油气开采深井用 BT110V 高强高韧套管开发

姜 涛,石晓霞,李建元,詹 飞,宋 歌

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管分公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要:文章基于油气开采深井专用套管强度高、韧性低的痛点,充分发挥合金元素在钢中的作用,设计了 BT110V 高强高韧套管用钢化学成分。并利用现有无缝钢管生产装备,制定了 BT110V 高强高韧套管生产工艺。试制的 BT110V 高强高韧套管力学性能、淬透性及显微组织均达到了技术要求。规格为 Φ193.68 mm × 10.92 mm 的 BT110V 高强高韧套管,内压致失效强度高于技术要求 58.6%,外压致失效强度高于技术要求 38.3%,连接强度高于技术要求 26.6%。产业化推广应用过程中,各项指标均表现出良好的稳定性,稀土微合金化对夹杂物的改性作用明显。

关键词:BT110V;高强高韧;石油套管;夹杂物改性

中图分类号:TE931.2;TG335 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2026)01 - 0001 - 06

Development of BT110V High - strength and High - ductility Casing for Deep Well of Oil and Gas Exploitation

Jiang Tao, Shi Xiaoxia, Li Jianyuan, Zhan Fei, Song Ge

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

Abstract: In the paper, the chemical compositions of BT110V steel for high - strength and high - ductility casing are designed based on the problem that special casing for deep well of oil and gas exploitation is with high strength and low ductility by giving full play to the effects of alloying elements in steel. Moreover, the production process of BT110V high - strength and high - ductility casing is formulated with the existing production equipment of seamless steel pipe. The mechanical properties, hardenability and microstructure of trial - produced BT110V high - strength and high - ductility casing could all meet the technical requirements. For the BT110V high - strength and high - ductility casing with the specification of Φ193.68 mm × 10.92 mm, failure strength caused by internal pressure is 58.6% higher than that of the technical requirement, failure strength caused by external pressure is 38.3% higher than that of the technical requirement and joint strength is 26.6% higher than that of the technical requirement. During the process of industrialized promotion and application, all indexes show good stability and the modifying effect of rare earth microalloying on inclusions is obvious.

Key words: BT110V; high - strength and high - ductility; oil casing; inclusion modification

随着国内外石化能源需求的攀升,油气资源勘探开发不断向深层、超深层、复杂地质工况推进,深井、超深井及非常规油气藏成为未来能源供给的重要增长点[1-4]。在此背景下,作为油气井关键结构

收稿日期:2025 - 12 - 02

作者简介:姜 涛(1977 -),男,硕士,高级工程师,现从事无缝钢管研发及质量攻关工作。

材料的套管,面临着更为严苛的服役环境,不仅要承受高温、高压、高应力的复合作用,还要抵御硫化氢、二氧化碳、微生物等腐蚀性介质的侵蚀。当前,常规套管钢种在面对110 ksi级及以上强度要求时,往往难以平衡高强度与高韧性之间的矛盾,存在0 ℃低温冲击韧性不足的问题,制约了其在复杂井况,特别是深井中的安全应用。因此,开发兼具超高强度、优异低温韧性及良好工艺适应性的新一代套管,成为突破深层油气资源开发技术瓶颈的有效措施与安全保障。

1 技术要求

油气井身结构复杂,往往结合地质条件、井深及油气自身特点具体设计。API Spec 5CT 标准[5] P110钢级套管,通过调控热处理工艺,屈服强度、抗拉强度均能达到110 ksi钢级套管强度要求,但常规碳锰钢或微合金化钢强韧性匹配较差,强度虽然能满足要求,0 ℃低温冲击韧性表现欠佳。因此,BT110V高强高韧套管屈服强度、抗拉强度及延伸率满足API Spec 5CT标准P110钢级套管技术要求的前提下,0 ℃冲击功技术要求要远超标准要求,特别是0 ℃横向冲击韧性。英国能源部提出,承压管的韧性应不小于其屈服强度的1/10,服役于深井的套管BT110V高强高韧套管力学性能技术要求见表1。

表1 BT110V高强高韧套管力学性能技术要求

$R_{t0.6}$/MPa	R_m/MPa	A/%	C_V(0 ℃,横向全尺寸)/J	C_V(0 ℃,纵向全尺寸)/J
758~965	≥862	≥e	≥76	≥95

