

稀土 Ce 对 V、Ti 微合金化钢组织性能的影响研究

米永峰, 姚晓乐, 姜 涛, 孙文秀, 康 虹, 刘玉荣, 王增海

(内蒙古包钢钢管有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 通过拉伸及冲击试验, 并采用透射电镜、扫描电镜和能谱仪等分析手段, 研究了稀土 Ce 对 V、Ti 微合金化钢组织和性能的影响。结果表明, 随着稀土 Ce 含量的增加, 试验钢的珠光体片层距减小, 含钛夹杂物由有尖锐棱角的矩形转变为光滑球状, 细长条 MnS 夹杂物变短并球化; 试验钢屈服强度和冲击韧性得到改善。

关键词: 稀土 Ce; V、Ti 微合金化钢; 夹杂物变质; 性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)05-0049-06

Study on Effects of Rare Earth Ce on Microstructure and Properties of V, Ti Microalloyed Steel

Mi Yong-feng, Yao Xiao-le, Jiang Tao, Sun Wen-xiu, Kang Hong,
Liu Yu-rong, Wang Zeng-hai

(Inner Mongolia Baotou Steel Pipe Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The effects of rare earth Ce on the microstructure and properties of V, Ti microalloyed steel are studied by tensile and impact tests as well as with such analysis means as transmission electron microscope, scanning electron microscope and energy spectrometer. The results showed that the interlamellar spacing of pearlite for test steel was decreased, inclusions containing titanium were changed from rectangle with sharp edge angle to smooth spherality as well as long and thin MnS inclusions became shorter and spherized with the increase of rare earth Ce content. Moreover, the yield strength and impact toughness of test steel are improved.

Key words: rare earth Ce; V, Ti microalloyed steel; modification of inclusions; properties

V、Ti 微合金化钢因其具有良好的强韧性而得到广泛应用, 其中 V、Ti 的强韧化作用有两方面, 一是抑制形变奥氏体再结晶和再结晶后晶粒的长大, 起到细化晶粒的效果; 二是在铁素体上沉淀相的弥散析出, 产生沉淀强化的作用^[1]。少量的 V、Ti 可

大幅度提高材料的综合性能。稀土元素在钢铁材料中的研究和应用已有 100 多年的历史, 稀土在钢中的作用机理大致总结为三个方面, 即钢液净化作用、夹杂物变性作用、微合金化作用^[2]。大量的实验研究表明, 稀土对钢材的多项性能均有改善, 如增强钢

收稿日期: 2024-06-01

作者简介: 米永峰(1984-), 男, 陕西省榆林市人, 硕士, 高级工程师, 现从事无缝钢管新材料、控制轧制工艺技术、钛合金管与双金属复合管制备技术研究工作。

材的抗疲劳性能^[3]、提高钢材的耐腐蚀性^[4]、改善钢材力学性能^[5-6]等。

研究稀土 Ce 对 V、Ti 微合金化钢组织性能的影响,对开发性能优异的含稀土的 V、Ti 微合金化钢具有重要的指导意义。

1 试验方法

试验钢在 25 kg 真空感应炉中冶炼,用工业生

产的优质低磷硫 V、Ti 微合金化钢为原料,加入不同量的稀土 Ce,以保证除稀土 Ce 外其他成分一致。25 kg 钢锭的平均直径为 120 mm(钢锭为锥形,大头直径为 130 mm,小头直径为 110 mm),经 $\Phi 750 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ 高刚度二辊热轧试验轧机轧制成 20 mm 厚的钢板。试验钢化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢化学成分(质量分数)

编号	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	Ce
1 [#]	0.156	0.244	1.45	0.007 9	0.004	0.070	0.015	0
2 [#]	0.158	0.239	1.40	0.009 0	0.004	0.065	0.016	0.006 4
3 [#]	0.153	0.261	1.42	0.009 0	0.004	0.064	0.014	0.016 0

从钢板上取样进行拉伸及冲击试验,采用美国 FEI 公司设计制造的 Tecnai G2 F20 S - TWIN 透射电子显微镜对试验钢的珠光体片层距进行观察,采用德国蔡司生产的 Sigma 500 场发射扫描电镜对试验钢的夹杂物进行观察。

