

撤稿声明

撤稿文章名: 冷弯厚壁型钢中的残余应力测量与去除
作者: 李亦森, 葛宁, 胡盛德, 李立新

* 通讯作者: 邮箱: adhello@163.com

期刊名: 力学研究 (IJM)

年份: 2018

卷数: 7

期数: 3

页码 (从X页到X页): 105-113

DOI (to PDF): 10.12677/IJM.2018.73012

文章ID: 2650125

文章页面:

<https://www.hanspub.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=26>

894

撤稿日期: 2019-7-8

撤稿原因 (可多选):

- 所有作者
 部分作者:
 编辑收到通知来自于
 出版商
 科研机构:
 读者:
 其他:

撤稿生效日期: 2019-7-8

撤稿类型 (可多选):

- 结果不实
 实验错误
 数据不一致
 分析错误
 内容有失偏颇
 其他:
 结果不可再得
 未揭示可能会影响理解与结论的主要利益冲突
 不符合道德
 欺诈
 编造数据
 虚假出版
 其他:
 抄袭
 自我抄袭
 重复抄袭
 重复发表 *
 侵权
 其他法律相关:
 编辑错误
 操作错误
 无效评审
 决策错误
 其他:

其他原因: 最近申报的一项发明专利, 查新时发现了这篇文章, 与正在申请的发明专利查新冲突。

出版结果 (只可单选)

- 仍然有效.
 完全无效.

作者行为 失误(只可单选):

- 诚信问题
 学术不端
 无 (不适用此条, 如编辑错误)

* 重复发表: "出版或试图出版同一篇文章于不同期刊."

历史

作者回应:

是, 日期: yyyy-mm-dd

否

信息改正:

是, 日期: yyyy-mm-dd

否

说明:

“冷弯厚壁型钢中的残余应力测量与去除”一文刊登在 2018 年 9 月出版的《力学研究》2018 年第 7 卷第 3 期第 105-113 页上。因本文与正在申请的发明专利查新冲突, 作者主动申请撤稿。根据国际出版流程, 编委会现决定撤除此稿件, 保留原出版出处:

李亦森, 葛宁, 胡盛德, 李立新. 冷弯厚壁型钢中的残余应力测量与去除[J]. 力学研究, 2018, 7(3): 105-113.

<https://doi.org/10.12677/IJM.2018.73012>

所有作者签名: 李亦森 葛宁 胡盛德 李立新

Measurements and Elimination of Residual Stress in Cold-Formed Thick-Wall Profiled Steel

Yisen Li, Ning Ge, Shengde Hu, Lixin Li

College of Materials and Metallurgy, Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education in Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei
Email: 1358130873@qq.com, adhello@163.com

Received: Aug. 31st, 2018; accepted: Sep. 13th, 2018; published: Sep. 20th, 2018

Abstract

Taking the typical products as an example, the paper sketched the residual stress distribution and stress change with time of cold-formed sectional steels in China. It also introduced methods for determining technology of removing residual stresses. The residual stress testing center for cold-formed sectional steel was advised to establish in order to improve product quality and reduce the import dependence.

Keywords

Cold-Formed HFW Pipes, Distribution and Measurement of Residual Stress, Cold-Formed Steel Specification, Elimination of Residual Stress

冷弯厚壁型钢中的残余应力测量与去除

李亦森, 葛宁, 胡盛德, 李立新

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, 材料与冶金学院, 湖北 武汉
Email: 1358130873@qq.com, adhello@163.com

收稿日期: 2018年8月31日; 录用日期: 2018年9月13日; 发布日期: 2018年9月20日

摘要

以国产典型产品为例, 简述了我国冷弯型钢产品残余应力沿厚度的分布、时效规律和残余应力消除制度的制定方法。指出残余应力问题是我国冷弯产品能否应用到高端、重大工程中的关键, 建议成立冷弯型

