

中频感应加热弯管用WB36钢热处理工艺研究

赵婧¹, 张晓航², 赵艺博³

1. 郑州天时海洋石油装备有限公司 河南郑州 450000

2. 安德里茨(中国)有限公司 广东佛山 528000

3. 河南华电金源管道有限公司 河南郑州 450000

摘要: 对WB36钢中频感应加热弯管水冷成形进行试验, 管道弯制后对弯管区分别进行正火+回火、回火, 从而改善弯管区的硬度、金相组织和力学性能, 在确保弯管区成形质量合格的前提下, 使中频感应加热弯管区的性能满足相关标准的要求。

关键词: WB36钢; 中频感应加热弯管; 正火+回火; 硬度; 金相组织

Research on heat treatment process of WB36 steel for medium-frequency induction heating bending pipes

ZHAO Jing¹, ZHANG Xiaohang², ZHAO Yibo³

1. Zhengzhou TSC Offshore Equipment Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China

2. ANDRITZ (China) Co., Ltd., Foshan 528000, Guangdong, China

3. Henan Huadian Jinyuan Pipeline Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China

Abstract: Tests were carried out on the water-cooled forming of WB36 steel medium-frequency bends. After the pipes were bent, tempering + normalizing and tempering were respectively performed on the bent pipe areas to improve the hardness, metallographic structure and mechanical properties of the bent pipe areas. On the premise of ensuring the forming quality of the bent pipe areas to be qualified, the properties of the medium-frequency bent pipe areas are made to meet the requirements of relevant standards.

Keywords: WB36 steel; medium frequency elbow; normalizing + tempering; hardness; metallographic organization

1 序言

WB36钢是20世纪30年代德国曼内斯曼公司研制的一种低合金钢, 在欧标EN 10028-2: 2009《承压用扁平钢产品—第二部分: 具有规定高温性能的合金钢和非合金钢》中牌号为15NiCuMoNb5-6-4。

由于Ni、Cu、Mo、Nb等合金元素的加入, 显著提高了钢的高温抗拉强度和蠕变强度, 该种钢的稳定使用温度 $>400^{\circ}\text{C}$, 主要应用在超临界火电机组中主给水管等高温高压部件上^[1, 2]。

在电站管道预制生产中, 利用中频感应加热

第一作者: 赵婧, 学士, 工程师, 主要研究方向为焊接热处理工艺, E-mail: zhaojing1028@163.com。

通信作者: 张晓航, 助理工程师, 主要研究方向为智能焊接技术与工艺开发, E-mail: 1351698168@qq.com。

技术对管道进行局部加热，进而实现管材的弯管，是一种较为先进的生产工艺。该工艺具有生产成本低、效率高、性能稳定等优点，能大幅缩减配管制造中焊缝的数量。我国从20世纪70年代末开始利用中频感应加热弯管技术，对各种规格的碳素钢管、合金钢管和不锈钢管进行热弯，弯制后通过热处理工艺，来改善弯管后材料的性能。多年实践证明了该技术的成熟可靠^[3, 4]。

中频感应加热弯管后，鉴于不同的弯后热处理工艺，会分别对弯管区的组织和性能产生较大的差别。为避免热处理工艺偏差使弯管区的质量产生不可逆的影响，因此对WB36钢中频感应加热弯管进行弯后不同的热处理工艺试验很有必要。经试验研究验证了WB36钢弯管区实施两种不同热处理工艺后，材料质量、组织和性能的差异，最终确定合适的热处理工艺，从而保证弯管区的各项性能指标满足标准要求，对WB36钢中频感应加热弯管与弯后热处理的制造提供技术支持和参考。

2 弯管试验材料与方法

2.1 弯管试验材料

试验材料选用规格为 $\phi 508\text{mm} \times 55\text{mm}$ 的WB36钢管，试验前分别对试件的硬度和金相组织进行检测。在DL/T 438—2016《火力发电厂金属技术监督规程》中，对WB36（15NiCuMoNb5-6-4）钢的

