

球形管件多工位冷镦内折叠原因分析与工艺改进

史士鹏, 冀晋辉, 李文奇

(北京新光凯乐汽车冷成型件股份有限公司, 北京 100000)

摘要: 首先介绍作为减震部件内芯的球形管件的多工位冷镦挤成形方式和产品应用, 然后提出球形管件在多工位冷镦生产中遇到的内折叠缺陷问题。为了分析出产品产生内折叠的原因, 对初始成形工艺方案进行有限元模拟分析和成形理论分析。得出镦挤球形部分的材料强度分布不均匀是零件产生内折叠的主要原因。随后通过对实际生产零件的切割取样和硬度测量, 并将硬度值转化为强度值, 得到实际镦挤球形部分的材料强度分布曲线。该曲线验证了理论分析的准确性。最后以理论分析的结论为依据改进成形工艺方案, 并实际生产零件。生产零件没有内折叠缺陷, 达到了保证零件质量并稳定生产的目的。

关键词: 球形管件; 内折叠; 强度分布; 多工位; 冷镦

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.020

中图分类号: TG376.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0138-07

Reason analysis on inner folding and process improvement of multi-station cold upsetting for spherical pipe

Shi Shipeng, Ji Jinhui, Li Wenqi

(Beijing Singu Keller Automotive Cold Forming Parts Inc., Beijing 100000, China)

Abstract: Firstly, the multi-station cold upsetting extrusion forming method and product application of spherical pipe as the inner core of shock absorber were introduced, and then, the problem of inner folding defects encountered in the production of multi-station cold upsetting for spherical pipe was proposed. In order to analyze the reasons for the inner folding of the part, finite element simulation analysis and forming theoretical analysis were carried out on the initial forming process scheme, it was concluded that the non-uniform strength distribution of the material in the spherical part of upsetting extrusion was the main reason for the inner folding of the part. Furthermore, the material strength distribution curve of the spherical part for the actual upsetting extrusion was obtained by cutting sampling and hardness measurement of the actual produced part and the hardness value was converted into strength value. The accuracy of the theoretical analysis was verified by the curve. Finally, based on the conclusion of the theoretical analysis, the forming process scheme was improved, and the parts were actually produced. The results show that the produced parts have no inner folding defects, so as to achieve the aim of ensuring the quality of parts and stabilizing the production.

Key words: spherical pipe; inner folding; strength distribution; multi-station; cold upsetting

1 球形管件特点及应用

简单来说球形管件就是中间鼓起为球形的管型件, 如图 1 所示。球形管件根据中间鼓起球形的形状可分为规则球形管件、椭圆球形管件、V 型球形管件和方球形管件。球形管件的成形方式主要为多工位冷镦挤压成形。多工位冷镦挤压成形是在多工位冷镦设备上, 在室温下使用模具对金属材料施加成形力, 使坯料按预设的形状和尺寸发生塑性变形的成形工艺^[1-3]。该工艺不仅具有零件表面质量好、

尺寸精度高、组织性能好、金属流线连续和材料利用率高的特点, 还具有高速成形的优点^[4-6]。



图 1 球形管件图

Fig. 1 Spherical pipe diagram

收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-11-19

作者简介: 史士鹏 (1988-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: shisp@singukeller.com

球形管件作为标准冷挤压件，被广泛应用于汽车底盘系统中。其主要应用是作为橡胶减震组件的内芯，在安装使用中起到支撑和固定的作用^[7]。橡胶减震组件如图2所示。橡胶减震组件安装时内芯上下平面接触连接汽车底盘背板，中间穿紧固螺丝紧固，外壳连接摆臂杆，达到连接和减震的作用^[8]。



图2 橡胶减震组件图

Fig. 2 Component diagram of rubber damping

2 球形管件内折叠缺陷

图3为球形管件尺寸图，材料为DINEN 10263 C10C钢，生产工艺为多工位冷镦挤压成形。C10C钢材料为常用冷镦用钢，材料的化学成分如表1所示，该材料由于均匀性好、塑性高等特点被广泛应用于生产冷镦冷挤压零件。该零件使用直径 $\Phi 25.3$ mm的原料，下料重量为201 g，材料抗拉强度为367 MPa，伸长率为38%，断面收缩率为74%。