钢残余应力测试中心，并在相关技术标准中增加考核内容，以提高我国冷弯型钢产品质量，减少冷弯高端产品的进口。

关键词

冷弯型钢，残余应力检测与分布，冷弯型钢规范，残余应力消除

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪言

冷弯型钢生产的各个工序都可能产生残余应力，包括带坯卷曲、开卷、展平、弯曲、焊接等过程，这些过程不均匀的变形及冷却产生的残余应力都会影响产品的最终残余应力[1] [2] [3]。残余应力影响构件的静载强度、疲劳强度、稳定性及尺寸精度。国内外对冷弯型钢的残余应力大多集中在薄壁型钢，鲜见对厚壁冷弯型钢沿壁厚的测量和计算[2] [3] [4] [5]。目前，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，对冷弯型钢残余应力的幅度、分布和影响计算都没有明确的规定，很多生产厂家也不清楚所生产产品的残余应力，导致我国绝大部分冷弯产品只能用于低端市场，附加值低[6]-[12]。

2. 国产厚壁冷弯型钢中的残余应力分布

2.1. 实验准备及取样

课题组对多种断面的冷弯型钢残余应力进行了大量研究[2] [3] [4]，限于篇幅，本文仅以冷弯方管为例。试样取自某冷弯型钢公司生产的规格为 $200 \times 200 \times 10$ mm 的 Q345 冷弯方管。测试共取 8 根 800 mm 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 1 所示。

X 射线法不但可测算出轴向、径向及切向的残余应力，还可测算出绝对残余应力值。但 X 射线法所测为试样表层几微米至几十微米深度内的加权平均应力，故对试样的表面状态很敏感。因此要测量冷弯钢管内部的残余应力，必须对钢管剥层。为了精确测量冷弯钢管的残余应力，本测试前，经过反复实验比较，选择测试表面均用酒精加电解抛光清除表面脏污及锈层，不用砂纸打磨。

2.2. 方管截面残余应力

实测方管截面残余应力等值线如图 2~图 5 所示。可见：1) 管的外表面都是拉应力，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[5]的结果一致。但内壁的残余应力不都为压应力却与该文献不完全一致。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 2、图 4、图 5 中该值分别为 200、300、300 MPa，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(0~2 mm)的拉应力进行估算，上角纵、横向应力约

100~200~100 MPa、50~100~100 MPa；下角纵、横向应力约 150~300~200 MPa、200~300~200 MPa。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或重视。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。

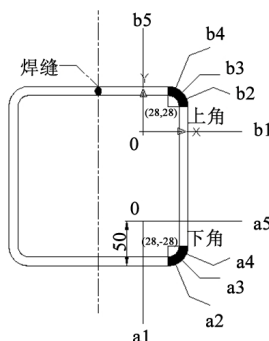


Figure 1. Measurement points of residual stress on cold-formed square pipe
图 1. 冷弯方管残余应力测点布置

