

# 起重机臂架用 BT770 无缝钢管的开发

康虹<sup>1</sup>, 方明山<sup>2</sup>, 李东东<sup>1</sup>, 董珍<sup>1</sup>, 姚晓乐<sup>1</sup>, 贾冬梅<sup>1</sup>, 赵晓峰<sup>1</sup>

1. 内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 文章介绍了包钢生产的起重机臂架用 BT770 无缝钢管的技术要求、生产工艺控制和质量性能情况, 经“连铸坯 + PQF 连轧无缝钢管 + 调质热处理”全流程生产工艺以及钢管外表面处理工艺生产的 BT770 臂架用钢管, 具有较高的强韧性和良好的低温冲击韧性、焊接性能、表面质量。

**关键词:** 无缝钢管; BT770; 起重机臂架管; 开发

中图分类号: TH213.7; TG335.71

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)04-0054-04

## Development of Seamless Steel Pipe BT770 for Crane Boom

Kang Hong<sup>1</sup>, Fang Ming-shan<sup>2</sup>, Li Dong-dong<sup>1</sup>, Dong Zhen<sup>1</sup>,  
Yao Xiao-le<sup>1</sup>, Jia Dong-mei<sup>1</sup>, Zhao Xiao-feng<sup>1</sup>

1. Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In the paper, the technical requirements, production process control and quality performances of seamless steel pipe BT770 for crane boom produced by Baotou Steel are introduced. The seamless steel pipe BT770 for crane boom produced with the full process production process of “continuous casting billet + PQF continuous rolled seamless steel pipe + quenched - tempered heat treatment” and treatment process of external surface for steel pipe are with higher strength and toughness, good low temperature impact toughness, welding performances and surface quality.

**Key words:** seamless steel pipe; BT770; pipe for crane boom; development

履带式起重机是工程机械起重机中非常重要的一类, 由空间桁架框架结构与连接接头组成的臂架是履带式起重机重要的承载部件, 主要作为弦杆与腹杆使用, 起承载和移送起吊重物的作用。一般采用低合金高强度无缝管制造起重机的臂架, 对设备轻量化、提高臂架承载能力有重要意义<sup>[1-4]</sup>。由于起重机臂

架特殊的服役工况, 要求臂架用钢管不仅具有高强韧性, 还应具有良好的低温冲击韧性和焊接性能。

目前, 国内鞍钢、衡阳钢管、宝钢等企业已经成功研发相关产品, 并取得了较好业绩。内蒙古包钢钢管有限公司(以下简称钢管公司)与国内某用户合作开发臂架用无缝钢管(牌号为 BT770), 成功实

现了 BT770 无缝钢管的设计开发与工业化生产。

## 1 成分设计

为了保证钢管的焊接性能和低温冲击韧性,采用低 C 含量、加入 Mn、Cr、Mo、Ni、V 等合金元素的成分设计思路,利用合金元素固溶强化、析出强化和细晶强化等机理,获得高强高韧 BT770 无缝钢管。

结合钢管公司冶炼生产实际,选用 Cr - Mo - V - Ni 系成分体系,化学成分设计见表 1。其中 Cr 和 Fe 结合可形成固溶体,与 C 结合可形成多种碳

化物,可有效提高钢的淬透性。钢中有较高含量的 Mn 元素时,会增大热处理时高温回火脆性倾向,需添加 Mo 元素减弱高温回火脆性的倾向。V 在钢中的主要作用是细化晶粒,可增加淬火钢的回火稳定性。Ni 是形成稳定奥氏体的主要合金元素之一,可以改善钢的低温冲击韧性,还能降低钢的临界温度和钢中各元素的扩散速度,可提高钢的淬透性,改善钢的回火脆性<sup>[5]</sup>。同时向钢中添加一定量的稀土元素,发挥其净化钢液、细化晶粒、微合金化等作用,进一步改善钢的低温冲击韧性。

表 1 BT770 化学成分设计(质量分数)

								%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo、V	RE
≤0.18	≤0.50	≤1.5	≤0.020	≤0.010	≤0.70	≤0.80	适量	≤0.05

