

液压复合成形技术在三通件上的应用

冯苏乐¹, 徐永超², 赵淘¹, 管雅娟¹, 徐爱杰¹

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用液压复合成形技术, 对数控铣削加工三通件进行工艺改进, 针对充液拉深和内高压胀形阶段建立了力学模型, 分析了摩擦系数、拉深比、压边力和胀形力等工艺参数对零件成形的影响。通过对液室压力的数值模拟, 得到在 40 MPa 液压下, 充液拉深后零件的壁厚减薄率最小, 为 27.5%, 壁厚最薄处位于凸模圆角区域; 并通过液压复合成形工艺, 试制出内径为 $SR90$ mm 的三通件, 成形的三通件翻边处最小壁厚为 1.59 mm, 通过了液压强度、气密性能等可靠性考核, 实现了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢球形三通件的整体成形。研究表明, 采用液压复合成形技术, 三通件的研制周期缩短了 8 天, 材料利用率提高了 60% 以上。

关键词: 液压复合成形; 三通件; 液室压力; 充液拉深; 内高压胀形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2018.01.013

中图分类号: TG394

文献标识码: A

文章编号: 1000-3940 (2018) 01-0072-06

Application of hydraulic compound forming technology for tee part

Feng Sule¹, Xu Yongchao², Zhao Tao¹, Guan Yajuan¹, Xu Aijie¹

(1. Shanghai Aerospace Research Institute of Precision Machinery, Shanghai 201600, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The technology improvement of tee part produced by CNC milling was conducted by hydraulic compound forming technology. Then, the mechanical models of hydromechanical deep drawing and internal high pressure bulging were established, and the influences of friction coefficient, drawing ratio, blank holder force and bulging force, etc. on the forming of part were analyzed. When the hydraulic pressure increased to 40 MPa, the thinning rate of wall thickness after hydromechanical deep drawing was the minimum of 27.5% at the punch corner by the numerical simulation of hydraulic pressure. Furthermore, the tee part with a inner diameter of $SR90$ mm was formed by hydraulic compound forming technology, and the minimum wall thickness in the flange of forming tee part was 1.59 mm. Thus, the integral forming of spherical tee part of stainless steel 1Cr18Ni9Ti was realized by assessing the reliability of hydraulic strength and air tightness. The results show that the hydraulic compound forming technology reduces the production cycle of tee part for eight days, and the material utilization is improved up to 60%.

Key words: hydraulic compound forming; tee part; hydraulic pressure; hydromechanical deep drawing; internal high pressure bulging

多通件是运载火箭增压输送系统的重要零件, 承担多路管道的汇集分流作用, 在实际飞行过程中, 承受一定的压力和结构应力, 其成形质量的优劣直接影响到火箭增压输送系统的可靠性。根据现有工艺水平, 多通件目前采用“锻压毛坯+机械铣切”及“半球拉深成形+环向焊接”两种方法制造。由于多通件多为异形薄壁件, 因此, 采用“锻压毛坯+机械铣切”方法, 不仅材料损耗量大、浪费严重, 同时存在加工周期长、效率低下、零件装夹困

难、变形难以控制等问题; 采用“半球拉深成形+环向焊接”方法, 会受到产品结构限制, 仅适用于加工主管与支管分布于半球两侧的多通产品, 且需强制装配焊接, 残余应力大, 而对于支管位置高度超过球体平分线的多通件则无法加工。

由于航空航天飞行器对于结构轻量化要求越来越高, 各种管路结构件在满足强度指标的条件下要求尽可能薄, 因液力成形技术具有柔性化程度高、产品轻量化效果好等优点, 被认为是“21世纪最具发展潜力的塑性成形技术之一”^[1]。哈尔滨工业大学等高校分析了液室压力、补料比等因素对多通管壁厚分布的影响, 采用液力成形技术研制出 T 形三通、Y 形三通等变截面多通件, 实现了消除焊缝、

收稿日期: 2017-07-13; 修订日期: 2017-09-28

基金项目: 上海航天局型号工艺攻关项目 (716A-YZ)