硬度要求为185~255HBW，经检测WB36钢原材料硬度为215~240HBW，硬度合格。金相组织检测WB36钢原材料显微组织为铁素体+贝氏体，二者含量大致相同，如图1所示。

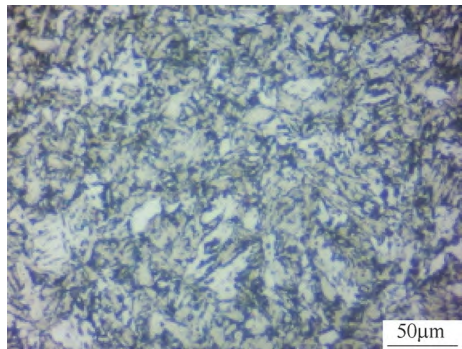


图1 WB36钢原材料金相组织

2.2 弯管试验方法

弯管试验采用中频感应加热弯管工艺，其弯管过程是在钢管待弯曲区套上感应线圈，利用机械转臂夹持前端管头，待感应线圈通入中频感应电流后均匀加热钢管，使钢管达到塑性状态，此时钢管后端管头用机械推力推进弯制，弯制出的钢管表面采用喷淋水淬迅速冷却成形，整个过程是在钢管均匀加热的时候逐步进行推进、弯制、急冷^[5]。此次弯管试验采用设备为ZW-813弯管机；感应线圈规格为 $\phi 550\text{mm} \times 20\text{mm}$ （厚度） $\times 75\text{mm}$ （宽度），其他弯管工艺参数见表1。

表1 中频感应加热弯管工艺参数

编号	材质	规格/mm	弯制温度/℃	起弯温度/℃	弯曲半径/mm	推进速度/(mm/min)	弯曲角度/(°)	冷却方式
WGPD-2303	WB36	$\phi 508 \times 55$	880~930	900	1524 ($R=3D$)	10~15	45	水冷

2.3 弯制后检测分析

弯制后对弯管区分别进行无损检测、金相检验和硬度检测。无损检测结果表明，磁粉检测弯管区表面能够分别达到NB/T 47013.4—2015《承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测》规定的I级合格、超声波检测弯管区能够达到NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第3部分：超声检测》规定的I级合格。WB36钢中频感应加热弯管后成形状态如图2所示，弯后硬度检测见表2。

从表2可知，WB36钢中频感应加热弯管水淬急冷后，弯制区上中性面、背弧面和内弧面硬度整体

偏高，说明上述区采用喷淋较为直接，而下中性面水淬更多为上中性面、背弧面和内弧面水流形成，使热弯过程水淬较上中性面、背弧面和内弧面稍滞后，弯管成形区水淬急冷后金相组织如图3所示。

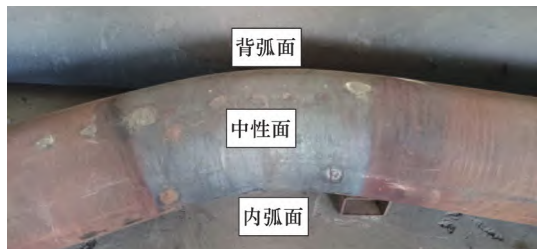


图2 WB36钢中频感应加热弯后成形状态

表2 中频感应加热弯管后硬度检测结果

测点位置	距前端 100mm	弯管角度/ (°)							距后端 100mm
		0	5	10	15	20	25	30	
上中性面 HBW	221	215	297	312	322	302	305	321	253
背弧面 HBW	200	197	270	282	329	294	323	266	320
下中性面 HBW	202	203	210	217	224	213	215	216	233
内弧面 HBW	206	200	249	297	326	288	312	322	268

