

文章编号:1001-4888(2019)05-0904-07

冷弯高频焊管中的残余应力分布及其消除^{*}

郑一鸣¹, 胡雨绮², 肖遥², 张蓓², 李亦森¹, 胡盛德¹, 李立新¹

(1. 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2. 武外英中学校, 武汉 430022)

摘要:残余应力分布状况是决定我国冷弯产品能否应用到高端、重大工程中的重要因素之一。本文以我国冷弯高频焊管典型产品为对象, 实验研究了其弯角区域横向和纵向残余应力沿壁厚的分布和自然时效规律。结果发现, 应力极值点一般出现在弯曲段中心, 外表面纵向和横向残余应力皆为拉应力, 内表面上角所有点及下角弯曲中心附近为压应力; 横向残余应力呈现较明显的指数形式下降, 自然时效最终残留的横向应力仍占母材屈服应力的60%。通过硬度测试和金相组织观察, 确定了630℃保温2小时为冷弯Q345B焊管的最佳去应力退火工艺。该工艺相比厂方原退火工艺, 节约能源显著。

关键词:冷弯高频焊管; 残余应力检测与分布; 冷弯型钢规范; 残余应力消除

中图分类号: TU398

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-080

0 引言

冷弯高频焊管是将热轧板卷弯曲变形, 经高频感应焊接再精整而成, 与无缝钢管相比, 具有生产效率高、成本低、尺寸精度高、规格多样化、表面质量好等优点, 在油气能源运输、建筑、工业液体输送等领域应用越来越多^[1-3]。尽管我国是世界第一大钢管生产和出口国, 焊管产量占钢管总量的71%, 但进口焊管均价高达出口钢管均价的2.6倍, 说明国产高端焊管存在严重不足^[1]。这种不足一方面是因为不能生产某些特殊材质的焊管, 另一方面是对已稳定生产的钢管没有做进一步的完善。

冷弯钢管弯角和焊缝处的残余应力影响构件的静载强度、疲劳强度和稳定性, 加速构件的脆性断裂和腐蚀开裂。消除残余应力可以大大提高其性能, 扩大应用范围, 使产品可以应用于高端、重大工程^[4-7]。然而, 国内冷弯型钢结构技术规范, 包括冷弯焊管及双焊缝焊管标准等, 对冷弯型钢残余应力的幅度、分布和影响都没有规定, 厂家甚至不清楚自己产品的残余应力状况, 导致我国绝大部分冷弯产品附加值低^[3]。

本文对国内某厂冷弯直缝焊管典型产品的弯角残余应力分布、自然时效、热时效特性进行了系统研究, 确立了该产品节能的消残工艺制度。

1 国产厚壁冷弯钢管中的残余应力分布

1.1 实验设备、方法及取样

残余应力的测试方法可分为两类: 有损测量法和无损测量法。有损测量法的原理是通过机械加工进行割断的方法使残余应力得到释放, 利用测量其应变的变化量来反算此处残余应力值的大小。无损测量法有X射线法、中子衍射法、磁性法等, 其原理是通过测量材料受力前后微观组织及物理性质的变

^{*} 收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-07-15

基金项目: 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室基金(2014QN03); 湖北省大学生创新创业计划项目(201310488031)

通讯作者: 胡盛德(1972-), 男, 教授。研究领域: 冷弯成型及产品开发。Email: adhello@163.com

化来测量残余应力^[8]。目前,X 射线衍射法与应力释放中的钻孔技术与理论最为成熟,应用最广。本文采用 X 射线衍射应力测定仪 X-350A 测量弯角部位残余应力,其设备参数如表 1。

表 1 测量设备参数

Tab. 1 Measuring equipment parameters

测量参数	衍射晶面	应力常数	X 光管高压	X 光管电流	准直管直径	测量方法	定峰方法
使用值及方法	(211)	-318MPa/(°)	25kV	5mA	Φ2mm	侧倾固定 Ψ 法	交相关法