作者简介: 冯苏乐 (1987-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: fengsuleshikeke@sina.com

提高可靠性等有益效果,已在航空航天、汽车等领域得到广泛应用^[2-3]。

1 液压复合成形特点

液压复合成形技术将充液拉深、内高压胀形、整形等工序通过工艺设计集成在一起,是实现多通结构件加工的新技术之一。图1为不锈钢三通件示意图,三通件由一个轴向主管、两个径向支管构成,球面内径为SR90 mm,由原始壁厚为2.5 mm的1Cr18Ni9Ti不锈钢板材成形。

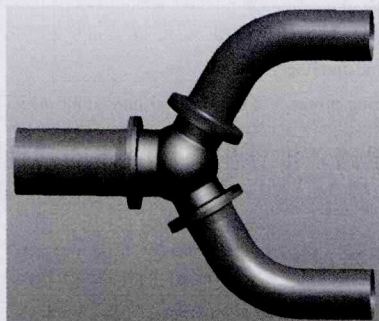


图1 三通件结构

Fig.1 Structure of tee part

图2为该三通件的液压复合成形过程示意图。其中, F 为压边力, P_1 为充液拉深时液室压力, P_2 为胀形时液室压力。液压复合成形过程分为拉深和内高压胀形两个主要部分。为保证成形三通件壁厚分布均匀,需要预成形深腔球底筒形件,再采用内高压胀形成形两个支管。针对该三通件,由于筒形

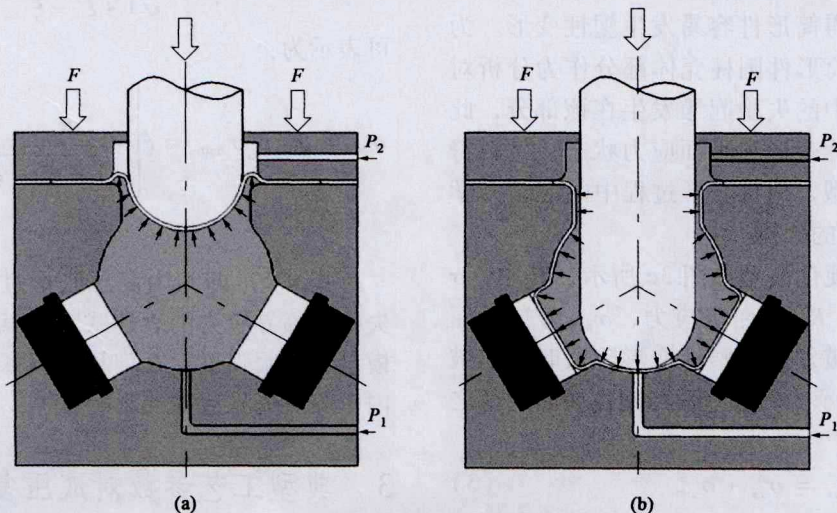


图2 三通件液压复合成形示意图

(a) 充液拉深 (b) 内高压胀形

Fig.2 Sketch map of hydraulic compound forming for tee part

(a) Hydromechanical deep drawing (b) Internal high pressure bulging

件的高径比大,普通拉深无法完成,因此,需要进行充液拉深成形,以改善壁厚分布。

本文将液压复合成形技术应用于运载火箭三通件的成形,主要基于如下分析:(1)因支管型面超过半球1/2,故该三通件无法采用拼焊结构形式,而液压整体成形不受该结构形式的影响;(2)采用机加工工艺,材料浪费严重,单件加工周期长,整体“性价比”不高,相比之下液压复合成形工艺更有优势;(3)采用液压复合成形,产品壁厚均匀,消除了焊缝,并且轻量化效果好。