2 试验结果和讨论

2.1 稀土对 V、Ti 微合金化钢组织的影响

图 1 为 1[#]~3[#]试验钢的显微组织,组织均为铁素体+珠光体,晶粒度均达到 8 级,可以看出未添加稀土 Ce 的 1[#]试验钢、稀土 Ce 含量为 0.006 4% 的 2[#]试验钢和稀土 Ce 含量为 0.016 0% 的 3[#]试验钢,从显微组织未看出明显差异。

为进一步研究不同稀土 Ce 含量对试验钢显微组织的影响,使用透射电镜观察各试验钢的珠光体

形貌,如图 2 所示。以图中左下角 2 μm 标尺的长度为统一测量线长度,测量线垂直于珠光体平行片层方向。数测量线长度内的珠光体片层数,然后计算珠光体片层距,珠光体片层距 = 测量线长度/珠光体片层数。测量计算各试验钢的珠光体片层距。

每个试验钢在透射电镜下随机选取 20 个样本进行珠光体片层距测量,测量线长度均为 2 μm ,测量结果如表 2 所示。可以看出,未添加稀土 Ce 的 1[#]试验钢珠光体片层距为 0.133 μm ,稀土 Ce 含量为 0.006 4% 的 2[#]试验钢珠光体片层距为 0.125 μm ,稀土 Ce 含量为 0.016 0% 的 3[#]试验钢珠光体片层距为 0.100 μm 。可以看出,随着稀土 Ce 含量的增加,试验钢的珠光体片层距逐渐减小,珠光体组织得到细化。

