

一种高强度钢 U 形梁自阻加热冲压工艺装备

孙欢迎, 刘翊安, 张 晗, 张晓宇, 赵 军, 张 泉

(北华航天工业学院 材料工程学院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 构建了自阻加热在线冲压试验平台, 设计并制造了 U 形弯曲成形模具, 对自阻加热冲压技术进行了工艺验证试验。结果表明: 仅需对模具、夹具进行适当创新设计, 自阻加热冲压就可以在传统设备上, 从而显著降低热冲压件的生产成本。为了制造汽车车身上的高强度钢 U 形梁类零件, 设计了一套自阻加热冲压工艺装备: 专用弹性夹持装置可以快速夹紧、卸下金属板坯, 同时提供弹性拉力, 消除细长板坯由于热胀冷缩或自重引起的弯曲, 并减小冲压过程对通电回路的冲击; 切断弯曲模具两端的冲裁结构与压边顶件的机构配合, 可以实现工件的自动顶出, 从而提高生产效率。

关键词: 热冲压; 自阻加热; 高强度钢; U 形弯曲; 工艺装备

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.021

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0130-07

Self-resistance heating stamping process equipment for a kind of high-strength steel U-shaped beam

Sun Huanying, Liu Yi'an, Zhang Han, Zhang Xiaoyu, Zhao Jun, Zhang Quan

(Material Engineering College, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: The online stamping test platform by self-resistance heating was established, and the U-shaped bending forming die was designed and manufactured. Then, the process verification tests for the stamping technology by self-resistance heating were completed. The results show that the stamping by self-resistance heating is conducted on traditional equipment with proper innovative design of die and fixture, and the production cost of hot stamping parts is significantly reduced. In order to manufacture high-strength steel U-shaped beam parts on the automobile body, a set of stamping process equipment by self-resistance heating is designed, which can quickly clamp and unload the sheet metal by the special elastic clamping device, provide elastic tension at the same time, eliminate the bending of slender sheet metal caused by thermal expansion and cold contraction or its own weight, reduce the impact of the stamping process on the electrified circuit, cut off the mechanism cooperation between the punching structure at both ends of bending die and the blank holder ejector, realize to eject the workpiece automatically. Thus, the production efficiency can be improved.

Key words: hot stamping; self-resistance heating; high-strength steel; U-shaped bending; process equipment

近年来, 人们对汽车的节能减排提出了更为严格的要求, 汽车轻量化越来越受到重视。汽车车身承力部件采用高强度钢板制造, 不但减轻汽车重量、

提高节能环保性, 还可以显著提高汽车的碰撞安全性。但是, 随着钢板强度的提高, 塑性显著下降, 传统冷冲压成形容易产生破裂、起皱、回弹严重、尺寸不可控和形状不良等问题, 于是高强度钢板热冲压工艺应运而生。热冲压利用金属高温状态下塑性增加、强度下降的特点, 在热冲压模具上使钣金件成形, 同时, 利用模具冷却淬火获得超高强度。与传统的冲压装备有显著不同, 热冲压工艺一般需要自动

收稿日期: 2021-02-06; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 北华航天工业学院科研基金重点项目 (ZD-2020-02);

河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2018239)

作者简介: 孙欢迎 (1980-), 男, 博士, 副教授

E-mail: huanying417@163.com

[13] 韩光超, 刘军, 温晓宁, 等. 基于不同振动模式的超声辅助拉深精密成形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 118-123.

Han G C, Liu J, Wen X N, et al. Precision forming process by ultrasonic assisted deep drawing based on different vibration modes [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 118-123.

[14] Yu Z Y, Zhong B, Zhang C W, et al. Theoretical and experimental study on optimal cropping load control strategy of duralumin alloy Al-Cu4Mg1 based on linear elastic fracture mechanics [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234 (8): 1630-1639.

