热处理工艺对BT140TT抗挤毁套管组织性能的影响*

张行刚,石晓霞,米永峰,魏 淼,裴福莉,贾冬梅

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了包钢股份钢管公司生产的规格为Φ141 mm×13.5 mm BT140TT高抗挤毁套管在不同热处理工艺下力学性能和组织演变规律,通过热处理工艺正交试验得出了BT140TT最佳热处理工艺为淬火(890±10) ℃保温40 min,回火(660±10) ℃保温90 min,材料屈服强度不低于965 MPa,0 ℃横向冲击功不低于100 J,满足抗挤毁套管BT140TT设计要求,实现了高强高韧性能的综合要求。

关键词: BT140TT; 抗挤毁; 高强高韧

中图分类号: TG142.1,TG161 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)06-0056-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.06.015

Effects of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of BT140TT Anti-collapse Casing

Zhang Xing-gang, Shi Xiao-xia, Mi Yong-feng, Wei Miao, Pei Fu-li, Jia Dong-mei

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

Abstract: In this paper, it is introduced the evolution law of mechanical properties and microstructure for BT140TT high anti-collapse casing with the specification of Φ141 mm×13.5 mm produced by Steel Tube Co. of Baotou Steel with different heat treatment processes, the orthogonal experiment of heat treatment process showed that the optimum heat treatment process of BT140TT was quenching at (890±10) ℃ and holding for 40 min, tempering at (660±10) ℃ and holding for 90 min, material yield strength≥965 MPa and impact energy at 0 ℃≥100 J, which could meet the design requirements of BT140TT anti-collapse casing as well as the integrated requirement of high strength and toughness could be realized.

Key words: BT140TT; anti-collapse; high strength and toughness

随着科技的日益进步,国内油气钻采深度也越来越深,特别是近些年国家加大力度对地质复杂和开采难度大的西部油气田、西南部油气田、海上油气田等复杂工况条件下地区的开发,油气勘探及开采的特点是地质工况条件日益复杂,不断向纵深发展,页岩气井、深井、超深井、水平井、大位移井、复杂结构井、欠平衡井的地质构造越来越复杂,高难度的钻采工艺井对油套管的性能和质量等提出了越来越高的要求,使得在完井过程中,套管承受的外挤载荷和轴向载荷越来越高[1]。同时,国内对高强度、高抗挤毁套管的需求量也日益增加,BT140TT高强高抗毁套管不仅要求钢管具有高的强度还需要高的韧性

* 收稿日期: 2020-11-03

作者简介: 张行刚(1983-),男,湖北省宜昌市人,硕士,高级工程师,现从事无缝钢管的产品研发及质量攻关工作。

来降低裂纹敏感性以提高材料的抗挤毁能力，因此，要求套管具有良好的综合力学性能[2-4]，借助包钢股份钢管公司两套先进的 PQF 机组，开发出高品质高抗挤毁 BT140TT 高钢级套管，通过合适的热处理工艺，保证产品性能达到国内先进水平，满足复杂井况抗挤毁性能的需求。

1　试验材料及实验方法

1.1　试验钢的成分

C、Mn 元素是提高强度和淬透性最有效的元素之一，但为防止淬火变形开裂同时兼顾韧性，尽量提高 Mn/C 比，w[C] 控制在 0.30% 之内、w[Mn] 控制在 1.00% 之内；P 元素会造成微观偏析，成为氢的聚集源同时形成冷脆，因此，w[P] 控制在 0.015% 以下；S 元素易与 Mn 元素沿轧制方向形成长条状 MnS 夹杂物，是影响材料横向冲击韧性最主要的因素，因此 w[S] 控制在 0.005% 以下；Cr 元素有固溶强化的作用，能提高钢的强度和淬透性，w[Cr] 控制在 1.00% 之内；Mo 元素有固溶强化的作用，能提高钢的强度和淬透性，特别是在调质钢中具有回火稳定性的作用，w[Mo] 控制在 1.00% 之内；V 元素是强碳化物形成元素，V 元素会以 V(C,N) 颗粒的形式在奥氏体－铁素体相界面沉淀析出，能够钉扎位错、阻碍滑移系的开动，从而细化了铁素体晶粒，以充分发挥其细晶强化和沉淀强化的功效，延缓压溃失稳的过程，同时 V 也具有高温回火抗性的作用，因此，w[V] 控制在 0.15% 之内；RE 元素能够净化钢液、改善非金属夹杂物的形态、减少点腐蚀和强化晶界，但含量过高会形成大的夹杂物团絮，因此，RE 元素含量控制适量。基于以上钢种设计理念，采用中碳 Cr－Mo－V－Ce 钢系，具体成分见表 1。