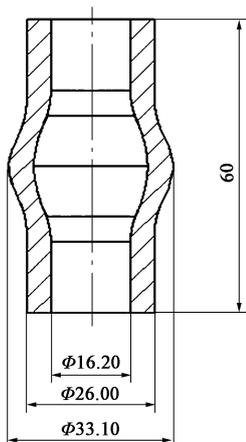


图3 球形管件尺寸图

Fig. 3 Dimension diagram of spherical pipe

球形管件冷镦生产后，纵向切开检查零件发现，零件内部有材料堆积现象，且有折叠现象，如图4

表1 C10C钢材料化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of C10C steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Al
0.08~	≤0.10	0.30~	≤0.025	≤0.025	0.02~
0.12		0.50			0.06



图4 球形管件内折叠现象

Fig. 4 Inner folding phenomenon of spherical pipe

所示。零件的外形尺寸和内孔尺寸均符合图纸公差要求。内孔折叠属于冷镦工艺缺陷，影响零件的强度性能，需要改进冷镦工艺，避免折叠，提高零件强度。

3 球形管件内折叠缺陷产生原因分析

该零件生产时的变形过程图如图5所示，从图5中可以看到，该零件经过5个工位、5次挤压变形，分别为工位1预挤变形、工位2反挤变形、工位3二次反挤变形、工位4剔料、工位5镦挤球形。

3.1 有限元模拟仿真分析

根据零件变形过程图，采用SolidWorks建造各步模具的3D模型和原料模型，把模型导入到Qform软件中进行数值模拟分析。根据实际生产情况设置模拟参数：材料选择C10C钢；设备选择250 t压力机；润滑条件选择油润滑；模具材料选择M2钢。提交模拟计算，各步模拟的平均应力分布结果如图6所示。

从模拟结果中可以看到，前4工位的成形形状的模拟结果与实际生产情况相同。工位5的成形形状模拟结果与实际生产情况不同，模拟过程中中间位置的材料始终向外流动，导致在凸模、凹模合模位置出现溢料，形成一圈高度为2 mm左右的腰带。模拟成形结果与实际生产结果不同，需要更深入地从理论方面分析该零件产生内折叠缺陷的原因。