X 射线法可测算出轴向、径向、切向的残余应力以及绝对残余应力值,但 X 射线法只能测量试样表层几微米至几十微米深度内的加权平均应力,对试样的表面状态较敏感。要测量冷弯弯角内部的残余应力,必须对钢管沿壁厚剥层。为了提高测量精度,测试前,经过反复实验比较,选择号的测试表面均采用酒精加电解抛光清除表面脏污及锈层,不用砂纸打磨(图 1)。具体测量步骤如下:(1)用稀盐酸腐蚀并清理待测点表面。(2)划十字线定位测量点。(3)调节应力仪激光十字线与所划十字线重合,测量应力值并保存于计算机。(4)用透明胶在十字中心贴出方形抛光区域。(5)电解抛光至要求深度,用酒精清洗表面,测量应力值并保存数据。

试样取自某冷弯型钢公司生产的规格为 200mm×200mm×10mm 的 Q345B 冷弯直缝焊管。共取 8 根 800mm 长的管子(4 根备用),分别用作截面残余应力分布、残余应力自然时效、完全退火以及消除应力退火后的残余应力测试。残余应力测点布置如图 2 所示。

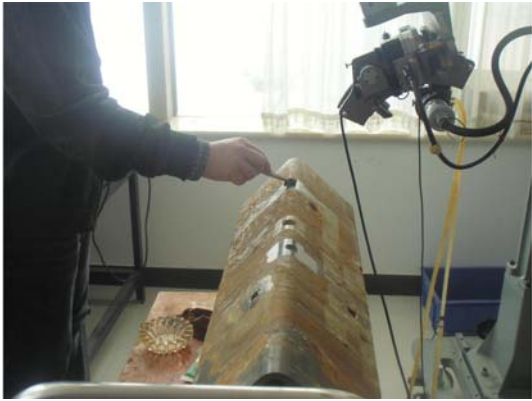


图 1 焊管残余应力测试现场

Fig. 1 Residual stress test site

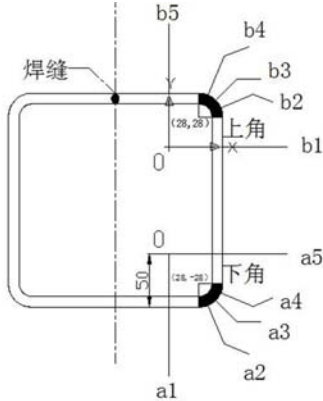


图 2 残余应力测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points

1.2 典型产品的残余应力

1.2.1 焊管截面残余应力分布

实测方管截面残余应力等值线如图 3 所示,单位为 MPa。由图可见:(1)管的外表面都是拉应力,这与文献[7]中 1~3 号试样的测量结果一致。趋向内层,拉应力下降,当达到内表面时,上角都变为压应力,而下角只在弯角中心附近变为压应力,这与文献[7]中 4 号试样的测量结果不完全一致。文献[7]中 4 号试样上角 b1 位置出现较小纵向拉应力,下角内壁弯角中心横向应力为较小拉应力,下角内壁弯角中心纵向残余应力规律与本文类似,但幅值偏低。这种不一致可能源于型钢尺寸的不同以及测量误差。(2)上角等位线的分布是舒展开放型的,大多等位线都延伸到两端尽头;下角等位线的分布是卷曲封闭式的,以某中心为圆状。这反映上角的应力分布沿不同角度较均匀;而下角则相反,其应力分布沿不同角度分布不同,大的应力较集中于弯曲中心附近圈内。(3)应力等位线圆圈的中心是应力极值,由图可知,管外侧的是拉应力极大值,管内侧的为压应力极小值。应关心的是外侧的拉应力极大值,图 3 (a)、(c)、(d)中该值分别为 200MPa、300MPa、300MPa,可见下弯角的最大拉应力大于上角。据图对弯角中心附近近外层(0~2mm)的拉应力进行估算,上角纵、横向应力约 100-200-100MPa(指图 2 中弯角中心附近的三个测量点处的应力)、50-100-100MPa;下角纵、横向应力约 150-300-200MPa、200-300-

