

ICS 49.035

CCS V 94



T

团体标准

T/CI 936—2025

异形截面金属构件 3D 液压成形工艺规范

Three-dimensional hydroforming specification for special-shaped section metallic components

2025 - 03 - 19 发布

2025 - 03 - 19 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 工艺要求	1
4.1 坯料要求	1
4.2 设备要求	2
4.3 工装要求	2
4.4 安全要求	4
4.5 液体介质	4
5 工艺过程	4
5.1 主要工艺流程	4
5.2 工艺参数	7
5.3 成形要点	9
5.4 缺陷形式	9
6 试验方法	9
6.1 焊缝处检测	9
6.2 工装检测	9
6.3 零件检测	10
7 包装运输要求	10
参考文献	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：北京航空航天大学、河北博航唯实科技有限公司、湖南志凌云航空科技有限公司、佛山市兴迪机械制造有限公司、中国航发长江动力有限公司、中国航空发动机研究院、浙江摩多巴克斯科技股份有限公司、江苏耐特内高压成形科技有限公司。

本文件主要起草人：孟宝、闫彬宇、韩金全、万敏、陶锐辰、刘春雷、李小军、李伟平、丁志敏、龚志辉、李经明、胥志高、李博、吴新洲、何雨波、朱宇、陆志伟、郑再象。

引 言

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及4.2相关专利（ZL202010519076.0）一种航空发动机封严环双向同步加载液压成形设备、4.3相关专利（ZL202111319179.3）一种多波型金属封严环两道次液压成形模具装置、5.1相关专利（ZL201911392764.9）一种航空发动机异形封严环3D液压成形方法和专利（ZL202111337445.5）一种多波型金属封严环多道次液压成形方法的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，他愿意同任何申请人在公平、合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。

表1中列出的专利权人持有本文件涉及的专利。

表1 持有本文件涉及的专利的专利权人相关信息

专利持有人	地址
北京航空航天大学	北京市海淀区学院路37号
中国航发长江动力有限公司	湖南省岳阳市岳阳楼区冷水铺路606号

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

异形截面金属构件 3D 液压成形工艺规范

1 范围

本文件规定了异形截面金属构件3D液压成形工艺的工艺要求、工艺过程、工装要求、工艺参数设计、试验方法和包装运输要求。

本文件适用于直径10 mm~200 mm范围内具有C、U、W、M、 Ω 及多波型等复杂截面特征的轴对称径向开口环形零件的3D液压成形工艺。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1184 形状和位置公差 未注公差值

HB/Z 140—2004 航空用高温合金热处理工艺

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

3D 液压成形 three-dimensional hydroforming

利用液体作为传力介质，将液压作用在环形坯料上，同时与动模位移匹配使坯料向变形区内流动，使环形坯料鼓胀变形最终贴合在模具型面上的一种液压成形工艺。

3.2

预胀形 pre-bulging

在零件成形初期，动模未推动送料之前，将一定压力液体介质充入模具型腔，依靠低压使坯料沿轴向方向部分流入成形区，并在径向方向产生一定的塑性鼓胀变形。

3.3

合模胀形 feeding bulging

将液体压力沿径向方向施加在坯料上，同时匹配双向动模的合模运动，同步推动坯料向变形区内送料，保障成形区内材料在减薄较小的前提下贴合模具型面。

3.4

高压整形 high pressure shaping

将作用在坯料上压力调整为高压，利用高压提高零件复杂特征的贴模度，使成形区内材料完全紧贴模具型面。

3.5

外压成形 external pressure forming

依据零件开口特征，将液体压力作用在坯料外表面，使材料朝内发生胀形的成形过程。

3.6

内压成形 internal pressure forming

依据零件开口特征，将液体压力作用在坯料内表面，使材料朝外发生胀形的成形过程。

4 工艺要求

4.1 坯料要求

4.1.1 材料

3D液压成形工艺主要针对金属材料零件，材料厚度范围为0.03 mm~1.0 mm。成形所需的初始坯料在下料切割为矩形坯料。

4.1.2 坯料尺寸要求

4.1.2.1 焊接前的矩形坯料的尺寸精度直接影响到成形零件直径尺寸的大小及均匀性、稳定性。

4.1.2.2 下料切割的矩形坯料宽度精度要求在 ± 0.1 mm以内，长度尺寸精度宜在 ± 0.2 mm以内。

4.1.2.3 理论的长宽尺寸可基于模具结构安装位置及最终零件的尺寸，通过周长不变的原则计算。在实际生产中根据零件试制过程中的模具补偿情况进行尺寸调整，最终形成固定参数。其中，宽度尺寸偏小或偏大可能会导致成形零件尺寸不合格或型面折叠等缺陷，如图1所示。

