

消音管内高压成形焊缝区胀裂数值分析

刘立君, 王 宇

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对消音管在内高压成形过程中, 焊缝区附近易出现胀裂的问题, 采用数值模拟与实验相结合的方法, 对消音管的内高压成形过程进行了研究. 实验采用 HF1000 内高压成形机进行消音管的内高压成形实验, 并利用 dynaform 软件进行对该实验的过程进行了数值模拟, 实验模拟了消音管在内高压成形过程中焊缝附近的应力分布情况和壁厚的分布情况, 并与实验结果对比验证, 发现使用凹形直线加载路径进行内高压成形实验时, 能够使得到的管件在变形过程中产生的应力最小, 管件的壁厚分布情况最好.

关键词: 焊缝; 加载路径; 壁厚; 应力分布

DOI: 10.15938/j.jhust.2015.02.017

中图分类号: TG39 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2014)06-0091-06

Numerical Analysis of Weld Zone Splitting During Silencer Tube Hydroforming

LIU Li-jun, WANG Yu

(School of Material Science and Engineering, Harbin in University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this paper, the process of silencer tube hydroforming was studied through methods combining of numerical simulation and experimental basing on the problem of splitting near the weld area during inner hydroforming of silencer tube. In the experiment silencer tube hydroforming was finished with HF1000 hydroforming machine, then we used dynaform to do numerical simulation of the experiment process, mainly simulated the distribution of stress near the weld and wall thickness during inner hydroforming of silencer tube. Comparing with the experiment results, we can get quality pipe with least deformation stress and best distribution of wall thickness when using concave linear load path within the hydroforming.

Keywords: weld; load path; wall thickness; the distribution of stress

0 引 言

近些年来,随着汽车和飞机等运输工具的快速

发展,人们已经意识到汽车尾气对环境的污染和对人类健康的影响^[1-3]. 在这种情况下,追求汽车和飞机等运输工具零部件的结构轻量化,用于减少燃料的消耗、汽车尾气的排放,显得尤为重要^[4-6]. 而且

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521111).

作者简介: 刘立君(1968—),男,博士,教授,硕士研究生导师. E-mail: 888liulijun@163.com;

王 宇(1988—),男,硕士研究生.

人们对这些运输工具的零部件的外观也提出了更高的要求,这时,一种新型的管材材料塑性成型的非传统方法的出现解决了这一难题,这就是管材的内高压成形^[7-8]。

管材的内高压成形是将经过预处理的管坯放入模具中,向两端注入高压液体,并通过向管材两端施加轴向压力实现密封和补料,将管材压入到模具的型腔中,使其贴合到模具上,形成所需的零件^[9]。在机械制造领域内,与传统的焊接、铸造等工艺相比较,管材的内高压成形可以使制造出的零件具有刚度大、强度高、提高材料的疲劳度、节约材料、外形美观、结构紧凑和加工工艺少等优点^[10-13]。随着计算机控制技术的发展,以及管件内高压技术已经进入实际阶段,该技术将促进汽车、航空、船舶等制造业的发展^[14-15]。

本文通过用 dynaform 对消音管的成形进行模拟,采用不同的3种加载方式,分析这3种加载方式对消音管成形的影响^[16-18],以及分析了在管件成形过程中,焊缝附近的应力的分布情况,对于管件在内高压成形过程中产生的影响^[19-20]。

1 实验准备

1.1 实验材料

本文所使用的管坯材料为 304 L 不锈钢,直径 38 mm,厚度 1 mm,长度 30 mm。304 L 不锈钢又称为奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9,在室温下呈奥氏体单相组织,其塑性、韧性和屈服比高,有较好的冷成形性能和焊接性。0Cr18Ni9 的主要化学成份如表 1。

表 1 0Cr18Ni9 的化学成分 %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
0.035	1.27	0.45	0.002 7	0.035	17.58	8.13

1.2 几何模型的建立

本文所用的模型,是通过 Solidworks2012 进行绘制,然后导入到 dynaform 软件,在对 dynaform 中进行网格划分和有限元的模拟分析。我们之所以要通过 Solidworks2012 这款软件进行绘制,这是因为 dyanform 软件在进行三维空间建模时,他的运算处理不是很方便、操作复杂,而在 solidworks 完成则比较简单。