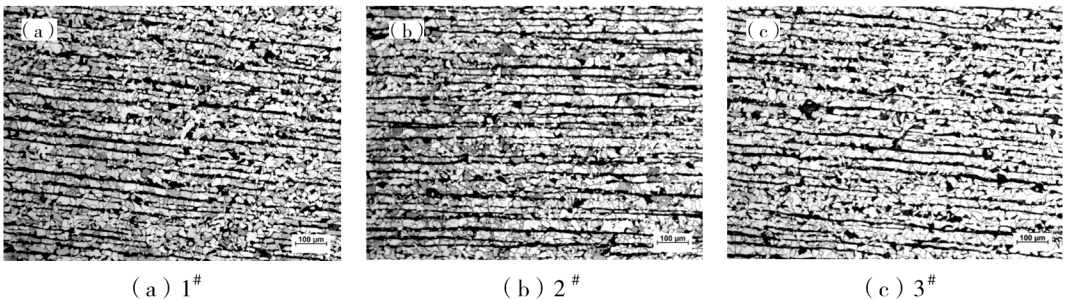


图 1 试验钢显微组织

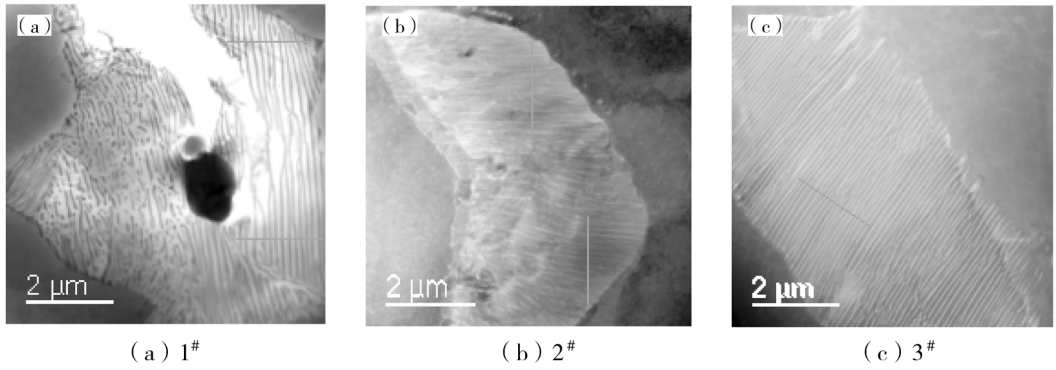


图2 试验钢珠光体透射电镜形貌图

表2 试验钢珠光体片层距

1# 试验钢			2# 试验钢			3# 试验钢		
编号	珠光体层数	珠光体片层距/ μm	编号	珠光体层数	珠光体片层距/ μm	编号	珠光体层数	珠光体片层距/ μm
1# -1	15	0.133	2# -1	15	0.133	3# -1	17	0.118
1# -2	14	0.143	2# -2	16	0.125	3# -2	20	0.100
1# -3	17	0.118	2# -3	14	0.143	3# -3	22	0.091
1# -4	16	0.125	2# -4	18	0.111	3# -4	20	0.100
1# -5	15	0.133	2# -5	16	0.125	3# -5	19	0.105
1# -6	17	0.118	2# -6	16	0.125	3# -6	20	0.100
1# -7	14	0.143	2# -7	17	0.118	3# -7	23	0.087
1# -8	15	0.133	2# -8	16	0.125	3# -8	19	0.105
1# -9	14	0.143	2# -9	18	0.111	3# -9	20	0.100
1# -10	15	0.133	2# -10	16	0.125	3# -10	20	0.100
1# -11	15	0.133	2# -11	15	0.133	3# -11	21	0.095
1# -12	14	0.143	2# -12	16	0.125	3# -12	22	0.091
1# -13	15	0.133	2# -13	17	0.118	3# -13	20	0.100
1# -14	16	0.125	2# -14	16	0.125	3# -14	19	0.105
1# -15	15	0.133	2# -15	15	0.133	3# -15	20	0.100
1# -16	16	0.125	2# -16	18	0.111	3# -16	18	0.111
1# -17	15	0.133	2# -17	15	0.133	3# -17	23	0.087
1# -18	15	0.133	2# -18	16	0.125	3# -18	20	0.100
1# -19	14	0.143	2# -19	15	0.133	3# -19	19	0.105
1# -20	15	0.133	2# -20	17	0.118	3# -20	20	0.100
平均		0.133	平均		0.125	平均		0.100

2.2 稀土对 V、Ti 微合金化钢含 Ti 夹杂物的影响

使用扫描电镜对各试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌进行观察。析出夹杂物中 V 含量较少,这是因为 V 在钢中溶解度较高,本次试验钢中钒含量较低,大部分 V 溶入到钢基体,少部分以碳氮化物的形式存

在于钢中^[7]。

图3为未添加稀土 Ce 的 1# 试验钢中的含 Ti 夹杂物形貌及其能谱图。夹杂物形貌为矩形,有尖锐棱角,在棱角处容易引发应力集中,容易导致微裂纹产生,对钢材产生极大的破坏作用。经测量该含 Ti

夹杂物尺寸约为 $3\ \mu\text{m}$ 左右。

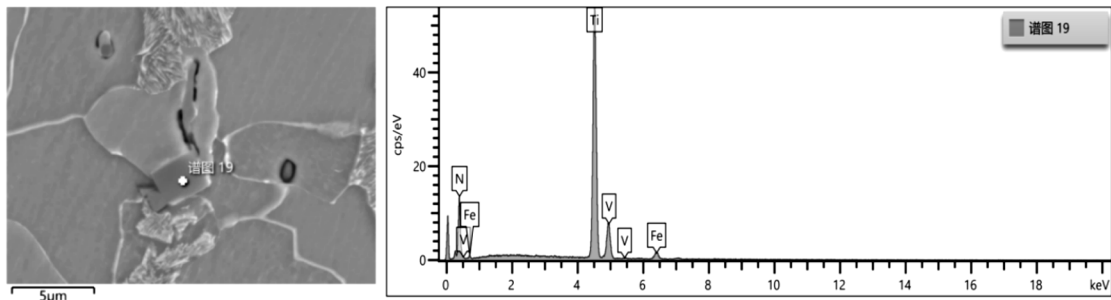


图 3 1[#]试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌及其能谱图

图 4 为稀土 Ce 含量为 0.006 4% 的 2[#] 试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌及其能谱图。可以看出, 该含 Ti 夹杂物形貌仍为规则的矩形, 由能谱图分析, 该夹杂