化生产线才能完成,包括板料拆垛系统、打标站、加热炉、上料装置、压机、下料装置、零件堆垛系统等,生产成本很高。目前,国内现有的热冲压生产线全部为高价进口的国外生产线,用于国产速腾、奥迪等几款轿车的核心零部件生产,而且多数厂家使用的热冲压模具也是从国外高价购买的,造成热冲压零件的市场价格居高不下^[1-7]。为了降低热冲压零件的生产成本,北华航天工业学院将自阻加热技术^[8-9]引入到热冲压领域,进行了U形弯曲工艺的自阻加热冲压试验研究,本文针对高强度钢U形截面承力梁零件,设计了一套自阻加热冲压工艺装备。

1 自阻加热冲压及应用探讨

1.1 自阻加热冲压技术简介

对于薄板构件来说,冲压前的加热工序非常关键,由于温降很快,如果先在电炉内加热然后再移至压机进行冲压,除非采用自动化装置,否则很难

保证冲压时的成形温度。近年来,出现了一种新的加热方法,利用高频开关加热电源向板坯通入很强的电流,由于金属材料存在电阻,会释放出大量焦耳热从而达到加热自身的目的,这样就可以先把板坯放置在合适的模具位置上,通电加热和冲压成形在同一位置完成,从而最大程度地避免温降对热冲压过程的影响。

图1为U形弯曲工序自阻加热冲压装置示意图。弯曲前利用模具两端的电极给金属板料通电加热,当达到一定温度后,凸模下移,如图1中箭头所示,开始弯曲成形,几乎同时工件脱离电极。选择不同的模具,这种方法也适用于拉深、胀形、复合成形等冲压工序。金属自阻加热具有热效率高、设备简单、控制方便、受模具结构影响小等特点,而且加热速度很快,可减小常规热成形工艺中的表面氧化^[10-11]。采用自阻加热方法,只需对模具、夹具进行适当的创新设计,就可以在传统设备上实现热冲压,从而显著降低生产成本。

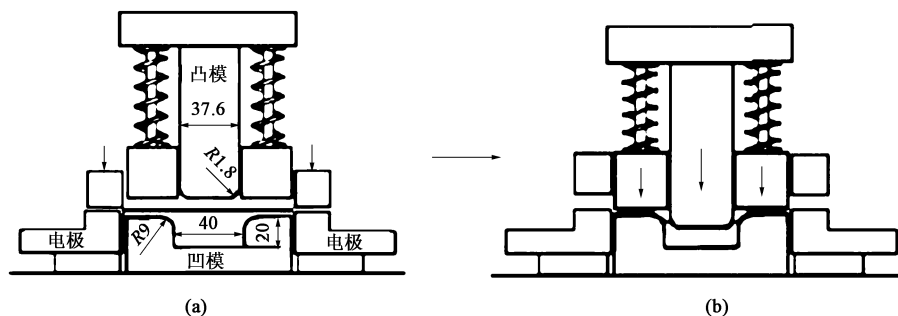


图1 金属U形弯曲自阻加热冲压装置

(a) 通电加热 (b) 成形

Fig. 1 Stamping device by self-resistance heating for U-shaped bending of metal

(a) Electric heating (b) Forming

1.2 自阻加热冲压技术应用探讨

金属自阻加热的重大缺陷是对板坯的形状有一定限制,假如板坯的截面尺寸不同,会造成各部位的加热温度不均匀。通过考察汽车车身上适用于高强度钢热冲压工艺的零件发现,这类零件大部分是承受外力的框架结构件,如图2中深色阴影部位所示,多数是具有U形截面特征但截面尺寸变化的细长梁柱类零件^[1,12]。这类零件应用自阻加热技术进行冲压成形时,可以先下料为长宽比很高的矩形板坯,再用夹具夹持板坯的两端,使之与加热电源的正、负极板相连,通电后板坯中间的大部分区域可以加热均匀,最后选用落料弯曲复合结构的模具进行冲压,既适合自阻加热的特点,又减少了工序数,具有较好的应用前景。

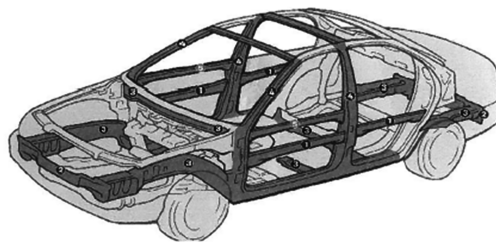


图2 适用于热冲压的车身零件

Fig. 2 Auto-body parts suitable for hot stamping

2 自阻加热冲压工艺验证试验

2.1 自阻加热U形弯曲试验

为了验证自阻加热冲压技术的可行性,北华

航天工业学院购置了 6000 A/12 V 高频开关加热电源, 与液压机配合使用, 构建了金属自阻加热冲压试验平台, 如图 3a、图 3b 所示。利用铜排将加热电源的电流引至液压机工作台的位置, 经计算, 通过 6000 A 的电流需要两块 150 mm×10 mm 的铜排导线, 对铜排导线进行折弯、校正、打孔等工序后, 采用螺栓连接方式完成组装, 板坯的加热温度使用红外线测温仪测量。为了避免局部通电导致过热, 板坯两端与铜排电极之间要紧密连接, 设置了螺栓压板夹具。模具结构与板坯的夹持方式必须整体考虑, 这是自阻加热冲压技术的关键, 采用先切断落料再进行 U 形弯曲的复合结构模具。