1.3 边界条件

在进行有限元分析之前,为了使计算简化,我们对有限元模型作了以下假设:

1) 模具在分析过程中不发生变形等变化,将其

看作刚性体,管坯材料则符合刚塑性硬化曲线模型;

2) 管件模型与模具间的摩擦系数为 0.125,动摩擦系数为 0;

3) 管件两端的轴向力是通过压头加到管件上的,忽略了轴向压头的动力学影响,在进行管件的有限元模拟时,轴向力施加在两端的压头上;

4) 在进行管件的內高压成形时,我们认为內压力时均匀的施加在管件的內表面上的。

1.4 网格划分

对管件的模拟分析时,网格的划分是模拟效果好坏的关键,网格划分尺寸太大,模拟的精度不够准确,实验研究的意义就变得不大;网管划分的过密,运算操作复杂,模拟的时间很长,效率太低,而且也没有必要。所以在网格的划分过程当中要选取适当的尺寸进行划分。本次实验的管坯是在 dynaform 软件中进行的网格划分,使用 Blank Generator 对管件以及两端的冲头进行网格的划分。图 1 为经过 dynaform 划分网格后的消音管和两端冲头的有限元分析模型。



图 1 有限元分析模型

1.5 焊缝的添加

本文选用的管坯是经过 TIG 焊焊接完成的,所以在实际生产的过程中焊缝对管的內高压成形会有很重要的影响,在模拟过程中对管坯添加焊缝十分重要。在 dynaform 软件中,我们常用的添加焊缝的方法是忽略焊缝的类型,只考虑焊缝的位置,将焊缝和热影响区用一排梁单元网格来表示,这种方法的计算效率高,能够准确的模拟出管件內高压成形的过程,体现出焊缝对管材在成形过程中产生的影响,如图 3 所示。

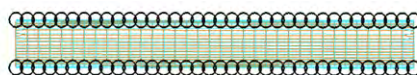


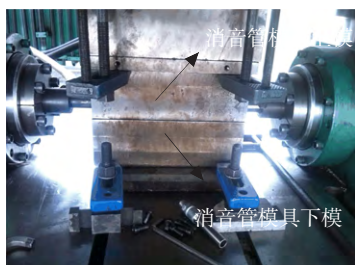
图 2 添加焊缝后的管材

1.6 管材內高压成形的实验设备

本文进行管材內高压的成形实验的仪器设备,采用的是自主研发的 1000T 內高压成形压力机进行內高压实验,如图 3(a)、(b)、(c) 是管材在內高压成形装置的实验过程图。



(a) 内高压成形前的管材



(b) 内高压成形过程中的管材



(c) 内高压成形后的管材

图3 内高压成形实验图

2 实验模拟结果及分析

2.1 管材内高压成形工艺参数

在管材进行内高压成形的过程中,主要的工艺参数,特别是内压的确定,一般是通过试错的方法获得,试错法所获得的数据一般都是由一些简单的公式获得.在进行管材内高压成形过程当中,初始屈服压力 P_{yield} ,纯胀形时的开裂压力 P_{bursting} ,整形压力 $P_{\text{calibration}}$,分别是由以下3个公式估算得:

$$P_{\text{yield}} = \sigma_u \frac{2t_0}{D_0 - t_0}, \quad (1)$$

$$P_{\text{bursting}} = \sigma_a \frac{4t_0}{D_a - t_0}, \quad (2)$$

$$P_{\text{caiculation}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_b \ln \left[\frac{r_b}{r_b - t_0} \right]. \quad (3)$$

其中: t_0 为管材的初始厚度; D_0 为管材的直径; D_a 为管材凸起的直径; r_b 为模具的最小半径; σ_u 为材料的流变应力; σ_a 为材料的屈服应力; σ_b 为材料的极限抗拉强度.

