

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.02.017

超高强钢管气压热成形设备的研究开发

王贵桥, 李建平, 孙 涛, 赵安石
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为了满足超高强钢管气压热成形工艺研究的需求, 基于高气压热成形原理, 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室自主设计开发了一套超高强钢管气压热成形设备. 该设备利用电阻加热方式对管坯温度进行精确控制, 开发了管端部高压密封结构、快速充气系统及液压伺服进给系统; 结合模具内部的循环冷却水路设计, 高温管件在内高压与轴向进给联合作用下成形, 且成形过程中与冷态模具接触被直接淬火, 实现了单工位条件下的管件加热、成形及在线淬火功能. 实验测试表明, 该设备最高充气压力可达 40 MPa 且密封可靠, 温度控制精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 管件充气速度连续可调, 为超高强钢管气压热成形工艺研究提供了可靠的支持.

关 键 词: 热成形设备; 超高强钢管; 热成形; 高气压; 高压密封; 单工位

中图分类号: U 466 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)02-0234-06

Development of Thermoforming Equipment with Inner High Atmospheric Pressure for Ultra-strength Steel Pipe

WANG Gui-qiao, LI Jian-ping, SUN Tao, ZHAO An-shi
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: WANG Gui-qiao, E-mail: wanggq@ral.neu.edu.cn)

Abstract: A set of thermoforming equipment was developed by State Key Laboratory of Rolling and Automation, based on thermoforming with high inner atmospheric pressure theory, to study thermoforming process of ultra-strength steel pipes. The resistive heating was used to accurately control the temperature of the pipes. The high-pressure sealing structure of pipe ends, rapid inflation system and hydraulic servo system were designed. The heated pipes were shaped under the action of both high inner atmospheric pressure and axial feed. By means of the mold inner loop cooling circuit designed, the pipes touched the cold mold and were quenched directly. Therefore, pipe heating, forming and quenching were finished in single-position. The experiment results show that maximum gas pressure reaches 40 MPa with the sealing effect reliable. Temperature control accuracy is $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the inflation velocity can be adjusted continuously. The equipment provides reliable support for the research of ultra-strength steel pipe thermoforming process with inner high atmospheric pressure.

Key words: thermoforming equipment; ultra-strength steel pipe; thermoforming; inner high atmospheric pressure; high-pressure sealing; single-position

可持续发展、节约资源和减少环境污染已经成为世界汽车工业的主要发展方向. 对于汽车工业, 车身每减重 10%, 油耗可降低 6%~8%. 因此, 汽车减重能够显著节约能源和提高燃料经济性, 汽车轻量化正成为 21 世纪汽车技术的前沿和热点^[1-3]. 超高强度钢在汽车关键部件的应用, 是减轻车身重量、大幅提高碰撞安全性的重要途径之一; 另一有效途径是“以空代实”的节约型轻量化构件的应用, 如凸轮轴、双层消音器、车身骨架等^[4]. 节能型汽车的发展, 要求把上述两种途径结合在一起, 将轻质超高强度钢加工成具有复杂曲面、薄壁、空心变截面等轻量化结构.

超高强度钢管气压热成形技术是将超高强度钢加热到奥氏体区,然后在模具内利用高压气体对管件进行胀形,最后基于淬火硬化效应,对成形的管件进行淬火处理,获得高强度的薄壁空心管件.相比于传统的液压管成形技术^[5-6],超高强度钢管气压热成形技术具有如下显著优点:①高温成形极大降低材料的变形抗力,对于同类零件,其压力仅为液压成形所需压力的 2%~5%;②利用相变强化机制可获得的强度高达 1 500 ~ 2 000 MPa,而室温成形所能达到的极限强度一般低于 600 ~ 980 MPa.因此,该技术由于在汽车工业的广泛应用前景而受到国内外专家学者的极大关注与研究.目前,国外的超高强钢管气压热成形技术主要有两类方法^[7].一类方法是将管材和模具一起放入加热炉中加热,待管材和模具加热到设定温度后在加热炉中直接成形,成形结束后将工件移至后续工位进行淬火热处理.此方法可以较为准确地控制管材成形温度,但模具在高温条件下因热膨胀出现尺寸偏差而影响成形精度.另一类方法是将管材在模具外用电阻炉或感应方式加热到设定温度,然后快速转移到模具内成形,成形结束后将工件移至后续工位进行淬火热处理,此方法能避免模具的高温膨胀,但管材在转移过程中的温度控制精度无法保证.国内由于受到试验条件的限制,对高气压薄壁管成形技术的研究刚刚起步,且主要集中在铝合金、钛合金等轻质合金的成形研究,关于超高强度钢薄壁管件高气压热成形技术在国内尚未有相关文献报道.