3.2 成形理论分析

从实际生产结果和模拟结果可知，前4工位的

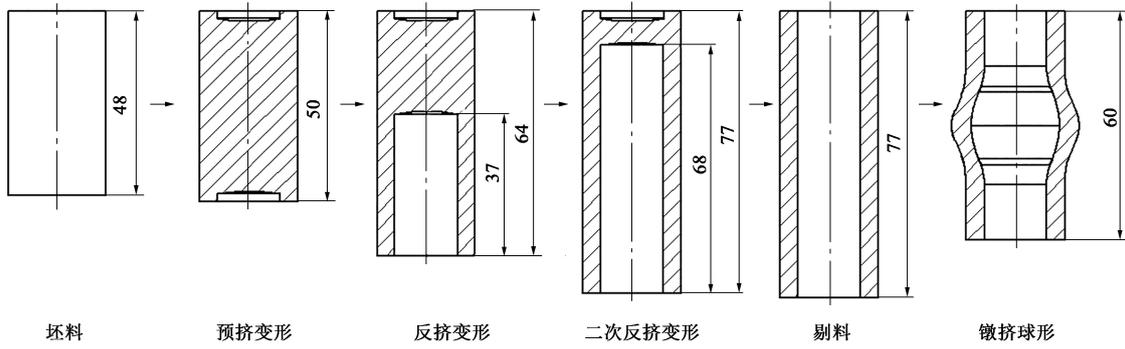


图 5 球形管件变形过程图

Fig. 5 Deformation process diagram of spherical pipe

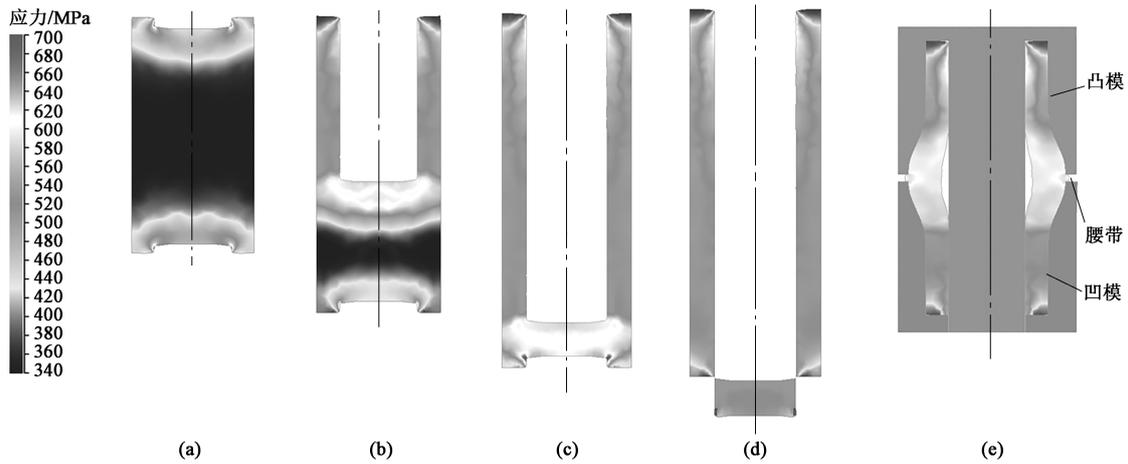


图 6 有限元模拟结果

(a) 工位 1 (b) 工位 2 (c) 工位 3 (d) 工位 4 (e) 工位 5

Fig. 6 Finite element simulation results

(a) Station 1 (b) Station 2 (c) Station 3 (d) Station 4 (e) Station 5

成形形状和尺寸没有问题，内折叠缺陷主要是工位 5 镦挤球形时产生的。需要分析工位 4 零件的特点和性能，以找到零件内折叠缺陷产生的原因。工位 4 零件是经过预挤、反挤、二次反挤、剔料后产生的，由于材料加工硬化特性的存在，每一次变形均会使材料的强度和性能发生变化。工位 1 预挤过程和工位 4 剔料过程中的材料变形很小，只发生局部变形和剪切效应，可以忽略变形影响，认为零件强度不变。工位 2 和工位 3 是反挤深度不同的两次反挤过程。

根据 Dipper 理论，如图 7 所示的反挤变形过程可以当作双镦粗过程来计算^[9]：(1) 从坯料高度 h_0 到反挤后底部厚度 h_1 的轴向镦粗；(2) 在圆周半径方向上，直径 d_1 到壁厚为 s 的径向镦粗。相应的变形程度计算如式 (1)、式 (2) 和式 (3) 所示。

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (1)$$

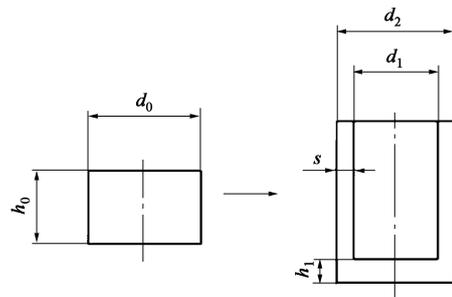


图 7 反挤变形图

Fig. 7 Back-extrusion deformation diagram

$$\varphi_2 = \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot \left(1 + \frac{d_1}{8s} \right) \quad (2)$$

$$\varphi_m = \frac{\varphi_1 d_1^2 + \varphi_2 (d_2^2 - d_1^2)}{d_2^2} \quad (3)$$

式中： φ_1 为轴向镦粗变形程度； φ_2 为径向镦粗变形程度； φ_m 为平均变形程度； d_0 为坯料直径； h_0 为

坯料高度； h_1 为反挤后底部厚度； d_1 为反挤后内孔直径； d_2 为反挤后外径直径； s 为反挤后壁厚。

根据式 (1)、式 (2) 和式 (3) 计算工位 2、工位 3 的变形程度，结果如表 2 所示。

表 2 变形程度
Table 2 Deformation degree

变形程度	φ_1	φ_2	φ_m
工位 2	0.58	0.83	0.73
工位 3	1.13	1.60	1.42

在图 5 中，工位 4 的零件在 77 mm 长度范围内，自下向上，前 37 mm 为工位 2 的成形长度，37~68 mm 为工位 3 的成形长度，68~77 mm 可近似认为是工位 3 的轴向镦粗成形长度。并根据表 2 不同工位的平均变形程度得到工位 4 零件长度方向上的变形程度分布图，如图 8 所示。参考标准德标 VDI 3200 Blatt 2 (1978)^[10] 查到 C10C 钢材料在不同变形程度下的流动应力曲线图。根据材料原始强度为 367 MPa 和工位 4 零件长度方向上每个位置对应的变形程度，在 C10C 钢材料流动应力曲线图中查到工位 4 零件长度方向上每个位置对应的流动应力值。最后根据工位 4 零件长度方向上每个位置对应的流动应力值绘制出工位 4 零件长度位置对应的流动应力分布图，如图 9 所示。