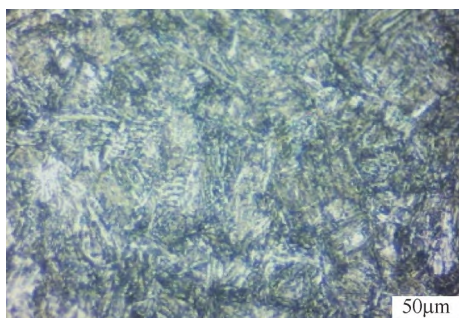
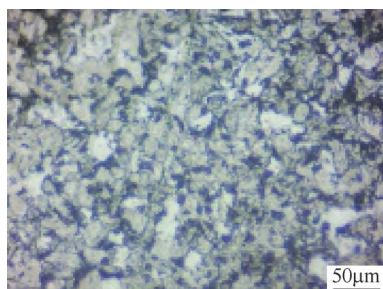


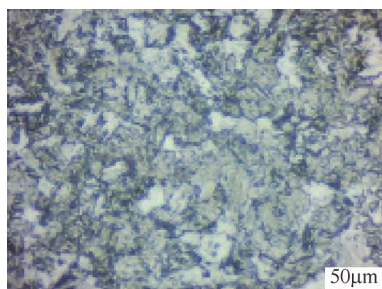
图3 WB36钢中频感应加热弯管水淬后金相组织

表3 WB36钢弯管后两种热处理工艺

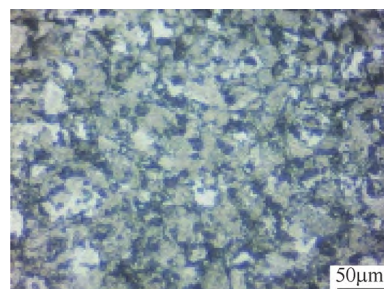
试样编号	规格/mm	正火温度/℃	正火保温时间/h	回火温度/℃	回火保温时间/h	升降温速度/ (℃/h)	冷却方式
WGHT-01	φ508×55	—	—	590±10	4	113	炉冷
WGHT-02	φ508×55	945±15	1.5	615±15	4	113	正火+风冷、回火+炉冷



a) 弯管内弧面

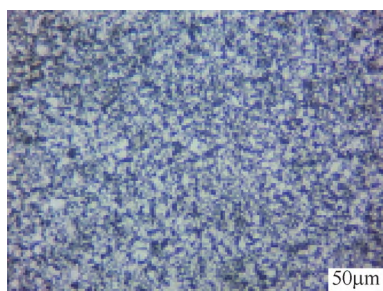


b) 弯管背弧面

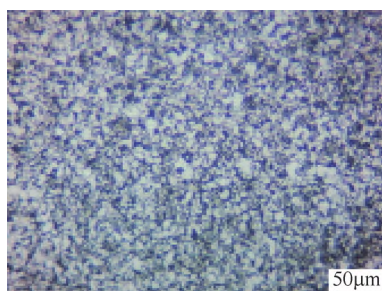


c) 弯管中性面

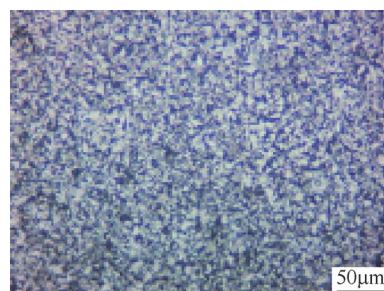
图4 回火试件不同区金相组织



a) 弯管内弧面



b) 弯管背弧面



c) 弯管中性面

图5 正火+回火试件不同区金相组织

3 WB36钢中频感应加热弯管后热处理与性能检测

3.1 WB36钢弯管后热处理工艺

为保证WB36钢中频感应加热弯管后，材料有较高的强度、良好的韧性及稳定的微观金相组织，对弯管区截取两部分试样分别进行两种工艺的热处理，即对试样WGHT-01进行回火；对试样WGHT-02进行正火+回火，两种热处理工艺见表3。