2 液压复合成形过程受力分析

充液拉深过程的受力分析如图3a所示,在拉深过程中,板料按照材料变形情况可分为5个区域:法兰区、凹模圆角区、侧壁区、凸模圆角区和筒底区^[4]。在法兰区,材料主要受到径向拉应力 σ_r 和环向压应力 σ_θ 作用。若压边圈摩擦系数为 μ ,凹模摩擦系数为 μ_1 ,则正向压力(压边力) F 产生的摩擦力为 $F(\mu_1 + \mu)$,该摩擦力在侧壁上产生的拉应力 σ_f 为:

$$\sigma_f = F(\mu_1 + \mu) / \pi dt \quad (1)$$

式中: t 为筒形件的厚度。

在凹模圆角处,板料受到的摩擦力为 f_1 ,受到的弯曲抗力为 σ_m ,则凹模圆角与侧壁相切处材料受到的径向拉应力为 $\sigma_r = \sigma_f + f_1 + \sigma_m$ ^[5],带入式(1)得:

$$\sigma_r = F(\mu_1 + \mu) / \pi dt + f_1 + \sigma_m \quad (2)$$

在拉应力的作用下,材料主要发生减薄变形,

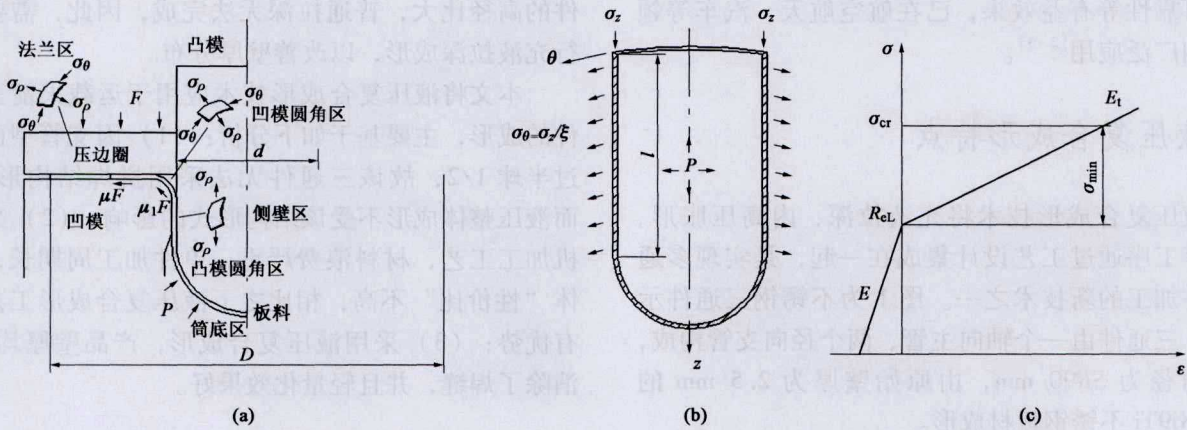


图3 液压复合成形过程的力学模型

(a) 拉深过程力学模型 (b) 胀形过程力学模型 (c) 材料硬化模型

Fig.3 Mechanical models for hydraulic compound forming

(a) Mechanical model for deep drawing process (b) Mechanical model for bulging process (c) Material hardening model

当材料流入凹模后不再发生大的塑性变形。凸模圆角处的材料在变形开始时受到摩擦力的作用产生减薄，而后随着法兰区板料增厚产生一定的缩颈，此时减薄程度较大，并容易产生开裂。充液拉深的流体润滑作用可减小摩擦系数 μ 和 μ_1 ，同时其液室压力 P 的作用可提高凸模圆角处的材料贴模效果，从而有效防止成形过程中的开裂趋势^[6]。

在内高压胀形过程中，当不进行补料时（即不存在轴向应力 σ_z ），零件处于纯胀形状态；而当进给补料和液压胀形联合作用时（即存在轴向应力 σ_z ），可在一定程度上减小零件减薄，但容易产生失稳起皱等缺陷。胀形过程的起皱是在内压和外力的共同作用下产生的，起皱前的应力状态为一拉一压，该应力状态使得筒形件容易发生塑性变形。为方便理论解析，取筒形件圆柱壳体部分作为分析对象，假设胀形过程中的失稳起皱发生在该部分，此时筒形件处于轴对称变形和平面应力状态，材料符合理想线性硬化模型，则将胀形过程中的起皱力学模型做如图3b所示的分析。