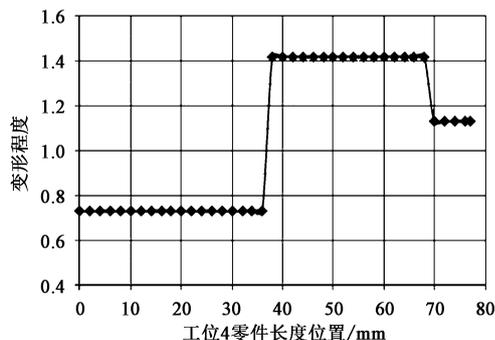


图 8 变形程度分布图

Fig. 8 Distribution diagram of deformation degree

从图 9 可知：工位 4 零件 77 mm 的长度范围内，材料流动应力有 3 个值，分别为 632、763 和 710 MPa；该范围内有 2 个流动应力陡变，分别在 37 和 68 mm 长度位置。

根据材料的流动和变形规律可知，工位 4 到工位 5 变形时，零件两端各有 15 mm 材料不参与球形成形，仅起到支撑作用，即自下向上长度 15~62 mm 范围内的材料参与球形成形。从以上分析可知，15~62 mm 范围内材料有两种流动应力状态，分别为 632

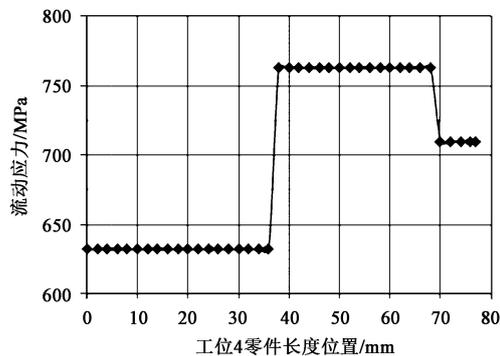


图 9 流动应力分布图

Fig. 9 Distribution diagram of flow stress

和 763 MPa，且变点在 37 mm 长度位置。根据塑性成形力学可知，同等压力下，不同应力强度的材料，其变形速率和变形量是不同的^[11-12]。镦挤球形时，工位 4 零件两端受力，且受力相等，同等的力作用在 15~62 mm 范围内的材料上。由 15~37 mm 范围内材料和 37~62 mm 范围内的材料强度不同，同等受力情况下，两个范围内材料的流动速率不同，致使零件产生内折叠缺陷。由此分析该零件产生内折叠缺陷的主要原因为镦挤球形部分材料的应力强度分布不均匀。

3.3 实验验证

以上理论分析还需要实验验证，零件变形后无法直接检测零件的流动应力，但是当金属材料的流动应力增大时，该材料的抗拉强度也相应的提高^[11]。可以用检测零件抗拉强度的方法间接验证零件流动应力分布不均匀的结论。设计实验检查工位 4 零件在长度方向上强度的分布情况。具体实验方案如下：

(1) 取样：取工位 4 零件，按图 10 所示间隔 90° 切割，取 4 个厚度为 2 mm 的管壁作为检测样本，分别标记为样本 1、样本 2、样本 3 和样本 4，如图 11 所示。

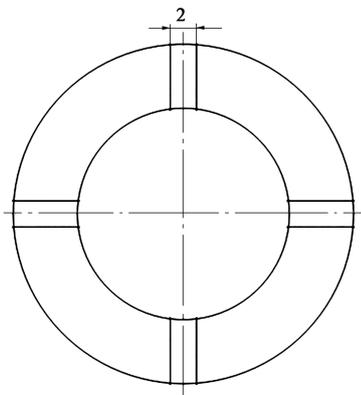


图 10 取样示意图

Fig. 10 Schematic diagram of sampling



图 11 取样结果图

Fig. 11 Sampling result diagram

(2) 标记: 在每个检测样本的壁厚切割面沿长

度方向标记 11 个点, 如图 12 所示。

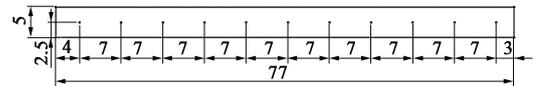


图 12 标记点位置图

Fig. 12 Location diagram of marking points

(3) 检测: 测量每个标记点位置的 HV 硬度, 记录 HV30 硬度结果。

实验结果如表 3 所示, 取 4 个样本相同位置硬度的平均值作为该位置处的硬度测量结果, 用以分析该位置的强度大小。根据标准 GB/T 1172—1999^[13] 转换硬度结果为对应位置的强度结果, 如表 3 所示。对比相同位置的应力计算结果和实验强度结果, 如图 13 所示。