3.2 WB36钢弯管热处理后无损检测与金相检验

WB36钢弯管区的两块试样分别经两种热处理后，按照NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》规定要求对两块试件分别进行MT和UT无损检测，结果显示热处理后，弯管试样没有缺陷、质量合格。无损检测后对两种热处理工艺试样分别进行金相检验，回火试样、正火+回火试样金相组织分别如图4、图5所示。由图4可知，WB36钢弯管后回火组织为铁素体+贝氏体+少量珠光体，其中铁素体含量（体积分数，下同）≥60%，晶粒度5~6级；

由图5可知，WB36钢弯管后经正火+回火，金相组织为贝氏体+铁素体，其中贝氏体含量约为60%，晶粒度更细小达到9级，无大面积网状铁素体，且无拉伸变形组织出现。由于晶粒度越小的材料，其强韧性越好，因此WB36钢弯管后经正火+回火的金相组织更为理想。

3.3 WB36钢弯管热处理后硬度检测

在金相组织检验完成后，分别对两种热处理试样，沿弯管试样的中性面、背弧面和内弧面进行硬度检测，结果见表4。由表4可知，WB36钢弯管经两种热处理后，回火试样的大多数区，硬度明显高

出标准要求的上限255HBW，而经正火+回火的试样，硬度均在标准要求范围内。

3.4 WB36钢弯管热处理后力学性能试验

硬度检验后对弯管两种热处理后的试样分别进行拉伸与冲击的破坏性试验，来验证WB36钢弯管在两种热处理工艺下材料的力学性能。WB36钢弯管区回火、正火+回火后拉伸试验结果见表5。由表5可知，WB36钢弯管区回火后的强度，要高于正火+回火后的强度，但是正火+回火的伸长率要高于回火工艺，这说明正火+回火弯管材料的塑性更加优异。

表4 WB36钢弯管后两种热处理试件硬度检测结果 (HBW)

测点	回火试件				正火+回火试件			
上中性面	238	248	232	255	205	212	196	200
背弧面	286	296	275	308	206	202	203	205
下中性面	281	264	268	275	196	197	199	200
内弧面	302	300	305	269	211	199	199	196

表5 WB36钢弯管两种热处理后拉伸试验结果

试样编号	试验温度/℃	试样规格/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率 (%)	试验方向
回火/H-LS-01	20	φ10.02	770	725	14.5	横向
回火/H-LS-02	20	φ10.03	705	575	18.0	横向
正火+回火/ZH-LS-01	20	φ10.00	715	670	32.0	横向
正火+回火/ZH-LS-02	20	φ9.99	690	560	27.0	横向

同时，对两种不同热处理工艺的弯管区，分别沿管道周向制取纵向试样、沿管道轴向制取横向试样（见图6）做冲击试验。WB36钢弯管材料两种不同热处理工艺后冲击试验结果见表6。由表6可知，WB36钢弯管经两种热处理后的试样，无论是横向试样还是纵向试样，经正火+回火后，材料的冲击吸收能量均高于回火，说明WB36钢弯管区材料经正火+回火后韧性更好。

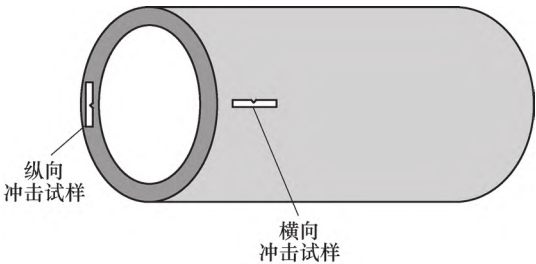


图6 冲击试样取样示意

表6 WB36钢弯管热处理后冲击试验结果

试样编号	试验温度/℃	试样规格/mm	缺口位置	缺口类型	冲击吸收能量/J	试验方向
回火/H-C-01	20	10×10×55	原材	夏比V型	132、120、162	横向
回火/H-C-03	20	10×10×55	原材	夏比V型	140、138、140	纵向
正火+回火/ZH-C-01	20	10×10×55	原材	夏比V型	177、174、185	横向
正火+回火/ZH-C-03	20	10×10×55	原材	夏比V型	166、169、171	纵向

