高钢级射孔枪管 BT150P 无缝钢管开发[*1]

孙文秀[1,2], 陈 林[1], 张行刚[2]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金工程学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了包钢调质生产的 BT150P 钢级射孔枪管, 通过钢种设计、热处理工艺试验和实际生产总结了高钢级射孔枪管的开发情况和效果。结果表明, 通过合适的热处理工艺后射孔枪管达到了 150 KSI 强度级别, 具备高强高韧的性能。

关键词: 射孔枪管; 调质; 150 KSI
中图分类号: TG335.71 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)01 - 0051 - 04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.01.013

Development of BT150P Seamless Steel Tube for High Steel Grade Perforating Gun Pipe

Sun Wen - xiu[1,2], *Chen Lin*[1], *Zhang Xing - gang*[2]

(1. *School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, it is introduced the BT150P perforating gun pipe produced with hardening and tempering by Baotou Steel as well as summarized the situation and effects of developing it through designing steel grade, technological test of heat treatment and actual production. The results showed that the perforating gun pipe reached 150 KSI strength level and was with high strength and ductility by the proper heat treatment.

Key words: perforating gun pipe; hardening and tempering; 150 KSI

高钢级射孔枪管是制作油气井高性能射孔枪的主要部件, 射孔作业时射孔枪管中要填充弹架对射孔方向进行定位, 保护射孔火工器件不受井内流体浸泡, 承受压力和减轻射孔作业时对井下套管的损害, 并在爆炸过程中保护油层套管。其工作条件恶劣, 枪体除了受介质腐蚀、井温及压力的影响外, 主要威胁来自射孔弹发射时产生的高压及巨大冲击波, 同时射孔枪管内部还要填充射孔弹架、射孔弹以及炸药, 对其质量和性能尤其是横向冲击韧性要求非常严格, 根据管材冲击韧性的检测方法可以看到, 横向冲击韧性体现了管材沿纵向方向开裂的倾向性[1]。一般情况下, 管材强度越高时, 其冲击韧性就越低, 横向冲击韧性就更低。文章通过 BT150P 钢种成分设计、工业生产, 重点进行了实验室热处理工艺试验来满足 BT150P 射孔枪管各方面性能的要求。

* 收稿日期: 2018 - 03 - 01
作者简介: 孙文秀(1989 -), 女, 内蒙古包头市人, 在读硕士, 助理工程师, 现从事无缝产品研发工作。

中国知网 https://www.cnki.net

1 试验方法

1.1 设计指标

射孔枪管在射孔作业时不仅要承受射孔弹高载荷高速冲击作用，还要承受射孔弹碎片对管材反向撞击作用[2]。这样不仅对射孔枪管冲击韧性的要求非常高，对其屈服强度的要求也很高，以承受较高的撞击载荷。为满足射孔，保证射孔枪管达到高强高韧的要求，材料主要性能设计指标见表1。

表1 BT150P性能设计指标

屈服强度 $R_{t0.7}$/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	A /%	冲击韧性 A_{kv}(0 ℃)/J	
			纵向	横向
1 034～1 184	≥1 088	≥12	≥100	≥60

1.2 成分设计

BT150P以中碳Cr－Mo系高强度低合金钢为主，特别是增加了Mo含量以提高回火抗性；同时加入V，V除了能细化晶粒外也有抗高温回火性，通过高温调质处理，在强度满足要求的同时提高材料的冲击韧性，同时降低钢中五害元素As、Sn、Pb、Sb、Bi，气体[H]、[O]、[N]以及P、S的含量；五害元素有回火脆性倾向，P、S弱化晶界，尽量控制这些有害元素及气体，保持钢质纯净，钢种化学成分设计如表2所示。

表2 BT150P化学成分设计(质量分数) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
≤0.30	0.17～0.37	≤1.3	≤0.020	≤0.010	≤1.0	≤0.75	≤0.5

1.3 工艺流程

铁水预处理→顶底复吹转炉→LF精炼→VD真空处理→圆坯连铸→轧管→热处理→检验→水压试验→探伤→定尺、包装、入库。

高钢级管材对非金属类夹杂物异常敏感，夹杂物的控制是实现管材高强高韧性能的关键[3]。为了控制夹杂物数量，改善夹杂物形态，细化夹杂物粒度，采用纯净钢冶炼工艺，喂入充分的铝丝进行脱氧，并适量喂入硅钙丝对夹杂物球化处理。真空脱气吹氩弱搅拌后保持至少5 min镇定时间，促进夹杂物充分上浮。根据尺寸精度要求，采用无缝管热连轧工艺。根据该钢的热塑性曲线，控制轧制温度，调整环形炉加热温度，控制初轧温度、终轧温度和热定径。以此为工艺重点进行生产，材料的成分控制合理，且P、S含量低，五害元素、尺寸精度控制满足要求。

2 实验室试验及结果分析

热处理是改善钢管组织性能的重要手段，特别是对于高强钢管，必须进行精确化调质处理。回火温度是影响套管调质性能的最主要因素，为此，研究了热处理对无缝钢管组织、性能的影响，旨在使钢管得到最佳强韧性匹配。取现场生产的轧态管样，在实验室进行了热处理试验，热处理试验在箱式电阻炉中进行，设定相应的热处理试验工艺。