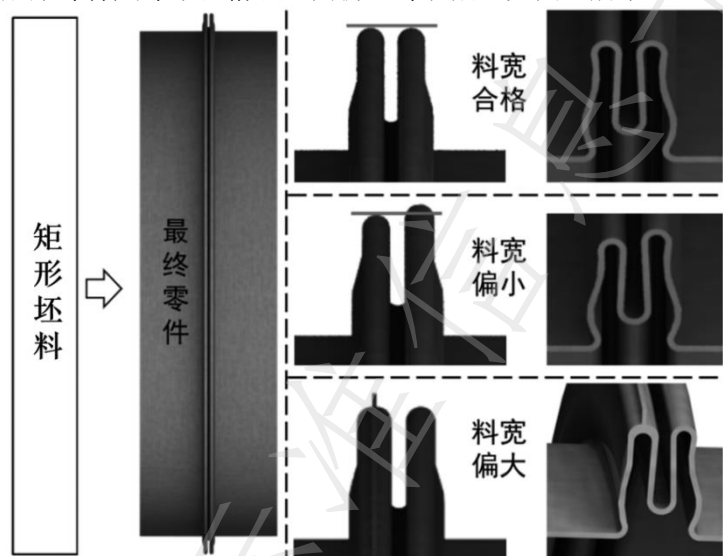


图1 矩形切割料料宽偏差引起的构件成形问题

4.1.3 坯料焊接要求

4.1.3.1 焊接前应进行清理、砂光，去除表面所有污染物、氧化等多余物。焊接方式应采用对焊，不应采用搭接焊。

4.1.3.2 焊缝表面不准许有裂纹、气孔、咬边、凹坑和未焊透情况，焊缝表面应平整与基体圆滑过渡，焊接表面不准许有裂纹，焊缝内部不准许有未熔合和未焊透问题。

4.1.4 坯料圆整

在焊接过程中，初始焊接件变形为截面不规则的非环形坯料，应对焊接后非环形坯料进行圆整，减小装料难度，提高生产效率。焊接坯料圆柱度应满足GB/T 1184要求。

4.2 设备要求

3D液压成形设备应符合以下要求。

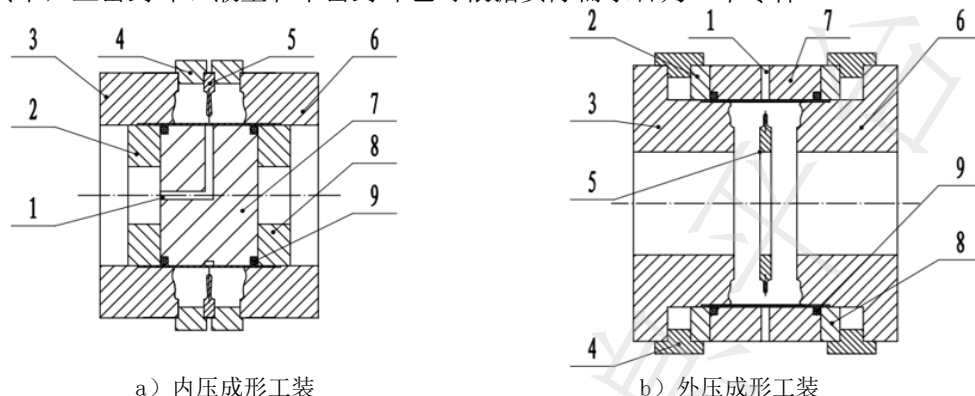
- 具有工作台用来安放模具及实现成形，工作台应有良好的平行度及模具安装的定位功能。
- 具有垂直方向上的锁模力的锁模缸、水平方向上提供同步进给的左右侧缸及提供胀形压力的增压缸。其中，左右侧缸同步位移精度应达到 ± 0.1 mm，增压缸压力可按进给行程连续调节。
- 设备应支持胀形压力、进给速度、锁模力等关键参数的加载路径自动化调节，并具有安全保护装置。