表 1　BT140TT 对化学成分限量要求(质量分数)　%

C	Si	Mn	P	S	Cr、Mo、V、Ce	Al
≤0.300	≤0.300	≤1.000	≤0.015	≤0.005	均适量	≤0.050

1.2　试验方法

试验钢为包钢股份钢管公司连铸生产的 BT140TT 圆管坯，通过 Φ159 mm PQF 机组轧制成规格为 Φ141 mm×13.5 mm 的光管料，然后截取成小试样，在实验室进行的相关热处理试验。

通过热膨胀仪对该试验钢的 CCT 曲线进行了测定，该试验钢的 A_{c_3} 温度为 827 ℃，根据淬火温度一般在 A_{c_3} 以上 50 ℃，如果合金含量高可适当提高温度，设计了三个淬火热处理制度，分别在850 ℃、890 ℃、940 ℃进行淬火试验，然后通过 4% 硝酸酒精以及饱和苦味酸溶液对淬火后的组织和原始奥氏体晶粒度进行检验以确定最终淬火温度。

采用不同调质热处理工艺进行正交法试验，即相同淬火制度下不同的回火温度、不同的回火时间，同时通过力学性能检测设备、高倍显微镜、扫描电镜、透射电镜对材料拉伸性能、低温冲击性能、组织等进行检验。不同的回火温度热处理工艺制度为 890 ℃淬火，保温时间 40 min，回火温度分别为 630 ℃、650 ℃、670 ℃、690 ℃、710 ℃，保温时间 90 min；不同的回火保温时间热处理制度为 890 ℃淬火，保温时间 40 min，回火温度 660 ℃，保温时间分别为 40 min、60 min、80 min、100 min、120 min。

2　试验结果及分析

2.1　BT140TT 淬火工艺研究

图 1 中(a)、(b)、(c) 分别为 850 ℃、890 ℃、940 ℃淬火组织相片，(d)、(e)、(f) 为通过苦味酸腐蚀后所对应的原始奥氏体晶粒度，从图中可以看到，三个淬火温度下的组织都是板条状马氏体，形貌相差不大，原始奥氏体晶粒度显示三个制度下的原始奥氏体晶粒度均为 10.0 级、10.5 级，组织均匀细小。随着淬火温度从 850 ℃提高到 940 ℃，组织并无明显粗化，说明该钢的淬火温度范围宽，淬火既要保证材料奥氏体化，机体中的碳化物溶解均匀化，又要保证材料晶粒不过于粗大，考虑到实际生产过程中钢管淬火保温后从淬火炉出炉到水淬设备处还有温降，实验钢 A_{c_3} 温度为 827 ℃，综合考虑，选取实验钢的淬火加热温度为 890 ℃较为合适。

