

# 高强韧钢管热处理前后轴向与周向残余应力分布

翟鹏远<sup>1</sup>, 李峰诚<sup>1</sup>, 侯晓峰<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业新技术推广研究所, 北京 100089; 2. 内蒙古北方重工业集团有限公司, 内蒙古自治区 包头 014030)

**摘要:** 通过测量获得高强韧钢管热处理前后轴向与周向的残余应力分布情况, 评估热处理工艺对钢管性能的影响。研究共选用3根同型号的40CrNi4Mo1V钢管作为研究对象, 其中, 热处理前2根, 热处理后1根。测试采用盲孔法对钢管轴向和周向上共计47个数据点进行钻孔测量, 结果显示, 热处理后钢管的等效残余应力普遍降低。通过统计分析进一步计算了每个测量点的平均值和标准差, 评估了热处理前后钢管在轴向与周向上的等效残余应力分布特征, 发现了热处理后钢管轴向等效残余应力平均值和标准差均有所下降, 揭示了热处理可以一定程度上降低并均匀化钢管中的残余应力, 对钢管的加工制造具有重要意义。

**关键词:** 钢管; 热处理; 残余应力; 轴向; 周向; 统计分析

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.03.011

**中图分类号:** TG115

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2025) 03-0095-07

## Distributions of residual stresses in axial and circumferential directions for high-strength and high-toughness steel pipes before and after heat treatment

Zhai Pengyuan<sup>1</sup>, Li Fengcheng<sup>1</sup>, Hou Xiaofeng<sup>2</sup>

(1. China North Advanced Technology Generalization Institute, Beijing 100089, China;

2. Inner Mongolia North Heavy Industry Group Corp. Ltd., Baotou 014030, China)

**Abstract:** The axial and circumferential residual stress distributions of high-strength and high-toughness steel pipes before and after heat treatment were obtained by measurement to evaluate the influence of heat treatment processes on the performance of steel pipe. Then, for three 40CrNi4Mo1V steel pipes of the same type, including two pipes before heat treatment and one pipe after heat treatment. Furthermore, a total of forty-seven data points in the axial and circumferential directions of steel pipes were drilled and then measured by the blind hole method. The results show that the equivalent residual stress of steel pipe generally decreased after heat treatment. The mean value and standard deviation of each measurement point are further calculated by statistical analysis, and the distribution characteristics of equivalent residual stress in the axial and circumferential directions of steel pipes before heat treatment are evaluated. It is revealed that both the mean value and standard deviation of the axial equivalent residual stress of steel pipe decrease after heat treatment, indicating that the heat treatment can reduce and homogenize the residual stress in the steel pipes to a certain extent, which is of great significance to the processing and manufacturing of steel pipes.

**Key words:** steel pipe; heat treatment; residual stress; axial direction; circumferential direction; statistical analysis

在工程应用领域, 钢管因其高强度和良好的韧性而被广泛应用于各种极端领域。然而, 钢管在制造和加工过程中产生的残余应力会显著影响其性能和寿命。残余应力是材料内部、非外力作用存在的应力, 这些应力可能由冷加工、焊接或热处理等过程引起<sup>[1-2]</sup>。对于钢管而言, 残余应力的存在可能导致其在极端环境下发生过早的失效, 例如屈曲或

断裂<sup>[3-4]</sup>。因此, 准确测量和分析钢管中的残余应力对于确保钢管的服役性能和工艺优化至关重要<sup>[5-7]</sup>。热处理是一种用于改善金属材料性能的常用的方法, 包括残余应力的调整优化<sup>[8-9]</sup>。然而, 热处理对钢管残余应力的影响尚不完全清楚, 特别是在不同热处理条件下。本文旨在通过检测钢管热处理前后轴向与周向残余应力特征, 以期对钢管设计和制造提供科学依据。

## 1 实验材料与方法

本文选用的试验钢管用料为40CrNi4Mo1V钢, 其化学成分如表1所示, 选用的3根钢管的型号、

收稿日期: 2025-01-08; 修订日期: 2025-01-27

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2022208A002)

作者简介: 翟鹏远 (1989-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhaipy@gfc.cn

表 1 40CrNi4Mo1V 钢的化学成分 (%, 质量分数)  
Table 1 Chemical compositions of 40CrNi4Mo1V steel  
(%, mass fraction)

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Fe
0.42	0.15	0.1	0.005	0.005	1.5	3.8	1.1	0.25	0.15	余量

