

# 正火温度对高强度贝氏体钢管组织和性能的影响\*

程晔锋, 程巨强, 冯熠婷

(西安工业大学 材料与化工学院, 西安 710021)

**摘要:** 为了研究正火温度对新研制的高强度贝氏体钢管组织和性能的影响,将其经过热处理试验后,采用拉伸及冲击试验进行力学性能测试,运用扫描电子显微镜及光学显微镜进行组织形貌观察,利用X射线衍射进行物相分析。研究表明:随着正火温度的提高,贝氏体钢管的抗拉强度呈降低的趋势,当正火温度为930℃时,钢管的抗拉强度、延伸率及断面收缩率较高,冲击功出现最大值,为最佳正火温度。不同正火温度加热,贝氏体钢管的显微组织均为无碳化物贝氏体和少量的铁素体,930℃加热组织细化程度较高,超过930℃加热,组织中板条贝氏体的比例增加,板条组织长度增加,组织粗化。930℃加热空冷、300℃回火,无碳化物贝氏体钢管的力学性能为强度( $R_m$ )为971 MPa,延伸率( $A$ )为18.3%,断面收缩率( $Z$ )为69%,冲击功 $A_{KV}$ 为82.6 J。

**关键词:** 无碳化物贝氏体钢;正火温度;显微组织;力学性能

**中图分类号:** TG142.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-9965(2020)04-0428-06

## Effect of Normalizing Temperature on Microstructure and Properties of High Strength Bainitic Steel Pipe

CHENG Yefeng, CHENG Juqiang, FENG Yiting

(School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to study the effect of normalizing temperature on the microstructure and properties of a newly developed high strength bainitic steel pipe, after it was heat treated, its mechanical properties were tested by tensile and impact tests. Its microstructure was observed with a scanning electron microscope and an optical microscope and its phase was analyzed by X-ray diffraction. The results show that the tensile strength of the bainitic steel pipe decreases with the increasing normalizing temperature. At 930℃, the tensile strength, the elongation of the section and the reduction of area are relatively high, and the impact value reaches the maximum, indicating that this temperature is the optimum normalizing temperature. When the bainitic steel pipe are heated at different normalizing temperatures, its microstructure is carbide-free bainite with a small amount of ferrite. At 930℃, the microstructure

\* 收稿日期:2020-04-11

第一作者简介:程晔锋(1994-),男,西安工业大学硕士研究生。

通信作者简介:程巨强(1963-),男,西安工业大学教授,主要研究方向为高强度金属材料,E-mail:chengjuqiang@163.com。

引文格式:程晔锋,程巨强,冯熠婷.正火温度对高强度贝氏体钢管组织和性能的影响[J].西安工业大学学报,2020,40(4):428-433.  
CHENG Yefeng, CHENG Juqiang, FENG Yiting. Effect of Normalizing Temperature on Microstructure and Properties of High Strength Bainitic Steel Pipe[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2020, 40(4): 428-433.

refinement degree is relatively high. Over 930 °C, the proportion of lath bainite in the microstructure increases, the length of lath microstructure increases, and the microstructure coarsens. Heated and air-cooled at 930 °C and tempered at 300 °C, the carbide free bainitic steel pipe has the following mechanical properties: the strength is 971 MPa, the elongation of the section is 18.3%, the reduction of area is 69% and the impact value is 82.6 J.

**Key words:** carbide free bainite steel; normalizing temperature; microstructure; mechanical property

钢管作为钢铁产品的重要组成部分,根据其制造工艺分为无缝钢管、焊接钢管和铸造钢管<sup>[1]</sup>,无缝钢管一般以圆坯通过热轧获得,焊接钢管用热轧板卷或带坯成型后焊接而成,铸造钢管通过铸造的方法获得。钢管为了提高强韧性一般需要进行热处理,对于高强度钢管采用的热处理方式为淬火+高温回火,淬火热处理变形较大,甚至出现缺陷<sup>[2]</sup>。高强度贝氏体钢热处理采用正火方式获得,热处理变形较少,可避免淬火缺陷,获得较高的强韧性及耐磨性。各种类型的贝氏体钢已应用于矿山、电力、石油及工程机械等方面<sup>[3-5]</sup>。对于钢管材料,采用合适的正火温度可以细化钢管的组织,提高其力学性能,对于低强度等级的钢管,目前已有关于正火温度对其组织和性能影响的相关研究,如文献[6]研究了正火温度对强度为491~499 MPa级钢管组织性能的影响,结果表明,830 °C正火时,其力学性能最高。文献[7]研究了正火温度对强度为460 MPa高频电阻焊钢管组织和性能的影响,结果表明,在850~1 000 °C范围内加热,当加热超过950 °C时的钢管强度较高,钢管的焊缝区在900~1 000 °C的正火加热温度范围内,随加热温度的升高,强度升高。但对于高强度钢管,正火温度对其组织和力学性能的影响文献较少。因此,本文通过研究正火温度对新研制的高强度无碳化物贝氏体钢管组织和力学性能的影响,确定合适的正火加热温度,为实际贝氏体钢管正火奥氏体化温度的确定提供了参考,对于无碳化物贝氏体钢管实际的热处理工艺参数制定具有重要的实践意义。