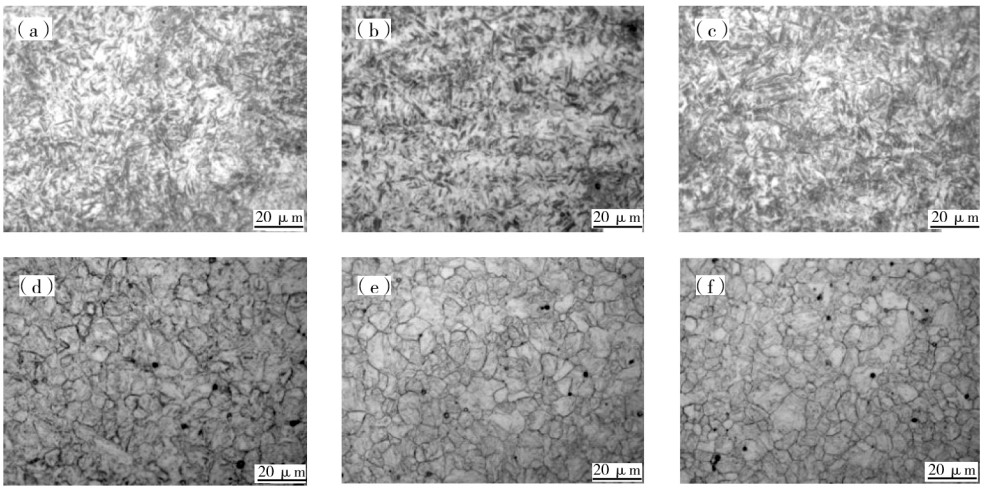


图1 不同淬火温度下材料组织及晶粒度

2.2 BT140TT **不同回火温度工艺研究**

不同回火温度热处理工艺及试验钢力学性能如表2所示。不同回火温度热处理工艺下材料力学性能变化趋势如图2、图3所示。

表2 不同回火温度热处理实验

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 A_{kv} (0 ℃ 横向(半尺寸)) /J
1	890	40	630	90	1 156	1 228	22.5	39
2	890	40	650	90	1 093	1 187	24.0	47
3	890	40	670	90	1 013	1 083	26.0	53
4	890	40	690	90	856	938	29.0	63
5	890	40	710	90	823	906	31.0	64
设计要求					965 ~ 1 138	≥1 034	≥16	≥45

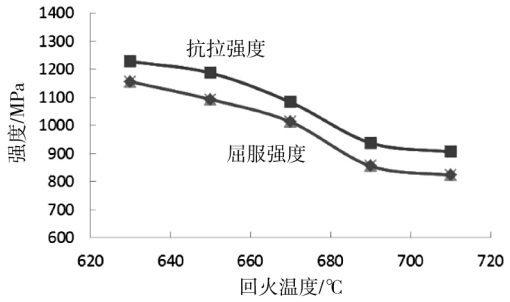


图2 不同回火温度拉伸性能

从热处理后材料的力学性能可以看出,随着回火温度的升高,试验钢强度逐渐降低,韧性逐渐升高,630 ℃回火温度下,材料的屈服强度达到了1 100 MPa以上,强度超过了160 ksi钢级水平,但0 ℃横向半尺寸冲击功为39 J,按照中石油、中石化招标文件,目前高钢级(125 ksi钢级以上)产品半尺寸规格冲击试样和吸收能递减系数为0.45,则半尺寸冲击功应当达到45 J(100 J×0.45)以上的水平。

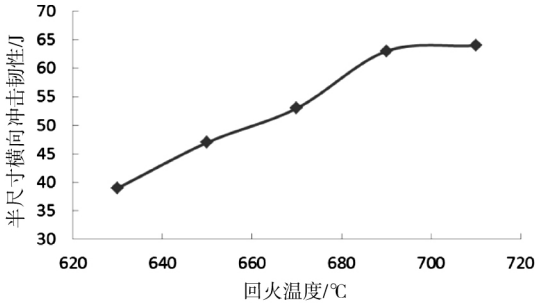


图3 不同回火温度冲击韧性

630 ℃下回火不能满足设计要求;650 ℃、670 ℃

回火温度下，材料屈服强度在 1 000 ~ 1 100 MPa 区间以内，冲击功不低于 45 J，强度和韧性均满足设计指标，且强度还有较大的富余量；当回火温度超过 690 ℃，虽回火温度仅增加 20 ℃，但强度急剧下降，回火温度从 670 ℃增加至 690 ℃，屈服强度下降幅度达到150 MPa左右，说明 670 ℃是该钢回火温度的一个拐点，因此回火温度要严格控制在 670 ℃以下。