4.3 工装要求

4.3.1 结构尺寸

用于异形截面金属构件3D液压成形的专用模具工装的结构和尺寸是根据每一套成形零件的具体型号和尺寸来确定的。模具的关键成形型面应与对应零件匹配，外形尺寸根据成形设备的工作平台尺寸以及各动作行程限制确定。各部件的结构设计应考虑坯料装拆时的定位与加工效率问题。图2为3D液压成

形用工装的关键结构简化示意图,包括上动模、下动模、中模、液室、上密封环、下密封环、定位块、密封圈等。其中,上密封环、液室和下密封环也可根据实际需求合为一个零件。

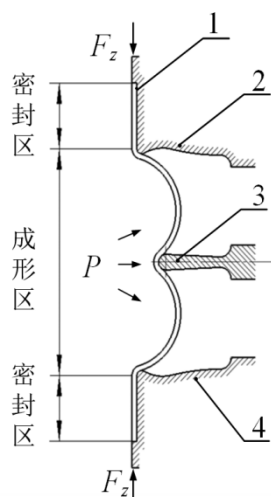


- 标引序号说明:
- 1——通道;
 - 2——上密封环;
 - 3——上动模;
 - 4——定位块;
 - 5——中模;
 - 6——下动模;
 - 7——液室;
 - 8——下密封环;
 - 9——密封圈。

图2 3D 液压成形工装结构示意图

4.3.2 上动模、下动模和中模

上动模、下动模和中模上的型面与零件的复杂截面形状一致,成形时通过材料贴合在型面获得目标截面形状。在模具安装阶段,通过定位块对三者的位置进行定位,由此确定成形区的间距。如图3所示,上动模和下动模内侧宜设计限位结构用于安放坯料,成形时通过限位卡槽推动坯料送料。由于高压整形过程中,压力作用力主要作用在型面上,因此上动模、下动模和中模的材料宜为Cr12MoV,硬度宜为HRC50~55。



- 标引序号说明:
- 1——限位卡槽;
 - 2——上动模;
 - 3——中模;
 - 4——下动模。

图3 上动模、下动模和中模结构示意图

4.3.3 液室

成形过程中胀形压力由设备中的液压系统提供，在液室中应设置有液压通道，满足外界液体介质输送要求。液室结构进行设计时应预留合适的液压通道，并根据成形设备结构设计合理的液压管道接口。

4.3.4 上密封环和下密封环

4.3.4.1 坯料在径向方向上和液室之间留有间隙，间隙值宜为 1 mm~2 mm。

4.3.4.2 坯料和上密封环、下密封环之间间隙值宜为 0.05 mm~0.15 mm。

4.3.4.3 应在液室和上密封环、下密封环之间设计图 4 a) 中所示的密封槽以安装密封圈进行高压密封，防止液体介质在间隙中的泄漏。

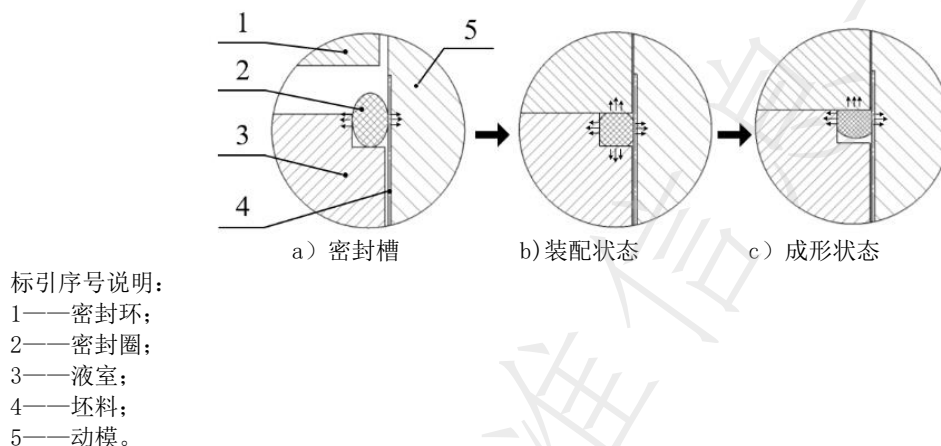


图4 密封槽工作示意图

4.3.4.4 在成形过程中，液室和上密封环、下密封环在轴向端面上应紧密贴合无间隙，防止密封圈挤入间隙中，导致密封失效而泄漏。

4.3.5 密封圈

密封圈结构宜选用O型密封圈及Y型密封圈等。密封圈尺寸应与液室、上密封环和下密封环组合形成的密封槽尺寸相配合。为了保证高压密封，在安装完成后，密封圈压缩量宜达到30%以上。