表 3 样本硬度和强度结果

Table 3 Hardness and strength results of samples

位置/mm	3	10	17	24	31	38	45	52	59	66	73
样本 1/HV	189.4	186.9	190.2	191.5	203.5	207.8	213.4	211.1	209.7	211.0	186.5
样本 2/HV	189.6	189.2	190.5	187.6	207.6	209.8	210.0	215.1	213.1	212.2	190.2
样本 3/HV	187.8	190.5	191.6	193.4	210.5	210.3	209.7	208.9	206.5	211.3	185.4
样本 4/HV	188.8	188.4	190.3	192.1	206.3	208.7	204.3	209.8	209.1	208.7	187.3
平均值/HV	188.9	188.8	190.7	191.2	207.0	209.2	209.4	211.2	209.6	210.8	187.4
强度/MPa	652.7	652.2	658.6	660.3	713.5	720.9	721.5	727.8	722.4	726.4	647.5

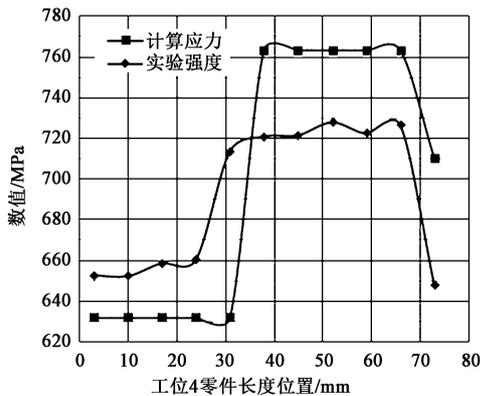


图 13 应力与强度分布曲线对比图

Fig. 13 Comparison diagram of stress and strength distribution curves

从图 13 可以看到, 工位 4 零件的强度分布规律与理论计算应力分布规律基本相同: 工位 4 零件在 77 mm 长度范围内, 材料强度有 3 个稳定范围, 分别是 650~660、710~730 和 640~650 MPa; 该范围内有 2 个强度陡变, 分别在 24~31 mm 长度范围和 66~73 mm 长度范围; 实际零件强度第 1 个陡变发生的位置与理论计算应力第 1 个陡变发生的位置

略有差异, 偏差了 10 mm 左右; 零件强度分布不均匀, 且在 15~62 mm 范围内存在两个明显不同的强度范围。

为了分析工位 4 零件整体的不均匀性, 定义波动函数 R 以评价材料的不均匀状态, R 函数计算表达式如式 (4) 所示。工位 4 零件 R 的函数分布状态如图 14 所示。

$$R_i = \frac{X_i - \sum_{i=1}^n X_i/n}{\sum_{i=1}^n X_i/n} \times 100\% \quad (4)$$

式中: R_i 为单个测量标记点的波动百分比; X_i 为第 i 个单个测量标记点的强度值, $i=1, 2, \dots, n$; n 为测量标记点数。

从图 14 可以看到: 实际强度波动函数 R 的分布规律与理论计算应力波动函数 R 的分布规律基本相同; 实际强度波动函数 R 的范围较小, 基本在 $\pm 4\%$ 以内; 理论计算应力波动函数 R 的范围较大, 基本在 $\pm 10\%$ 以内。

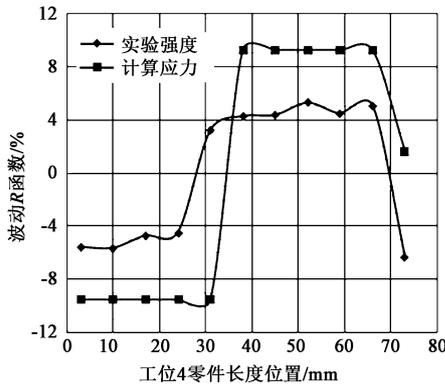


图 14 R 函数分布曲线

Fig. 14 R function distribution curves

通过以上结果分析可知，工位 4 零件实际的强度分布不均匀，且分布规律与计算应力分布规律基本相同，只是不均匀程度没有理论计算应力强烈。基本证明了理论分析的准确性。

4 成形工艺改进

从以上的分析可知，工位 5 零件出现内折叠缺陷主要是由于工位 4 零件中间 15~62 mm 长度范围内的材料的强度不均匀，且有较大的波动。而工位 4 零件产生此状态的原因为工位 2、工位 3 两次反挤的分界点正好在 15~62 mm 长度范围内。调整工位 2 反挤深度到 15 mm，工位 3 反挤深度到 65 mm，优化成形方案。并计算优化后工位 4 零件的变形程度和流动