## 1 实验材料及方法

实验材料为一种新研制的贝氏体钢管,钢管由厂家协作制成,试验材料的化学成分(质量分数 $w/\%$ )为 $w(C) = 0.08\% \sim 0.15\%$ 、 $w(Si) = 0.8\% \sim 1.5\%$ 及 $w(Mn) + w(Cr) + w(Mo) + w(V) \leq 3\%$ 。贝氏体钢管管材的生产过程为:100 t电炉冶炼+钢包精炼(Ladle Furnace, LF)+真空

处理(Vacuum Degassing, VD),连铸成直径为 $\varnothing 430$  mm的铸锭。铸锭经加热、热穿孔、钢管连轧、定径及冷床冷却,热轧成尺寸为 $\varnothing 420$  mm $\times$ 16 mm的钢管。试验材料的力学性能试样均取自于热轧态钢管。采用JB-300型摆锤式冲击试验机对试样进行冲击,将其加工成10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm的V型缺口冲击试样;利用DDL300型拉伸试验机进行试样的拉伸,将其加工成直径为 $\varnothing 8$  mm的标准短拉伸试样;使用NIKON EPIHOT-300显微镜观察试样的金相组织,组织腐蚀液为4%硝酸酒精溶液;采用Quanta 400扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察试样的组织形貌;使用X射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD)(型号:XRD-6000)分析实验材料物相。根据实验材料的 $A_{C3}$ 相变温度测定结果,确定实验材料的正火热处理加热温度分别为850 °C、870 °C、890 °C、910 °C、930 °C、950 °C和970 °C,保温时间为30 min,空冷。由于贝氏体钢管在250~350 °C回火时的强韧性较高<sup>[8]</sup>,故选择不同温度正火后进行300 °C回火,热处理设备为CY00-1型箱式电阻炉。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 正火温度对贝氏体钢管力学性能的影响

图1为正火温度( $T$ )对高强度贝氏体钢管力学性能的影响曲线。从图1(a)可以看出,贝氏体钢管的强度( $R_m$ )随正火温度的上升呈下降趋势,但变化幅度不大,抗拉强度在1 000~962 MPa之间,因此,在不同加热温度下贝氏体钢管均具有较高的强度。图1(b)为无碳化物贝氏体钢管冲击功( $A_{KV}$ )随正火温度的变化曲线,由图1(b)可以看出,随正火温度的提高,冲击功有增加的趋势,加热温度在930 °C时冲击功出现最大值,为82.6 J,超过930 °C加热,冲击功下降。图1(c)为贝氏体钢管延伸率( $A$ )随正火温度的变化曲线,由图1(c)可以看出,随正火加热温度提高,延伸率有增加的趋

势,在950℃加热出现峰值;加热温度为930~950℃时,延伸率指标较高,在18.3%~18.6%区间;超过950℃加热,延伸率下降;在970℃加热,最低延伸率指标为16.5%。图1(d)为贝氏体钢管断面收缩率( $Z$ )随加热温度的变化曲线,由图1(d)可以看出,随正火加热温度的提高,断面收缩率有增加趋势,930℃加热,断面收缩率出现峰值,超过930℃加热,断面收缩率下降。

贝氏体钢管的力学性能随正火温度变化的原因为,随正火加热温度的提高,奥氏体转变比较充分,奥氏体组织中合金元素的固溶度增加,提高了奥氏体的稳定性,增加了正火热处理后组织中的残