尺寸一致, 外径约为  $\Phi 200 \sim \Phi 250$  mm (变截面钢管), 内孔直径约为  $\Phi 80$  mm, 长度约为 7000 mm。盲孔法残余应力检测系统包括钻孔功能组件、应力检测功能组件和数据采集及分析软件 (图 1)。钻孔功能组件用于在钢管表面钻制小孔, 以释放局部应力, 应力检测功能组件用于记录应力释放前后的位移变化, 数据采集及误差修正软件则用于处理数据

并计算残余应力。实验前, 首先对钢管进行表面磨抛处理, 以确保测量点的表面平整且无氧化层。测量点位置则沿钢管轴向和周向均匀分布选取: 热处理前的两根钢管在轴向上分别于两端、1/4 和 1/2 位置选点, 周向则在每个轴颈位置处每旋转  $90^\circ$  选 1 点, 即每根钢管取 20 点; 由于工厂热处理工作的总体进度要求, 本文仅选用热处理后的一根钢管作为对比, 并仅在轴向上均匀选取 7 个点。选点后, 在被测点位周围粘贴电阻应变花, 测量过程中, 钻头以恒定速度钻入应变花中心的钢管表面, 钻孔深度控制在 2 mm, 以保证少于加工余料厚度。钻孔过程中, 应变花实时测量孔周围的位移变化, 并将数据传输至数据采集软件。

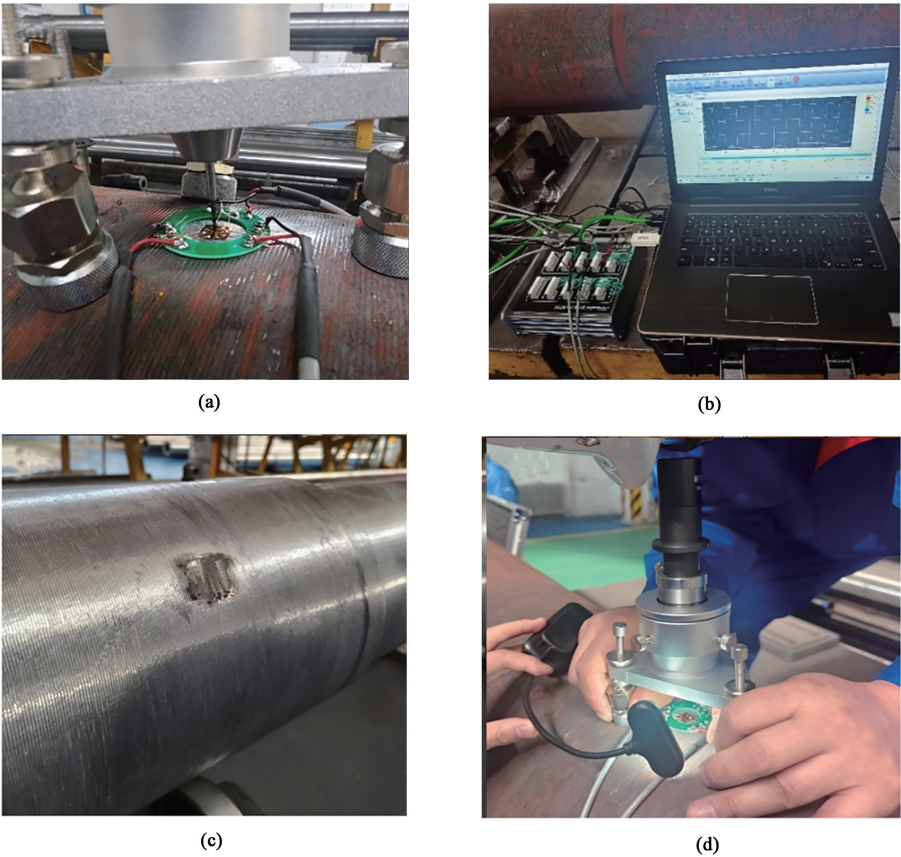


图 1 盲孔法残余应力检测系统  
(a) 钻孔组件 (b) 检测及分析组件 (c) 待测钢管样件 (d) 对中装置

Fig. 1 Residual stress measurement system using blind hole method  
(a) Borehole assembly (b) Test and analysis components (c) Steel pipe sample to be tested (d) Centering device