200MPa。可见下角弯角中心左右的残余拉应力,无论纵向、横向都比上角大,故破坏可能性大于上角。这一结果在方管钢结构设计与使用中应加以考虑和重视。(4)从横向应力等位图来看,下角相对于上角,等位线分布有一定的左右对称性,这与我们课题组之前实验所测的辊弯槽钢的应力等位图类似,所以下角的变形更接近槽钢的冷弯变形。

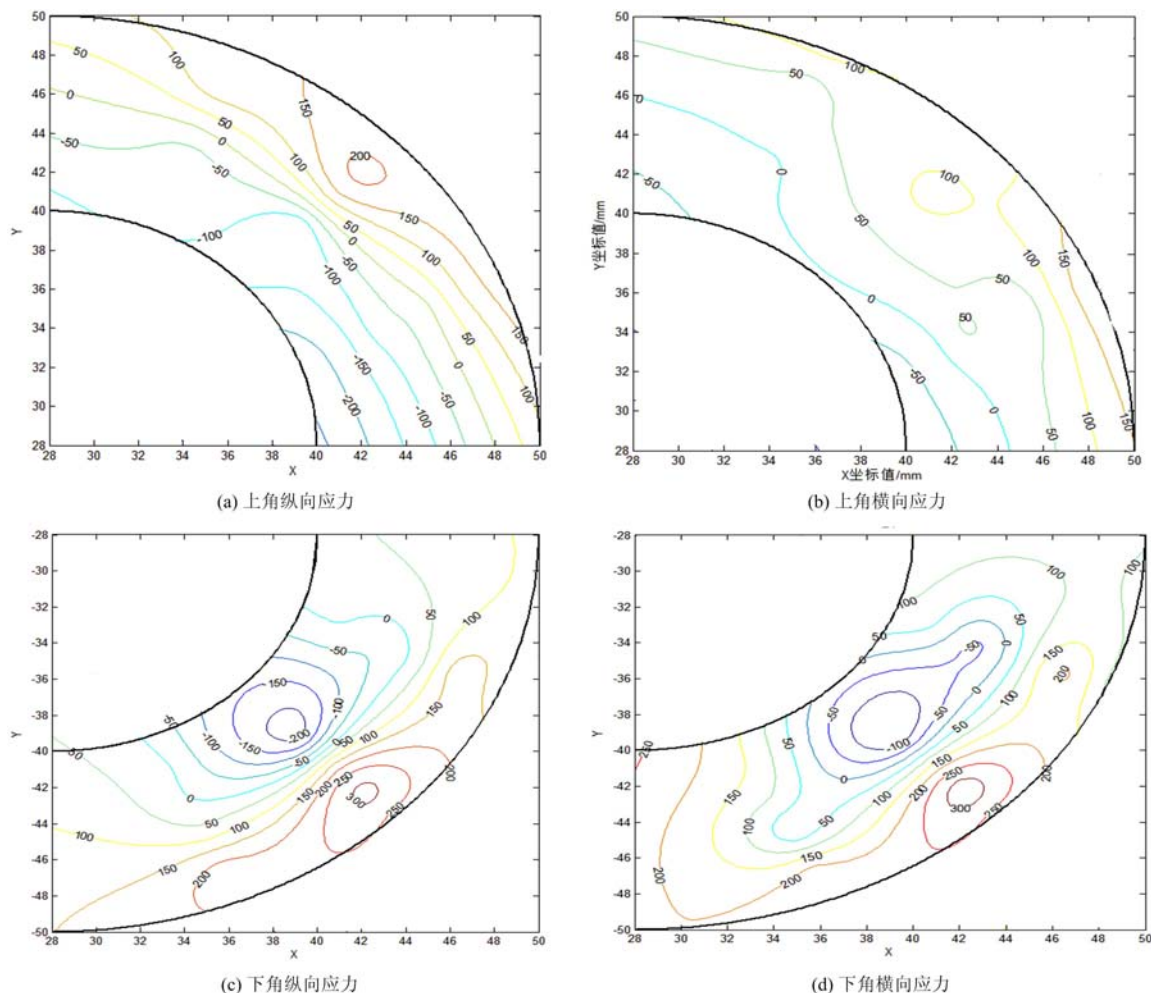


图 3 冷弯高频焊管弯角残余应力等值线

Fig. 3 The residual stress isoline of cold-formed HFW(High Frequency Welding) pipe