应力，绘制长度方向的变形程度分布图和流动应力分布图，如图 15 和图 16 所示。从图 15 和图 16 中可以看到，工位 4 零件 15~62 mm 长度范围内的流动应力分布均匀，且没有波动。根据理论计算结果得到的工艺改进过程图如图 17 所示。

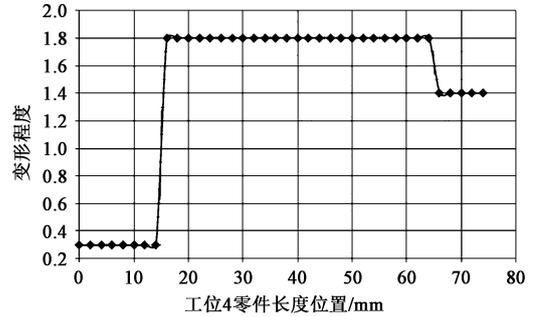


图 15 改进后的变形程度分布图

Fig. 15 Distribution diagram of deformation degree after improvement

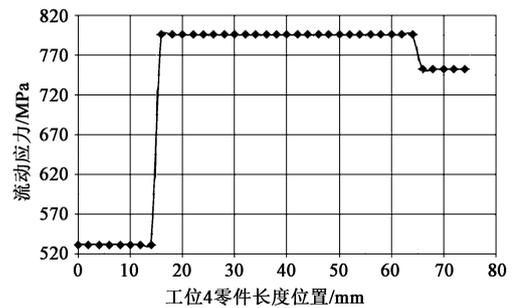


图 16 改进后的流动应力分布图

Fig. 16 Distribution diagram of flow stress after improvement

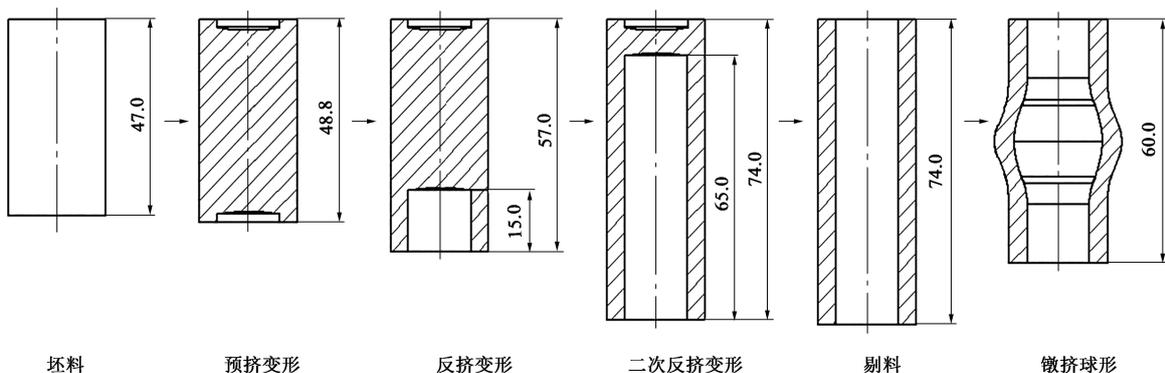


图 17 改进方案变形过程图

Fig. 17 Deformation process diagram of improved scheme

根据改进方案进行实际生产验证，对改进方案工位 4 零件重复进行之前的硬度测量实验并计算强度结果，其强度分布情况如图 18 所示。从图 18 中可以看到：15~62 mm 长度范围内材料的强度基本在 720~735 MPa 范围内，强度分布均匀，

没有较大波动，与理论计算结果基本相同。使用工位 4 零件镦挤球形，成形零件如图 19 所示。从图 19 中可以看零件内孔没有内折叠缺陷，流线连续、无乱流，内孔中间位置为外凸形状，达到工艺改进的目的。

