高强高韧性射孔枪管无缝钢管开发*

张行刚，余泽金，石晓霞

（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高强高韧性射孔枪管，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，横向冲击韧性好，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： TE925^{+}.3 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2019)04－0059－04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.04.015

Development of Seamless Steel Pipe for High－strength and High－ductility Perforating Barrel

Zhang Xing－gang, Yu Ze－jin, Shi Xiao－xia

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, the high－strength and high－toughness perforating barrel produced with quenching and tempering by Baotou Steel is introduced. Its development and effects are summarized through the design of steel grade, heat treatment process test and actual productions. The results show that its strength can reach 150KSI level, transverse impact toughness is good so that it is with high－strength and high－toughness performance after the appropriate heat treatment process.

Key words: perforating barrel; quenching and tempering; 150KSI

射孔就是把一种专门的仪器设备下到井中的某一层段，将油层套管及固井水泥环瞬间打穿，在套管、水泥环和地层中打开一些通道，原油由这些小孔进入井身使地层中的流体能从地层中流出，这种施工过程就是射孔。射孔作业中射孔枪管中的弹架对射孔弹射孔方向进行定位，射孔枪管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，主要威胁来自射孔弹发射时产生的高压及巨大冲击波，因此材料的性能及内外表面质量的要求都极为苛刻，对射孔作业质量起着至关重要的作用，根据检测管材冲击韧性的制样方法可以看到，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。本文通过合理的成分设计以及热处理工艺成功开发出BT150P高强高韧射孔枪管，完全满足其恶劣工况使用的各项性能要求。

1 产品工艺设计

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

* 收稿日期：2019－06－05

作者简介：张行刚(1983－)，男，内蒙古包头市人，硕士，高级工程师，现从事无缝钢管产品研发工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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非常高，以承受较高的撞击载荷，又因其内部装有射孔弹架同时还要在下井中和油层套管保持一定的间隙，所以对尺寸要求也极其严格。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

$R_{t0.7}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	冲击韧性 A_{kv}(0 ℃) /J	
			纵向	横向
1 034～1 241	≥1 103	≥12	≥100	≥60

钢管外径和壁厚的允许偏差为：外径 ±0.75%；壁厚 -5% ～12.5%；钢管壁厚不均度≤16.5%，钢管弯曲度应不大于1.5 mm/m。

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含量是为了提高回火抗性，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，钢种化学成份设计如表2所示。

表2 BT150P化学成分设计(质量分数) %

钢级	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
BT150P	≤0.35	0.17-0.37	≤1.45	≤0.020	≤0.010	≤1.0	≤0.75	≤0.5

2 热处理实验及结果

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，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。

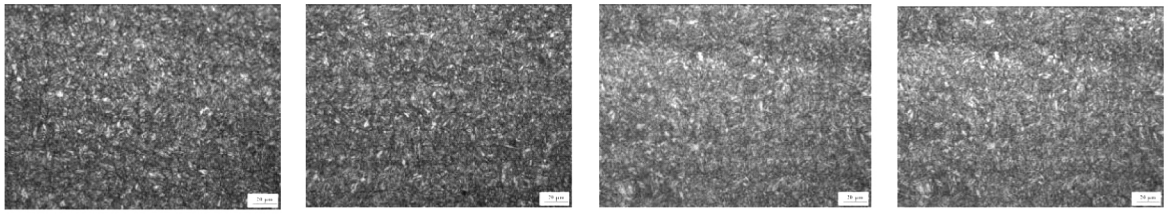
2.1 热处理试验

通过前期CCT曲线研究测出BT150P钢种的A_{c3}温度为833 ℃，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如表3所示。

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

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 /%	冲击韧性 KV_8(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



(a) 工艺1 (b) 工艺2 (c) 工艺3 (d) 工艺4

图1 热处理工艺组织

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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 ℃以下温度回火材料屈服强度、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 ℃温度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，但拉伸强度低于要求的下限，四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。