2.3　BT140TT 不同回火时间工艺研究

不同回火时间热处理工艺以及试验钢力学性能如表 3 所示。

表 3　不同回火时间热处理实验

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 A_{kv}（0 ℃ 横向（半尺寸））/J
1	890	40	660	60	1 053	1 142	24.0	46
2	890	40	660	80	1 036	1 102	24.0	48
3	890	40	660	100	1 025	1 080	24.5	52
4	890	40	660	120	944	1 026	26.0	56
5	890	40	660	150	934	1 004	25.0	54
设计要求					965 ~ 1 138	≥1 034	≥16	≥45

不同回火时间热处理工艺下材料力学性趋势图如图 4、图 5 所示。

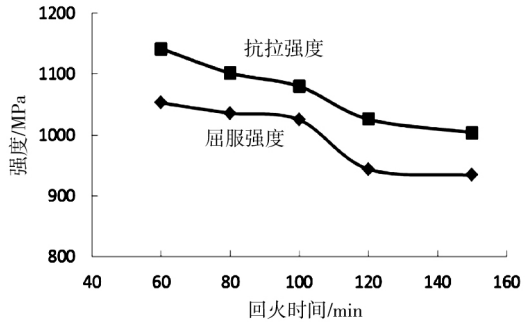


图 4　不同回火时间拉伸性能

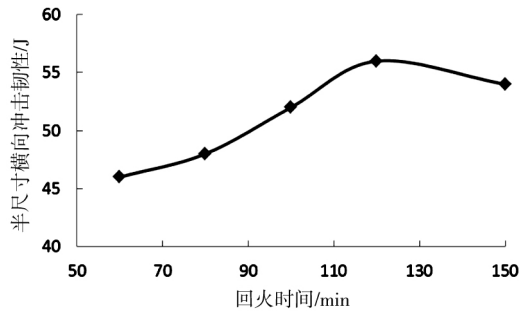


图 5　不同回火时间冲击韧性

从不同回火时间力学性能检测结果可以看出，60 ~ 100 min 回火时间范围内，材料强度逐渐降低，冲击韧性逐渐提高，但是强度和韧性变化幅度相对较小，该时间范围内回火材料的强度和韧性均能满足设计要求，当回火时间超过 120 min，材料强度下降较快，韧性趋于平稳。因此，选取材料的最佳热处理制度为：（890 ± 10）℃保温 40 min 出炉水淬，回火温度（660 ± 10）℃，回火时间保温 70 ~ 90 min。

2.4　BT140TT 组织研究

选取具有代表性 630 ℃、670 ℃以及 710 ℃不同回火温度下材料进行组织检验，如图 6 所示。

图 6 中（a）、（b）、（c）分别为回火温度在 630 ℃、670 ℃、710 ℃条件下的金相组织相片，从组织相片中可以看出，3 个不同回火温度下，试验钢组织均为典型的回火索氏体，组织均匀细小，形貌相差不大。鉴于该试验钢在 670 ℃以上回火时，材料强度会急剧下降，对 670 ℃、710 ℃回火温度热处理工艺下的组织进行了析出物扫描电镜以及透射电镜分析。如图 7 和图 8 所示。

图 7 中（a）为 670 ℃回火温度下的 SEM 检测，图 7 中（b）为 710 ℃回火温度下 SEM 检测。该试验钢为中碳 Cr – Mo – V 系低合金钢，能谱分析主要为 Cr 的析出物为主，从 SEM 检测可以看出这些析出相均匀细小，弥散的分布在材料基体之中，但扫描电镜下两者区别不大，均匀细小的析出物在调质工艺高温回火下可以阻碍晶界的移动，保持亚结构的稳定，起到钉轧晶界的作用，不仅材料强度下降的少还具有高韧性，真正实现高强高韧性[5]。

