3）在合模过程中施加相配合的轴向进给及内压能进一步提升管件成形质量。确定了在合模过程中进给 0.75 mm、合模后继续按照加载路径 11 进行内压提升和轴向进给的情况下成形效果最好。通过此路径成形出的管件最小壁厚为 0.42 mm，最大减薄率为 16%，最小弯曲半径为 1.258 mm，与模具间隙面积为 0.065 mm^2，能满足对此类型管件的成形质量要求。

参考文献：

[1] AHMETOGLU M, SUTTER K, LI X J, et al. Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Need for Training[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2000, 98(2): 224-231.

[2] 李光霁, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(5): 47-61.
LI Guang-ji, LIU Xin-ling. Overview of Research Status of Automotive Lightweight Technology[J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(5): 47-61.

[3] GUO R, WU N, ZHANG G. New Materials for Auto-Body Lightweight Applications[J]. Advanced Materials Research, 2011, 341/342: 226-230.

[4] TOLAZZI M. Hydroforming Applications in Automotive: a Review[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 307-310.

[5] 苑世剑, 王小松. 内高压成形机理研究及其应用[J]. 机械工程学报, 2002(S1): 12-15.
YUAN Shi-jian, WANG Xiao-song. Research on the Mechanism of Internal High-pressure Forming and Its Application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002(S1): 12-15.

[6] AHMETOGLU M, ALTAN T. Tube Hydroforming: State-of-the-art and Future Trends[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2000, 98(1): 25-33.

[7] ALASWAD A, BENYOUNIS K Y, OLABI A G. Tube Hydroforming Process: A Reference Guide[J]. Materials and Design, 2011, 33: 328-339.

[8] HWANG Y M, TAYLAN A. Finite Element Analysis of Tube Hydroforming Processes in a Rectangular Die[J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2003, 39(11): 1071-1082.

[9] 张士宏, 程明, 宋鸿武, 等. 航空航天复杂曲面构件精密成形技术的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 1-11.
ZHANG Shi-hong, CHENG Ming, SONG Hong-wu, et al. Research Progress in Precision Forming Technology of Aerospace Complex Curved Components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 52(1): 1-11.

[10] KOCAŃDA A, SADŁOWSKA H. Automotive Component Development by Means of Hydroforming[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8(3): 55-72.

[11] 苑世剑, 郎利辉, 王仲仁. 内高压成形技术研究与应用进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000(5): 60-63.
YUAN Shi-jian, LANG Li-hui, WANG Zhong-ren. Research and Application Progress of Internal High- pressure Forming Technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000(5): 60-63.

[12] REDDY V P, REDDY V B, RAMULU J P, et al. Comparison of Constitutive Models for Predicting the Formability of SS304 by Tubular Hydroforming Process[J]. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering, 2022, 12(1): 1-11.

[13] MIKAEL J, LARSGUNNAR N, KJELL S. On Process Parameter Estimation for the Tube Hydroforming Process[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2007, 190(1): 1-11.

[14] LI H Y, DENG H P, YU S. Yield Behavior of Tube Hydroforming and It's Effecti on Hollow Component Manufacturing[J]. Key Engineering Materials, 2021, 6116: 98-103.

[15] 崔晓磊, 王祎纯, 温时宇, 等. 内高压成形合模力对变径管尺寸精度的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(10): 12-18.
CUI Xiao-lei, WANG Yi-chun, WEN Shi-yu, et al. Effect of Clamping Force of Internal High-pressure Forming on Dimensional Accuracy of Reducer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(10): 12-18.

[16] 李晓冬, 徐雪峰, 华如雨, 等. 5052 铝合金 T 型三通管内高压成形规律研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(3): 41-49.
LI Xiao-dong, XU Xue-feng, HUA Ru-yu, et al. Study on the Internal High-pressure Forming Law of 5052 Aluminum Alloy T-shaped Tee[J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28(3): 41-49.

[17] HAJIME Y, TAISUKE M, SHOICHIRO Y, et al. Influence of Internal Pressure and Axial Compressive Dis-

placement on the Formability of Small-Diameter ZM21 Magnesium Alloy Tubes in Warm Tube Hydroforming[J]. Metals, 2020, 10(5): 674-674.

[18] 鄂大辛, 周大军. 金属管材弯曲理论及成形缺陷分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 135-146.
E Da-xin, ZHOU Da-jun. Bending Theory and Forming Defect Analysis of Metal Tubes[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2016: 135-146.

[19] 陈智勇. 管坯预弯轴线设计对DP800管件低压液压成形起皱的影响[J]. 锻压技术, 2021, 46(4): 75-80.
CHEN Zhi-yong. Effect of Tube Blank Pre-bending Axis Design on Wrinkling of DP800 Tube in Low-pressure Hydroforming[J]. Forging Technology, 2021, 46(4): 75-80.

[20] 黄琳, 徐雪峰, 范玉斌, 等. 基于不同润滑方式的 1D 弯曲半径薄壁铝合金管推弯数值模拟和实验研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(6): 111-118.
HUANG Lin, XU Xue-feng, FAN Yu-bin, et al. Numerical Simulation and Experimental Research on Push Bending of 1D Bending Radius Thin-walled Aluminum Alloy Tubes Based on Different Lubrication Methods[J]. Journal of Plastic Engineering, 2021, 28(6): 111-118.

[21] HASHEMI R, NIKNAM S A. Flexible Bending of Rectangular Profiles: Numerical and Experimental Investigations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56(Pt A): 390-399.

[22] MASAAKI M, YUKIHISA K. Effect of Bending Method on Tube Hydroforming[J]. Materials Transactions, 2020, 61(3): 515-521.

[23] ZHENG K, DENIS J P, WANG L, et al. A Review on Forming Techniques for Manufacturing Lightweight Complex-shaped Aluminum Panel Components[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2018, 1(2): 55-80.

[24] 张钧萍, 方刚, 路洪洲, 等. 汽车车身用铝合金板材的研究现状[J]. 汽车工艺与材料, 2022(8): 10-18.
ZHANG Jun-ping, FANG Gang, LU Hong-zhou, et al. Research Status of Aluminum Alloy Sheets for Automotive Body[J]. Automotive Technology and Materials, 2022(8): 10-18.

[25] 苑世剑. 现代液压成形技术(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 26-30.
YUAN Shi-jian. Modern Hydroforming Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 26-30.

责任编辑：蒋红晨