U 形件自阻加热弯曲的工艺流程如下: (1) 板坯通电加热: 利用螺栓压板将金属板坯与铜排电极压紧后, 打开高频开关加热电源, 调节输出电流, 用红外线测温仪测量温度, 如图 3a、图 3b 所示, 达到工艺温度并保持稳定后, 停止电流调节; (2) U 形件热冲压成形: 事先将液压机的操控按钮移动至加热电源操控面板附近, 几乎同时按下加热电源停止按钮与液压机下压按钮, 随着上模的下压, 先后完成切断落料和 U 形弯曲工序, 如图 3c 所示; (3) U 形件的取出: 工艺验证试验用模具没有设置工件顶出机构, 热冲压完成后稍作冷却, 使用扳手人工取出工件, 如图 3d 所示。

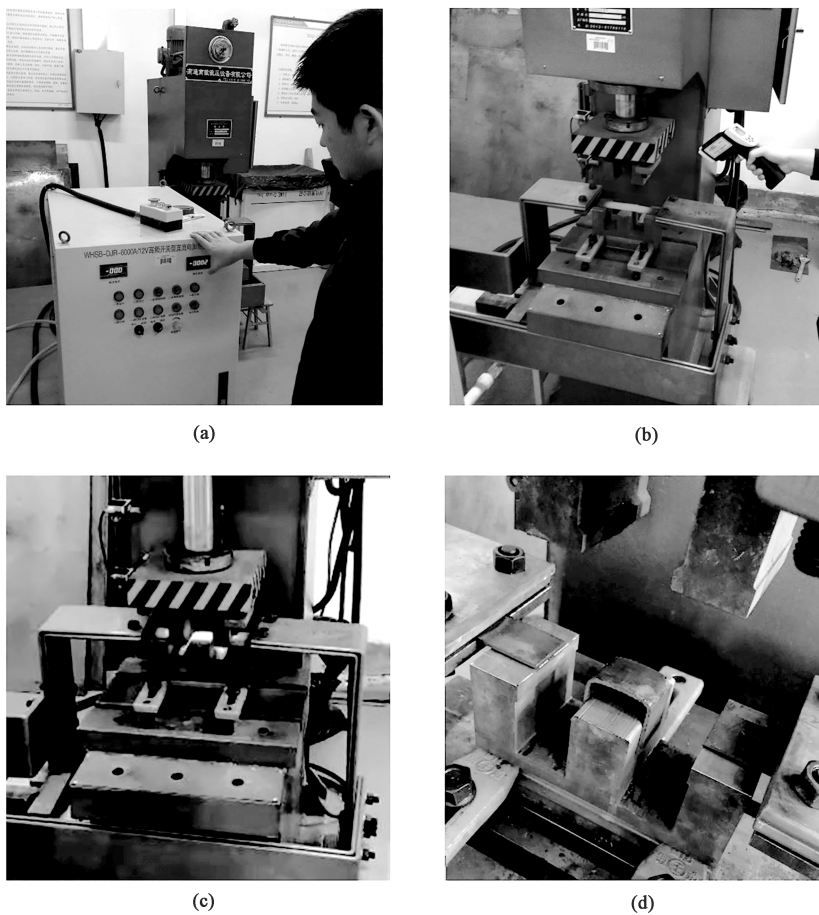


图 3 自阻加热冲压试验过程

(a) 板坯通电加热 (b) 红外线测温 (c) 热冲压成形 (d) 工件取出

Fig. 3 Test process of stamping by self-resistance heating

(a) Electric heating of slab (b) Infrared temperature measurement (c) Hot stamping (d) Workpiece removal

2.2 试验结果与讨论

2.2.1 U 形弯曲试验样件

选用厚度为 3 mm、宽度为 40 mm 的 65Mn 钢板坯进行自阻加热 U 形弯曲试验, 样件如图 4a 所示, 可以看出其弯曲成形性能良好, 没有产生裂纹等缺