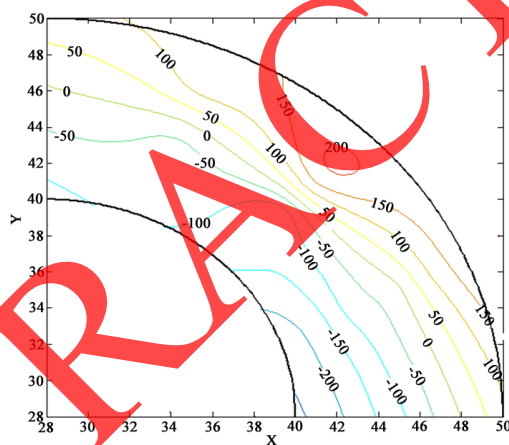


Figure 2. Longitudinal stress isoline for top corner
图 2. 冷弯方管上角纵向应力等值线

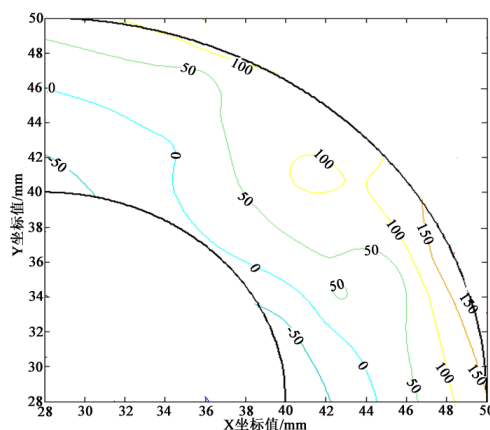


Figure 3. Transverse stress isoline for top corner
图 3. 冷弯方管上角横向应力等值线

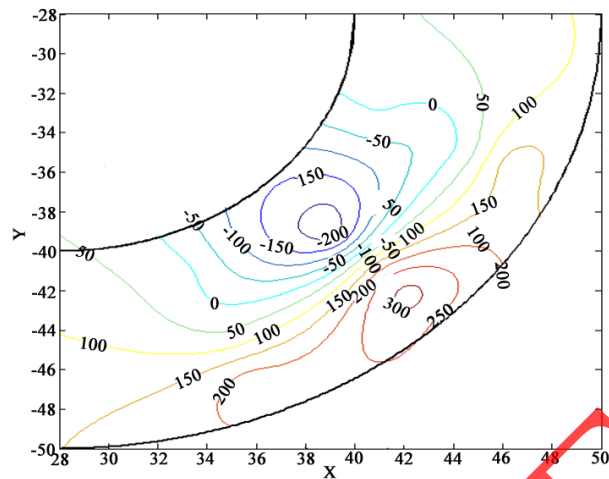


Figure 4. Longitudinal stress isoline for lower corner
图 4. 冷弯方管下角纵向应力等值线

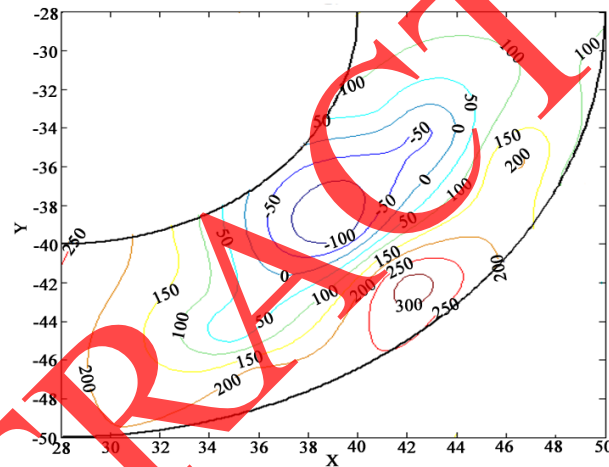


Figure 5. Transverse stress isoline for lower corner
图 5. 冷弯方管下角横向应力等值线

2.3. 残余应力的自然时效规律

对结构件进行去应力处理的时效方法有：热时效、频谱谐波定位时效、自然时效、静态过载时效、热冲击时效等。国内冷弯型钢生产厂家主要使用自然时效和热时效方法消除残余应力，然而厂家并不清楚产品的自然时效规律，因此对时效后的残余应力能否满足客户要求也不清楚，不能据之合理安排交货进度和生产库存。

2.3.1. 冷弯方管横向残余应力随时间变化情况

图 6 为室温下冷弯方管横向残余应力随时间变化的测量结果。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。拟合上述数据，得到函数关系： $y = 261\exp(-x/18) + 196$ ，显然，横向应力变化趋势服从某一指数下降规律。当 $x \rightarrow +\infty$ 时， $y \rightarrow 196$ 。因此不管方管放置多长时间，其应力值最小也有 196 Mpa。应力约在 50 天前下降快，相对第 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 200 Mpa 的拉应力存在，对高端运用无残余应力要求，必须进行消除应力退火。

2.3.2. 冷弯方管纵向残余应力随时间变化

图 7 为方管纵向残余应力随时间的实测结果, 可知, 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着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。

3. 残余应力的危害

3.1. 残余应力的危害及消除残余应力的意义

弯角部位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。焊管焊缝内部的残余应力使构件的强度、韧性下降, 可能导致焊接部位产生应力腐蚀开裂; 此外, 焊接残余应力伴随的变形还会不利于结构件制造精度的控制。因此, 消除残余应力可以大大提高冷弯产品的性能, 扩大产品的应用范围, 使产品应用于高端、重大工程。

3.2. 短柱轴压实验

采用未经残余应力消除的冷弯焊管为实验对象, 试验前, 先在短柱试件中截面的四边中央处贴上对中用应变片, 以进行几何和物理对中。短柱试验在 5000 kN 的压力试验机上进行, 短柱上下端加平板和石英砂找平并保护压头和底座。短柱压缩后局部屈曲如图 8 所示, 短柱实测强度及按国内外规范设计的结果见表 1 [13]。