本文基于超高强度钢管气压热成形工艺原理,根据工艺要求,研究开发了一套新型的超高强度钢管气压热成形设备,该设备采用单工位工作方式,能够实现管件的在线加热、快速充气、在线淬火功能,为轻质超高强管材的精确成形理论与技术的进一步研究提供了硬件平台.

1 基本原理及工艺流程

高气压热成形技术的基本思想是将高压气体快速通入模具型腔中处于高温状态的管坯,通过高压气体内部加压和管坯轴端两侧的轴向跟进补料把管坯压入到模具型腔内使其成形,成形过程中的管坯通过与具有冷却功能的模具接触实现淬火冷却,最终获得强度高、尺寸和形状精确的薄壁空心零件,其成形工艺原理如图 1 所示.

整个工艺流程为:①将管坯置于胀形模具中间,控制管端两侧的液压缸带动两侧轴向推杆对管坯进行固定与密封;②在管壁上焊接测温用热电偶;③通过压力机进行合模操作,并对模具通入冷却水进行循环冷却;④左、右电极通电对管坯进行加热,达到设定温度后向管坯内部充入高压气体,在充气加压的同时两侧液压缸推动轴向推杆进行送料进给,管坯在内部气压和轴向力的共同作用下快速成形;⑤胀形结束后,保压一段时间使管坯贴模冷却淬火;⑥卸载内部高压气体,打开上模后退回左、右液压缸,取出成形件,成形结束.

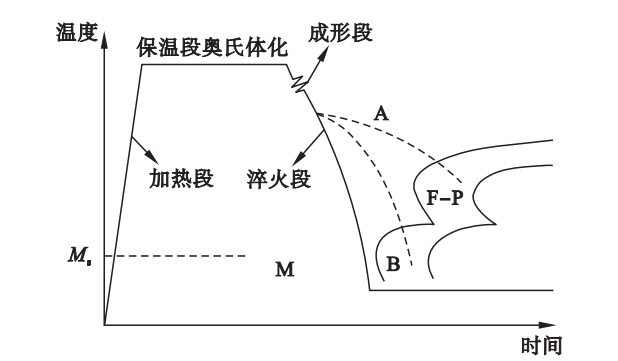


图 1 薄壁管高气压热成形工艺原理图
Fig. 1 Process principle chart of high pressure gas thermoforming for thin-wall tube

2 设备组成与关键技术方法

新开发的气压热成形设备主要由机械系统、管端部密封装置及加热系统、快速充气系统、液压伺服系统及计算机控制系统组成,各系统功能明确且相互协调,基本结构如图 2 所示.

2.1 机械系统

机械系统主要包括合模压力机和模具.合模压力机采用 100 t 压力机,用于成形过程中上、下模具的合模压紧.模具兼备管件成形和在线淬火功能,因此对模具内部结构进行了特殊的循环冷却水路设计.水路均匀布置于型腔周围,可有效均匀地对上、下模具的成形区、过渡区和导向区进行冷却.以下模具为例,其冷却水路布置如图 3 所示,冷却水从 P 口流入,从 L 口流出.

2.2 管端部密封结构及电阻加热系统

针对成形管件内部高压气体的端部密封及管件高精度温度控制问题,特殊设计了成形管端部密封结构以及电阻加热系统,如图 4 所示.