陷。经测量, U 形件的底部尺寸为 49 mm、口部尺寸不足 51 mm, 弯曲回弹量比较小。试验样件的成形精度的主要问题是底部不平, 这主要是由于模具结构不合理引起的, 可以通过改进模具结构来消除。

2.2.2 板坯加热温度分布情况

对于热冲压来说，板坯的加热温度分布非常关键，冲压前的自阻加热板坯如图 4b 所示，通过颜色判断大致可以将其分为 3 个区域：（1）1 区与铜排电极相连，范围比较狭窄，由于电流产生的热量被迅速传导出去，加热温度很低；（2）2 区也是一个比较狭窄的区域，这一区域的温度梯度很大，随着与铜排电极距离的增大，温度迅速提高，因此，其颜色变化非常明显；（3）3 区占据板坯的绝大部分，该区域由于热量传导速度减缓，温度比较均匀，经

测量，温差能控制在 50 ℃ 以内。

2.2.3 工件表面氧化情况

图 4a 所示，样件上可以观察到少量氧化皮，而氧化程度主要与加热时间有关。试验过程中发现，通电电流为 1600 A 左右时，一两分钟后板坯中部能保持 950 ℃ 左右的恒温，表明通电放出的焦耳热与辐射到空气中的热量达到平衡，实际操作时可将电流迅速调至 2000 A，观察板料颜色黄亮后再回调至 1600 A，这样可以显著缩短加热时间，减小工件的表面氧化。

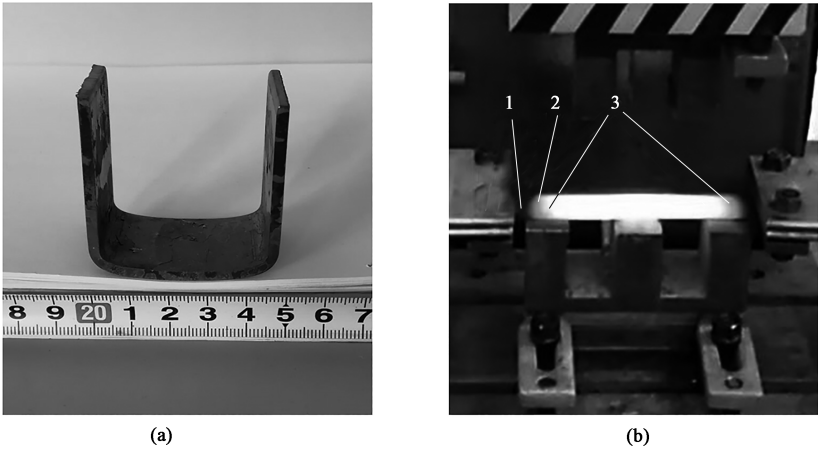


图 4 试验样件 (a) 及板坯加热温度分布 (b)
Fig. 4 Sample piece (a) and temperature distribution in blank (b)

3 高强度钢 U 形梁自阻加热冲压工艺装备

自阻加热 U 形弯曲试验虽然取得了预期效果，但期望目标为应用于汽车产品的梁柱类零件上，试验所采用的工艺装备条件相差甚远，主要表现在以下几个方面：（1）试验用板坯的通电方向与 U 形截面法线垂直，如果成形过程应用细长 U 形梁柱类零件，需要沿 U 形截面法线方向增加板料尺寸，这样对大形零件来说，常规加热电源不能满足要求；（2）试验用板坯通过螺栓压板夹具与铜排电极相连后，整个通电回路均为刚性，如果要冲压成形长度为米级的梁柱类零件，则热胀冷缩伸长量必然会使板坯弯曲，对热冲压过程产生影响；（3）夹具采用螺栓压板方式、模具没有设置顶件机构，导致生产效率很低，不能满足实际工程应用的需要；（4）模具没有设置导向机构、压料机构，会影响工件的尺寸精度。此外，模具没有开设冷却水道，工件不能淬火强化。

为了解决这些问题，设计了一套专门用于细长梁柱类零件的自阻加热冲压工艺装备，下面以高强度钢 U 形截面梁零件为例，说明该装备的组成及结构，其示意图如图 5 所示。热冲压模具 3 安装在液压机工作台 4 上，热冲压模具两侧都设置有电极板夹具 2，左侧电极板夹具通过螺纹连接安装在弹性