余奥氏体量,提高韧性,降低强度。但当温度过高时,贝氏体钢管的组织长大,造成晶粒粗化,降低强度及其塑性。超过950℃加热,冲击功有所升高,虽然组织粗大,但是过高的加热温度会造成组织中的残余奥氏体量增加,提高韧性<sup>[9-11]</sup>。虽然930℃加热时实验材料的抗拉强度的值并非最高,但与其他加热温度相比,其抗拉强度的降低幅度不大,而延伸率和断面收缩率较高,冲击功在930℃加热时最高。因此,从强度和韧性的配合来看,贝氏体钢管最佳的正火温度为930℃。930℃加热空冷,300℃回火获得的力学性能为 $R_m=971\text{ MPa}$ , $A=18.3\%$ , $Z=69\%$ , $A_{KV}=82.6\text{ J}$ 。

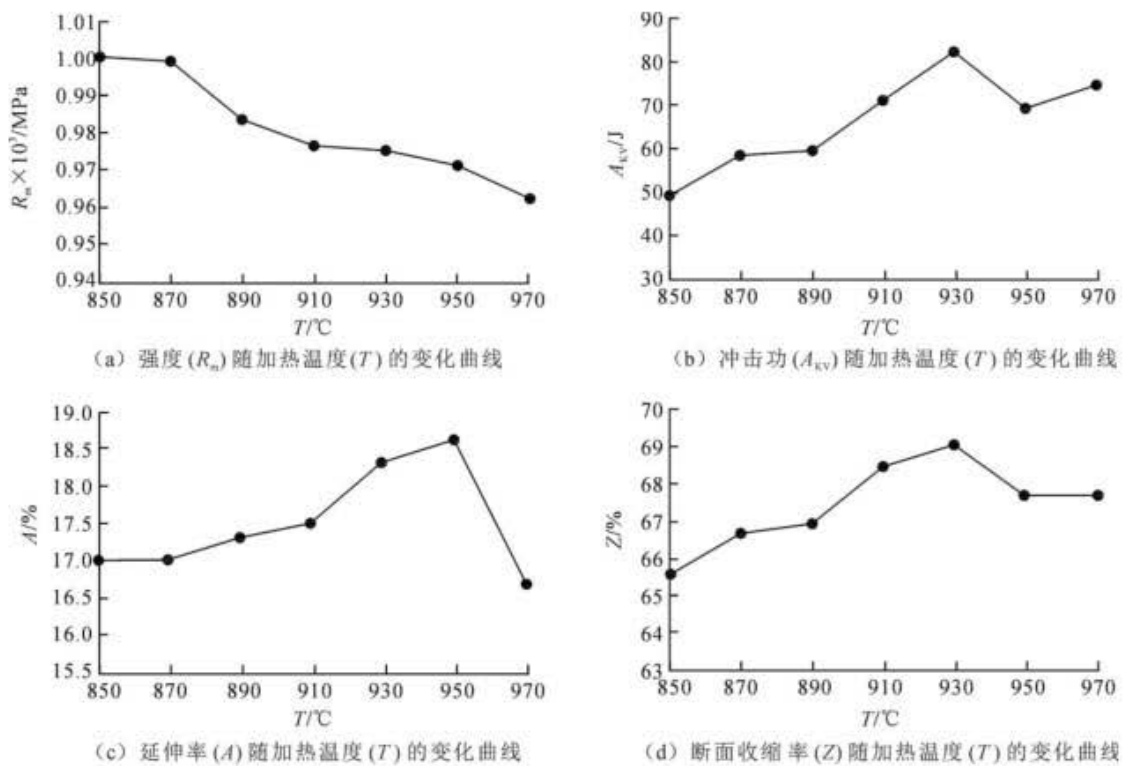


图1 无碳化物贝氏体钢管力学性能随正火温度的变化曲线

Fig. 1 Change of mechanical properties of carbide free bainite steel pipe with normalizing temperature

## 2.2 正火温度对贝氏体钢管物相及组织的影响

图2为贝氏体钢管在不同温度下(850℃、890℃、930℃和970℃)加热正火,300℃回火冲击试样的XRD衍射图谱。由图2可以看出,不同温度加热正火,300℃回火时,贝氏体钢管的XRD衍射峰主要有铁素体峰( $\alpha$ )和奥氏体峰( $\gamma$ ),无碳化物峰存在,说明组织中无碳化物相存在。因此,在不同正火温度加热,300℃回火的条件下,贝氏体钢管的组织应为贝氏体铁素体和奥氏体组织,为无碳化