延伸率因套管壁厚、外径不同测试结果差距悬殊,API Spec 5CT标准给出了套管产品延伸率最小值按照公式(1)计算。

$$e = K \cdot A^{0.2}/U^{0.9} \quad (1)$$

式中:e为最小延伸率;K为常数,$K = 1\,942.57$;A为拉伸试样的横截面积,mm^2;U为规定的抗拉强度,MPa。

组织决定性能,想要获得高强度与高韧性良好匹配的钢铁材料,综合力学性能优异的回火索氏体成为高强高韧油套管的首选显微组织,碳锰钢及低合金钢要获得回火索氏体,需要进行淬火+回火的调质热处理。另外,钢中的非金属夹杂物与钢基体的结合力弱,会成为应力集中点。非金属夹杂物周围易产生微裂纹,导致材料提前断裂,使抗拉强度、屈服强度降低。尺寸较大且形状不规则的非金属夹杂物会破坏钢铁材料的连续性,在低温冲击载荷作用下,裂纹会沿非金属夹杂物造成应力集中的位置扩展,使其成为裂纹的主要发源地。在交变载荷作用下,非金属夹杂物与基体界面易产生剥离,形成微裂纹并逐步扩展,使钢的疲劳寿命大幅缩短。四大强化机理,仅细化晶粒不仅能提高钢铁材料的强度,而且能提高材料的韧性,为保证BT110V高强高韧套管的强韧性,初步设计其晶粒度≥9级。基于以上因素,结合目前生产无缝管装备能力及洁净钢冶炼技术水平,对BT110V高强高韧套管非金属夹杂物控制提出要求,见表2。

表2 BT110V高强高韧套管非金属夹杂物织要求 级

A类		B类		C类		D类		Ds类	晶粒度
粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系		
≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.5	≥9

BT110V高强高韧套管不仅要保证良好的综合力学性能和使用性能,同时还需要各项指标尤其是力学性能的稳定性,显微组织为回火索氏体的钢铁材料,其淬透性对钢力学性能的稳定性影响极大,API Spec 5CT标准对套管淬透性做出了明确要求,根据材料钢级及用途的不同,将淬透性技术要求分为三类,即50%马氏体、90%马氏体及95%马氏体,考虑高强高韧材料保证淬透性需要添加价格相对高的合金元素,BT110V高强高韧套管淬火后保证90%以上的马氏体组织即可,即淬火后取硬度环检

测四象限硬度以表征淬透性,保证淬火后获得 90% 以上马氏体的 HRC 最小值计算公式见式(2)。

$$HRC_{min} = 58 \times C\% + 27 \quad (2)$$

2　钢种及工艺设计

低合金钢铁材料中碳含量增加,碳化物引起的第二相强化发挥积极作用,因此材料的屈服强度和抗拉强度升高,但表征材料塑性的延伸率及表征材料韧性的冲击功随着碳含量的增加而呈现下降趋势,在 BT110V 高强高韧套管钢种设计中,为保证强度、延展性、韧性,碳含量不宜过低也不宜过高,另外,生产经验表明,碳含量≥0.35% 的钢工业生产过程中容易产生淬火裂纹,增加制造成本的同时,对套管的安全服役带来威胁。硅能提高钢的淬透性,在炼钢过程中加硅作为还原剂和脱氧剂,一般控制在 0.15% ~0.37% 之间。锰降低钢的临界冷却速度,提高钢的淬透性,在炼钢过程中,锰是良好的脱氧剂和脱硫剂,另外钢中加入适量锰能改善钢的热加工性能,且锰与硫形成熔点较高的 MnS,可防止 FeS 导致的热脆现象,但是锰含量过高易造成成分偏析,恶化钢铁材料的力学性能。磷、硫作为有害元素,应尽量控制。铬在调质钢中的主要作用是提高淬透性,使钢经淬火、回火后具有较好的综合力学性能,铬、钼对耐蚀性有一定的正向作用,但铬、钼作为合金元素,价格相对昂贵,因此成分设计过程还需要考虑经济性。近年来的研究结果表明[6-9],稀土具有净化钢液、夹杂物改性及微合金化作用,因此可适当添加。另外,高强高韧套管离不开细晶强化韧化,适当加入铝、钒、铌、钛等晶粒细化元素,是解决强韧性技术冲突的另外一条途径。充分考虑环境友好性、经济性及可行性,结合合金元素在钢中的作用,设计的 BT110V 高强高韧套管钢种化学成分如表 3 所示。