为了减少环境因素和人为操作引起的检测误差, 本文采用温度补偿和提前预热的方法解决测量过程中因环境因素导致的温漂误差, 采用误差修正软件解决了人为操作引起的钻孔偏心误差<sup>[10]</sup>。其中, 由于厂房环境温度偏低, 钻孔检测时钢管表面应变花的温度难以恒定, 会导致数据采集存

在温漂现象, 对此切割同种材料的小试样作为温度补偿件, 在钻孔测试前, 先选取钢管表面两个相邻测量点处的应变花进行接线预热, 同时对接线的两点同步进行温度补偿, 这样可以在第 1 个测量点钻孔测试时, 节省第 2 个测量点的温度完全调平时间, 待第 1 个测量点测试结束后, 将该

点导线接入第3个测量点处进行温度预热,并钻第2个测量点。依次进行上述操作,可以降低数

据的温漂现象,钻孔结束后数据未出现明显温漂,如图2所示。



图2 钻孔过程残余应力变化趋势显示界面

Fig. 2 Display interface for changing trend of residual stress during drilling process

若操作过程中未钻孔偏心,则等效残余应力值如图2所示,通过数据采集软件中的内嵌公式(1)直接计算得到:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{eq}$  为等效残余应力;  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为残余应力最大主应力和最小主应力,两者均通过钻孔数据平衡后采集获得。

若人为操作引起了钻孔偏心误差,则采用误差

修正软件进行误差修正,如图3a所示,为通过100倍数码摄像显微镜拍摄的实际偏心钻孔点,采用误差修正软件测得该偏心圆孔半径  $a$ 、孔心在应变花  $0^\circ$  轴向偏移量  $d$ ,以及孔心在应变花  $90^\circ$  轴向偏移量  $c$ ,同时将钻孔时取得的实测最大主应力、最小主应力代入误差修正软件内<sup>[11]</sup>,通过式(2)和式(3)可计算获得修正后的最大主应力和最小主应力,再通过等效应力计算公式(1),即可获得误差修正后的等效应力。

$$\begin{cases} a_i = \tan^{-1} \frac{r \sin \xi_i - c}{r \cos \xi_i - b} \\ r_i = \sqrt{(r \sin \xi_i - c)^2 + (r \cos \xi_i - b)^2} \\ \theta_i = \xi_i - a_i \\ \varepsilon_i = A_i(\sigma'_1 + \sigma'_2) + B_i(\sigma'_1 - \sigma'_2) \cos 2\varphi + C_i(\sigma'_1 - \sigma'_2) \sin 2\varphi \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_i = \left( -\frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{a^2}{r_i^2} \cos 2\theta_i \right) / E \\ B_i = \left[ - (1-\mu) \frac{a^2}{r_i^2} \cos 2a_i - \frac{1+\mu}{2} \left( 2 \frac{a^2}{r_i^2} - 3 \frac{a^4}{r_i^4} \right) \cos 2(a_i - \theta_i) \right] / E \\ C_i = \left[ - (1-\mu) \frac{a^2}{r_i^2} \sin 2a_i - \frac{1+\mu}{2} \left( 2 \frac{a^2}{r_i^2} - 3 \frac{a^4}{r_i^4} \right) \sin 2(a_i - \theta_i) \right] / E \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma'_1$  为修正后的最大主应力;  $\sigma'_2$  为修正后的最小主应力;  $\varphi'$  为修正后的最大主应力方向;  $\xi_i$  为第  $i$  应变片的原方位角;  $a_i$  为第  $i$  应变片与偏心圆的参考方位角;  $\theta_i$  为第  $i$  应变片的偏角;  $r$  为偏心圆距应

变花中心距离;  $r_i$  为第  $i$  应变片中心距偏心圆的距离,以上参量通过高倍数码显微镜测量分析获得;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  应变片所获释放应变,通过应变花数据采集获得;  $E$ 、 $\mu$  分别为材料的弹性模量和泊松比。