1.2.2 残余应力的自然时效规律

图 4 为室温下冷弯方管弯角横向和纵向残余应力随时间变化的测量结果。由图 4(a)可知,冷弯方管生产出来后静置库房,刚开始残余应力值一直快速下降,50 天后,应力值下降幅度变小,并趋于稳定。拟合图中数据,得到函数关系: $\sigma=261\exp(-t/18)+196$,拟合相关系数为 0.92。显然,横向应力变化趋势服从某一指数下降规律。当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\sigma \rightarrow 196$ 。因此不管焊管放置多长时间,其应力值最小也有 196MPa。应力大约在前 50 天内的下降速度比较快,第 50 天时相对于第 18 天约下降 33%。因此,冷弯产品在库房存放约 50 天是很有意义的。另一方面,即使存放很长时间(如一年),仍有近 200MPa 的拉应力存在,为满足高端应用对产品无残余应力的要求,必须通过退火来完全消除应力。

纵向残余应力数据波动较大,但大体上还是随着时效时间增加,残余应力逐渐下降,不过不像横向残余应力那样随时间的增长呈明显指数形式下降。这与管中纵向残余应力的来源比较复杂有关。管中残余应力既来源于冷弯变形、挤压焊接过程,也与冷弯前热轧板的冷却不均匀、成卷、运输、开卷等前期过程有关。

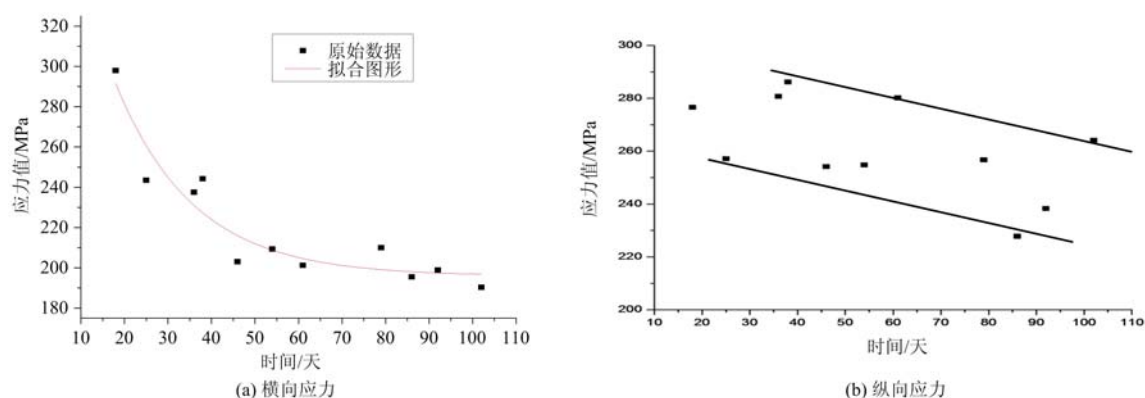


图4 冷弯方管弯角残余应力的自然时效规律

Fig. 4 Variation of corner residual stress with time on cold-formed square pipe

3 残余应力的消除工艺确定

3.1 实验方法

残余应力自然时效规律的研究表明,对所研究的冷弯焊管,弯角部分自然时效最终残留的横向应力仍占母材屈服应力的60%。产品要应用到高端、重大工程,必须彻底消除残余应力。而现有的国家冷弯型钢技术规范中,并无对残余应力的规定和要求,造成我国冷弯型钢产品附加值低,主要供给中低端使用。本课题组对上述产品建立了高效节能的消残工艺制度。实验步骤如下:(1)从弯曲量最大的弯角处截取金相试样(图5),先用600号金相砂纸打磨平整,再按图6取点打硬度,将打完硬度后的试样制成供观察的金相样,用金相显微镜(型号:Axio Scope A1)观察记录其组织。(2)将第一步打磨好的试样分别在500℃、550℃、600℃、650℃下作保温2小时退火处理。将退火试样再按图6取点打硬度,重新制样看金相,并与退火前组织(图7)进行比较。