表 3　钢种化学成分(质量分数)　%

C	Mn + Si + Cr + Mo + Al	RE
0.26 ~0.30	2.32	适量

从成分设计可以看出,BT110V 高强高韧套管钢种属于含稀土的低合金钢,根据当前低合金钢冶炼、连铸、轧制、热处理及管端加工装备情况,设计的 BT110V 高强高韧套管生产工艺流程如下:100 t 转炉冶炼→LF 精炼→VD 真空处理→圆坯连铸→Φ35 m环形加热炉加热→菌式穿孔机穿孔→PQF/MPM 连轧管机轧制→冷却→锯切→淬火→回火→热矫直→冷床冷却→管端加工→探伤→水压→喷涂发运。

3　试制及产业化稳定性控制分析

结合市场需求,对 BT110V 高强高韧套管进行试制,试制的套管管体规格为 Φ193.68 mm × 10.92 mm,接箍毛坯规格为 Φ215.9 mm × 19.0 mm,成品套管管端接头扣型为 BC(偏梯)螺纹。试制的 BT110V 高强高韧套管,按照 API Spec 5CT 标准取样并加工拉伸试样、冲击试样及淬透性硬度环,依据 ASTM A370 标准[10]对纵向拉伸性能进行检测,依据 ASTM E23 标准[11]对冲击功进行检测,依据 ASTM E18 标准[12]对淬透性硬度环四象限内中外 HRC 进行检测,力学性能检测结果见表 4,淬透性硬度环 HRC 检测结果见表 5,取冲击试验残样,依据 ASTM E45 标准[13]对非金属夹杂物进行检测,结果见表 6,测试过程观察到稀土复合夹杂,具体形貌及物相组成见图 1。BT110V 高强高韧套管显微组织为回火索氏体,具体见图 2。

表 4　BT110V 高强高韧套管力学性能检测结果

项目	$R_{t0.6}$/MPa	R_m/MPa	A/%	C_V(0℃,横向全尺寸)/J
套管管体	873,864	957,974	24,25	51(93),54(98),52(95)
接箍毛坯	921,912	1 010,1 015	20,21	82,85,84
设计技术指标	758 ~965	≥862	≥ e	≥76

注:因尺寸原因,套管管体仅可以加工横向 1/2 尺寸冲击试样,括号内为冲击功实测值,括号外根据 API Spec 5CT 标准折算成全尺寸冲击功的折算值。

表 5 BT110V 高强高韧套管淬透性硬度环 HRC 检测结果

项目	位置	第一象限	第二象限	第三象限	第四象限
套管管体	内	45.3,45.4,45.4	44.6,45.1,45.4	45.3,45.0,44.4	44.9,44.6,44.9
	中	45.4,44.6,44.0	44.7,44.5,45.7	45.9,45.2,44.1	44.5,44.6,45.0
	外	44.5,44.6,45.9	45.0,44.4,45.2	44.4,44.9,44.6	44.9,45.5,44.7
接箍毛坯	内	45.7,45.9,45.5	45.2,45.5,45.3	45.3,45.0,45.4	44.9,44.8,44.9
	中	44.4,44.1,44.3	44.2,44.3,44.6	44.2,44.4,44.3	44.1,44.2,44.1
	外	45.1,45.2,45.3	45.0,45.2,45.1	45.1,44.9,45.2	44.5,44.8,44.6

表 6 BT110V 高强高韧套管非金属夹杂物检测结果 级

项目	A 类		B 类		C 类		D 类		Ds 类
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	
套管管体	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.5	1.0
接箍毛坯	0.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	0.0	0.5	1.0