4.3.6 定位块

定位块用于安装坯料时的初始定位，定位块的限位尺寸与上动模、下动模中坯料的限位卡槽尺寸在轴向方向不应互相干涉。

4.4 安全要求

4.4.1 操作人员在上岗前应熟悉、了解并掌握成形设备使用、成形工装装拆说明等技术文件，并应经过专业知识和安全生产知识的应知、应会培训。

4.4.2 操作人员在生产前应检查设备运行情况，应在保证一切功能动作正常可靠的情况下正确安放模具工装。

4.5 液体介质

液体介质为液压油、纯水或乳化液。

5 工艺过程

5.1 主要工艺流程

5.1.1 使用 3D 液压成型的主要工艺流程如图 5 和表 2 所示，生产时可根据实际情况进行调整。

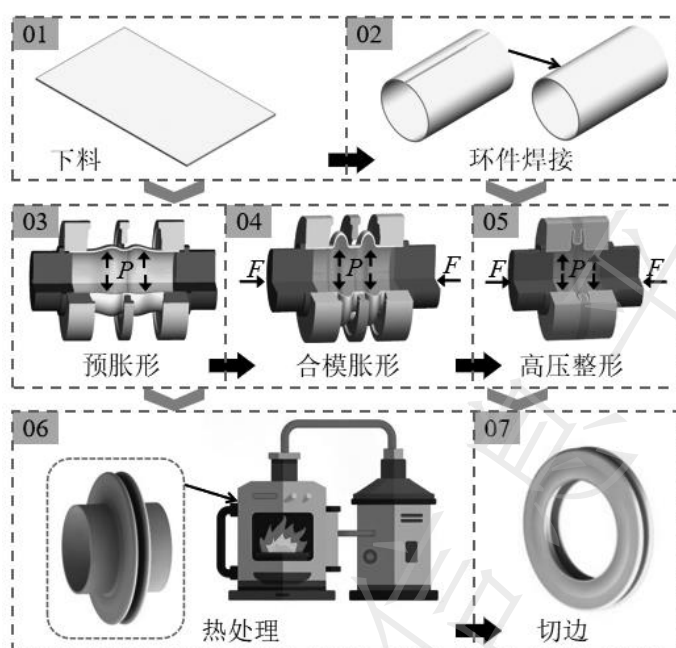


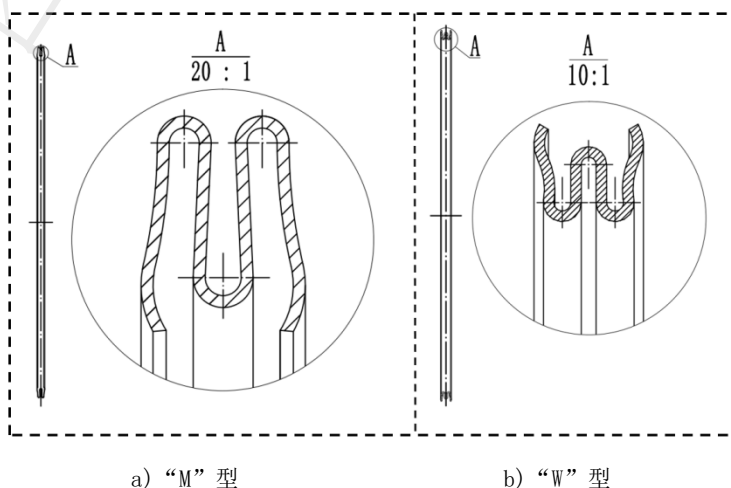
图5 3D 液压成型的主要工艺流程

表2 3D 液压成型的主要工艺流程

序号	主要工序	依据	主要设备
01	下料	计算矩形坯料件尺寸	剪板机 线切割机
02	环件焊接	环形坯料尺寸	熔化焊设备
03	预胀形	关键参数计算	液压成形设备
04	合模胀形	关键参数计算	液压成形设备
05	高压整形	关键参数计算	液压成形设备
06	热处理	HB/Z 140-2004	热处理炉
07	边料切除	要求零件尺寸	车床、线切割、激光切割

5.1.2 根据不同零件的截面结构特征的成形需求，3D 液压成形可分为内压成形和外压成形两种方法。

- 如图 6 a) 中截面为“M”型时，最终零件的截面形状径向开口方向朝向中心线方向，宜采用内压成形；
- 如图 6 b) 中截面为“W”型时，其截面形状的径向开口方向背向中心线方向，宜采用外压成形方法。