胀形过程中的硬化模型如图3c所示，其中， σ 为应力， ε 为应变， R_{eL} 为屈服应力， σ_{min} 为塑性屈曲应力。当失稳起皱发生在塑性变形阶段时，起皱临界应力 σ_{cr} 可以表示为屈服载荷与塑性屈曲载荷之和，即：

$$\sigma_{cr} = \sigma_{zs} + \sigma_{zmin} \quad (3)$$

式中： σ_{zs} 为屈服时的轴向应力； σ_{zmin} 为轴向塑性屈曲应力。

对于塑性屈曲，当把本构方程的起算点设置在线性强化的起始位置时，本构方程为线性形式。

根据这个思路，推导出圆柱壳体的塑性屈曲应力为：

$$\sigma_{zmin} = -\frac{\xi t E_t \sqrt{\frac{1}{3(1-\nu^2)}}}{\xi + \left(\frac{l}{2\pi r m}\right)^2} \quad (4)$$

式中： ξ 为轴向与环向应力比； l ， t ， r 分别为筒形件的长度、厚度和半径； m 为起皱失稳的轴向半波数； E_t 为塑性模量， $E_t = 0.01E$ ； E 为弹性模量； ν 为泊松比。

胀形过程中，零件处于平面应力状态， $\sigma_1 = \sigma_\theta$ ， $\sigma_2 = \sigma_z$ 。由Mises屈服准则可得，零件屈服时的轴向应力为 $\sigma_{zs} = \frac{\xi R_{eL}}{\sqrt{1+\xi^2-\xi}}$ ，则起皱临界应力 σ_{cr} 可表示为：

$$\sigma_{cr} = \sigma_{zs} + \sigma_{zmin} = \xi \left[\frac{R_{eL}}{\sqrt{1+\xi^2-\xi}} - \frac{t E_t \sqrt{\frac{1}{3(1-\nu^2)}}}{\xi + \left(\frac{l}{2\pi r m}\right)^2} \right] \quad (5)$$

式(5)即为内高压胀形过程中零件发生塑性失稳时临界应力的表达式^[7]，其反映了材料的弹性模量、屈服强度、几何尺寸（长度、直径、厚度）、内压等对失稳起皱的影响。

3 典型工艺参数对液压复合成形的影响

3.1 拉深比

拉深比 k 是原始坯料直径与成形零件直径的比值，如公式(6)所示。

$$k = D/d \quad (6)$$

式中： D 为原始坯料直径； d 为成形零件直径。

采用不同直径的坯料进行普通拉深，获得不同深度的筒形件，通过数值模拟分析不同拉深比时的最小壁厚，如图4所示。可以看出：当拉深比为1.6时，材料的减薄率为15%；随着拉深比的增大，壁厚变化越明显，减薄越严重；当拉深比达到2.0时，减薄率达到30%。对于本文的三通件，需要较深的筒形件，拉深比达到2.7，普通拉深无法达到该变形程度，需采用充液拉深成形，通过调节液室压力 P 来控制充液拉深时的壁厚分布，以满足变形程度及壁厚的要求。

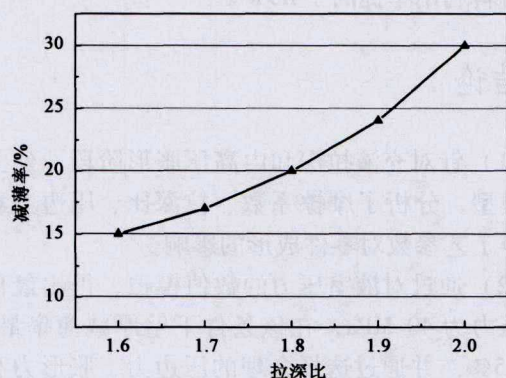


图4 普通拉深时不同拉深比的壁厚减薄率分布曲线

Fig. 4 Thinning rate distribution curve of wall thickness under different drawing ratios in general deep drawing