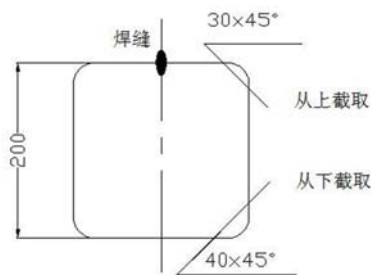


图5 金相试样取样示意图

Fig. 5 Sketch of metallograph sampling

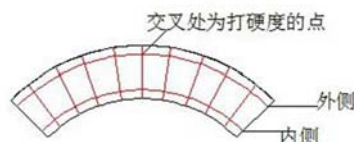


图6 硬度测量位置

Fig. 6 Hardness measuring position

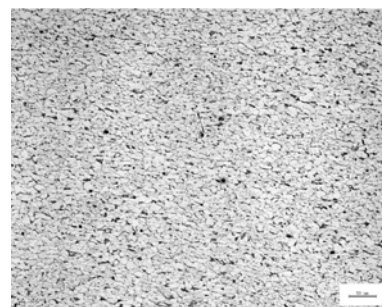


图7 退火前的金相组织

Fig. 7 The microstructure before annealing

3.2 去应力退火温度的确定

实验获得了不同温度下的硬度和金相组织,如图8所示。由图8(a)、(b)可知,500℃退火后,试样的硬度几乎无变化,试样组织形态与退火前大体一致,因此此温度下材料还没有发生再结晶;由图8(c)、(d)可知,试样550℃退火后,硬度已经开始下降,组织有少量晶粒开始形核,但是不明显,因此可以认为暂时还未发生再结晶;由图8(e)、(f)可知,600℃退火后,试样硬度下降程度明显,组织大部分已经形核,晶粒逐渐开始长大,结合硬度曲线图8(e)可知,此时已经开始发生再结晶;由图8(g)、(h)可知,650℃退火后,试样硬度显著下降,晶粒再结晶长大基本完成,组织几乎都形成了等轴晶粒,结合硬度曲线图8(g)可知,此时基本完成再结晶,即该钢的再结晶温度为650℃。根据金属学知识,消除应力退火温度应比再结晶温度稍低,故选630℃为消除应力退火温度。