从表 4 力学性能检测结果可以看出,试制的 BT110V 套管管体及接箍毛坯屈服强度及抗拉强度均满足设计技术要求,套管管体及接箍毛坯屈服强度均处于技术要求中上限,强度较高,有利于 BT110V 套管抗内压强度、抗外挤强度等使用性能的提高。另外,接箍毛坯的强度整体高于套管管体,可预防套管接头上卸扣粘扣导致的失效问题。根据式(1)计算的规格 Φ193.68 mm×10.92 mm 套管管体延伸率技术要求为 14%,试制的套管管体延伸率高于技术要求 71.4% 以上,规格 Φ215.9 mm×19.0 mm接箍毛坯延伸率技术要求为 13%,试制的接箍毛坯延伸率高于技术要求 53.8% 以上。因套管管体外径及壁厚因素,只能加工尺寸为 5 mm×10 mm×55 mm 的 1/2 尺寸横向冲击试样,按照 API Spec 5CT 标准尺寸折算系数折算后,套管管体的 0 ℃横向全尺寸冲击功高于技术要求 22.4% 左右,接箍毛坯冲击功高于技术要求约 7.9%。接箍毛坯强韧性匹配较套管管体弱,主要原因在于试制过程两种规格钢管均采用相同规格圆坯进行穿孔轧制,管体压缩比高于接箍毛坯,导致强韧性匹配存在一定的差异。根据式(2)计算的 BT110V 高强高韧套管淬火后获得 90% 以上的马氏体,其硬度环检测硬度最小值为 43.24,从表 5 可以看出,BT110V 高强高韧套管管体及接箍毛坯淬透性均能满足技术要求,套管管体内、中、外硬度相对均匀,接箍毛坯中部 HRC 检测值略低,这是因为套管淬火采用内喷外淋的方式快冷,壁厚影响了中部及内外部微观组织。

从表 6 非金属夹杂物检测结果可以看出,BT110V 高强高韧套管管体及接箍毛坯未发现 A 类、B 类、C 类、D 类粗系夹杂物,且 A 类、C 类、D 类细系夹杂物均为 0.5 级,仅 B 类细系及 Ds 类夹杂物为 1.0 级。Ds 夹杂物达到 1.0 级,是稀土对夹杂物改性球化后的结果,图 1 稀土非金属夹杂物呈现球形,其组分主要由 S、Al、O、Ce 构成,初步推断为铝酸铈、氧化铈、氧硫化铈或硫化铈两种及以上稀土夹杂复合而成。采用 ASTM E112 标准[14]对 BT110V 高强高韧套管管体及接箍毛坯晶粒度进行评级,评级结果为管体 10.0 级,接箍毛坯为 9.5 级。从图 2 可以看出,BT110V 高强高韧套管接箍毛坯微观组织为回火索氏体。

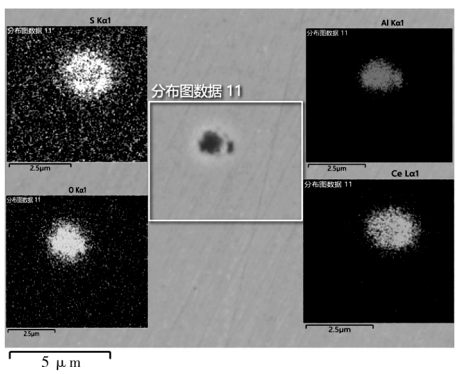


图 1 稀土非金属夹杂形貌及物相组成

采用 API RP 5C5 标准[15]对 BT110V 高强高韧套管连接强度、内压致失效强度、外压致失效强度及拉伸致失效载荷等使用性能进行测试,测试结果见表 7,各样管失效后的形貌见图 3。

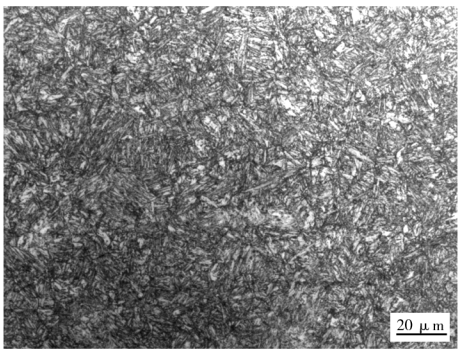
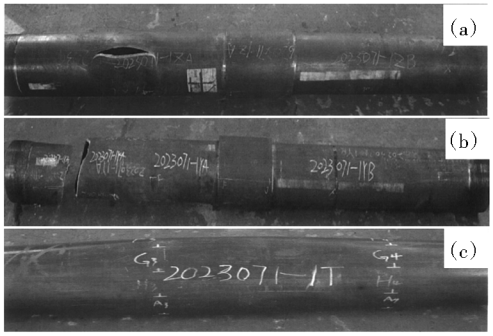