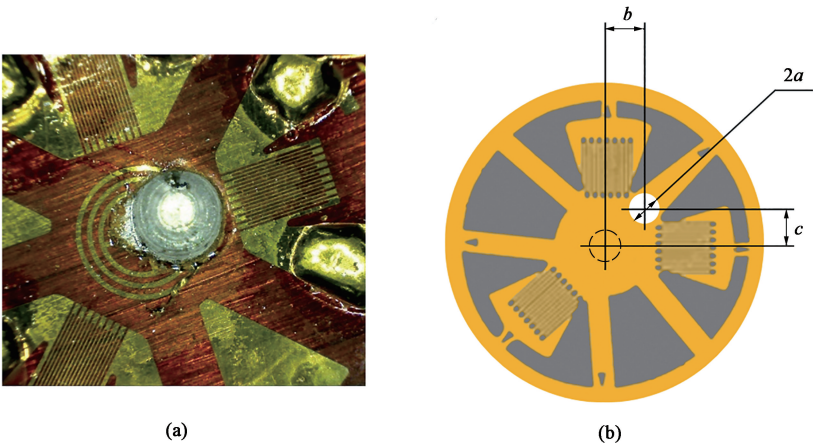


图 3 人为操作引起的钻孔偏心误差

(a) 高倍数码显微镜拍摄图 (b) 误差修正过程

Fig. 3 Drilling eccentricity error caused by human operation

(a) Image taken by high-power digital microscope (b) Error correction process

2 结果与分析

2.1 残余应力测量数据

本文残余应力测量数据分为两大部分，一是热处理前后 3 根钢管残余应力的最大主应力方向，二是热处理前后 3 根钢管的等效残余应力，所有数据均进行了误差修正。其中，图 4 和图 5 为热处理前钢管 1 和钢管 2 所测得数据的最大主应力方向，表 2 和表 3 分别为热处理前钢管 1 和钢管 2 在轴向上和周向上分布的等效残余应力，每根钢管均有 20 个测

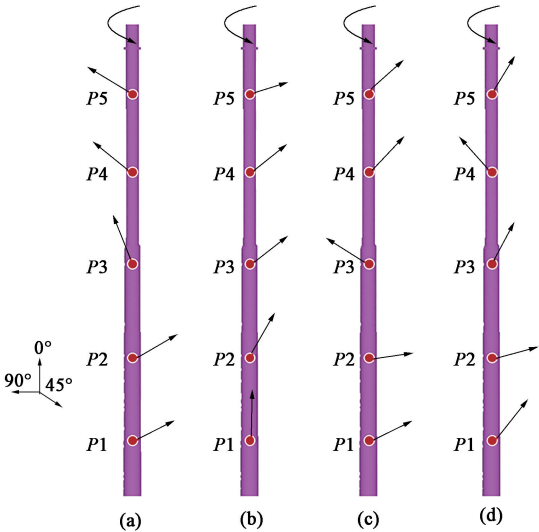


图 4 热处理前钢管 1 的各测点残余应力最大主应力方向

(a) 0° (b) 90° (c) 180° (d) 270°

Fig. 4 Directions of maximum principal stress for residual stress at each measuring point on steel pipe 1 before heat treatment

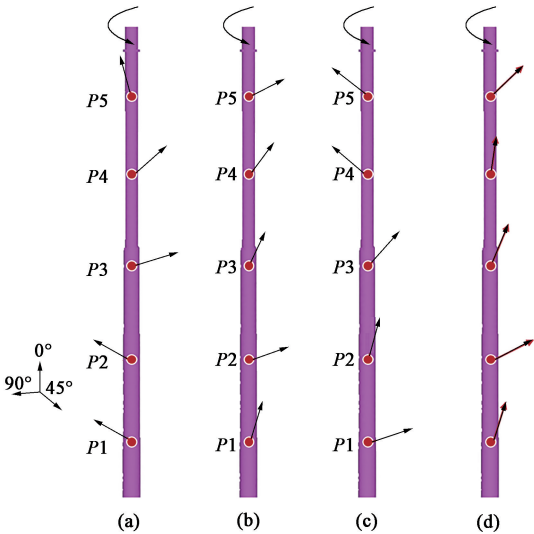


图 5 热处理前钢管 2 的各测点残余应力最大主应力方向

(a) 0° (b) 90° (c) 180° (d) 270°

Fig. 5 Directions of maximum principal stress for residual stress at each measuring point on steel pipe 2 before heat treatment

量点，图 6 为热处理后钢管 3 所测得数据的最大主应力方向，共 7 个测量数据值，表 4 为其轴向分布的等效残余应力。

从等效残余应力测量值可以看出，热处理前两根钢管的等效残余应力检测值范围为 30~550 MPa，其中大多数测量点的等效残余应力数值在 150~300 MPa，头尾部部分测点的等效残余应力超过 300 MPa，在应力较大位置处钻孔时也表现出了硬度较硬的特征，并且热处理前两根钢管的测量点最大主应力方向和等效残余应力分布无明显规律。热处理后等效残余应力检测值范围则处于 143~339 MPa，