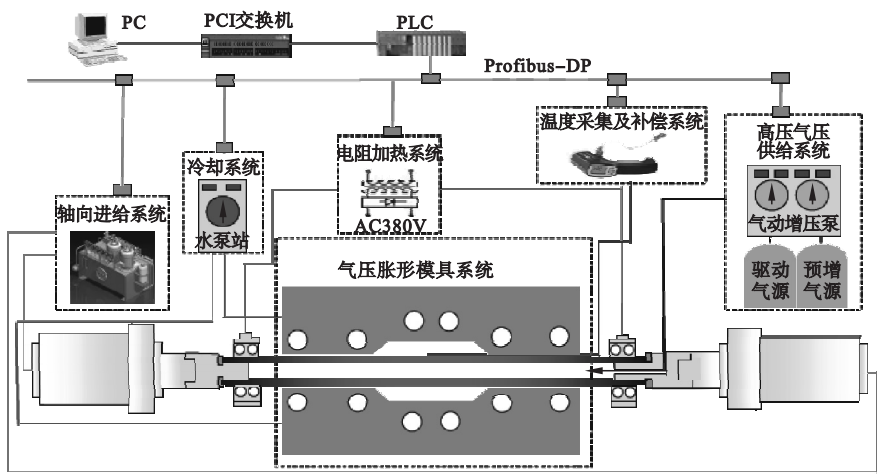


图 2 设备基本结构图
Fig. 2 Basic structure of the equipment

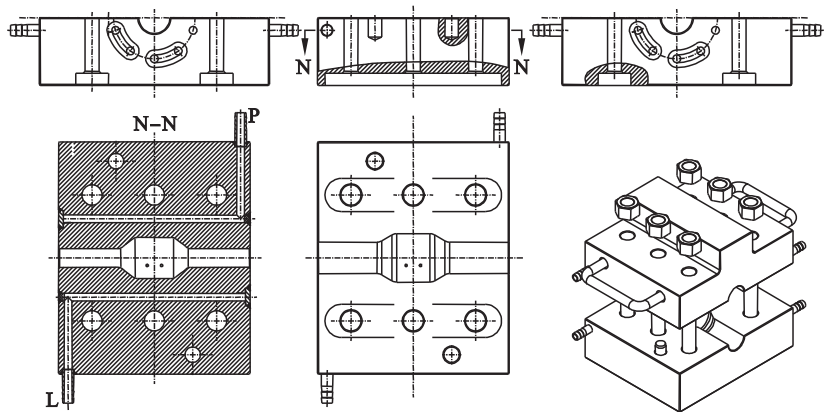
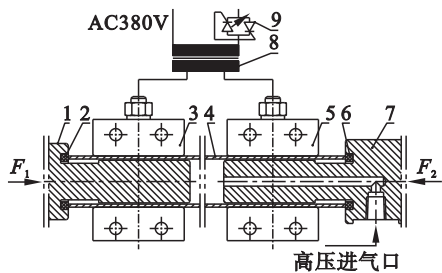


图 3 模具冷却水路布置图
Fig. 3 Cooling waterway layout of mold



1—左轴向推杆; 2—左密封件; 3—左导电铜排;
4—成形管件; 5—右导电铜排; 6—右密封件;
7—右轴向推杆; 8—变压器; 9—可控硅;
 F_1 —左液压缸推力; F_2 —右液压缸推力

图 4 管端部密封结构及电阻加热系统
Fig. 4 Sealing structure at the pipe ends and resistive heating system

2. 2. 1 管端部密封结构

气压热成形过程中,管件端部密封效果关系到成形的成败. 常规密封形式有两种,一种采用焊接的方法,将管两端焊合,再在焊接处开通气管道,这种方式的密封效果良好,但操作起来非常繁琐,需要专用的焊机设备,且管件成形后需要对焊接处进行后续加工处理;另一种是采用盖式或楔

形密封装置,密封材料与工件具有不同的热膨胀系数,从而在加热过程中产生不同变形,使密封装置一直紧贴工件以保证密封效果,这种密封结构相对较为复杂,且密封材料成本较高.

本文开发了一套专有的进气及密封装置如图 4 所示,成形管件加热到设定温度后,高压气体通过右轴向推杆的高压进气口进入到成形管件内腔,在左轴向推杆及右轴向推杆端面专门设计密封用沟槽,沟槽内置入密封件(材质为聚四氟橡胶圈或紫铜垫),在左、右液压缸的推力下,成形管件端面与密封件可靠压紧,密封件在沟槽内受到沟槽的径向约束,从而实现成形管件端面的高压密封.

2. 2. 2 电阻加热系统

变压器次级输出端通过电缆线与导电铜排相连接,导电铜排通过夹紧机构固定于管坯两端,形成电流回路. 管坯温度可通过焊接于管坯外表面的热电偶进行测量,变压器次级输出电流可通过功率调节器根据温度偏差进行调节,从而实现温度闭环控制.

2.3 高压快速充气系统

本文提出的在线加热、在线淬火的成形设备具有温度控制精度高、单工位效率高等特点;但在管材充气成形过程中,如果充气速度慢,那么随着时间推移,管材温度不断下降,变形抗力随之升高,尤其当成形区中心部分的管材率先贴模后,管材的温度急剧下降,使得过渡区的管材难以继续胀形,最后得到的零件不能与模具型腔完全贴合,所以必须提高充气速度,缩短胀形时间以减少温降对胀形程度的影响.然而,过快的充气速度又容易使高温状态下的管壁过度减薄甚至破裂,因此,

充气速度是本设备在成形过程中需要研究的一个重要工艺参数.本文设计了一套高压充气装置,如图 5 所示.其中,压力变送器 2 直接连接到管件入口处,能够准确测量管件内压力状态.在对管件充气之前,首先将高压气体充入高压气罐中;在对管件充气时,高压气罐中的气体能够快速排出,满足快速充气的需求,充气速度的快慢由节流阀进行调整.三个高速开关阀相互配合,能够完成管件充气、停止充气、管件内气体排空、拆卸管件以及气罐内气体排空等工序.