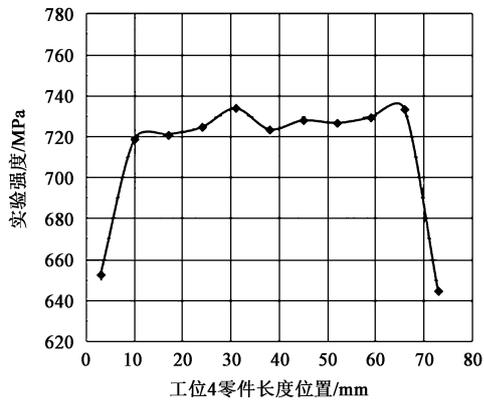


图 18 改进后的强度分布曲线图

Fig. 18 Curve diagram of strength distribution after improvement



图 19 实际零件

Fig. 19 Actual part

5 结语

本文通过发现问题→有限元模拟→理论分析→实验验证的过程,确定球形管件冷镦成形内折叠缺陷产生的原因为镦挤球形部分材料强度分布不均匀,并以此为依据提出工艺改进方案。根据改进方案进行实际生产,生产零件没有内折叠缺陷,达到了解决问题的目的。这对以后类似零件的工艺开发与生产调试有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 赵震,陈军,吴公明. 冷温热挤压技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Zhao Z, Chen J, Wu G M. Cold Warm Hot Extrusion Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.

[2] 宋琼,梁强,付子城,等. 钢丝固定块多工位冷镦成形工艺 [J]. 模具工业, 2019, 45 (3): 54-57.
Song Q, Liang Q, Fu Z C, et al. Design of multi-station cold upsetting process for wire clip [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (3): 54-57.

[3] 詹艳然,廖丹佩. 继电器 Ag-Cu 复合触点冷镦成形过程数值模拟分析 [J]. 模具工业, 2015, 41 (4): 11-15.
Zhan Y R, Liao D P. Numerical simulation analysis on cold heading process of relay with Ag-Cu composite contact [J]. Die & Mould Industry, 2015, 41 (4): 11-15.

[4] 隋毅,梁强. 组合形活塞销冷镦挤成形工艺 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (1): 109-113.
Sui Y, Liang Q. Cold upsetting-extruding process for combination piston-pins [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (1): 109-113.

[5] 梁强. 活塞销冷镦挤成形微折叠缺陷分析及改进措施 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 99-104.
Liang Q. Micro-folding defect analysis and improvement of cold upsetting-extruding process for piston-pin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 99-104.

[6] 林崑,杨明鄂. 汽车法兰带肩螺母多工位冷镦成形工艺试验 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 123-130.
Lin Y, Yang M G. Experiment on multi-station cold heading process for automobile flange shoulder nut [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 123-130.

[7] 项俊男,龚正朋,颜焯熠,等. 汽车减震橡胶衬套预紧挤压滑块与模具结构设计 [J]. 模具工业, 2020, 46 (3): 56-59, 64.
Xiang J N, Gong Z P, Yan H Y, et al. Design of pre-tightening extrusion slider and the die structure for rubber bushing of automobile shock absorber [J]. Die & Mould Industry, 2020, 46 (3): 56-59, 64.

[8] 胡振娴,顾亮. 汽车减震器橡胶连接件静刚度有限元分析 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (6): 309-313.
Hu Z X, Gu L. FEA Technology on static stiffness for shocker mount [J]. Computer Simulation, 2010, 27 (6): 309-313.

[9] Lange K, Kammerer M, Pöhlant K, 等. 卡默勒. 挤压技术: 金属精密件的经济制造工艺 [M]. 杜国辉,赵震,译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Lange K, Kammerer M, Pöhlant K, et al. Extrusion Technology: Economical Manufacturing Process of Metal Precision Parts [M]. Translated by Du G H, Zhao Z. Beijing: China Machine Press, 2014.

[10] VDI 3200 Blatt 2 (1978), Fließkurven metallischer Werkstoffe, Stähle [S].
VDI 3200 Blatt 2 (1978), Metallic material, Steel [S].

[11] 俞汉清,陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
Yu H Q, Chen J D. Principle of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.

[12] 洪慎章. 冷挤压实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Hong S Z. Practical Technology of Cold Extrusion [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

[13] GB/T 1172—1999, 黑色金属硬度及强度换算值 [S].
GB/T 1172—1999, Conversion of hardness and strength for ferrous metal [S].