表 2 热处理前钢管 1 的等效残余应力值 (MPa)

Table 2 Equivalent residual stress values of steel pipe 1 before heat treatment (MPa)				
测量点	角度			
	0°	90°	180°	270°
P1	184	230	84	228
P2	87	287	160	159
P3	186	282	158	390
P4	430	241	30	118
P5	59	139	297	476

表 3 热处理前钢管 2 的等效残余应力值 (MPa)

Table 3 Equivalent residual stress values of steel pipe 2 before heat treatment (MPa)				
测量点	角度			
	0°	90°	180°	270°
P1	517	324	550	450
P2	163	162	398	168
P3	178	250	64	181
P4	62	302	221	262
P5	66	152	116	221

其中大部分测量点数值在 150 MPa 左右，头尾部检测点最大主应力方向呈现轴向偏离 $\pm(40^{\circ}\sim60^{\circ})$ ，中间检测点的主应力方向则转为轴向方向。

2.2 平均值及标准差分析

为了摸清热处理前后钢管的加工质量，同时方

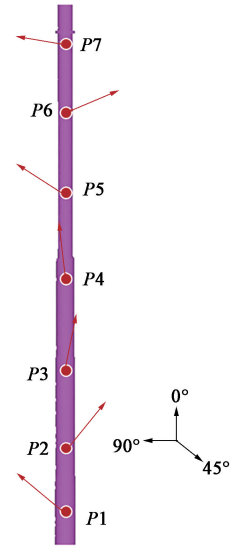


图 6 热处理后钢管 3 的各测点残余应力最大主应力方向  
Fig. 6 Directions of maximum principal stress for residual stress at each measuring point on steel pipe 3 after heat treatment

表 4 热处理后钢管 3 的等效残余应力检测值 (MPa)

Table 4 Equivalent residual stress values of steel pipe 3 after heat treatment (MPa)							
测量点	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
等效残余应力	249	152	143	164	187	339	147

便比较热处理工艺对钢管质量的影响作用。本文对测量收集的数据进行了统计分析，包括分别计算钢管不同轴向、周向以及全部测量点的平均值、标准差等统计参数，分析结果如表 5、表 6 和表 7 所示。

表 5 热处理前钢管 1 各点的等效残余应力平均值及标准差 (MPa)

Table 5 Average values and standard deviations of equivalent residual stress at each point of steel pipe 1 before heat treatment (MPa)										
参数	轴向测量角度				周向测量点					全部测量结果 均值
	0°	90°	180°	270°	P1	P2	P3	P4	P5	
样本平均值	189.2	235.8	145.8	274.2	181.5	173.25	254	204.75	242.75	211.25
样本标准差	146.13	59.55	100.55	153.25	68.38	83.18	105.07	173.32	184.28	121.54
总体标准差	130.70	53.27	89.93	137.07	59.22	72.04	90.99	150.10	159.59	118.46

表 6 热处理前钢管 2 各点的等效残余应力平均值及标准差 (MPa)

Table 6 Average values and standard deviations of equivalent residual stress at each point of steel pipe 2 before heat treatment (MPa)										
参数	轴向测量角度				周向测量点					全部测量结果 均值
	0°	90°	180°	270°	P1	P2	P3	P4	P5	
样本平均值	197.2	238	269.8	256.4	460.25	222.75	168.25	211.75	138.75	240.35
样本标准差	186.62	78.75	202.07	114.31	99.91	116.86	77.05	105.17	65.19	144.13
总体标准差	166.91	70.44	180.74	102.24	86.52	101.21	66.72	91.08	56.46	140.48

表 7 热处理后钢管 3 的等效残余应力平均值及标准差 (MPa)

Table 7 Average values and standard deviations of equivalent residual stress of steel pipe 3 after heat treatment (MPa)