图 2　接箍毛坯微观组织照片

表 7　BT110V 高强高韧套管使用性能测试结果

项目	内压致失效强度/MPa	外压致失效强度/MPa	拉伸致失效载荷/kN
实测值	118.8	75.1	6 155
技术要求	74.9	54.3	4 863



(a)内压失效;(b)拉伸失效;(c)外压失效

图 3　样管失效形貌

从表 7 可以看出,内压致失效强度高于技术要求 58.6%,外压致失效强度高于技术要求 38.3%,连接强度高于技术要求 26.6%。从图 3(a)可以看出,内压致失效试验管体破裂,连接处未见异常,表明接口密封性能优异,且拥有不低于管体的抗内压能力。从图 3(b)可以看出,拉伸致失效试验管体破裂,连接处未见异常,表明不逊于管体连接强度的接头连接强度。从图 3(c)可以看出,外压致失效试验管体变形,管体未发现裂纹,表明套管材料有良好的塑性与韧性。试制结果表明,生产的 BT110V 高强高韧套管各项指标均满足设计技术要求,制备工艺合理可行。将 BT110V 高强高韧套管投放市场并进行了产业化推广,目前已实现 5 000 t 以上产业化批量供货,对产业化生产的套管管体(规格为 Φ139.7 mm×12.09 mm,48 组)、接箍毛坯(规格为 Φ161.0 mm×22.0 mm,12 组)的 BT110V 高强高韧套管力学性能及微观组织检测结果进行统计分析,见图 4—图 7。