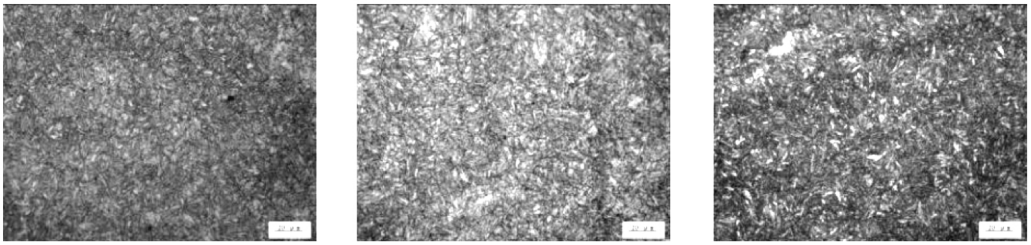
2.2　热处理工艺优化及实际结果

根据以上热处理试验结果，在 630 ℃下进行了重复性热处理实验以及优化，热处理工艺制度以及实验结果如表 4 所示。

金相组织如图 2 所示。

表 4　重复性热处理实验以及优化

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 /%	冲击韧性 KV_8(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) 工艺1　　(b) 工艺2　　(c) 工艺3

图 2　630 ℃回火温度下材料组织

从以上热处理后材料性能可以看出，材料的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，但回火保温时间为 60 min，材料的冲击性能偏下限，90 min 和 120 min 回火时下材料性能都满足设计要求，三个制度下，材料的组织均为回火索氏体，区别不大，鉴于此材料的最佳热处理制度为(900 ± 10) ℃，淬火保温 40 min，回火(630 ± 5) ℃保温 90 min。

3　分析与讨论

对以上三个热处理工艺下的组织进行了析出物透射电镜的研究。如图 3 所示。



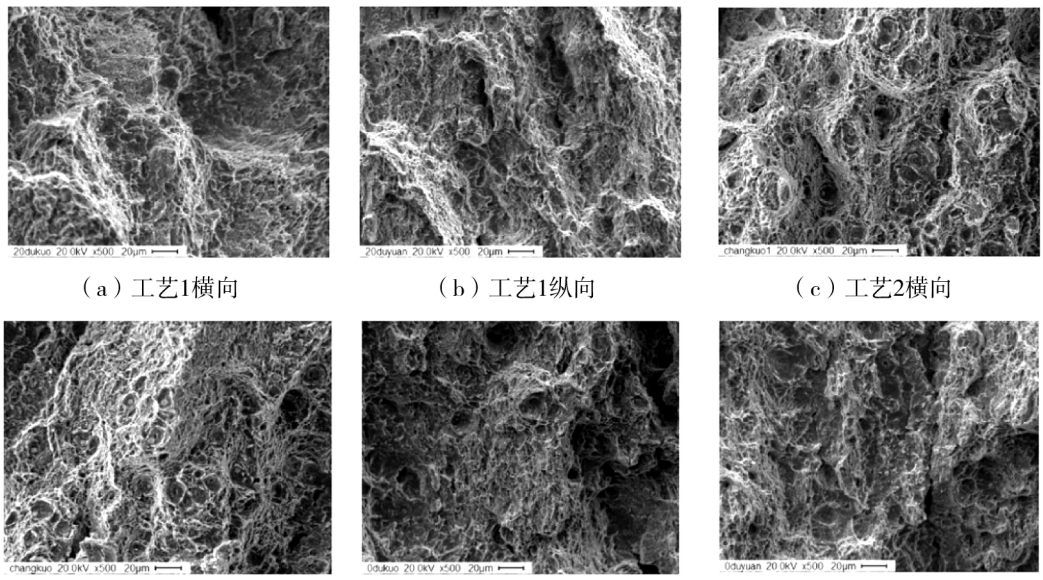
(a) 工艺1　　(b) 工艺2　　(c) 工艺3

图 3　630 ℃回火温度下透射电镜

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

TEM析出相分析如图4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，它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，不仅使材料强度下降的低而且使材料具有很高的韧性。