在进行管件的内高压成形过程当中,管件的加载方式和轴向补料量的匹配是零件成形好坏的关键,因为这两个量是变化的量,因此选用适当的加载方式和补料量相当重要.一般进行管件的内高压成形所采用的加载路径,一般分为3种,分别是:凸形折线的内压力加载路径、直线的内压力加载路径和凹形折线的加载路径.本文选用的3种加载路径和补料量的参数如图4.其中在图4当中1号曲线是第一组使用的内压力加载路径,2号直线为第二组使用的内压力加载路径,3号曲线是第三组使用的内压力加载路径.

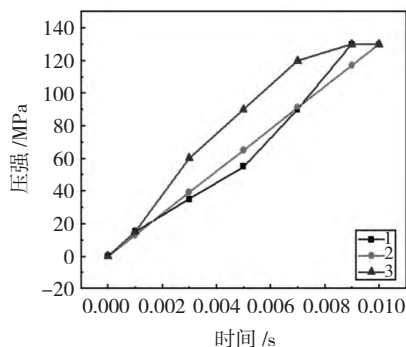


图4 三组内压力加载路径

管件的成形对补料量和成形压力有着严格的要求,补料量太大会使管件严重变形,达不到预期的要求;内压力太大会直接使管件爆裂.所以补料量与内压力的合理选择决定着管件成形好坏.本文在补料量的参数当中选择的是凸形折线的补料量参数,这是因为在管件的内高压成形时,管件在两端堵头推进时,需要材料能够及时地向中间流动,这样才能保证管件在成形时,使得管件的材料不要堆积在管件的两段,这样才能保证管件在胀形的过程中,不会在中间爆裂,所以凸形的折线补料量参数满足实验的需要.第一组、第二组和第三组的补料量参数选用的是图5当中的曲线.

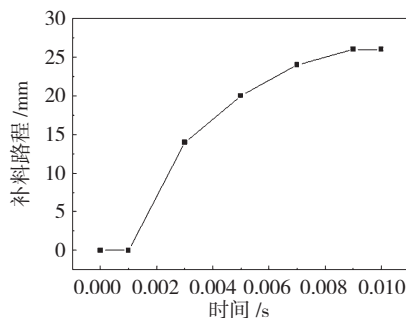


图5 补料量的参数

2.2 内高压成形的有限元分析

2.2.1 动态显示有限元

平衡方程的矩阵形式如下:

$$\sum_{m=1}^n \left\{ \int_m \rho \mathbf{N}^t \mathbf{N} \mathrm{d}v + \int_m \mathbf{B}^t \sigma \mathrm{d}v - \int_m \rho \mathbf{N}^t \sigma \mathrm{d}v - \int_b \mathbf{N}^t t \mathrm{d} \right\}^m = 0, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{N}$ 为差值矩阵; ρ 为材料密度.

σ 为应力矢量. 用以下公式表示:

$$\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}) \quad (4)$$

$\mathbf{B}$ 为应变位移矩阵; $\mathbf{a}$ 为节点加速度矢量, 用以下的公式表示:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{N}, \quad \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{x2} \\ \vdots \\ a_{yk} \\ a_{zk} \end{bmatrix} = \mathbf{N} \mathbf{a}, \quad (5)$$

$\mathbf{b}$ 和 $\mathbf{t}$ 分别为体力载荷矢量和外加载荷, 等于

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

从上面的公式, 可以看出构造和计算总体刚度矩阵是动态显示有限元求解所不需要的, 不用经过迭代, 因而收敛性问题在这种计算时不存在的, 也不必因求解大量繁琐的线性化方程组而降低效率, 所以它能够高效、稳定的获得一个解答. 虽然动态显示有限元的方法是受最小时间步长的限制, 然而在处理接触问题时, 它可以利用最小时间步长来有效地解决这一问题. 所以动态显示有限元求解的方法在处理一些冲压成形的问题时, 计算效率要提高很多. 本文在进行管件内高压成形的模拟实验中, 采用的就是动态显示有限元的方法.

2.2.2 中心差分法

在有限元分析计算时, 假设时间求解域 $0 \sim T$ 被分为 n 个时间间隔 Δt . $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, t + \Delta t$ 时刻的解已经求出, 计算的目的在于求 $t + \Delta t$ 时刻的解.