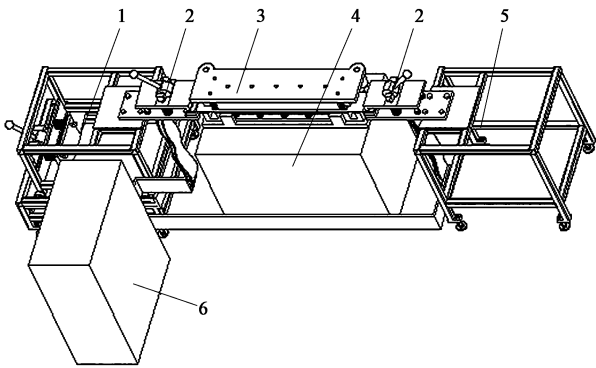


图 5 高强度钢 U 形梁自阻加热冲压工艺装备图
1. 弹性夹具工作台 2. 电极板夹具 3. 热冲压模具
4. 液压机工作台 5. 固定夹具工作台 6. 电源
Fig. 5 Diagram of stamping process equipment by self-resistance heating for high strength steel U-shaped beam

夹具工作台 1 上, 右侧电极板夹具通过螺纹连接安装在固定夹具工作台 5 上, 大电流高频开关加热电源 6 的电流经铜排、铜编织带引入到电极板夹具 2 的底座上。下面详细介绍该工艺装备各部分的结构。

3.1 高强度钢 U 形梁切断弯曲模具

U 形梁切断弯曲模具三维图如图 6 所示, 针对自阻加热冲压的工艺特点, 将高强度钢板坯通电方向设计为沿着 U 形梁的长度方向, 为了提高生产效率, 需要在模具上设置顶出机构 5~8, 这就要求上模下压过程中必须实现工件与电极板夹具夹持的板坯两端部分的切断分离, 模具工作零件的结构设计非常关键, 在上模板 4 两端设置有冲裁凸模 2, 在下模板 9 两端设置有冲裁凹模 3。此外, 为了提高工件精度, 在模具上设置了压料机构 10~12 和导柱导套导向机构 13~14, 为了实现工件淬火强化, 需要在模具上设置冷却系统。下面分别介绍该模具各组成部分的结构。

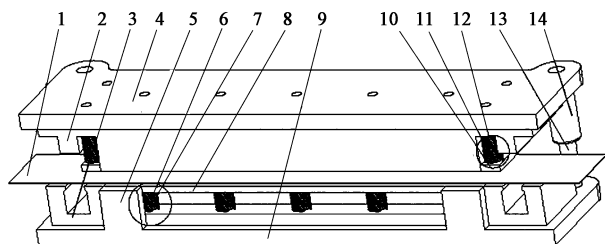


图 6 高强度钢 U 形梁切断弯曲模具图

1. 板坯 2. 冲裁凸模 3. 冲裁凹模 4. 上模板
5、6、7、8. 顶出机构 9. 下模板 10、11、12. 压料机构
13、14. 导柱导套导向机构

Fig. 6 Diagram of cutting bending die for high strength steel U-shaped beam

3.1.1 切断弯曲模具工作零件的结构

高强度钢 U 形梁切断弯曲模具中上模工作零件的结构如图 7a 所示, 下模工作零件的结构如图 7c 所示, 成形后的工件如图 7b 中的 4 所示, 模具的工作过程如下: 板坯的初始位置高于下模上表面 5 mm 左右, 上模下压接触板坯后, 首先上模的 4 个冲裁刃口 1 与下模的 4 个冲裁刃口 6 配合完成切口工序; 随即上模弯曲凹模部分 2 与下模弯曲凸模部分 7 配合完成 U 形弯曲工序; 弯曲工序结束后, 上模继续下压, 位于上模两端的冲裁凸模 3 与位于下模两端的冲裁凹模 8 配合, 将板坯上的两块条料 4 冲裁下来, 这样就实现了板坯与被电极板夹具夹持的一部分板料 5 分离开来。可以看出, 整块板坯会产生 4 和 5 两部分废料, 其中 5 是电极板夹具夹持的部分, 由于与电极板接触, 其温度很低, 也不适合冲压成