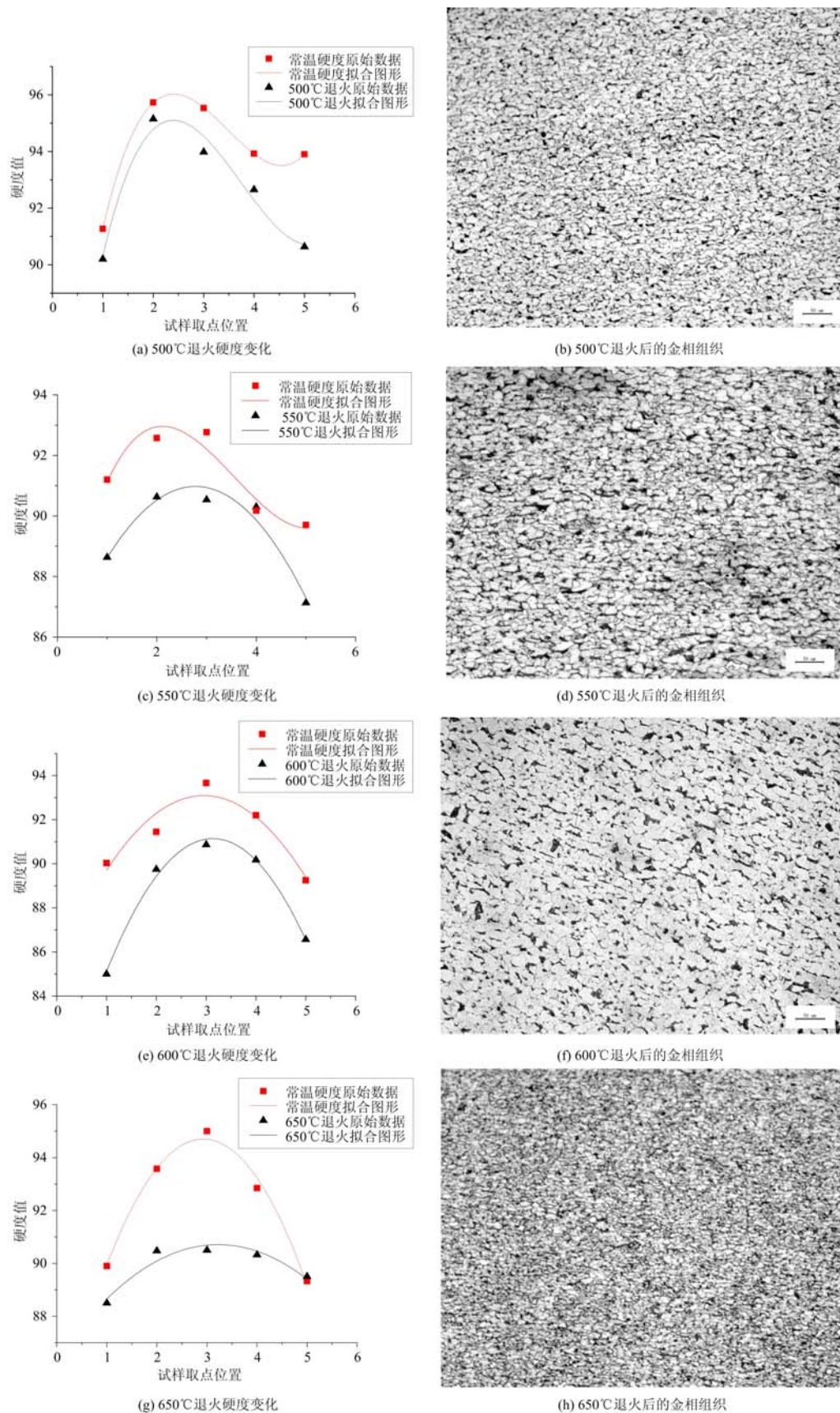


图 8 500℃~650℃退火后的硬度变化和金相组织

Fig. 8 Hardness and microstructure after annealing at temperature of 500℃~650℃

3.3 退火后的残余应力

对图 2 中的 a3 点按两种退火方式测量了退火后的表面残余应力,见表 2 所示。其中,930℃为厂方原来的消除应力退火温度。由表 2 可知,630℃、930℃退火后方管横向、纵向应力平均值非常接近,考虑到仪器本身的误差±20MPa,可以认为这两种退火温度下的方管应力都已完全消除。显然,选择 630℃退火能节约大量能源。

表 2 两种工艺退火后的残余应力
Tab. 2 Residual stress after two annealing processes

退火温度		630℃	930℃
纵向	实测 1	23	24
	实测 2	28	25
	均值	25.5	24.5
横向	实测 1	32	7
	实测 2	22	16
	均值	27	11.5

4 结论

(1) 冷弯焊管外表面纵向和横向残余应力皆为拉应力,沿壁厚向内层,拉应力成非线性逐降,到内表面,上角所有点以及下角弯曲中心附近皆变为压应力。

(2) 自然时效时,横向残余应力呈现较明显的指数形式下降,即服从方程 $\sigma=261\exp(-t/18)+196$ 。按照方程,室温静置的前 50 天内,残余应力释放最快,之后释放极慢,且有 196MPa 的永久残留应力。

(3) 630℃保温 2 小时,冷弯 Q345B 焊管的弯角残留应力得到完全消除。

参考文献：

[1] 庄钢,钟锡弟.我国钢管行业面对“十三五”的产品升级方向[J].钢管,2016,45(1):1-6 (ZHUANG Gang, ZHONG Xidi. Orientation for product upgrade to be taken by domestic steel tube industry during 13th FYP period [J]. Steel Pipe, 2016, 45(1):1-6 (in Chinese))