物为含稀土 Ce、O、Al、Ti、S 等元素的复合夹杂物。相比 1[#] 试验钢, 夹杂物尺寸有所减小, 约为 $2\ \mu\text{m}$ 左右。

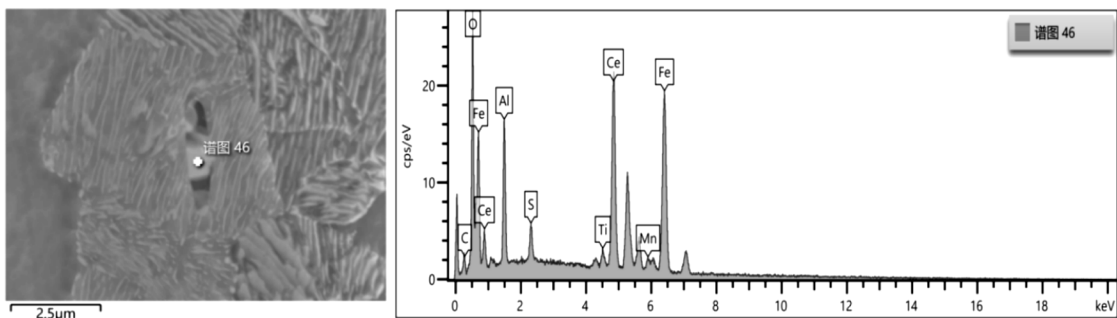


图 4 2[#]试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌及其能谱图

图 5 为稀土 Ce 含量为 0.016 0% 的 3[#] 试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌及其能谱图。可以看出, 该夹杂物为含稀土 Ce、O、S、Ti 等元素的复合夹杂物, 相比其他试验钢来说, 夹杂物形貌进一步发生改变, 转变

为光滑椭圆形夹杂物, 原来规则矩形的夹杂物的尖锐棱角基本消失, 测量夹杂物尺寸为 $1\ \mu\text{m}$ 左右, 尺寸进一步减小。

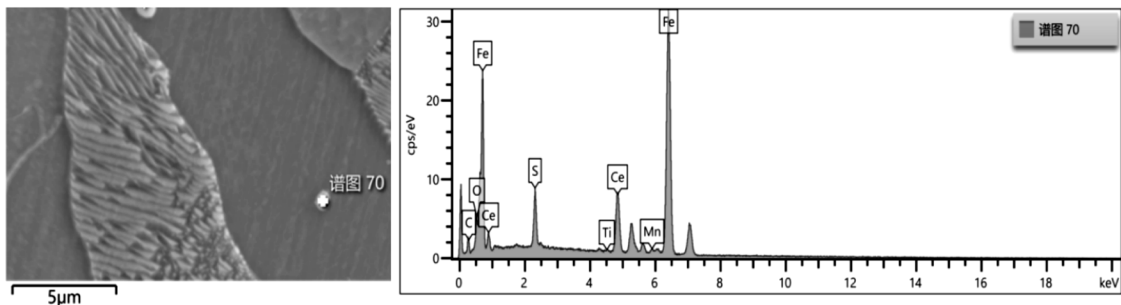


图 5 3[#]试验钢中含 Ti 夹杂物的形貌及其能谱图

可以看出,随着稀土 Ce 含量的增加,稀土 Ce 表现出较强的夹杂物改性作用。钢中不添加稀土 Ce 时,含 Ti 夹杂物为具有尖锐棱角的规则矩形,且尺寸较大;钢中稀土 Ce 含量为 0.006 4% 时,含 Ti 夹杂物形貌仍为规则矩形,但尺寸有所减小;钢中稀土 Ce 含量为 0.016 0% 时,含 Ti 夹杂物形貌由规则矩形变为光滑椭圆形,且尺寸进一步减小。含 Ti 夹杂物形貌及尺寸的变化,避免了因其规则形貌导致的应力集中对钢性能造成的危害。

2.3 稀土对 V、Ti 微合金化钢 MnS 夹杂物的影响

使用扫描电镜对试验钢中 MnS 夹杂物的形貌进行观察和分析。

由图 6 可以看出,1[#]试验钢中的夹杂物为 MnS 夹杂物,呈长条状带尖角,长度约为 3 μm 。图 7 为 2[#]试验钢中含稀土 Ce 的 MnS 夹杂物,可以看出,当钢中稀土 Ce 含量为 0.006 4% 时,MnS 夹杂物呈不连续断开状态,与图 6 相比,各段长度变短,最长约 1 μm 左右,呈球化趋势。当稀土 Ce 含量增加到 0.016 0% 时,MnS 夹杂物已基本球化,如图 8 所示,直径约 1 μm 左右。