## 2 生产工艺控制

### 2.1 炼钢工艺

炼钢生产工艺流程:高炉铁水→铁水预处理→转炉冶炼→LF 炉外精炼→VD 真空处理→Φ200 mm 圆坯连铸→铸坯缓冷→入库。

采用 100 t 转炉冶炼,严格控制钢中 S、P 含量和五害元素,出钢温度控制在 1 610 ~ 1 630 ℃。采用硅铁、锰铁和铬铁进行脱氧合金化,终脱氧采用有

铝脱氧工艺,严格控制钢中氧含量。VD 工艺控制真空度不大于 0.10 kPa,深真空时间不小于 15 min。连铸工艺中采用结晶器电磁搅拌和末端电磁搅拌工艺,促使钢液中夹杂物上浮,降低连铸坯成分偏析。经检验,连铸坯的熔炼化学成分和气体含量均满足设计要求,见表 2、表 3。酸浸低倍结果为疏松 0.5 级,中心缩孔 1 级,未发现其他内部缺陷,连铸坯内部质量良好,见图 1。

表 2 BT770 熔炼化学成分(质量分数)

								%
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo、V、RE	
0.176	0.389	1.324	0.01	0.003	0.358	0.704	0.307	

表 3 气体含量(质量分数)

			%
项目	H	O	N
实测值	0.000 6	0.001 6	0.007 5
设计要求	≤0.002 5	≤0.003	≤0.008

### 2.2 轧管工艺

轧管生产工艺流程:管坯锯切→加热→穿孔→连轧→脱管→张减径→冷床→锯切→矫直→无损检验。

选用 Φ159 mm PQF 连轧管机组进行轧制,生产规格为 Φ159 mm × 10 mm。由于多元合金的成分设计,要严格控制环形炉各工序温度,均热段温度控制在 1 050 ~ 1 290 ℃ 之间,最高加热区域的温度要低于 1 300 ℃,保证钢管加热均匀。

基于用户后续表面涂漆加工工艺的控制要求,用户要求钢管外表面不允许存在氧化铁皮。有研究表明,在轧制过程中钢管外表面状态直接影响后续热处理过程中氧化铁皮的生成及可去除性<sup>[6]</sup>。因



图 1 连铸坯低倍形貌

此,需在热轧过程中控制钢管外表面质量,尽量减少氧化铁皮的产生,在张减径前要进行高压水除鳞,水压不低于 10 MPa,保证轧管表面质量。

### 2.3 热处理工艺

经测定,该钢种的  $Ac_1$  为 656 °C,  $Ac_3$  为 795 °C,  $Ms$  为 403 °C。在实验室进行不同回火温度的热处理工艺优选试验,试验结果见表 4,其中 580 °C 回火

热处理的钢管纵向力学性能满足技术要求,但是冲击功偏下限,故选定工业热处理制度为 920 °C 淬火 + 610 °C 回火。采用内喷 + 外淋的方式进行淬火,设定内喷流量大于 700 m<sup>3</sup>/h,外淋流量大于 2 000 m<sup>3</sup>/h,水淬时间大于 12 s,同时要保证水淬时钢管冷却均匀。回火时钢管受热均匀,全长温度偏差小。

表 4 BT770 无缝钢管不同回火温度下的纵向力学性能及技术要求

热处理制度	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈强比	-40 °C 冲击功/J	
技术要求	≥790	880 ~ 1 020	≥14		≥40	
920 °C 淬火 + 680 °C 回火	606	725	21	0.84	211	209
920 °C 淬火 + 660 °C 回火	633	731	22	0.87	195	203
920 °C 淬火 + 640 °C 回火	684	771	22	0.89	189	203
920 °C 淬火 + 610 °C 回火	879	931	18	0.94	147	116
920 °C 淬火 + 580 °C 回火	904	959	16	0.94	40	43