物贝氏体组织。

图3为贝氏体钢管在不同温度加热正火,300℃回火的显微组织形貌图。结合图2的XRD衍射分析可知,实验材料在850~970℃加热,300℃回火时,显微组织均为贝氏体铁素体和残余奥氏体,即为无碳化物贝氏体组织。由于组织无碳化物相的存在,典型的贝氏体组织中的碳化物被奥氏体取代,且奥氏体为韧性相,可以提高贝氏体钢的塑性、耐磨性及接触疲劳寿命<sup>[12-14]</sup>。因此,无碳化物贝氏体组织具有良好的韧性。

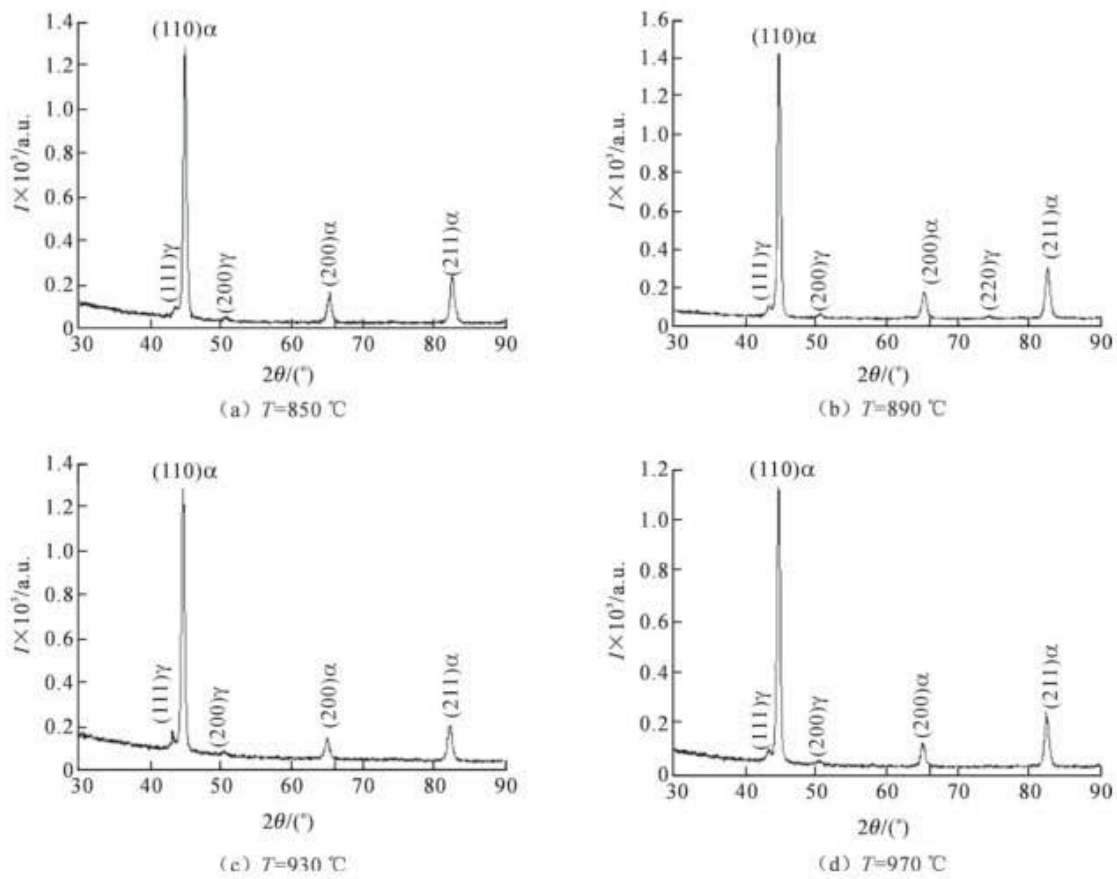


图2 不同正火温度冲击试样的XRD衍射图谱

Fig. 2 XRD diffraction patterns the impact specimens at different normalizing temperatures