4 结束语

1) 对WB36钢进行中频感应加热弯管试验,弯制成形过程中采用水淬对弯管区急冷,弯后经无损检测,弯管区无缺陷产生,质量可靠。弯后弯管区金相组织为铁素体+不规则贝氏体,上中性面、背弧面、内弧面的硬度均高出标准要求,需要通过弯后热处理来改善弯管区的组织和性能。

2) 在对弯管区分别采用回火、正火+回火两种工艺后,弯管区的无损检测依然合格。通过对WB36钢弯管区金相检验得出:回火组织为铁素体+贝氏体+少量珠光体,晶粒度为5~6级;而经正火+回火的金相组织为贝氏体+铁素体,晶粒度能达到9级。

3) 对两种热处理后的WB36钢弯管区,分别取样进行硬度检测和力学性能试验。结果显示,回火区硬度整体依旧高出标准,正火+回火区的硬度均在标准范围内;通过拉伸、冲击试验可知,回火试样强度高于正火+回火试样,延性、塑性方面则是正火+回火高于回火;冲击试验表明,正火+回火的韧性高于回火。

4) 综上分析,WB36钢中频感应加热弯管水淬急冷后,再通过正火+回火,弯管区的质量、金相组织及力学性能,能够满足标准要求。

参考文献:

- [1] 肖雄峰,潘振涛,林明新,等. 热处理工艺对高压配管用15NiCuMoNb5-6-4钢板组织和性能的影响[J]. 宽厚板, 2019, 25 (5) : 12-15.
- [2] 刘志超,朱锦波,李学军,等. 淬火、回火后厚壁WB36钢管径向力学性能的分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45 (18) : 232-234.
- [3] 许志强,李学通,杜凤山. 中频加热大口径钢管弯管过程的有限元模拟[J]. 秦皇岛:燕山大学学报, 2003 (2) : 122-125.
- [4] 闫平,马骏彪,卞小军,等. P92钢中频弯管技术研究及应用[J]. 综合智慧能源, 2008 (4) : 41-45.
- [5] 李俊峰,张丰收,郑海臣,等. 核电用WB36CN1钢中频弯管技术研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (17) : 166-169.

MW 20241115

(上接第102页)

660℃之间,

2) Q+T试验钢经910~930℃淬火,620~630℃回火处理后,强度裕度较少,回火工艺温度范围在620~630℃,窄于DQ+T的回火工艺温度范围。且回火温度精度范围只有10℃,对于设备的精度和稳定性要求更高,且容易出现性能波动

3) Q+T工艺路径下的组织主要是板条状回火贝氏体组织,部分板条束发生合并,组织呈现明显的多边形化特征,板条束内部存在大量细小碳化物腐蚀痕迹。DQ+T工艺路径下的组织主要是板条状回火贝氏体组织,板条束的取向各异,板条束内部存在少量细小碳化物腐蚀痕迹,板条间组织开始出现多边形化特征。

4) 试验钢采取轧后DQ+T,可以达到原油储罐用12MnNiVR钢性能要求,冲击吸收能量稳定且强度较标准有较多富裕值。原油储罐用12MnNiVR

钢可以通过轧后在线DQ+T达到节能减排生产钢铁的目的。

参考文献:

- [1] 其其格,余伟,武会宾,等. 回火工艺对在线淬火12MnNiVR钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2008 (24) : 101-103.
- [2] 王立军,武会宾,余伟,等. 直接淬火低碳贝氏体钢的回火组织与力学性能[J]. 材料工程, 2011 (3) : 36-44.
- [3] 李志恩. 大型原油储罐用12MnNiVR中厚钢板研制与开发[J]. 中国冶金, 2012 (4) : 49-54.
- [4] 石明光. 12MnNiVR钢板热处理工艺及性能研究[J]. 冶金与材料, 2021 (2) : 9-10.
- [5] 陈小林. 超快冷条件下中厚板温度均匀性的研究及应用[D]. 沈阳:东北大学, 2014.

MW 20241108