### 2.4 喷砂表面处理工艺

调质处理后采用喷砂方式实现对钢管外表面的质量控制,钢管按 6 m/min 的速度进行喷砂表面处

理,可以完全去掉氧化铁皮。钢管处理前后的外表面形貌对比如图 2 所示,由图可见处理后钢管的外表面光滑,氧化铁皮已完全去除,具有良好的表面质量。

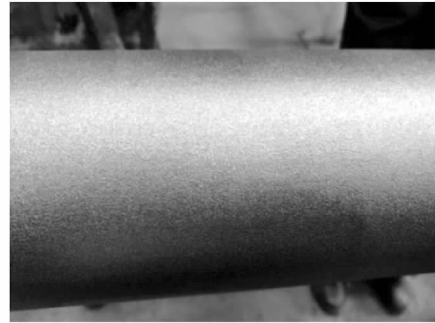


图 2 钢管处理前后的外表面形貌对比图

## 3 生产试制结果

### 3.1 力学性能检验

BT770 无缝钢管的纵向力学性能检测结果如表 5 所示。结果表明,钢管的各项纵向力学性能完全

符合 GB/T 30584—2014《起重机臂架用无缝钢管》<sup>[7]</sup>和用户的技术要求,且可与国内主要生产厂家(衡阳、攀钢等)同类产品的性能指标相媲美<sup>[8-9]</sup>。

表 5 BT770 无缝钢管纵向力学性能

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	冲击功/J
实测值	849	934	18	113(-40 °C)
技术要求	≥790	880 ~ 1 020	≥14	≥40(-40 °C)
GB/T 30584—2014	≥770	820 ~ 1 000	≥15	≥55(-20 °C)
衡阳	810 ~ 910	840 ~ 940	18 ~ 26	82 ~ 135(-20 °C)
攀钢	870 ~ 915	915 ~ 945	17 ~ 18	174 ~ 184(-20 °C)

### 3.2 金相检验

调质态钢管的金相检验结果见表 6, 显微组织为均匀的回火索氏体, 见图 3。结果表明, 钢管的非

金属夹杂物含量低, 晶粒细小, 组织均匀, 带状组织级别低。

表 6 BT770 无缝钢管金相检验

非金属夹杂物/级					晶粒度	脱 C 层深度	带状组织
A	B	C	D	DS	/级	/mm	/级
0.5	0.5	0	0.5	0	9	0	0.5

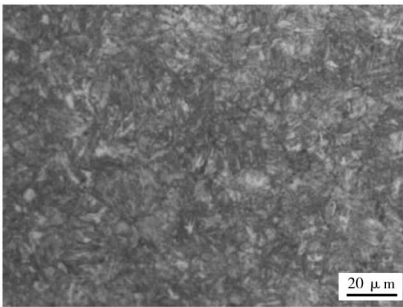


图 3 调质态钢管金相组织形貌

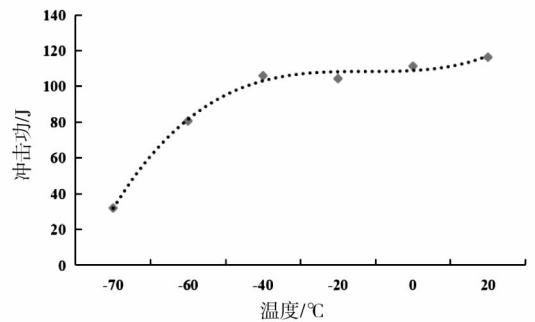


图 4 BT770 臂架钢管韧脆转变曲线

### 3.3 低温冲击韧性试验

设计 -70 °C、-60 °C、-40 °C、-20 °C、0 °C、20 °C 共 6 个温度, 测定每个温度下钢管的冲击功, 绘制 BT770 臂架钢管的韧脆转变曲线, 如图 4 所示。可以看出, 在 -40 ~ 20 °C 之间, 随着温度的降低, 试样的冲击功没有较大变化, 此时冲击功的变化处于一个平台区间。当温度低于 -40 °C 时, 随着温度的持续降低, 钢管的冲击功迅速下降。通过分析韧脆转变曲线, 可知钢管的韧脆转变温度为 -65 °C, 说明材料具有良好的低温冲击韧性。