图 8 中（a）为 670 ℃回火温度下的 TEM 检测，图 8 中（b）为 710 ℃回火温度下 TEM 检测。从透射电镜可以看出，670 ℃回火下的基体上的碳化物析出明显，碳化物细小，多而弥散的分布在机体上，而

710 ℃回火下，析出物明显的发生聚集，析出物的长度和宽度都要比670 ℃下要大，因此，该原因导致了材料在回火温度超过670 ℃后强度急剧下降，而从前热处理试验结果中也可以看到，该试验钢回火温度在670 ℃左右为一个分界点，因此，回火温度严禁超过670 ℃。

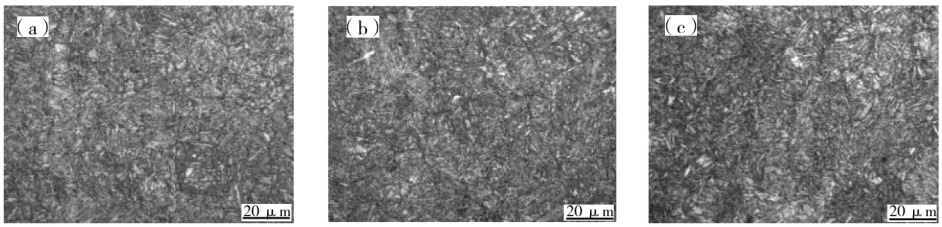


图6 不同回火温度下组织相片

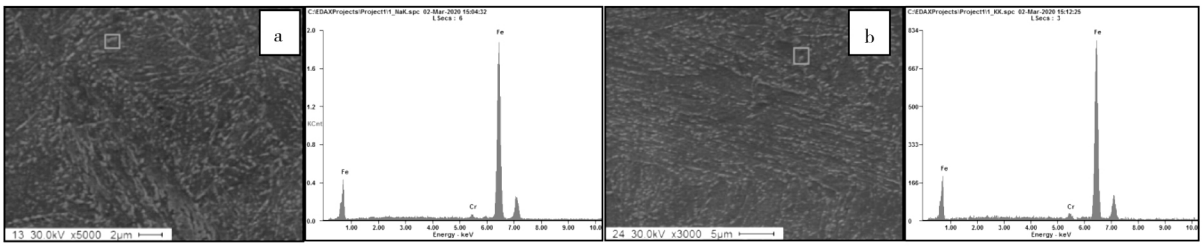


图7 不同回火温度下扫描电镜检测



图8 不同回火温度下透射电镜检测

3 结论

(1) 淬火温度从850 ℃升高到940 ℃，高温回火后组织均为回火索氏体，原始奥氏体晶粒未粗化。

(2) 回火温度从630 ℃升高到710 ℃，屈服强度降低了333 MPa，抗拉强度降低了336 MPa，0 ℃冲击功提高了64%，回火保温时间在130 min时0 ℃冲击功出现转折。

(3) 该试验钢在回火温度大于670 ℃后强度急剧下降，这与碳化物的析出及粗化有关，因此，BT140TT钢的回火温度严禁大于670 ℃。

参 考 文 献

[1] 李鹤林，韩礼红，张文利. 高性能油井管的需求与发展[J]. 钢管，2009，38(1)：1－9.

[2] 姬丙寓，吴丹，陈举，等. 油套管标准变化对其性能要求即评价的影响[J]. 钢管，2017，46(3)：71－75.

[3] 史彬，陈敏，饶晓东，等. 页岩气井套管损坏原因分析及认识[J]. 钢管，2018，47(3)：66－71.

[4] 张然. Q125钢级高强度石油套管的试制[J]. 钢管，2019，48(2)：35－39.

[5] 姜玉梅，卢小庆，罗蒙. 高存气压力区块生产套管柱优化设计及配套套管的开发与制造[J]. 钢管，2019，48(2)：29－34.