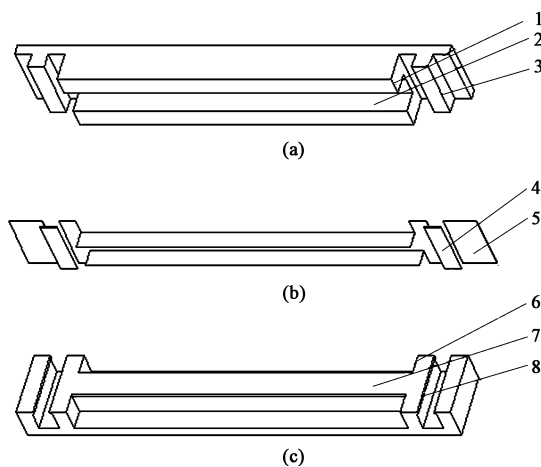


图 7 模具工作零件的结构

(a) 上模 (b) 板坯工件 (c) 下模

- 1、6. 冲裁刃口 2. 上模弯曲凹模 3. 冲裁凸模 4、5. 废料
7. 下模弯曲凸模 8. 冲裁凹模

Fig. 7 Structure of die working parts

(a) Upper die (b) Workpiece (c) Lower die

形, 仅有板坯中间部分经冲压成形得到 U 形梁工件, 但其两端由于工艺原因并未完成弯曲成形, 可以通过后续工序进行去除。

3.1.2 切断弯曲模具的压边顶件机构

U 形件进行冷冲压时, 在回弹张力的作用下, 工件会优先留在凹模内, 但进行自阻加热 U 形弯曲试验时发现: 由于存在热胀冷缩, 冲压完成后工件会紧紧包在凸模上, 比较难取出。为了提高生产效率, 在 U 形梁切断弯曲模具上设置了顶件机构, 该机构同时起到压边的作用, 可以减小回弹, 提高工件的尺寸精度。压边顶件机构的结构如图 8 所示, 在弯曲凸模 4 的两侧设置有弹性压边板 5, 冲压开始后凹模 2 下压, 弹性压边板 5 在弹簧 7 弹力作用下始终压紧工件 3 的两边; 冲压完成后凹模 2 上移,

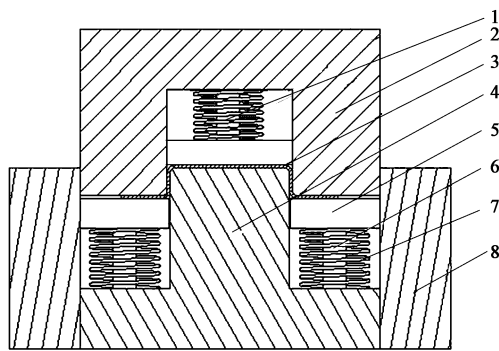


图 8 压边顶件机构的结构

1. 弹性压料机构 2. 凹模 3. 工件 4. 弯曲凸模
5. 弹性压边板 6. 卸料螺钉 7. 弹簧 8. 导向板

Fig. 8 Structure of blank holder mechanism

在弹簧7弹力的作用下,弹性压边板5将工件3从弯曲凸模4上顶出。

3.1.3 切断弯曲模具的弹性压料机构

为了使U形梁的底部更加平整,提高其尺寸精度,如图8所示,在切断弯曲模具的凹模2中设置了弹性压料机构1,其结构与压边顶件机构类似。

3.1.4 切断弯曲模具的导向机构

为了提高切断弯曲模具的导向精度,设置了导柱导套导向机构,如图6中13和14所示。

3.1.5 切断弯曲模具的冷却系统

高强度钢板热冲压工艺中,要求工件在模具上冷却淬火强化,需要在凸模、凹模、压边板上靠近工件的位置开设冷却水道,在热冲压过程中通入循环水冷却。

3.2 专用弹性夹持装置

为了适应细长件自阻加热冲压工艺的要求,设计了专用的弹性夹持装置。首先,在通电回路中引入铜编织带软连接,夹持板坯的电极板通过铜编织带与铜排导线相连,这样电极板夹具就可以移动,对夹具施加一个沿板坯方向向外的拉力,可以解决由于热胀冷缩或自重引起的板坯弯曲问题;其次,为了提高生产效率,电极板夹具采用了凸轮夹紧机构;此外,还需要考虑夹具高度调节和板坯定位问题。整套弹性夹持装置由1个弹性夹具工作台、1个固定夹具工作台和2个电极板夹具组成,如图5所示,下面分别介绍该夹持装置各组成部分的结构。