### 3.4 焊接评定试验

经用户检测中心依据 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》<sup>[10]</sup>、GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》<sup>[11]</sup>、GB/T 2652—2008《焊缝及熔敷金属拉伸试验方法》<sup>[12]</sup>、GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》<sup>[13]</sup> 和 JB/T 6963—1993《钢制件熔化焊工艺评定》<sup>[14]</sup> 等标准对 BT770 臂架用钢管进行焊接评定试验, 试验结果见表 7, 钢管焊接后的拉伸试验、冲击试验和弯曲试验均满足用户技术要求。

表 7 BT770 无缝钢管焊接后试验结果及技术要求

项目	拉伸试验 $R_m$ /MPa	弯曲试验		-40 °C 冲击功/J			
		面弯	背弯	焊缝处	热影响区	熔合区	母材
焊后样管	854	合格	合格	55	25	58	66
技术要求	≥820	合格	合格		≥20		

## 4 结束语

采用 Cr - Mo - V - Ni 成分体系以及合理的生产工艺控制技术生产的 BT770 臂架用钢管, 钢管的各项性能指标完全满足履带式起重机臂架管的使用要求, 具有较高的强韧性和良好的低温冲击韧性、焊接性能、表面质量。

## 参 考 文 献

[1] 王小明, 卢志强. 国内外大型起重机的研究现状及发展趋势[J]. 机电产品开发与创新, 2009, 22(2): 6-7.

(下转第 88 页)

- 技术研究进展[J]. 计算机应用, 2023(S1): 187-195.
- [2] 于涛, 申瑾. 建筑业数字化转型阶段工程管理人才培养教学改革研究[J]. 工程管理学报, 2022(4): 153-158.
- [3] 龚波涛, 肖斌, 汪孔屏, 等. 电力建设工程管理数字化应用[J]. 电力与能源, 2022(1): 92-94.
- [4] 李鑫. 工程施工行业与数字化技术的相关性思考[J]. 建材发展导向, 2022(4): 108-110.
- [5] 小荣. 数字化工程管理, “智”造美好生活[J]. 商学院, 2021(12): 112-113.
- [6] 卢志瑜, 邓恺坚, 王志强, 等. 基于新一代信息技术的工程建设数字化转型实践[J]. 国企管理, 2021(15): 60-69.

(上接第57页)

- [2] 游理华, 卫兴民, 洪连山. 用作起重机臂架的高强度钢管[J]. 起重运输机械, 1995(10): 15-18.
- [3] 王西江, 易良刚, 黄生权, 等. 高强度起重机臂架管用CS-Q780钢的冶炼工艺[J]. 钢管, 2011, 40(S1): 17-19.
- [4] 张新文, 刘广华, 轩康乐, 等. 履带式起重机臂架用890 MPa级钢管热处理性能探讨[J]. 现代交通与冶金材料, 2021, 1(4): 88-92.
- [5] 李刚, 张冬梅, 李蒙. 球磨机衬板用低合金耐磨钢的研制[J]. 热加工工艺, 2010, 39(21): 25-27.
- [6] 孙徕博, 李志群, 赵强. 热轧无缝钢管表面状态对后续氧化铁皮形成的影响[J]. 天津冶金, 2018(1): 31-34.
- [7] GB/T 30584—2014, 起重机臂架用无缝钢管[S].
- [8] 陈绍林. 履带式起重机臂架用HSM770无缝钢管的开发[J]. 钢管, 2010, 39(5): 42-44.
- [9] 董芬, 张新义, 李道刚, 等. 鞍钢AGQ770E起重机臂架管的开发[J]. 鞍钢技术, 2015(3): 16-18.
- [10] GB/T 2650—2008, 焊接接头冲击试验方法[S].
- [11] GB/T 2651—2008, 焊接接头拉伸试验方法[S].
- [12] GB/T 2652—2008, 焊缝及熔敷金属拉伸试验方法[S].
- [13] GB/T 2653—2008, 焊接接头弯曲试验方法[S].
- [14] JB/T 6963—1993, 钢制件熔化焊工艺评定[S].