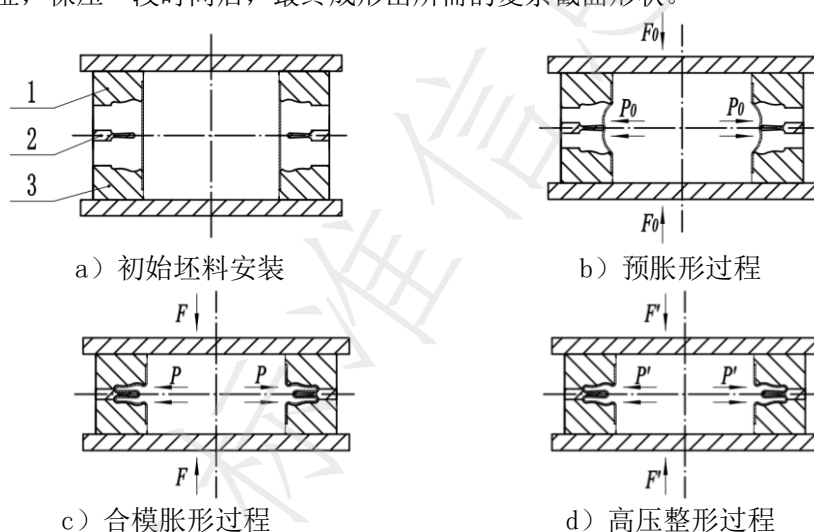
a) “M”型

b) “W”型

图6 两种不同截面开口方向的金属环形零件

5.1.3 薄壁环形金属零件 3D 内压成形过程见图 5，主要包括坯料安装、预胀形、合模胀形及高压整形四个阶段。

- 在成形之前，按照图 7 a) 所示在上、下动模之间放置环形焊接坯料，且保持成形区不变。
- 成形开始时，如图 7 b) 所示充入液体介质对坯料进行预胀形，使坯料沿径向方向产生一定的塑性鼓胀变形。其中 P_0 为预胀形液室压力， F_0 为初始锁模力。
- 图 7 c) 为合模胀形阶段，此时保持液室压力的施加，同时将合模载荷 F 分别作用在两动模上，使两动模按照预先设定的加载曲线同步推进送料，最终闭合在中模两侧。动模推动送料过程中液室压力 P 可根据成形需求实时调节为不同参数值。在压力沿径向向外胀形和双向同步加载送料的联合匹配作用下，成形区坯料填充到模腔内并贴靠模具型面，当上、下动模完全闭合时，已经成形出所需型面的大概轮廓，而截面局部微小精细特征尚未贴模成形。
- 在图 7 d) 中的高压整形阶段，首先增大合模力到最大锁模力以防止高压作用将动模向外推开，随后胀形压力调节为整形压力 P' ，利用高压使成形区坯料完全贴靠在模腔上，成形出所需局部微小特征，保压一段时间后，最终成形出所需的复杂截面形状。