本文采用充液拉深预成形筒形件，通过数值模拟对不同液室压力条件下的充液拉深过程进行模拟，并对零件的壁厚分布进行分析，其变化趋势如图5所示。从图5中可以看出：当液室压力较小时，随着液室压力的增加，壁厚减薄率下降；当液室压力达到40 MPa时，壁厚减薄率最小，为27.5%，此时最小壁厚为1.81 mm，壁厚最薄处位于凸模圆角区域；当液室压力超过40 MPa时，壁厚减薄率开始逐渐增大；当液室压力达到60 MPa时，壁厚减薄率增大至31.2%，此时最小壁厚为1.72 mm。因此，最佳的液室压力为40 MPa。

综上所述，当零件拉深比较大时，需采用充液拉深预成形筒形件，此时合理的液室压力是成形的关键。

3.2 压边力

压边力 F 是成形过程中的另一个重要参数，它直接影响拉深成形的起皱和开裂。充液拉深时，法兰区材料的下表面受到流体压力的作用。充液拉深的压边力一般大于普通拉深的压边力。在充液拉深

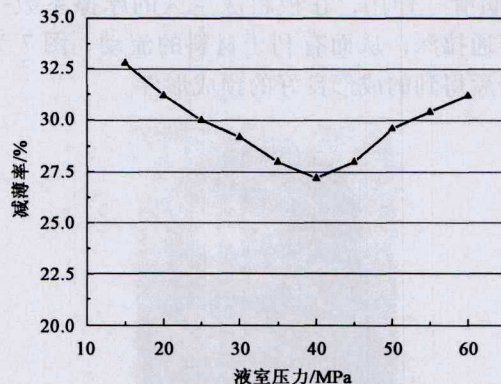


图5 充液拉深时不同液室压力的壁厚减薄率分布曲线

Fig. 5 Thinning rate distribution curve of wall thickness under different hydraulic pressures in hydromechanical deep drawing

过程中，当压边力过小时，会造成法兰处起皱，无法建立起液室压力，如图6a所示；当压边力过大时，会发生如图6b所示的底部破裂。因此，需根据模拟结果及试验，确定一个合适的压边力参数，在该参数条件下，可以有效避免破裂，且此时成形件壁厚减薄率最小。

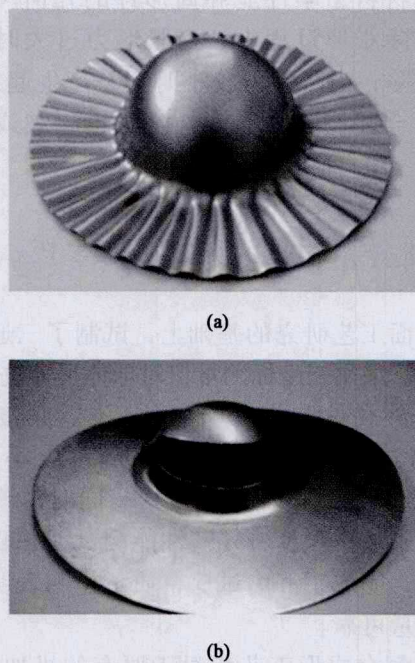


图6 充液拉深过程中的起皱及破裂形式

(a) 法兰起皱 (b) 底部破裂

Fig. 6 Wrinkle and crack in hydromechanical deep drawing process

(a) Flange wrinkling (b) Bottom cracking

3.3 摩擦系数

合理的润滑可以降低拉深过程中的摩擦系数 μ 和 μ_1 ，从而降低开裂的风险。由于充液拉深时存在

“流体润滑”作用,在板料法兰区的摩擦系数一般小于普通拉深,从而有利于材料的流动。图 7 为拉深工步后得到的成形良好的预成形件。

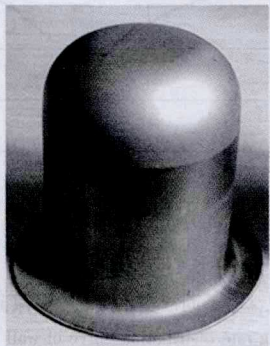


图 7 成形良好的拉深件
Fig. 7 Qualified drawing part

3.4 胀形力

内高压胀形过程中,随着胀形力的增加,筒形件主体部分进入胀形模型腔,渐变成球面贴模,然后在液压作用下成形支管。当胀形过程中同步存在进给补料时,则根据式(5)可知,胀形力的施加受到材料力学性能和筒形件的几何尺寸的影响。在实际胀形过程中,当胀形力过大时容易产生破裂缺陷,当胀形力较小时容易产生起皱失稳,因此,需合理控制胀形力,以防止起皱或破裂产生^[8]。