由图3(a)可知,850 °C加热时的显微组织主要由粒状贝氏体组织、板条无碳化物贝氏体组织和少量块状铁素体组成。粒状贝氏体是由贝氏体铁素体基体上大体呈方向性排列的马氏体(M)-奥氏体(A)岛组成,M-A岛的形成是由于冷却过程中,碳原子由铁素体/奥氏体界面向奥氏体内扩散,使残余奥氏体含碳量升高,发生稳定化,随后冷却过程中部分富碳奥氏体发生马氏体转变,与稳定化奥氏体形成M-A岛<sup>[15]</sup>。850 °C加热空冷形成的板条状贝氏体组织的板条较长,组织较为粗大。随着加热温度提高,正火组织有所细化。由图3(b)可知,870 °C空冷下的显微组织主要由粒状贝氏体组织和少量块状铁素体组成,与850 °C加热正火组织相比,其组织中长板条较少,组织有所细化。图3(c)和图3(d)分别为890 °C及910 °C加热空冷的显微组织,与870 °C加热正火组织形貌一致,也为粒状贝氏体和少量的块状铁素体。

由图3(e)可知,930 °C加热正火的显微组织主

要为粒状贝氏体和板条状无碳化物贝氏体,与前几个加热温度的组织相比,930 °C加热的组织更加细化,具体表现在一个原奥氏体晶粒内出现不同位相的转变组织,组织细小可以提高实验材料的冲击功。由图3(f)可以看出,930 °C加热正火时,无碳化物贝氏体铁素体中残余奥氏体分布在板条贝氏体的板条之间,贝氏体铁素体之上分布的被奥氏体包围的岛状物为M-A岛<sup>[16]</sup>。

由图3(g)可知,950 °C加热正火的显微组织主要由板条状贝氏体、粒状贝氏体和少量铁素体组织组成,这是由于随着加热温度提高,贝氏体板条长度增加,晶粒有所粗化,晶粒尺寸增加会降低实验材料的韧性。由图3(h)可知,970 °C加热正火的显微组织主要为粒状贝氏体、板条状贝氏体及少量的块状铁素体,但与前几个加热温度的组织相比,其板条长度明显增加,晶粒粗化,但板条束尺寸未粗化,由于板条束较细,再加之残余奥氏体对韧性的有益作用,实验材料具有较高的冲击功。