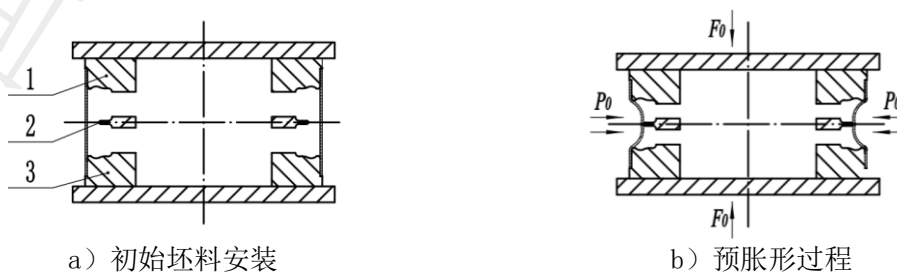


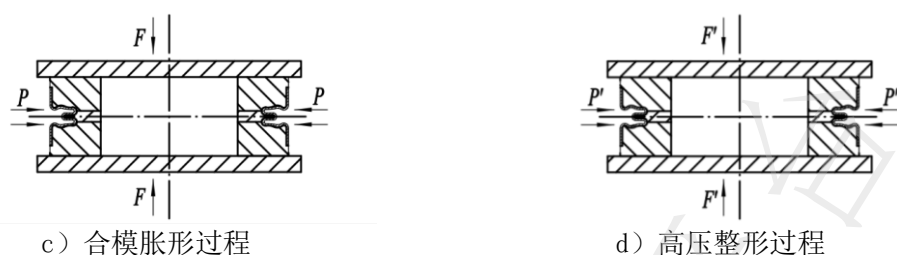
标引序号说明：

- 1——上动模；
2——中模；
3——下动模。

图7 开口向内环形构件 3D 液压成形工艺过程

5.1.4 利用 3D 液压成形技术成形开口朝外的薄壁环形金属零件的成形过程见图 8，同样分为预胀形、合模胀形和高压整形三个阶段，成形工艺原理与内压成形一致，成形所用模具部件装配和液体介质施压方向不同。





标引序号说明:

1——上动模;

2——中模;

3——下动模。

图8 开口向外环形构件 3D 液压成形工艺过程

5.1.5 在零件卸模后,两侧非成形区的材料需通过切边工序进行切除,宜根据零件结构及切除位置,采用车床、线切割或三维激光切除,获得最终的复杂截面构件。根据零件结构及尺寸,设计专用夹具工装进行切边支撑。支撑位置如图9所示。其中,图9 a)和图9 b)分别适用于开口向内和开口向外的环向构件。

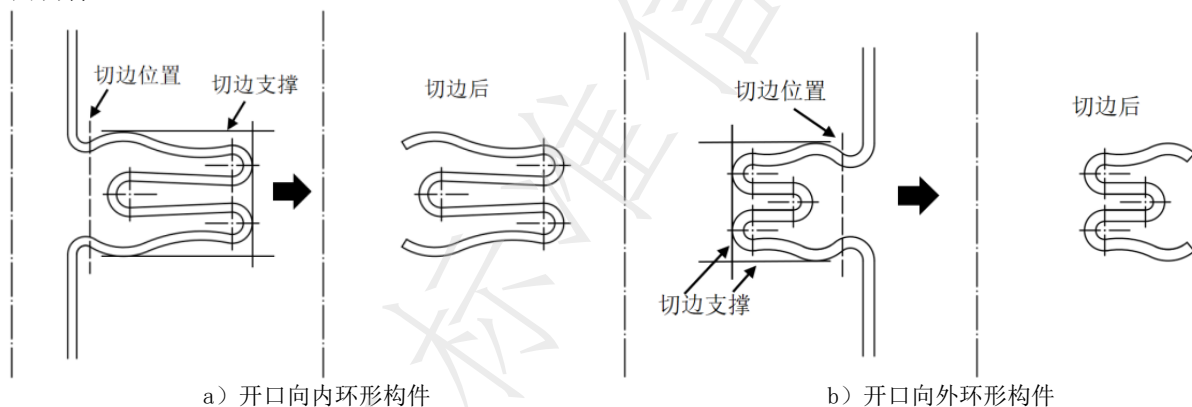


图9 不同开口零件的切边过程

5.2 工艺参数

5.2.1 同步进给速度

同步进给速度为3 mm/min ~50 mm/min,为保证模具两侧送料的同时位移精度,宜设置工作速度区间为3 mm/min ~10 mm/min。工作速度指在成形过程中,合模胀形过程中两模具动模前进送料的速度,宜设置在10 mm/min以下。成形结束后的退回动作速度则不作要求。

5.2.2 液室压力

液室压力是3D液压成形的关键工艺参数,在预胀形、合模进给及高压整形三个阶段,液室压力按照所需压力-位移曲线进行设定,其中液室压力的设定区间在最小值 $P_{\min}$ 和最大值 $P_{\max}$ 之间。不同阶段的液室压力可通过以下公式计算。

- a) 在预胀形初期,为使坯料发生塑性鼓胀的最小预胀形压力的计算如公式(1),成形过程中预胀形压力一般大于计算所得最小预胀压力,应在工艺试制过程中确定合适区间,如图10所示。

$$P_{\min} = \frac{2t_0\sigma_s}{\sqrt{3}r_0} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