参数	样本平均值	样本标准差	总体标准差
数值	197.28	72.45	67.07

从表 5 中可知, 热处理前钢管 1 在轴向上分布的测量点中, 位于  $90^\circ$  和  $180^\circ$  旋转角度上的轴向测点的总体标准差较小, 说明在这两个角度上的轴向等效残余应力分布较均匀, 这可能是由于钢管在前序加工过程中另外两个角度承受了载荷, 导致 4 个角度上的轴向等效应力分布呈现出明显的差异性变化。在周向上分布的测量点中, 位于  $P1$ 、 $P2$  和  $P3$  点的周向测点数据的均匀性较好, 并且通过比较各点位周向数据的标准差, 可以发现钢管 1 尾部  $P1$  点至头部  $P5$  点的周向等效残余应力的均匀性逐渐降低, 这是由于钢管在挤压成形过程中, 头部区域是金属材料首先通过模具的区域, 此时材料流动受到模具形状、挤压速度、摩擦等因素的共同影响, 易产生不均匀的流动, 这种不均匀的流动会导致材料在头部区域的组织不均匀, 进而引起头部  $P5$  点附近的周向等效应力分布最不均匀。随着挤压过程的进行, 尾部区域的材料流动逐渐趋于稳定, 有助于尾部  $P1$  点附近周向等效应力的均匀分布。通过全部测量点统计, 得到钢管 1 整体测量点的等效残余应力平均值为 211.25 MPa, 标准差为 121.54 MPa, 总体标准差为 118.46 MPa。

从表 6 中可知, 热处理前钢管 2 在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  旋转角度上的轴向测点数据的均匀性较好, 这种跨角度的情况可能来自于不同两道工序下的加工操作, 在不同工序下, 钢管由于吊装摆放姿势无法保持一致, 导致对称方向上在不同时间承受了不同载荷, 从而使其在加工中产生不均匀的等效残余应力。在周向上分布的测量点中, 各点处的周向测量点的标准差均较小, 其中,  $P3$  和  $P5$  点的标准差明显小于其他点, 这表示  $P3$  和  $P5$  点的周向等效应力分布相对更加均匀, 通过对比样本平均值可以发现,  $P3$ 、 $P5$  点的平均值明显小于  $P2$ 、 $P4$  点的平均值, 这说明当头部区域的周向等效残余应力较小时, 其变形协调性也会相应得到提高, 这会在一定程度上抵消头部区域率先通过模具时材料的不均匀流动, 使其

不容易出现局部的过度变形或滞后变形现象, 致使其周向等效应力均匀化。相反, 由于尾部  $P1$  点的等效残余应力的平均值较大, 也会阻碍尾部区域的材料流动性, 使钢管 2 的  $P1$  点的等效残余应力的标准差要明显高于钢管 1 的  $P1$  点等效残余应力的标准差。最终钢管 2 整体测量点等效残余应力的平均值为 240.35 MPa, 标准差为 144.13 MPa, 总体标准差为 140.48 MPa。

表 7 为热处理后钢管 3 各点等效残余应力的平均值及标准差, 其中, 平均值为 197.28 MPa, 标准差为 72.45 MPa, 总体标准差为 67.07 MPa。由于热处理后的钢管 3 仅对某一旋转角度上的轴向测点进行采集, 因此, 目前仅能与热处理前钢管 1、钢管 2 的轴向测点进行对比, 结果发现, 热处理后钢管 3 的等效残余应力平均值和标准差小于大多数热处理前钢管 1、钢管 2 的轴向测点等效残余应力的平均值和标准差, 这在一定程度上可以说明在热处理过程中, 钢管材料内部的残余应力会通过晶粒细化和塑性变形而逐渐得到释放并降低, 此外通过加热和冷却, 材料内部的应力状态会发生变化, 原有的应力集中区域会得到缓解, 应力会在材料内部重新分布, 使得应力分布更加均匀<sup>[12-13]</sup>。

### 3 结论

(1) 通过盲孔法检测获得热处理前钢管 1、钢管 2 的等效残余应力检测值范围为 30~550 MPa, 最大主应力方向无明显规律; 测得热处理后钢管 3 的等效残余应力检测值范围为 143~339 MPa, 其中, 头尾部区域点位的最大主应力方向呈现轴向偏离  $\pm(40^\circ \sim 60^\circ)$ , 中间点位的最大主应力方向则为沿轴向方向。

(2) 在不同旋转角度上的轴向测量点, 其等效残余应力的均匀性取决于钢管在前序工艺中所承受的载荷的方向变化, 这会导致钢管在不同旋转角度的轴向等效残余应力标准差呈现明显的差异。