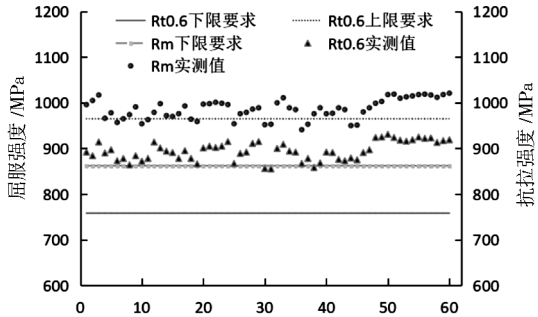


图 4　BT110V 屈服强度、抗拉强度统计

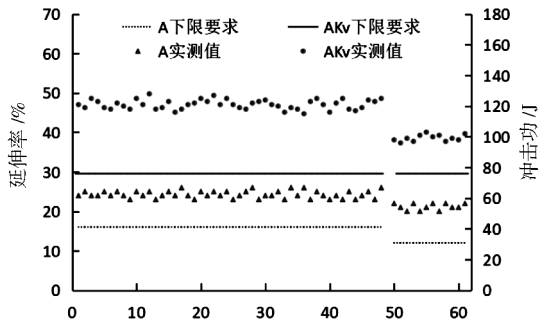


图 5　BT110V 延伸率、冲击功统计

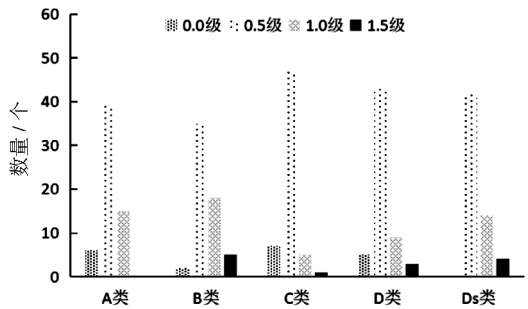


图 6　BT110V 非金属夹杂物统计

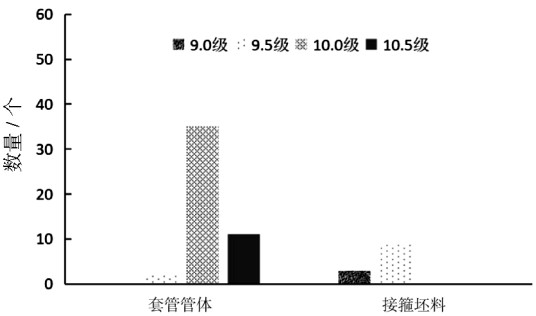


图 7　BT110V 晶粒度统计

从图4及图5可以看出,BT110V高强高韧套管管体及接箍毛坯产业化推广供货产品屈服强度、抗拉强度、延伸率、冲击功均能满足设计技术要求,套管管体屈服强度、抗拉强度分别波动69 MPa和76 MPa,接箍毛坯屈服强度、抗拉强度分别波动9 MPa和18 MPa。套管管体与接箍毛坯性能波动差别较大主要与统计数量有关,套管管体与接箍毛坯重量匹配约10∶1,因此不具备可比性,但从检测结果可以看出,无论是套管管体还是接箍坯料,屈服强度及抗拉强度均表现出良好的稳定性。另外,接箍毛坯屈服强度与抗拉强度均略高于套管管体,其目的在于抑制螺纹上卸扣粘扣问题。从图6统计结果可以看出,BT110V高强高韧套管管体及接箍毛坯非金属夹杂物均满足设计技术要求,不大于1.0级的A类硫化物非金属夹杂物占比达到100%,不大于1.0级的B类氧化物非金属夹杂物占比达到91.7%,不大于1.0级的C类硅酸盐非金属夹杂物占比达到98.3%,不大于1.0级的D类环状氧化物非金属夹杂物占比达到95%,不大于1.0级的Ds类球状氧化物非金属夹杂占比达到93.3%,不大于1.0级的B类、D类及Ds类非金属夹杂物占比略低。主要原因是钢液中稀土氧化物夹杂若未及时上浮去除,会因布朗运动或钢液流动发生碰撞、聚合,形成团絮状的氧化物簇。从图7可以看出,套管管体晶粒度在10.0级左右,接箍毛坯的晶粒度9.5级占比约75%。试制过程中,套管管体与接箍毛坯均采用Φ245 mm圆坯进行穿孔轧制,套管管体压缩比较大,套管管体相较于接箍毛坯获得更为细小的晶粒。

4 结论

(1)试制的规格为Φ193.68 mm×10.92 mm BT110V高强高韧套管管体、规格为Φ215.9 mm×19.0 mm接箍毛坯屈服强度及抗拉强度均满足设计技术要求,套管管体延伸率及冲击功分别高于技术要求71.4%、22.4%,接箍毛坯延伸率及冲击功分别高于技术要求53.8%、7.9%。

(2)试制的规格为Φ193.68 mm×10.92 mm的BT110V高强高韧套管,配套BC扣接头,内压致失效强度高于技术要求58.6%,外压致失效强度高于技术要求38.3%,连接强度高于技术要求26.6%,服役性能优异。

(3)产业化生产的BT110V高强高韧套管,屈服强度、抗拉强度、延伸率、冲击功、非金属夹杂物、晶粒度均满足设计技术要求,各项指标均表现出良好的稳定性,且稀土微合金化对夹杂物的改性作用明显。

参 考 文 献

[1] 杨秀琴. 中国油井管的供求现状与发展[J]. 金属世界,2012(13):1-10.

[2] 李鹤林,田伟. 面向"十二五"的油井管[J]. 钢管,2012,41(1):1-6.

[3] 赵廷阔. 超深井用超高强高韧V150套管热处理工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

[4] 李阳华. 超深井用高强高韧V150油套管的研究与开发[D]. 长沙:中南大学,2013.

[5] API Spec 5CT 11th,套管和油管规范[S].

[6] 李春龙. 稀土在钢中应用与研究新进展[J]. 稀土,2013,34(3):78-85.

[7] 苗如林,贺景春,麻永林. 发展稀土钢提高包钢油井管竞争力[J]. 稀土,2005,26(5):90-93.

[8] 计云萍,任慧平,刘新华,等. 稀土对20MnCrNi2Mo耐磨铸钢过冷奥氏体转变的影响及机理[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(4):997-1002.

[9] 张晓峰,唐建平,韩春鹏,等. 稀土在钢中作用及工业化生产现状浅析[J]. 稀土,2021,42(4):117-130.

[10] ASTM A370,钢产品力学试验方法[S].

[11] ASTM E23,金属材料切口试棒冲击试验的试验方法[S].

[12] ASTM E18,洛氏硬度试验方法[S].

[13] ASTM E45,钢中夹杂物含量测定的标准试验方法[S].

[14] ASTM E112,平均晶粒度测定的标准试验方法[S].

[15] API RP 5C5,套管和油管连接件的测试程序[S].