4 三通件尺寸检验及强度考核

在前面工艺研究的基础上,试制了三通件,如图 8 所示。采用三坐标测量仪对球体尺寸进行检测,得出球体外径偏差为 0.41 mm,支管角度偏差为 5'32",翻边口高度为 71.05 mm,最小壁厚为 1.59 mm,均满足设计图样要求。同时,该三通件顺利通过了液压强度、气密性能测试,并联合装配成组合体,完成了静力试验,质量检测表明,三通件产品质量可靠。

液压复合成形工艺相对于原有的机加工工艺,在质量和效益方面都有明显提高:(1)减少生产周期,采用机加工工艺,涉及“人工划线、校正基准、粗加工、精加工”等工序,单件平均耗时 10 天左右;而液压复合成形工艺,单件从下料、成形、切除工艺余料到最终检测平均耗时仅为 2 天,生产周期缩短了 8 天;(2)提高材料利用率,采用机加工工艺,大量材料被浪费,实际利用率仅为 30% 左



图 8 液压复合成形三通件

Fig. 8 Tee part of hydraulic compound forming

右;而液压复合成形工艺,材料利用率达到 90% 左右,材料利用率提高了 60%。

5 结论

(1) 针对充液拉深和内高压胀形阶段,建立了力学模型,分析了摩擦系数、拉深比、压边力和胀形力等工艺参数对零件成形的影响。

(2) 通过对液室压力的数值模拟,得出最佳的液室压力为 40 MPa,在该条件下壁厚减薄率最小,为 27.5%。并通过选择合理的压边力、胀形力和润滑解决了成形过程中的起皱、开裂问题。

(3) 采用液压复合成形技术,通过充液拉深、内高压胀形、切除工艺余料等工序整体成形三通件,生产周期减少了 8 天,材料利用率提高了 60%。

参考文献:

- [1] Koc M, Altan T. An overall review of the tube hydroforming (THF) technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108 (3): 384-393.
- [2] 包文兵,徐雪峰,戴龙飞,等.等径三通管整体液压成形壁厚分布规律[J].锻压技术,2017,42(4):91-95.
Bao W B, Xu X F, Dai L F, et al. Wall thickness distribution in integral hydroforming for equal T-shaped tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42 (4): 91-95.
- [3] 陈浩,刘钢,苑世剑,等.薄壁 Y 型三通管内高压成形及补料比的影响[J].航天制造技术,2009,(4):1-4.
Chen H, Liu G, Yuan S J, et al. Investigation of hydroforming thin-walled Y-shaped three-way tubes and effects of axial feed ratio [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009, (4): 1-4.
- [4] 王孝培.实用冲压手册[M].北京:机械工业出版社,2002.
Wang X P. Practical Stamping Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [5] 胡世光.板料冷压成形的工程解析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004.

大型厚壁管热挤压成形工艺参数优化

李琚陈

(安徽文达信息工程学院 机电工程学院, 安徽 合肥 231201)