对三个工艺制度下的材料横向和纵向冲击断口进行了扫描，如图4所示。



（a）工艺1横向 （b）工艺1纵向 （c）工艺2横向

（d）工艺2纵向 （e）工艺3横向 （f）工艺3纵向

图4 冲击断口扫描

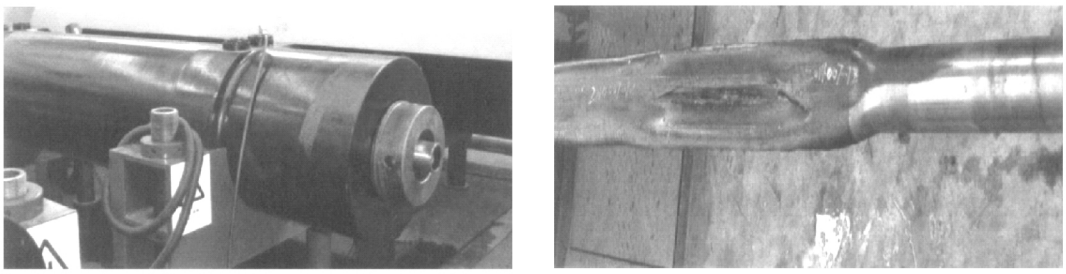
三个制度下材料的横向冲击韧性都在60 J以上，纵向冲击韧性在100 J以上，从冲击扫描断口可以看出，无论是横向冲击断口还是纵向冲击断口，都为典型的韧性断口，断口形貌中有大量的韧窝，较为均匀，为典型的解理断口形貌。

4 抗挤毁性能评价结果

对工业生产的射孔枪管材料进行了抗挤毁性能评价实验，结果见表5、图5。

表5 纯外压挤毁试验结果

编号	最大压力/MPa	试验结果
1Z	190.1	试样中间部位发生挤毁失效
2Z	188.5	试样中间部位发生挤毁失效
3T	180.5	试样中间部位发生挤毁失效
要求1Z、2Z≥167.0，3T≥133.5		



（a）试样按照在设备上的形貌 （b）试样1Z挤毁后的形貌

（下转第72页）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向的流量输出，即向一边偏移直到最大位置，即所谓的“满舵”现象。而且喷嘴挡板阀的压力效率和容积效率约为50%，比射流管低，其控制力较小。

3 对策建议

(1) 控制油液污染，做好电气线路及伺服阀头的防护，减少不必要的“排除法”更换次数。

(2) 考虑用射流管阀来替代喷嘴挡板阀的应用研究。射流管阀的阀芯直径明显大于喷嘴挡板阀，而阀芯直径越大，其驱动力也越大，即使有一点杂物和污粒，滑阀级也能顺利工作，从而提高了可靠性。射流管阀射流放大器部分压力效率和容积效率较高，推动阀芯力也较大。

4 结束语

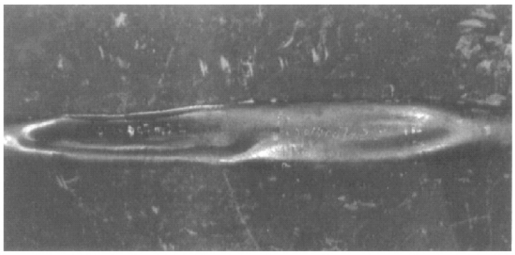
HCCS系统运行几年以来，工作状态稳定，根据上述对伺服阀性能测试及故障判断过程的描述，可以看出，利用系统强大的信号采集和故障分析功能，能够很快找到故障点，明显缩短了事故处理时间。需要指出，HCCS系统的稳定运行有赖于伺服阀等现场控制元件的可靠运行。伺服阀是精密制造的机电一体化产品，精度极高，对信号变化、油液污染十分敏感，它对维护、清洁及对维护工作重要性的认识等方面都有较高的要求。

参 考 文 献

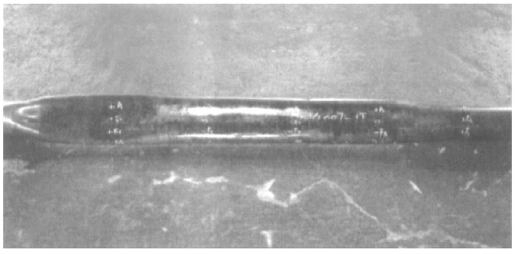
[1] 王春行. 液压伺服控制系统 [M]. 兰州: 甘肃工业大学出版社，1989.

[2] 张利平. 液压气动技术速查手册 [M]. 北京: 化学工业出版社，2007.

(上接第62页)



(c) 试样2Z挤毁后的形貌



(d) 试样3T挤毁后的形貌

图5 试样挤毁后的形貌

从实验结果可以看出，BT150P射孔枪管的抗挤毁性能良好，富余量大，满足射孔枪管的设计要求。

5 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表明，BT150P最佳热处理制度为淬火(900±10)℃、保温40 min、回火(630±5)℃、保温80 min，材料的拉伸、冲击性能满足设计要求。

(3) 射孔枪管的抗挤毁性能良好，满足射孔枪管性能要求。

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.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net