3.2.1 弹性夹具工作台的结构

弹性夹具工作台的作用是在电极板夹具夹紧金属板坯的同时对板坯施加弹性拉力,其结构如图9所示,分成上、下两部分,下工作台11与地面固定,而上工作台10的4个脚上安装滚轮8,并放置在下工作台11上,这样上、下工作台可以相对左右移动。在下工作台11上设置有凸轮机构,上工作台竖板4与下工作台竖板7通过弹簧5、螺栓6相连。凸轮机构的工作过程如下:向上抬凸轮手柄1,安装在两个凸轮支撑块3上的凸轮2的半径增大,推动上工作台10向右移动,并使弹簧5压缩,安装在上工作台安装板12上的电极板夹具夹紧板坯后,向下压凸轮手柄1,凸轮2半径减小,弹簧5的弹力作用使上工作台10有向左运动的趋势,对板坯施加拉力,用来消除热胀冷缩及重力作用引起的板坯弯曲。另外,热冲压过程中金属板坯需要下移一定距离,当板坯受弹性拉力时,整个通电回路不会受

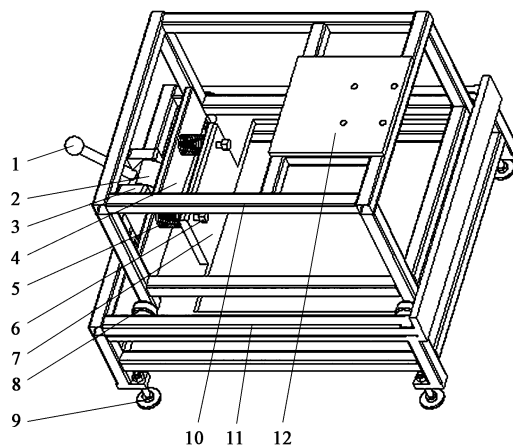


图9 弹性夹具工作台的结构

1. 凸轮手柄 2. 凸轮 3. 凸轮支撑块 4. 上工作台竖板
5. 弹簧 6. 螺栓 7. 下工作台竖板 8. 滚轮 9. 地脚螺钉
10. 上工作台 11. 下工作台 12. 安装板

Fig. 9 Structure of elastic fixture worktable

到很大冲击。

3.2.2 电极板夹具的结构

电极板夹具采用凸轮夹紧机构,其简单、高效,并且能够实现自锁,其结构如图10所示,上压板3套在2个活结螺栓5上,并由压缩弹簧9托起,凸轮7安装在活结螺栓5头部,可绕轴销6自由旋转。当前推手柄1时,凸轮7半径增大,与支撑螺栓4共同作用,驱动上压板3快速压紧板坯;后拉手柄1,凸轮7半径减小,夹紧力消失,压缩弹簧9顶起上压板3,就可以卸下板坯。为了避免上压板3磨损影响夹紧力,在上压板3与凸轮7之间装一块垫板8,磨损到一定程度后可以更换。铜编制带通过螺钉连接在底座2上,这样底座2就作为电极板使用。

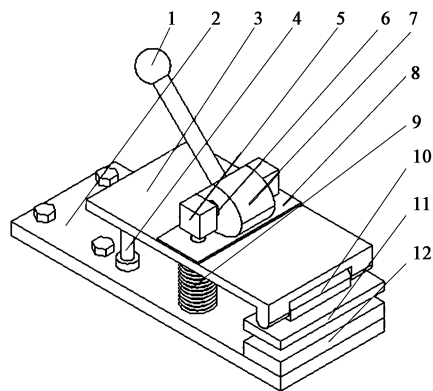


图10 电极板夹具的结构

1. 手柄 2. 底座 3. 上压板 4. 支撑螺栓 5. 活结螺栓
6. 轴销 7. 凸轮 8. 垫板 9. 压缩弹簧 10. 轴
11. 上夹持板 12. 下夹持板

Fig. 10 Structure of electrode plate fixture

上压板 3 与上夹持板 11 可以绕轴 10 旋转, 保证板坯与下夹持板 12 紧密接触。

3.2.3 固定夹具工作台的机构

固定夹具工作台采用简单的框架结构, 如图 5 中 5 所示, 和弹性夹具工作台一样, 在其上表面安装电极板夹具。

3.2.4 夹具工作台位置调节方式

为了增加通用性, 弹性夹具工作台和固定夹具工作台可以通过地脚螺钉调节高度, 如图 9 中 9 所示, 如果需要夹持不同长度的板坯, 他们之间的距离也可以手动调整。