采用中心差分法, 加速度和速度可以用位移表示为:

$$\ddot{a}_t = \frac{1}{\Delta t^2} (a_{t-\Delta t} - 2a_t + a_{t+\Delta t}), \quad (7)$$

$$\dot{a}_t = \frac{1}{2\Delta t} (-a_{t-\Delta t} + a_{t+\Delta t}). \quad (8)$$

由于 t 时刻的解已求出, 即满足平衡方程:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{a}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{a}} + \mathbf{K} \mathbf{a}_t = \mathbf{Q}_t, \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{a}_{t+\Delta t} = \mathbf{Q}_t - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{a}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{a}_{t-\Delta t}. \quad (10)$$

中心差分法解得稳定性条件是:

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_N}{\pi}. \quad (11)$$

式中 T_N 有限元系统的最小固有振动周期. Δt_{cr} 可由下式进行估算

$$\Delta t_{cr} = \frac{l_{\min}}{\sqrt{\frac{E\rho}{1-\beta v^2}}}. \quad (12)$$

式中: $l_{\min}$ 为最小单元长度, ρ 为材料密度, v 为泊松比, E 为材料的弹性模量.

从上面的公式中可以看出, 中心差分法的计算时间步长是由网格最小单元的边长和对角线长度决定的, 步长的尺寸越小, 会使 Δt_{cr} 越小, 从而会使模拟运算的时间增加. 所以, 在进行实验模拟时, 对于管件的网格划分, 要尽可能的均匀, 尽量不要有过小的网格出现, 这要会减少计算的时间, 也会提高模型的精度, 使模拟进行得更加准确.

2.3 管件焊缝附近胀裂区及管件厚度的模拟实验结果与分析

图 6(a)、(b)、(c) 分别采用图 4 中的 1 号线、2 号线和 3 号线的内压力的加载路径进行的有限元分析, 图 7(a)、(b)、(c) 为采用 3 种加载路径进行的内高压实验成形图.

在进行管件的内高压成形时, 我们选择了 3 种比较有特点的内压力加载路径, 这 3 种加载内压力路径分别为: 凹形曲线内压力加载路径、直线内压力加载路径和凸形曲线内压力加载路径. 从应力云图中可以看出 3 种加载路径成形后的管材, 在焊缝及焊接热影响区中所受的应力相比管材的其他部分较大, 这说明在内高压成形时, 焊缝附近变形较为强烈. 从云图中我们可以看出, 第一组加载路径的成形效果最好, 成形过程中, 最大的应力值为 0.839 796; 第二组的管材所受的最大应力值为 0.889 068; 第三组的管材所受的最大应力值为 1.112 694. 图 7(a) 采用的是凹形曲线内压力加载路径, 由于凹形加载路径前期加载速度缓慢, 这样管件在变形过程中产生的应力就比较小, 而当管件在后期进行胀型的过程中, 管件两端的补料能够及时的补充, 这样就使得管件最终成形完成后, 焊缝附件所受的应力比较小.