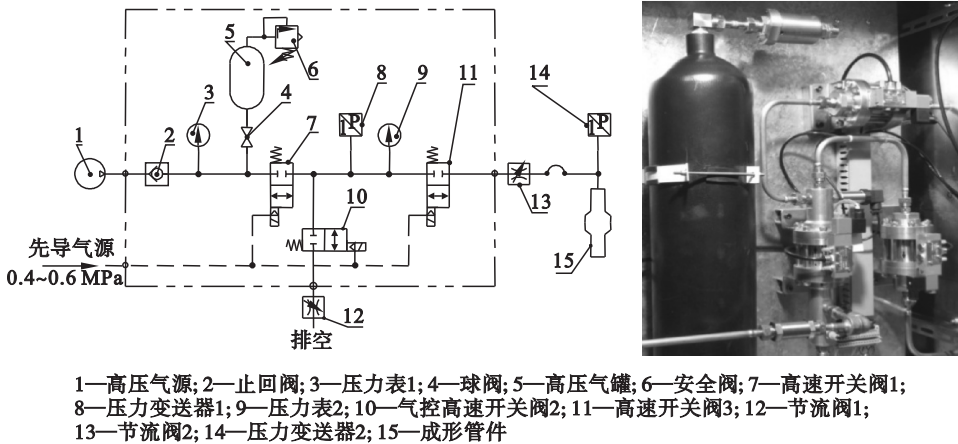


图 5 快速充气系统
Fig. 5 Rapid inflation system

2.4 液压伺服轴向进给系统

内压成形是在内压和轴向进给联合作用下的复杂成形过程.当内压过高时,工件会出现壁厚过度减薄甚至开裂;轴向进给过大,会引起管件弯曲或起皱;轴向进给太小,会引起补料不足而导致成形区管壁过薄甚至破裂或者管件端部密封失效^[8-9].因此,在管材成形过程中要使管件的加载受力处在既不起皱又不破裂的区域,这个区域是轴向进给力与成形内压力的最佳匹配区间.如图 6 所示,3 条线将整个区域分为 4 部分:A, B, C, D.其中, A 区的管坯处于弹性范围内,称为弹性区域; B 区的管坯胀形气体压力过高,称为开裂区; C 区称为起皱区域;只有当管坯胀形气体压力和轴向应力关系处于 D 区时,才能确保管材在发生塑性变形时既不起皱又不破裂,称 D 区为胀形区间^[10].

安装油压传感器.液压缸内置 MTS 位移传感器,因此通过调节伺服阀的输入控制量,能够分别实现液压缸精确的力控制和位置控制,从而满足气压成形全流程的工艺要求.

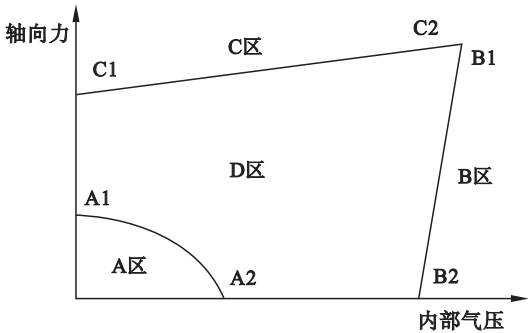


图 6 轴向力和内部气压关系示意图
Fig. 6 Relationship between axial force and internal air pressure

2.5 计算机控制系统

计算机控制系统是成形装备实现各种功能的保障,它主要用来完成管坯的高精度温度控制、液压缸的位置闭环、力闭环控制、完备的数据采集及数据存储等功能,使实验操作过程更加简单、高

因此,需要通过塑性稳定性理论确定内压力与轴向进给的合理匹配区间,并对轴向进给力进行精确的伺服控制,而成形过程中的轴向力控制由液压伺服系统实现,其原理如图 7 所示:液压缸的有杆腔连接恒背压油源 P2,有杆腔和无杆腔都