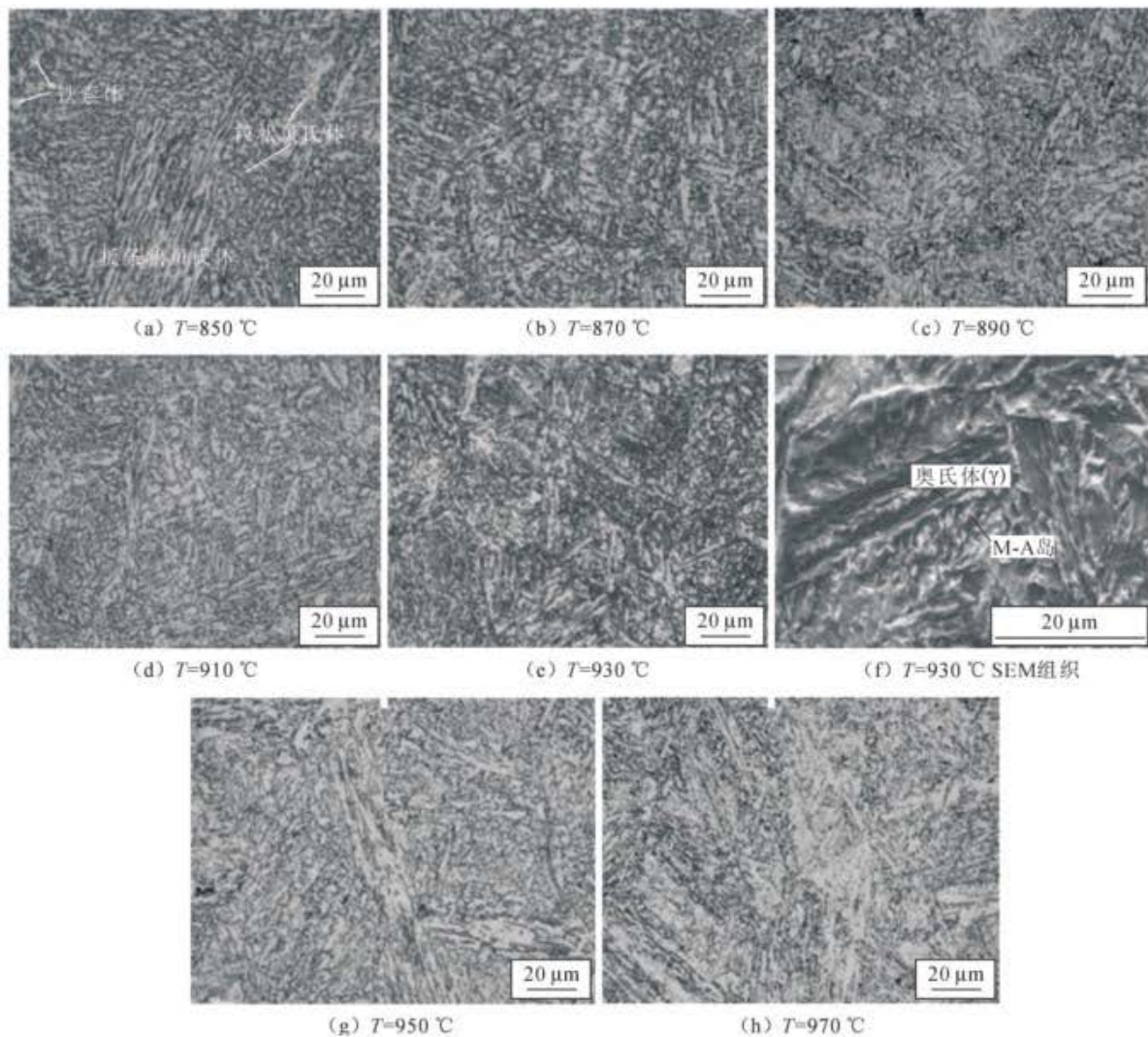


图3 不同正火温度加热,300 °C回火下冲击试样的组织形貌

Fig. 3 Microstructure at different normalizing temperatures and tempering temperature of 300 °C

### 3 结论

1) 无碳化物贝氏体钢管随正火加热温度的提高,抗拉强度有降低趋势,总体降幅较小,当正火温度为 930 °C 时,材料的抗拉强度较高,冲击功达到最高值,延伸率和断面收缩率较高。实验材料最佳的正火加热温度为 930 °C。930 °C 加热正火,300 °C 回火时,无碳化物贝氏体钢管的力学性能为:  $R_m=971$  MPa,  $A=18.3\%$ ,  $Z=69\%$ ,  $A_{KV}=82.6$  J。

2) 无碳化物贝氏体钢管在不同温度加热正火,其显微组织主要为无碳化物贝氏体和少量块状铁素体,在 930 °C 加热,其组织细化程度较高,超过 930 °C 加热,随加热温度升高,无碳化物贝氏体钢管组织中板条贝氏体组织比例增加,板条长度增加,组织粗化。

### 参考文献:

- [1] 李奇. “十三五”钢管标准体系建设方案探讨[J]. 钢管, 2017, 46(4): 1.  
LI Qi. Discussion of Establishment Scheme of Steel Pipe Standard System in “13th Five-Year Plan” [J]. Steel Pipe, 2017, 46(4): 1. (in Chinese)
- [2] 周勇. 调质钢管的缺陷分析[J]. 物理测试, 2009, 27(2): 45.  
ZHOU Yong. Analysis on Defects on Quenched and Tempered Steel Tubes [J]. Physics Examination and Testing, 2009, 27(2): 45. (in Chinese)
- [3] 席光兰, 马勤. 贝氏体钢的研究现状和发展展望[J]. 材料导报, 2006, 20(4): 78.  
XI Guanglan, MA Qin. The Research Situation and Development Prospect of Bainitic Steels [J]. Materials