σ_s ——材料屈服强度;

t_0 ——坯料厚度;

r_0 ——坯料内径。

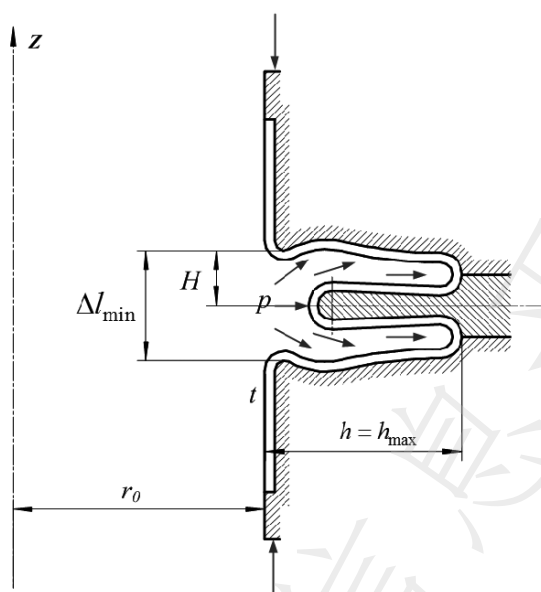


图10 环形薄壁件的高压整形阶段截面示意图

- b) 在高压整形阶段，为了避免材料在波尖顶部发生破裂，使用公式（2）计算最大整形压力。在最大整形压力范围内，液压越大，零件贴模效果越好，最终成形精度越高。但需根据实际设备所能提供试验条件确定成形过程中最大允许达到液压力值。

$$P_{\max} = \frac{t}{r} \sigma_s \quad (2)$$

式中：

r ——截面最小过渡圆角半径。

- c) 合模阶段压力设置为低压，一般大于或等于预胀形压力，通过实际工艺试制效果确定。

5.2.3 锁模力

5.2.3.1 3D 液压成形过程中需要在零件径向方向上对模具进行锁模，防止液体介质作用在坯料上的压力将坯料外接触模具顶开，从而将坯料压入缝隙中，出现成形缺陷。由公式 $F = PS$ 可知，在图 10 中的高压整形阶段，液体介质对模具的作用力最大为：

$$F_{\text{锁模力}} = 2r_0 \times \Delta l_{\min} \times P \quad (3)$$

式中：

r_0 ——坯料内径；

$\Delta l_{\min}$ ——开模间距；

P ——整形阶段压力。

5.2.3.2 成形过程中，所需锁模力设置值可通过公式（3）计算，根据压力分段变化设置相应锁模力的分段值，锁模力设置值宜稍大于整形阶段计算出作用力，同时根据工艺过程中表现再逐步增大设置，避免过大的锁模力使模具发生变形。

5.2.4 同步进给力

5.2.4.1 3D 液压成形过程中，两侧动模沿轴向方向位于坯料两端，承受液室压力在轴向方向上对模具的作用力，各阶段的同步进给力可按照下述方法设置。

- 在预胀形阶段，液体介质经坯料作用在两动模上的作用力较小，且两侧动模无位移变化，因此未施加进给力。
- 在合模胀形阶段，两侧动模在同步进给力推动下使材料向成形区中流动。

- c) 在高压整形阶段,坯料贴模在两动模型面上,此时坯料内的液室高压对动模的作用力最大,应设置最大同步进给力保证动模紧密合模,防止高压将坯料压入动模和中模之间的间隙。此时坯料内高压整形压力对动模的作用力大小计算公式如下:

$$F_{\text{进给力}} = \pi \times \left[(r_0 + h_{\text{max}})^2 - r_0^2 \right] \times P \dots\dots\dots (4)$$

式中:

h_{max} —— 零件截面高度;

P —— 整形阶段压力。

5.2.4.2 为了保证成形过程,在成形前应设置同步进给力稍大于上式中计算出最大作用力(整形液体压力下)。若同步进给力设置过小,成形后易出现波尖处材料堆积甚至发生折叠的缺陷,可根据实际试制情况提高进给力设置值后成形。