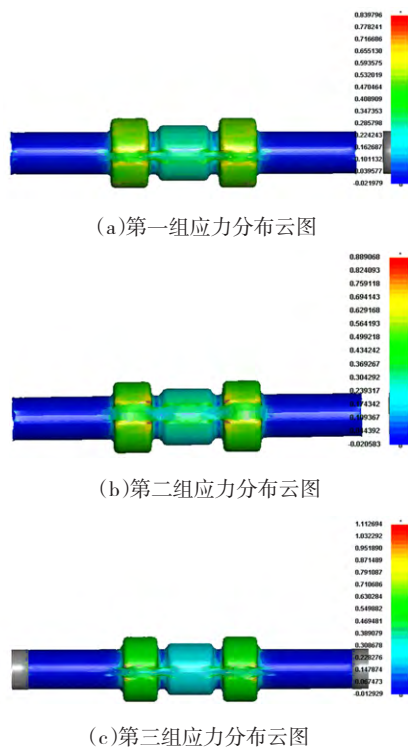


图 6 应力分布云图



(a)第一组实验图



(b)第二组实验图



(c)第三组实验图

图 7 内高压实验成形图

图 7(b) 和图 7(c) 的管件是采用的直线加载路径和凸形加载路径,当使用这两种路径时,由于内压力在管件成形前期加载的速度很快,这就使得管件在成形前期过程中所受的应力比较大,这样在后期成形过程中非常易于在焊缝附近胀裂. 图 7(b) 和图 7(c) 也可以看出,在内高压成形过程中,管材在焊接热影响区附近裂开,这是由于在内高压成形过程中,焊缝附近发生屈服变形,又由屈服变形发生塑性变形,在胀形的过程中应力逐步由焊缝相母材两端向附近扩张,从应力云图我们可以看出,焊缝附近母材所受的应力比焊缝的应力大,而且离焊缝越近,所受的应力值也越大,并且母材的强度也没有焊缝的强度高,所以在管材进行内高压成形时,管材非常易于在焊接热影响区裂开.

采用以上的加载路径进行的模拟厚度云图分布如图 8(a) 、(b) 、(c) .

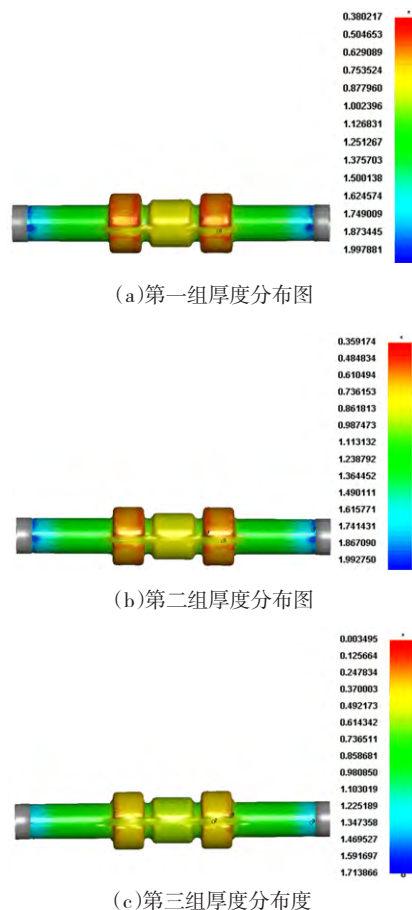


图 8 厚度分布云图

从上面的厚度云图可以看出,第一组采用凹形曲线内压力加载路径的管件成形后的最薄壁厚为 0.380 217 mm,最厚壁厚为 1.997 881 mm,焊缝处的厚度为 1.952 827 mm; 第二组采用直线内压力加载路

径的管件成形后的最薄壁厚为 0.359 757 mm,最厚壁厚为 1.992 750 mm,焊缝处的壁厚为 1.842 289; 第三组采用凸形曲线内压力加载路径的管件成形后的最薄壁厚为 0.003 495 mm,最厚壁厚为 0.476 433 mm,焊缝处的壁厚为 1.713 866 mm. 从数据来看第一组的管件要明显好于第二组管件和第三组管件,这是因为采用凹形曲线内压力加载路径的管件,前期的内压力加载速度较慢,使得在成形过程中,两端的补料能够及时补充,使得管件壁厚的最小厚度值和焊缝的厚度值增大. 而第二组管件和第三组管件,前期加载速度过快,使得在成形过程中管件的补料不能及时的补充,使得管件的最小壁厚和焊缝的厚度减薄. 由此我们可以看出凹形曲线内压力加载路径相比于直线内压力加载路径和凸形曲线内压力加载路径,成形的管件质量较好.

4 结 论

1) 采用了 HF1000 内高压成形机进行消音管的内高压成形实验,并且通过 dynaform 软件对于消音管的内高压成形过程进行有限元分析,模拟了消音管胀形过程中焊缝附近应力的分布,以及管件壁厚的分布情况,通过实验与模拟相结合的方法,分析了消音管在内高压成形过程中出现胀裂的原因.