- Reports,2006,20(4):78. (in Chinese)
- [4] 程巨强,康沫狂. 新型准贝氏体钢及工程应用[J]. 西安工业学院学报,2000,20(1):43.  
CHENG Juqiang,KANG Mokuang. New Type Meta-bainited Steel and Its Application to Engineering[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology,2000,20(1):43. (in Chinese)
- [5] 程巨强,康沫狂. 准贝氏体钢使用性能研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2002,25(1):61.  
CHENG Juqiang,KANG Mokuang. Research Progress of Service Properties of Meta-bainite Steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering,2002,25(1):61. (in Chinese)
- [6] 吴海林,刘祖强,李志鑫. 正火温度和时间对 BN 管线钢性能及组织的影响试验[J]. 柳钢科技,2016(6):16.  
WU Hailin,LIU Zuqiang,LI Zhixin. Test of Normalizing Temperature and Time Influence on the Properties and Microstructure of BN Pipeline Steel[J]. Science and Technology of Liuzhou Steel,2016(6):16. (in Chinese)
- [7] 孙庭秀,周晋仕,马晓琴. 正火温度对高频电阻焊管 X52 钢组织性能的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(11):193.  
SUN Tingxiu,ZHOU Jinshi,MA Xiaoqin. Effects of Normalizing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of High Frequency Electric Resistance of Welded Pipe X52 Steel[J]. Hot Working Technology,2012,41(11):193. (in Chinese)
- [8] 程晔锋,程巨强,游人杰. 回火温度对热轧态高强度贝氏体钢管组织性能的影响[J]. 钢管,2020,49(1):29.  
CHENG Yefeng,CHENG Juqiang,YOU Renjie. Effect by Tempering Temperature on Microstructure and Properties of Hot-rolled High Strength Bainite Steel Pipe [J]. Steel Pipe,2020,49(1):29. (in Chinese)
- [9] 程彦,程巨强,李振飞. 加热温度对无碳化物贝氏体截齿钢组织和性能的影响[J]. 煤矿机械,2019,40(2):62.  
CHENG Yan,CHENG Juqiang,LI Zhenfei. Effects of Heating Temperature on Microstructure and Properties of Carbide-Free Bainitic Pick Steels[J]. Coal Mine Machinery,2019,40(2):62. (in Chinese)
- [10] 程彦,程巨强,李振飞. 奥氏体化保温时间对无碳化物贝氏体钢组织和性能的影响[J]. 铸造技术,2019,40(4):365.  
CHENG Yan,CHENG Juqiang,LI Zhenfei. Effect of Austenitizing Time on Microstructure and Properties of Carbide Free Bainite Steel[J]. Foundry Technology,2019,40(4):365. (in Chinese)
- [11] 徐美玲,程巨强,刘志学. 35SiMnMo 截齿钢正火回火热处理工艺的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(10):193.  
XU Meiling,CHENG Juqiang,LIU Zhixue. Research on Normalizing Tempering Heat Treatment for 35SiMnMo Pick Steel [J]. Hot Working Technology,2012,41(10):193. (in Chinese)
- [12] 王明明,龙海洋,肖亚茹,等. 高强度贝氏体钢中的残留奥氏体(I)[J]. 金属热处理学报,2019,40(10):1.  
WANG Mingming,LONG Haiyang,XIAO Yaru,et al. Retained Austenite in High-strength Bainitic Steels (I) [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2019,40(10):1. (in Chinese)
- [13] 王明明,肖亚茹,踞立颖,等. 高强度贝氏体钢中的残留奥氏体(II)[J]. 金属热处理学报,2019,40(10):13.  
WANG Mingming,XIAO Yaru,JU Liying,et al. Retained Austenite in High-strength Bainitic Steels (II) [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2019,40(10):13. (in Chinese)
- [14] 万响亮,胡锋,成林,等. 残留奥氏体对微纳贝氏体钢塑韧性的影响[J]. 钢铁研究报,2019,31(3):305.  
WANG Xiangliang,HU Feng,CHENG Lin,et al. Effect of Retained Austenite on Plasticity and Toughness of Micro/nano Bainitic Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(3):305. (in Chinese)
- [15] 金传伟,张珂,吴园园. 透射-电子背散射衍射技术表征双相钢中马氏体-奥氏体岛的相结构及晶粒取向[J]. 冶金分析,2019,39(12):1.  
JIN Chuanwei,ZHANG Ke,WU Yuanyuan. Characterization of Phase Structure and Grain Orientation of Martensite-austenite Island in Duplex Steel by Transmission-electron Backscatter Diffraction [J]. Metallurgical Analysis,2019,39(12):1. (in Chinese)
- [16] 程彦,程巨强. 改善大截面 20SiMn3MoV 贝氏体钢组织和性能的热处理工艺研究[J]. 材料热处理学报,2020,41(4):151.  
CHENG Yan,CHENG Juqiang. Heat Treatment Process for Improving Microstructure and Properties of Large Section 20SiMn3MoV Bainitic Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2020,41(4):151. (in Chinese)

(编辑、校对 潘秋岑)

加入“常州精密钢管博客官方知识星球”即可免费下载所有的专业技术文档!

**常州精密钢管博客 知识星球**

专业的 钢铁知识 钢管知识 热处理知识 钢铁行业资讯 分享网站

官方网站: <http://www.josen.net>

微信扫码加入星球