由表 1 可知, 在未考虑截面效应的情况下, 短柱强度不符合国外厚壁冷弯型钢标准。

4. 残余应力的消除

4.1. 热时效方法

上述实验表明, 自然时效最终的横向残余应力仍占母材屈服应力的 60%左右。因此, 为了使产品应用到高端、重大工程, 必须彻底消除残余应力。金属的内应力从微观机理上来分析, 不管是热应力还是加工残余应力, 都是位错在晶粒中的不均匀分布所造成的, 晶格畸变比较大。热处理为位错的移动、消失提供能量, 消除了位错的聚集, 使位错数量下降并均匀分布于组织中, 去除了残余应力。

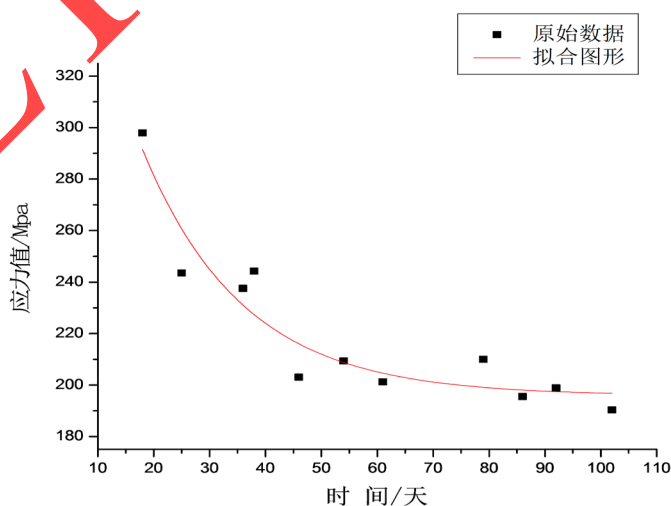


Figure 6. Variation of transverse residual stress with time
图 6. 冷弯方管横向残余应力自然时效规律

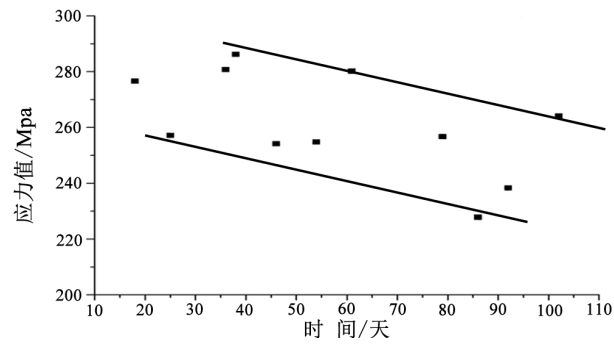
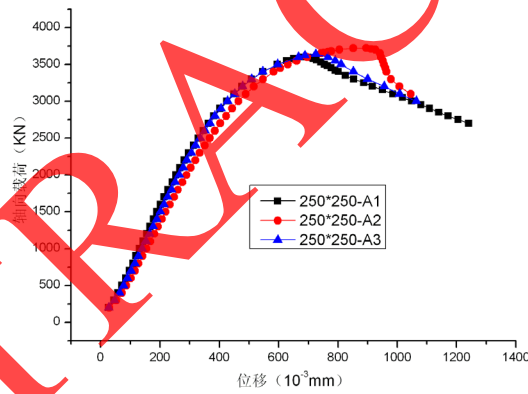


Figure 7. Variation of longitudinal residual stress with time

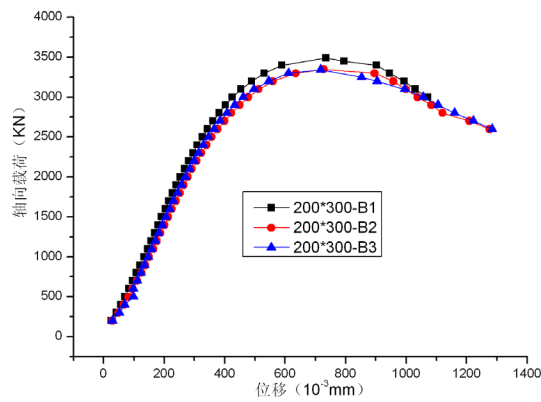
图 7. 冷弯方管纵向残余应力自然时效规律



(a)



(b)



(c)