摘要: 以 P91 钢大型厚壁管为研究对象, 基于 Deform-3D 平台建立厚壁管垂直热挤压过程的有限元仿真模型。选取坯料预热温度 T_0 、挤压比 λ 、挤压速度 v 、凹模锥角 β 和摩擦因子 μ 为影响因素, 以最大挤压力 F_{\max} 、成形管平均壁厚 d_{avg} 、模口等效应变均方差 ε_{sdv} 和模口金属流速均方差 V_{sdv} 为衡量指标, 进行虚拟正交试验。通过实际工业生产, 验证了有限元模拟结果的可靠性。研究表明: 影响 F_{\max} , d_{avg} , ε_{sdv} , V_{sdv} 的因素主次顺序分别为: $\lambda > T_0 > \beta > \mu > v$, $\lambda > v > T_0 > \mu > \beta$, $\beta > \lambda > v \approx \mu > T_0$ 和 $v > T_0 > \mu > \lambda > \beta$; 获得尺寸为 $\Phi 720 \text{ mm} \times \Phi 520 \text{ mm} \times 12000 \text{ mm}$ 的 P91 钢大型厚壁管热挤压成形工艺参数的取值范围为: $T_0 = 1150 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 5 \sim 7$, $v = 20 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\beta = 35^\circ \sim 45^\circ$, $\mu = 0.05 \sim 0.2$ 。经过实际工业生产验证可知, 虚拟正交试验得到的工艺参数较为准确、可靠。

关键词: 大型厚壁管; 垂直热挤压; P91 钢; 有限元仿真模型; 虚拟正交试验

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2018.01.014

中图分类号: TG376.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3940 (2018) 01-0077-06

Optimization on hot extrusion process parameters for large thick-walled pipe

Li Juchen

(School of Electromechanical Engineering, Anhui Wonder University of Information Engineering, Hefei 231201, China)

Abstract: For large thick-walled pipe of steel P91, a finite element model of its vertical hot extrusion process was established by the Deform-3D software. The virtual orthogonal experiment was numerically simulated with influential factors of the blank preheating temperature T_0 , extrusion ratio λ , extrusion speed v , taper angle β of die and friction factor μ and with evaluation indexes of the maximum extrusion load F_{\max} , the average wall thickness d_{avg} of forming pipe, the mean square error of equivalent strain ε_{sdv} at die export and the mean square error of metal flow rate V_{sdv} at die export. The reliability of finite element simulation results were verified by actual industrial production. The results show that the significance sequences of influence on F_{\max} , d_{avg} , ε_{sdv} and V_{sdv} are $\lambda > T_0 > \beta > \mu > v$, $\lambda > v > T_0 > \mu > \beta$, $\beta > \lambda > v \approx \mu > T_0$ and $v > T_0 > \mu > \lambda > \beta$, respectively. For the large thick-walled pipe of steel P91 with $\Phi 720 \text{ mm} \times \Phi 520 \text{ mm} \times 12000 \text{ mm}$, the reasonable ranges of forming process parameters are $T_0 = 1150 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 5 \sim 7$, $v = 20 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\beta = 35^\circ \sim 45^\circ$ and $\mu = 0.05 \sim 0.2$. The actual industrial production shows that the process parameters obtained by the virtual orthogonal experiments are accurate and reliable.

Key words: large thick-walled pipe; vertical hot extrusion; steel P91; finite element model; virtual orthogonal experiment

随着国防工业、石油化工、电力等行业的迅速

发展, 对大型厚壁管的需求也与日俱增^[1]。安全问题是核电行业的重中之重, 直接影响核电是否能够大规模使用^[2]。从成形工艺角度分析, 金属在三向压应力状态下挤压成形时获得的厚壁管微观组织更均匀、致密, 安全系数更高; 此外, 管件尺寸较大, 给后期校直工序带来较大困难, 为避免成形管出现

收稿日期: 2017-07-06; 修订日期: 2017-09-21

基金项目: 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2017A650)

作者简介: 李琚陈 (1986-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: cjchwd@163.com

Hu S G. Engineering Analysis of Cold Forming for Sheet Metal [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004.

[6] Xu Y C, Liu X, Liu X J, et al. Deformation and defects in hydroforming of 5A06 aluminum alloy dome with controllable radial pressure [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16 (6): 887-891.

[7] 苑世剑. 现代液压成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

Yuan S J. Modern Hydroforming Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.

[8] 陈名涛, 肖小亭, 刘易凡, 等. 内压和加载路径对并列双支管内高压成形性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (5): 19-24.

Chen M T, Xiao X T, Liu Y F, et al. Effects of the internal pressure and loading path on hydroforming of the parallel arrangement multi-way tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (5): 19-24.