5.3 成形要点

5.3.1 对于截面形状有对称性要求的零件,在坯料安装过程中尽可能使其相对中模对中,在成形时尽可能使两侧动模同时开始进给送料。

5.3.2 在工艺参数未完全确定的试制过程中,操作人员应关注成形过程中的关键参数变化,设置异常情况急停。

5.3.3 成形结束后不应采用不当强力方式拆模,防止产生人为变形。

5.4 缺陷形式

型面不对称、波尖处型面折叠和过渡圆弧丢失是3D液压成形中几种常见的缺陷形式,根据出现缺陷的不同阶段和不同位置分析引起这些缺陷的因素及解决方案,如表3所示。

表3 3D 液压成形缺陷形式

缺陷形式	位置	阶段	引起因素	解决方案
型面不对称	两侧波尖高度	成形初期	料宽偏小或装料不对称	确保料宽和装料对称
			预胀形压力过小且两伺服缸进给不同步	适当增大预胀形压力
	两侧圆弧特征	中、后期	料宽偏小	优化料宽尺寸
波尖处型面折叠	单侧波尖	成形初期	料宽偏大或装料不对称	保证料宽和装料对称
			预胀形压力过小或伺服缸进给不同步	增大预胀形压力
	两侧波尖	成形初期	合模压力过大	适当减小合模压力
			坯料料宽过大	优化矩形坯料尺寸
		成形后期	伺服缸进给力偏小	适当增大伺服缸进给力
	两中模贴合面处	成形后期	整形阶段锁模缸锁模力偏小	适当增大整形阶段锁模缸锁模力
丢失过渡圆弧特征	两侧圆弧	中、后期	整形压力过小	增大整形压力
		成形初期	料宽偏小	优化料宽尺寸

6 试验方法

6.1 焊缝处检测

应通过肉眼或借助简单的工具,如放大镜、焊缝检验尺等,对焊缝处表面进行全面细致地观察。检查焊缝的形状是否均匀、规则,焊缝的宽度和余高是否符合设计要求,焊缝表面是否存在咬边、焊瘤、凹陷、气孔、裂纹等缺陷。

6.2 工装检测

6.2.1 应进行目视检测,通过肉眼或借助放大镜等工具,仔细观察模具表面是否存在裂纹、砂眼、气孔、划痕等缺陷。

6.2.2 对于模具的线性尺寸,如长度、宽度、高度等,应选用卡尺、千分尺、高度规等常规量具进行初步测量。

6.2.3 测量模具尺寸后,应将测量结果与公差要求进行对比,判断尺寸是否在公差范围内。对于形状公差,如直线度、平面度、圆度等,宜使用专门的形状公差测量仪进行检测。

6.2.4 应对模具的安装便利性、拆卸便捷性以及装拆过程中模具各部件的配合情况等进行检测。应检查模具在设备上的定位是否准确可靠,应观察模具的外形尺寸是否与设备的成形平台尺寸相匹配。应检测模具部件间的安装螺栓、定位销等连接件的位置是否合理,操作是否简便。应检测模具工装与设备的液压接口是否能满足高压液体密封需求。

6.3 零件检测

6.3.1 应在光线充足且均匀的环境下,凭借肉眼或放大镜等对零件表面进行全方位观察,观察零件表面是否存在划痕、型面不对称、波尖型面折叠或过渡圆弧特征丢失等缺陷。

6.3.2 应依据零件的设计图纸,检测其直径、波宽等外形尺寸,判断是否有直径偏小或波宽偏差等现象。检测时应选择合适的测量基准,确保测量基准与设计基准和加工基准一致,以减少测量误差。应每隔 45 度取一检测点,并取平均值作为最终的测量尺寸。宜使用千分尺、内径千分尺、外径千分尺及卡板等工具进行测量。内径千分尺用于测量零件的内径,外径千分尺用于测量零件的外径,卡板用于快速抽检和批量检测。

6.3.3 应从批次零件中,选用样件检测截面形状与截面尺寸。检测方法宜采用截面法或无损检测等测量方法。截面法测量时,应利用线切割等方法进行切割,并对截面进行打磨、抛光等处理,制成金相试样后利用光学显微镜观察截面形状并测量微小复杂的截面结构尺寸。无损检测可采用三维 X 射线显微镜成像等方法进行。

7 包装运输要求

7.1 包装时不应选用会引起产品表面色泽改变或锈蚀的材料,也不应由于包装材料的变形而引起产品的损坏。

7.2 包装时应注意防水、防潮、防锈、防缓冲、防尘等防护,不应包含有害介质。

7.3 进行内外包装时应做到包装紧凑、防护合理、安全可靠等,包装件外形尺寸和质量应符合运输方面有关规定。

7.4 运输过程应保证安全可靠,避免受到震动、撞击等。

7.5 不应将产品同腐蚀性化学物品及潮湿性材料一同运输。

参 考 文 献

- [1] GB/T 15062 一般用途高温合金管
 - [2] GB/T 19867.4 激光焊接工艺规程
 - [3] GB/T 28295 高温合金管材通用技术条件
 - [4] GB/T 36520（所有部分） 液压传动 聚氨酯密封件尺寸系列
 - [5] GB/T 39192 高温合金件热处理
 - [6] HB 5800 一般公差
 - [7] YB/T 6123 高温合金精密无缝管
-