Figure 8. Column specimen and axial compression test curves

图 8. 短柱试样及轴压实验曲线

Table 1. Test of Columns and comparison with design results at home and abroad
表 1. 短柱屈服实测值及其与国内外设计结果的比较

试样	母材实测 $\overline{R_{m1}}$ (MPa)	短柱实测 $\overline{R_{m2}}$ (MPa)	$\frac{\overline{R_{m2}}}{\overline{R_{m1}}}$	国外 f_{ya} (MPa)	国内 F' (按实测) (MPa)
250 * 250-A1		415.7			
250 * 250-A2	362.2	431.9	423.7	1.17	441.9
250 * 250-A3		422.2			
200 * 300-B1		405.3			
200 * 300-B2	362.2	387.7	393.7	1.09	411.1
200 * 300-B3		388.3			391.8

课题组对某厂的主要冷弯产品建立了高效节能的消除残余应力的热时效工艺制度。从弯曲量最大的弯角处截取金相试样，在不同温度下进行退火处理，然后通过硬度值和金相组织的变化来确定该钢的再结晶温度，再通过金属学知识，确定消除应力退火温度。

4.1.1. 典型产品去应力退火温度的确定

实验步骤：1) 取下金相试样工作面(图 9)，先用 600 号金相砂纸打磨平整，再按图所示取点打硬度，将打完硬度后的试样制成供观察的金相样，用金相显微镜观察记录其组织。2) 将上述的试样，分别在 500℃、550℃、600℃、650℃下作保温 2 小时的退火处理。将退火试样再按图 10 取点打硬度，重新制样看金相。

因篇幅有限，本文仅给出 650℃退火与常温硬度及金相组织比较，如图 11、图 12 所示。可见，试样 650℃退火后，其硬度显著下降。由图 12 知，650℃退火后，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。

4.1.2. 退火后的残余应力

对图 1 中的 a3 点按两种退火方式，测量了退火后的表面残余应力，如表 2 所示。其中，930℃为现场原完全消除应力退火温度。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 ± 20 MPa，可以认为这两种退火温度下的方管应力已完全消除。显然，选择 630℃退火能节约大量能源。

4.2. 其他方法

消除冷弯型钢的残余应力除热时效方法外，常用的还有振动时效、采用新型冷弯工艺等方法[14]。振动时效是通过激振器给构件施加激振力，构件获得的激振动应力与内部残余应力叠加在一起，在某一方向上的合应力超过材料屈服极限而产生屈服变形，残余应力松弛释放，从而消除或降低残余应力。其显著优势是节能环保，对简单结构体效果明显。但对复杂结构构件的应力消除有一定的局限性，同时盲目的增加外应力很可能会造成工件材料的疲劳损伤。因此，冷弯型钢现场较少采用。将冷成型的圆管加热并成型为方矩管，在某种程度上可以改变残余应力的分布。另外，通过开发新的冷弯成型工艺，可以尝试降低产品残余应力，如链模成型或“千足虫”成型，是一种新型的板料成型方法[14]。该方法克服了传统轧制成型的限制，减少多余变形，减少成型中的回弹，可以用于传统轧制方法难以成型的复合材料和超薄高强度钢板的成型。但其最终产品的残余应力还有待实验检测结果。