2.1 热处理试验

通过前期CCT曲线研究已经测出BT150P钢种的A_{c3}和A_{r1}温度分别为833 ℃、745 ℃，因此，设定淬火温度为900 ℃，根据壁厚设定淬火保温时间为40 min，在不同的回火温度下进行试验，热处理工艺以及力学性能结果见表3。

材料金相组织如图1所示。

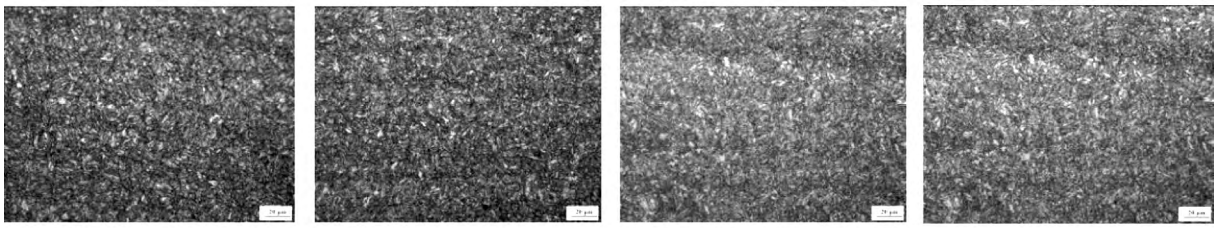
表3 BT150P实验室热处理工艺及性能检验(均值)

编号	淬火温度 /℃	保温时间 /min	回火温度 /℃	回火时间 /min	$R_{t0.7}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	A_{kv}(0 ℃)/J	
								横向	纵向
1	900	40	600	90	1 185	1 260	18.0	47	74
2	900	40	620	90	1 063	1 168	18.0	48	89
3	900	40	640	90	1 038	1 115	20.5	70	109
4	900	40	660	90	1 004	1 054	22.0	74	118

从热处理后材料的性能来看，随着回火温度的升高，材料强度逐渐降低，韧性逐渐升高，620 ℃以下回火，材料屈服强度、抗拉强度以及延伸率满足材料的设计要求，冲击韧性低于设计下限；640 ℃回火，材料拉伸强度和冲击韧性匹配较好，满足冲击设计要求；660 ℃回火时，材料的冲击韧性满足要求，

中国知网 https://www.cnki.net

但拉伸强度低于要求的下限。4 个工艺下材料组织均为回火索氏体，从组织形貌看，相差不大。



（a）编号1　（b）编号2　（c）编号3　（d）编号4

图 1　热处理工艺金相组织

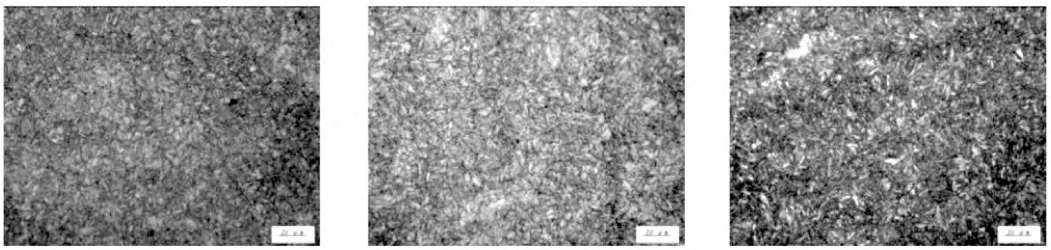
2.2　热处理工艺优化

根据以上热处理试验结果，在 630 ℃下进行了重复性热处理试验及优化，热处理工艺制度以及试验结果见表 4。

材料金相组织如图 2 所示。

表 4　热处理工艺制度及试验结果

编号	淬火温度 /℃	保温时间 /min	回火温度 /℃	回火时间 /min	$R_{t0.7}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	A_{kv}(0 ℃) /J	
								横向	纵向
1	900	40	630	60	1 066	1 181	18.5	58	100
2	900	40	630	90	1 065	1 150	19.0	67	113
3	900	40	630	120	1 049	1 135	19.5	69	116



（a）编号1　（b）编号2　（c）编号3

图 2　630 ℃回火温度下材料金相组织

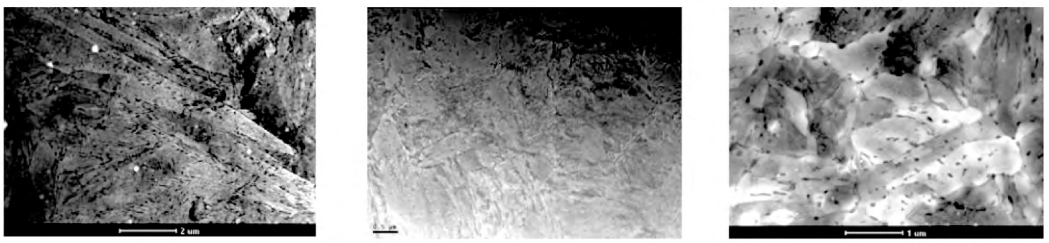
从以上热处理后材料性能可以看出，拉伸强度随着回火时间的延长而降低，延伸率和冲击功随着回火时间的延长而提高，但变化不明显。在 630 ℃回火温度下，不同的保温时间材料的拉伸性能都能满足要求，但当回火保温时间为 60 min 时，冲击性能偏下限，90 min 和 120 min 回火时材料性能都满足设计要求。3 个制度下，材料的组织均为回火索氏体，区别不大。