2) 分析了管材进行内高压成形时,焊缝附近胀裂的原因. 焊缝附近易于胀裂是由于在内高压成形过程中,由于焊缝附近发生屈服变形,又由屈服变形发生塑性变形,在胀形的过程中应力逐步由焊缝相母材两端向附近扩张,而母材在这个过程中受到的应力又大于焊缝受到的应力,而且离焊缝越近,所受的应力值也越大,并且母材的强度也没有焊缝的强度高,所以在管材进行内高压成形时,管材非常易于在焊接热影响区裂开.

3) 分析了内压力加载方式对管件成形的影响. 管件内高压成形的最重要的影响因素就是内压力加载方式,经过实验及模拟的验证,凹形曲线内压力的加载方式能够更容易获得质量好的管件.

参 考 文 献:

- [1] M Altan T. An Overall Review of the Tube Hydroforming (THF) Technology [J]. Journal of Materials processing Technology, 2011, 108 (3): 384 - 393.
- [2] KOYAMA H, MANABE K, YOSHIHARA S. A Database Oriented Process Control Design Algorithm for Improving Deep - drawing performance [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (138): 343 - 348.
- [3] 王同海. 管件胀形工艺分类及其变形力学特征 [J]. 锻压技术, 1999 (4): 30 - 32.
- [4] 陈永侃. 拼焊管内高压成形数值模拟及工艺参数优化 [J]. 安徽: 安徽工程大学, 2013: 1 - 5.
- [5] 黎俊初, 占丽娜, 熊洪森. 异型变径管内高压成形有限元模拟 [J]. 金属锻造焊接技术, 2010, 39: 43 - 47.
- [6] 初冠南, 刘钢, 苑世剑. 差厚拼焊管内高压胀形塑性变形规律 [J]. 金属学报, 2008, 44 (12): 1479 - 1484.
- [7] 程东明, 苑世剑, 安学良. 内压对 Y 型三通管内高压成形影响研究 [J]. 塑性工程学报, 2006, 13 (2): 1 - 5.
- [8] 陈杰. 管材内高压成形数值模拟与工艺研究 [J]. 上海: 上海交通大学, 2013: 1 - 5.
- [9] 张永, 吴利斌, 曲辉. 内高压成形技术及主要影响因素的分析 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (2): 3 - 5.
- [10] 刘玲, 赵慧丽, 孙大字. 各种介质对等径三通复合胀形工艺的影响 [J]. 锻压技术, 2007, 32 (5): 40 - 43.
- [11] 胡忠. 塑形有限元模拟技术的最新进展 [J]. 塑性工程学报, 1994, 3 (1): 143 - 155.
- [12] 王连东, 梁辰, 李文平, 等. 液压胀形汽车桥壳成形理论及其实验研究 [J]. 农业机械学报, 2003, 34 (1): 124 - 128.
- [13] 苑世剑, 王小松. 内高压成形技术研究与应用新进展 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15 (2): 22 - 23.
- [14] 田仲可. 薄壁管无模内高压成形的实验研究和数值模拟 [J]. 青岛科技大学学报, 2005, 26 (3): 242 - 245.
- [15] 周杰, 林乔荣, 曹建国. 直管液压成形工艺模拟及缺陷分析 [J]. 锻压技术, 2007, 32 (2): 39 - 72.
- [16] 郎利辉, 苑世剑, 王仲仁, 等. 防锈铝变径管内高压成形过程数值模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 11 (S2): 211 - 216.
- [17] 韦丽君, 马风雷, 张铁英, 等. 冷挤三通管液压胀形力的分析 [J]. 吉林工学院学报, 2001, 22 (4): 11 - 14.
- [18] 赵长财, 刘助柏. 金属波纹管液压胀形工艺过程中的管坯长度计算 [J]. 锻压技术, 2001, (5): 32 - 33.
- [19] 吴洪飞, 苑世剑, 王仲仁. 内高压成形起皱行为的研究 [J]. 锻压技术, 2001 (5): 29 - 31.
- [20] 杨雨春, 胡国安. 大变形多通管挤压胀形介质的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1999, 27 (5): 85 - 87.

(编辑: 关 毅)