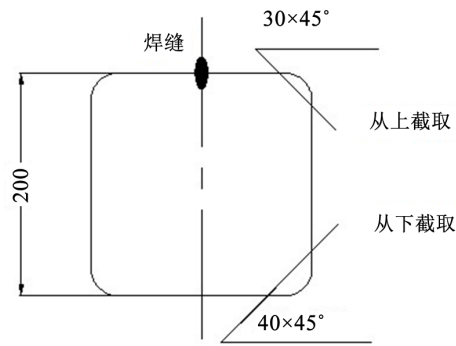


Figure 9. Metallographic Sampling location
图 9. 金相试样取样位置

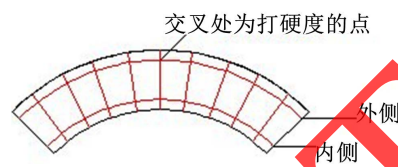


Figure 10. Hardness test position
图 10. 金相试样的硬度取点位置

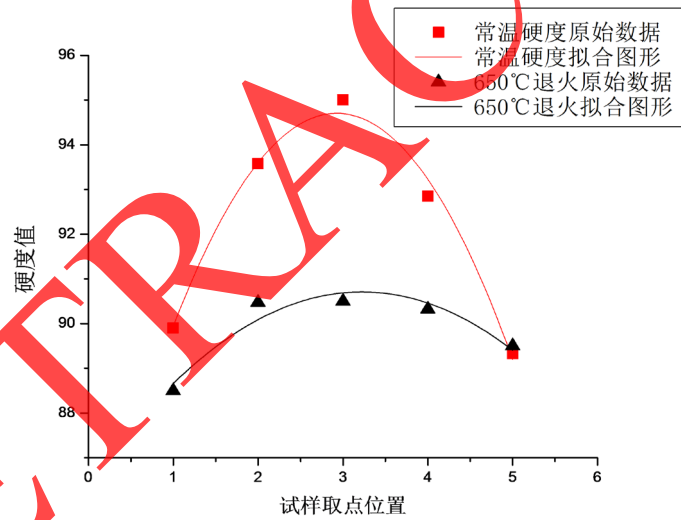


Figure 11. Comparison of hardness at RT and annealing at 650°C
图 11. 试样 650°C退火与常温硬度比较

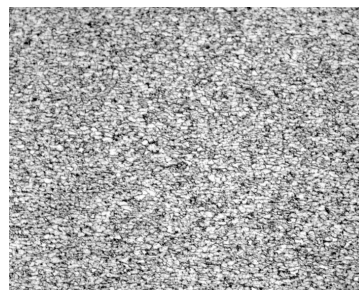


Figure 12. Microstructure after annealing at 650°C
图 12. 650°C退火后的金相组织

Table 2. Residual stress after two annealing technology
表 2. 两种工艺退火后残余应力

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

5. 成立冷弯型钢残余应力测试中心的建议

沿壁厚的残余应力的分布、时效规律以及消残制度是生产高品质厚壁冷弯型钢必须掌握的指标或技术，是产品能否应用到高端、重大工程中的关键。冷弯型钢产品残余应力的消除在德、日、美等国都得到了有效解决，国内不够重视，尚无有效解决此问题，因此国内一些重大、高端场所关键部位(如飞机场)的制造商宁可使用昂贵的进口冷弯产品，也不使用性价比更高的国内产品，是基于对国内产品的不信任。因此，建议成立冷弯型钢残余应力测试中心，并在相关技术标准中增加考核内容，以提高我国冷弯型钢产品质量，减少冷弯高端应用产品的进口量。

基金项目

湖北省大学生创新创业计划项目(201310488031)。

参考文献

- [1] 温东辉, 沈祖炎, 李元齐. 冷弯厚壁型钢冷弯效应及残余应力研究进展[J]. 结构工程师, 2010, 26(1): 156-163.
- [2] 胡盛德, 刘勇, 贾余超, 等. 厚壁型钢冷弯应力分析[J]. 武汉科技大学学报, 2012, 35(3): 174-177.
- [3] 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, 52(5): 55-60.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] GB/T 6728-2002 结构用冷弯空心型钢尺寸、外形、重量及允许偏差[S]. 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [7] GB/T 6726-2008 汽车用冷弯型钢尺寸、外形、重量及允许偏差[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [8] ANSI/AISI S220-12-2011 北美冷弯型钢构架标准, 非结构部材[S]. 美国国家标准, 2011.
- [9] YB/T 4181-2008 双焊缝冷弯方形及矩形钢管[S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2008.
- [10] YB/T 4291-2012 塔机用带尖角冷弯矩形钢管[S]. 中华人民共和国工业和信息化部, 2013.
- [11] Q/CNPC 108-2005 X80 钢级直缝埋弧焊管技术条件[S]. 中国石油天然气集团公司, 2005.
- [12] GB/T 26080-2010 塔机用冷弯矩形管[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2011.
- [13] 胡盛德, 李立新, 周绪昌, 等. 250 × 250 × 9.2 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.
- [14] 丁国良, 丁士超. 一种新型板材成型方法-链模成型法[C]//第十五届中国(北方)钢管与管道技术交流会. 第十五届中国(北方)钢管与管道技术交流会会议论文集. 石家庄, 2012, 26(10): 8-16.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-498X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ijm@hanspub.org

RETRACTED