效、灵活、安全,其控制原理如图 8 所示。

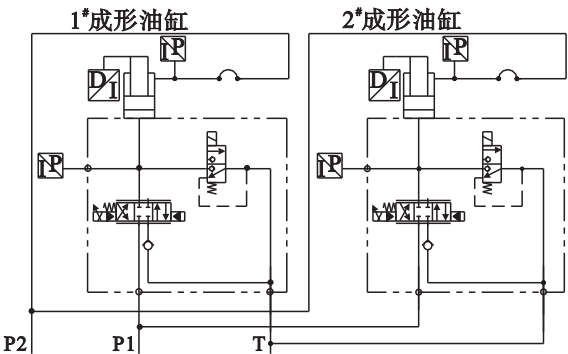


图 7 液压伺服系统原理图
Fig. 7 Schematic diagram of hydraulic servo system

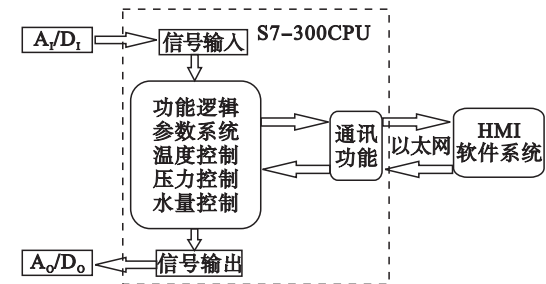


图 8 控制系统结构原理图
Fig. 8 Diagram of the control system structure

3 设备性能指标

实际测试过程及成形管件如图 9 所示。通过对一系列超高强钢管件进行成形研究表明,设备的主要性能指标为:最高气体压力,40 MPa;充气时间(管内容积加管路容积 0.31 L),3 ~ 15 s 连续可调;温度控制精度,±1 ℃;液压缸位置控制

精度,±3 μm;液压缸力控制精度,±0.3 kN;液压缸最快进给速度,单侧 30 mm/s;能够同时对温度、气压、油压及位移等信号进行多通道数据采集并存储,数据存储周期 2 ms。

4 结 论

- 1) 设计的超高强钢管气压热成形设备采用单工位工作方式,能够实现对管件电阻加热胀形后在线淬火。
- 2) 设计的成形管端部密封结构,配合轴向进给动作的液压伺服系统,使得内高压管件的端部密封结构简单可靠、成本低廉,实际应用表明,在成形气压达到 40 MPa 时,密封状况良好。
- 3) 设计的快速高压充气装置,提高了成形管件充气速度,且实现了充气速度的连续可调,能够解决单工位在线淬火所导致的胀形不充分的问题。
- 4) 设备功能考核结果表明:该设备功能齐全、操作方便、安全可靠,具有较高的自动化及信息化水平,能够实现较高的控制精度,并且能够对实验过程中的关键数据进行高速采集和记录,为超高强钢管气压热成形的工艺研究提供了可靠的硬件平台。

参考文献:

[1] Senuma T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets[J]. *ISIJ International*, 2001, 41(6): 520 - 532.

[2] 王利,杨雄飞,陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. *钢铁*, 2006, 41(9): 1 - 8.

(Wang Li, Yang Xiong-fei, Lu Jiang-xin. Development of high strength steel sheets for lightweight automobile[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(9): 1 - 8.)

[3] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科技发展报告(2011—2020) [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 193 - 195.

(Department of Engineering and Materials Science of the National Natural Science Foundation of China. Report on development strategy of mechanical engineering discipline (2011 - 2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010: 193 - 195.)

[4] Blawert C, Hort N, Kainer K U. Automotive applications of magnesium and its alloys[J]. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 2004, 57(4): 397 - 408.

[5] Yuan S J, Liu G, Huang X R, et al. Hydroforming of typical hollow components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 151(1): 203 - 207.

[6] Dohmann F, Hartl C. Tube hydroforming—research and practical application[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 71(1): 174 - 186.

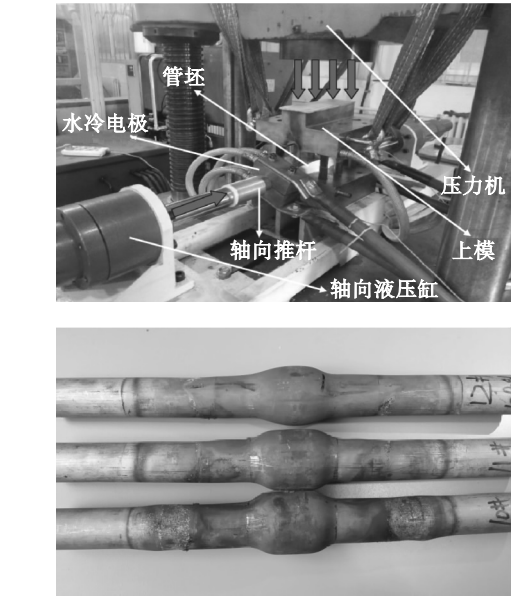


图 9 实际测试及成形管件
Fig. 9 Practical test and the formed pipes