(3) 由于钢管头部区域率先通过挤压模具, 容易引起材料不均匀流动, 导致头部区域周向等效残余应力不均匀, 标准差较大。当某点位周向等效残余应力平均值较小时, 则会使该点位变形的协调性提高, 不容易出现局部过度或滞后变形现象, 从而使周向应力均匀化, 标准差降低。

(4) 热处理工艺可以在一定程度上降低钢管整体残余应力, 并且使材料内部应力得到重新分布, 应力集中区域得到缓解释放, 使残余应力分布更加均匀。

#### 参考文献:

- [1] 张宗好, 刘建辉, 陈金明, 等. 热处理对 ZL205A 残余应力和微观组织的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1294-1302.  
Zhang Z H, Liu J H, Chen J M, et al. Effect of heat treatment on residual stress and microstructure of ZL205A alloy [J]. Foundry, 2023, 72 (10): 1294-1302.
- [2] 李连进, 王惠斌. 无缝钢管的矫直残余应力与压下量和温度的关系研究 [J]. 钢管, 2009, 38 (4): 18-21.  
Li L J, Wang H B. Study concerning effect of screwdown amount and temperature of straightening on residual stress of seamless steel pipe [J]. Steel Pipe, 2009, 38 (4): 18-21.
- [3] Chan K S, Enright M P, Moody J P, et al. Residual stress profiles for mitigating fretting fatigue in gas turbine engine disks [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32: 815-823.
- [4] 高玉魁. 超高强度钢喷丸表面残余应力在疲劳过程中的松弛规律 [J]. 材料热处理学报, 2007, 28: 102-105.  
Gao Y K. Shot-peened surface residual stress relaxation during fatigue for ultra-high strength steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28: 102-105.
- [5] 杨俊芬, 闫西峰, 刘海峰, 等. 圆钢管加工方法诱导的残余应力分布检测与分析 [J]. 工程力学, 2017, 34 (9): 202-210.  
Yang J F, Yan X F, Liu H F, et al. Detection and analysis on residual stress distribution induced by the processing method of circular tubes [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (9): 202-210.
- [6] 侯晓东, 黄照文, 高建波, 等. 残余应力检测技术及其应用 [J]. 机械工程材料, 2024, 48 (8): 41-54.  
Hou X D, Huang Z W, Gao J B, et al. Residual stress detection technology and its applications [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48 (8): 41-54.
- [7] 赵卫平, 王振兴, 陈佳麟, 等. 基于盲孔法的高强焊接圆钢管表面残余应力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (10): 332-342.
- Zhao W P, Wang Z X, Chen J L, et al. Experimental research on surface residual stress of high strength welded circular steel tube based on hole-drilling strain-gage method [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (10): 332-342.
- [8] 陈强. 热处理过程中残余应力的形成与控制策略 [J]. 冶金与材料, 2024, 44 (11): 153-155.  
Chen Q. Formation and control strategy of residual stress during heat treatment [J]. Metallurgy and Materials, 2024, 44 (11): 153-155.
- [9] 马文静, 陈志国, 李鸿娟, 等. 新型热处理调控 Al-Cu-Mg 合金残余应力的工艺和机理 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (6): 435-442.  
Ma W J, Chen Z G, Li H J, et al. Process and mechanism of novel heat treatment for controlling residual stress in Al-Cu-Mg alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33 (6): 435-442.
- [10] GB/T 31310—2014, 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法 [S].  
GB/T 31310—2014, Metallic material-Determination of residual stress-Hole drilling strain-gauge method [S].
- [11] 印兵胜, 赵怀普, 王晓洪. 残余应力测定的基本知识——第七讲 机械法测残余应力 [J]. 理化检验 (物理分册), 2007 (12): 642-645, 641.  
Yin B S, Zhao H P, Wang X H. Basic knowledge of residual stress determination—Lecture No. 7 Residual stress determination by mechanical method [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2007 (12): 642-645, 641.
- [12] 何路玉. 大型 7085 铝合金筒形件锻造成形及淬火残余应力消减工艺研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2023.  
He L Y. Research on Forging and Quenching Residual Stress Reduction of Large 7085 Aluminum Alloy Cylindrical Part [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.
- [13] 王妙全, 田成刚, 徐瑶, 等. GH4169D 高温合金锻件持久寿命的影响因素研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 46-52.  
Wang M Q, Tian C G, Xu Y, et al. Study on influencing factors of rupture life for superalloy GH4169D forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 46-52.

请关注更加新颖的公众号

www.qctester.com