[2] 胡盛德,李立新,胡灿,等.冷弯厚壁矩形型钢板材力学性能分析[J].实验力学,2010,25(1):87-93 (HU Shengde, LI Lixin, HU Can, et al. Mechanical property analysis of flat and corner coupons made from thick-walled rectangular steel tube[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1):87-93 (in Chinese))

[3] YB/T 4181-2008,中华人民共和国黑色冶金行业标准[S].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2008 (YB/T 4181-2008, Standard for ferrous metallurgy industry of the People's Republic of China[S]. Beijing: The national development and reform commission of PRC, 2008 (in Chinese))

[4] 胡盛德,程学鹏,李立新,等.考虑成卷-展平过程的冷弯残余应力分析[J].钢铁,2017(5):55-60 (HU Shengde, CHENG Xuepeng, LI Lixin, et al. Analysis of cold-formed residual stress considering coiling-flattening process[J]. Iron & Steel, 2017(5):55-60 (in Chinese))

[5] 李立新,苏雨萌,李书帖,等.冷弯厚壁方管残余应力沿截面分布规律的研究[J].上海金属,2014,36(4):55-59 (LI Lixin, SU Yumeng, LI Shutie, et al. Testing and analysis of residual stress in cold-formed thick-wall square hollow section[J]. Shanghai Metals, 2014, 36(4):55-59 (in Chinese))

[6] 胡盛德,李立新,周绪昌,等.250mm×250mm×9.2mm厚壁方形型钢管冷作硬化效应研究[J].工程力学,2010,27(11):172-175 (HU Shengde, LI Lixin, ZHOU Xuchang, et al. Strain hardening of cold-formed thick-wall square steel tube of 250mm×250mm×9.2mm[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11):172-175 (in Chinese))

[7] 曾国,郭永进,于忠奇,等.辊弯成形方形型钢的残余应力[J].钢铁研究学报,2008,20(11):29-32 (ZENG Guo, GUO Yongjin, YU Zhongqi, et al. Residual stresses of roll-formed shape with square section[J]. Journal of

Iron and Steel Research, 2008, 20(11):29—32 (in Chinese))

- [8] 金鹏, 李喜德. 残余应力分析方法比较: X 射线衍射法与应力释放法[J]. 实验力学, 2017, 32(5):645—651 (JIN Peng, LI Xide. Comparison of residual stress analysis methods: X-ray diffraction method vs stress release method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):645—651 (in Chinese))

On the Distribution and relaxation of residual stress in cold-formed high frequency welded (HFW) pipe

ZHENG Yi-ming¹, HU Yu-qi², XIAO Yao², ZHANG Bei², LI Yi-sen¹, HU Sheng-de¹, LI Li-xin¹

(1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, WuHan 430081, China;

2. WHBC-Wuhan Foreign Language School, WuHan 430022, China)

Abstract: The distribution of residual stress is one of the important factors determining whether the cold-formed products can be applied to the high-end and important projects in China. In this paper, taking typical cold-formed high frequency welded pipe products in China as study object, the distribution of transverse and longitudinal residual stress along wall thickness and the natural aging regular pattern in the corner region are studied experimentally. Results show that the stress extremum value points usually appear at the center of bending segment, longitudinal and transverse residual stress on the outer surface are tensile stress, on the inner surface, compression stress appears at all points in the upper corner and near the bending center of the lower corner. The transverse residual stress presents a significant index form decrease, and the final residual transverse stress of natural aging still accounts for 60% of base metal yield stress. By means of hardness measurement and metallographic observation, the optimum annealing process of cold-formed Q345b welded pipe at 630℃ for 2 hours was determined. The process is compared with the original annealing process in the factory, the energy is greatly saved.

Keywords: cold-formed high frequency welded (HFW) pipe; residual stress detection and distribution; specification for cold-formed section steel; relaxation of residual stress