3.2.5 板坯定位方式

为了保证板坯能够快速、准确地放置在电极板夹具上, 在图 10 中的下夹持板 12 上设置活动挡料销来定位。

4 结 论

(1) 由高频开关直流电源提供强电流, 利用铜排导线将电流引至压机工作台附近, 通过螺栓压板的方式使金属板坯与铜排相连, 设计并制造了切断弯曲模具, 选择 65Mn 钢板材进行了自阻加热弯曲试验, 证明自阻加热冲压工艺的可行性。

(2) 将铜编织带软连接引入通电回路, 针对金属细长件自阻加热冲压的特点设计了专用弹性夹持装置, 该装置的弹性夹具工作台由凸轮机构和弹簧压板机构组成, 电极板夹具采用高效的凸轮夹紧机构, 可以快速夹紧、卸下金属板坯, 同时提供弹性拉力, 解决细长板坯由于热胀冷缩或自重引起的弯曲问题。

(3) 针对高强度钢 U 形梁零件, 设计了自阻加热冲压模具, 该模具中间部分完成 U 形弯曲工序, 两端冲裁凸、凹模实现工件与夹具夹持部分的板坯的分离, 与模具中设置的压边顶件机构配合使用, 冲压完成后工件可以被自动顶出, 从而提高生产效率和工件精度。

参考文献:

- [1] 徐伟力, 艾健, 罗爱辉, 等. 钢板热冲压新技术介绍 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (4): 39-43.
Xu W L, Ai J, Luo A H, et al. Introduction of sheet metal hot-forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (4): 39-43.
- [2] 吕萌萌, 谷净巍, 徐虹, 等. 超高强度防撞梁热冲压成形工艺优化 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47 (6): 1834-1841.
- [3] 张施琦, 冯定, 张跃, 等. 新形超高强度热冲压用钢的热变形行为及本构关系 [J]. 材料工程, 2016, 44 (5): 15-21.
Zhang S Q, Feng D, Zhang Y, et al. Hot deformation behavior and constitutive model of advanced ultra-high strength hot stamping steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44 (5): 15-21.
- [4] Mu Y H, Wang B Y, Zhou J, et al. Influences of hot stamping parameters on mechanical properties and microstructure of 30MnB5 and 22MnB5 quenched in flat die [J]. Journal of Central South University, 2018, 25 (4): 736-746.
- [5] 尚欣, 周杰, 卓芳, 等. 超强度钢热成形车身零件性能的研究 [J]. 汽车工程, 2016, 38 (3): 380-384.
Shang X, Zhou J, Zhuo F, et al. A research on the performance of auto-body parts made of hot-formed ultra-high strength steel [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (3): 380-384.
- [6] 薛克敏, 孙大智, 李萍, 等. 22MnB5 超高强度热冲压成形工艺及试验 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (12): 1498-1511.
Xue K M, Sun D Z, Li P, et al. Hot stamping forming processes and experiments of 22MnB5 ultra-high strength steels [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28 (12): 1498-1511.
- [7] 郝亮, 朱国明, 闻玉辉, 等. 超高强度硼钢 38MnB5 的热冲压工艺研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49 (4): 817-823.
Hao L, Zhu G M, Wen Y H, et al. Study on hot stamping process of 38MnB5 ultra high strength boron steel [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2018, 49 (4): 817-823.
- [8] Yanagimoto J, Izumi R. Continuous electric resistance heating-Hot forming system for high-alloy metals with poor workability [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 3060-3068.
- [9] Li M Q, Chen Y Y, Chen D J. Electric field modification during superplastic deformation of 15 vol% SiCp/LY12 Al composite [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 73: 264-267.
- [10] Mori K, Maki S, Tanaka Y. Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating [J]. Annals of the CIRP, 2005, 54 (1): 209-212.
- [11] Mori K I. Smart hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: 496-503.
- [12] 王敏, 张春, 张宇, 等. 汽车高强度纵梁热冲压试验研究 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (3): 391-397.
Wang M, Zhang C, Zhang Y, et al. Experiments on hot stamping of car carling of high strength steel [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (3): 391-397.