2.3　透射电镜分析

对以上 3 个热处理工艺下的组织进行了析出物透射电镜的检测，结果见图 3。

TEM 析出相分析如图 3 所示，BT150P 含有多种合金元素，且 Cr、Mo 合金元素含量高，在回火过程中会产生大量析出相。这些析出相一般分布在马氏体和原奥氏体晶界处，呈粒状或链状，弥散分布在基体中，细小而均匀，起到钉扎的作用，可以增加材料的回火抗力，在高温回火时，可以阻滞亚晶界在蠕变过程中的移动，保持了亚结构的稳定，不仅使材料强度降低小而且使材料具有很高的韧性。

中国知网　https://www.cnki.net

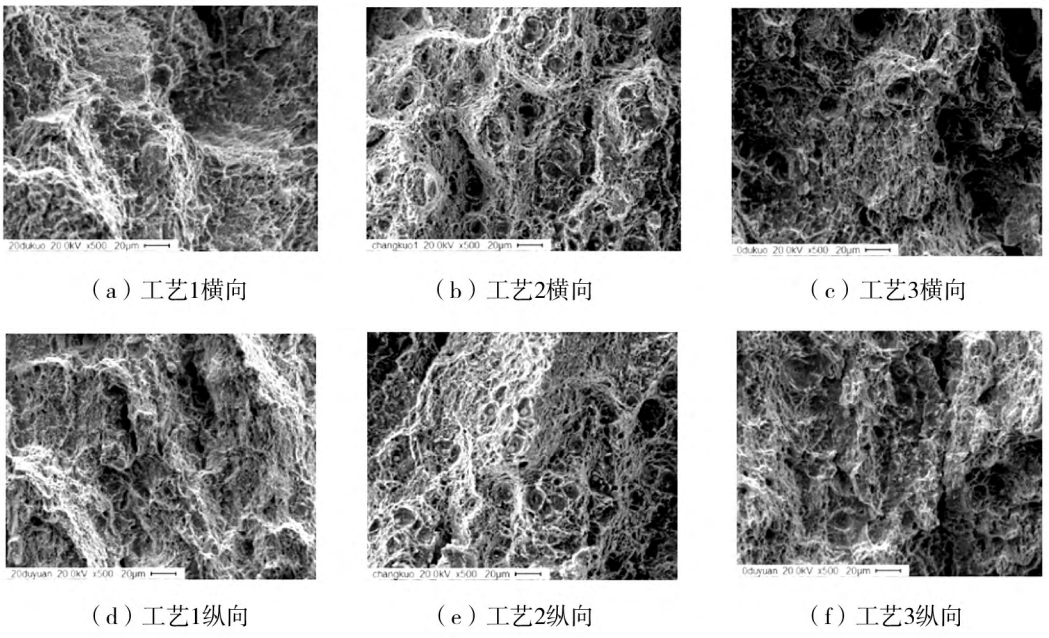


（a）编号1　（b）编号2　（c）编号3

图3　640 ℃回火温度下透射电镜照片

2.4　断口扫描

对3个工艺制度下的材料横向和纵向冲击断口进行了扫描，结果见图4。



（a）工艺1横向　（b）工艺2横向　（c）工艺3横向

（d）工艺1纵向　（e）工艺2纵向　（f）工艺3纵向

图4　冲击断口扫描照片

3个制度下材料的横向冲击韧性都在60 J以上，纵向冲击韧性在100 J以上，从材料冲击扫描断口可以看出，无论是横向冲击断口还是纵向冲击断口，都为典型的韧性断口，断口形貌中有大量的韧窝，较为均匀，为典型的解理断口形貌。

3　结论

（1）工业试制结果表明：BT150P钢种成分设计合理，炼钢轧制工艺确实可行，具备生产推广应用条件。

（2）通过对大生产取样在实验室进行各项热处理试验，找出了BT150P最佳热处理工艺制度。材料的拉伸、冲击性能满足设计要求。

参　考　文　献

[1] 邹良志，石化国，杨家忠. 国内外主要射孔技术发展评述[J]. 石油仪器，2012，26(4)：22－25.

[2] 方剑，周梦雄，邹喜洋. 32CrMo4钢射孔枪管探伤不合格原因分析[J]. 理化检验－物理分册. 2010，46(8)：512－518.

[3] 江勇，张传友，周家祥. 射孔枪用高强高韧无缝钢管开发[J]. 天津冶金，2008，(5)：33－39.

中国知网　https://www.cnki.net