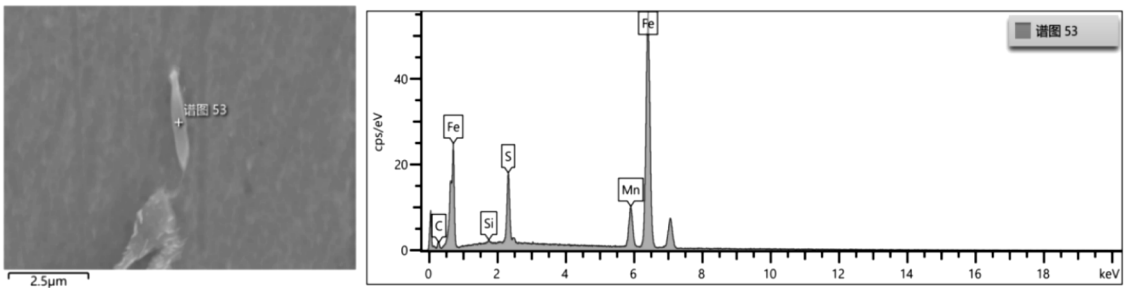


图 6 1[#]试验钢中 MnS 夹杂物的形貌及其能谱图

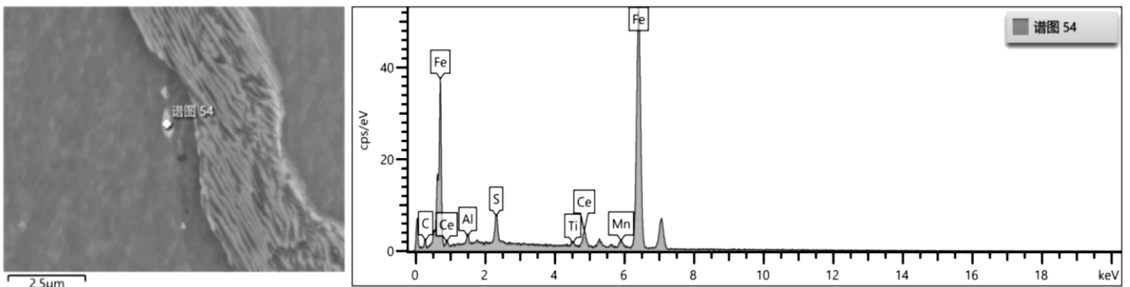


图 7 2[#]试验钢中 MnS 夹杂物的形貌及其能谱图

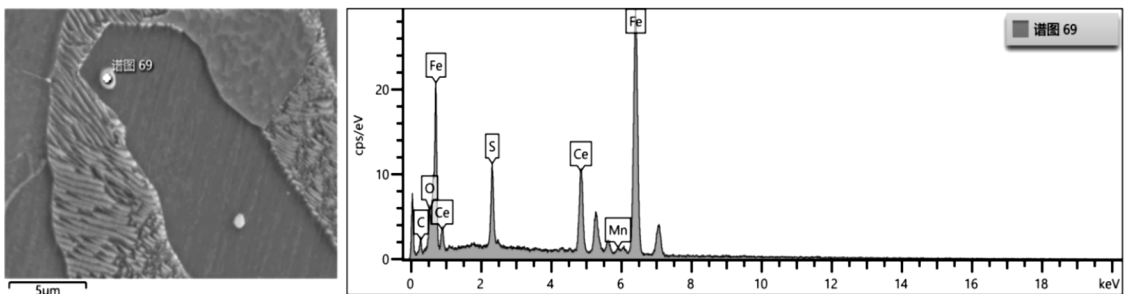


图 8 3[#]试验钢中 MnS 夹杂物的形貌及其能谱图

2.4 稀土对 V、Ti 微合金化钢力学性能的影响

试验钢的拉伸性能如表 3 所示,冲击性能如表

4 所示。

随着稀土 Ce 含量的增加,屈服强度及抗拉强

度均呈增加趋势,屈服强度增幅大于抗拉强度,屈强比变大,延伸率基本不变。

各个温度下,纵向冲击功均大于横向冲击功。加入稀土 Ce 后,纵向冲击功与横向冲击功差值变小,减小了横纵差异性。

加入稀土 Ce 后,纵向冲击性能得到改善,随着温度的降低,改善效果更明显。各个温度下的横向冲击性能改善效果要比纵向明显。

表 3 试验钢拉伸性能

编号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	屈强比	延伸率 A /%
1#	529	327	0.62	31.5
2#	533	353	0.66	31.5
3#	533	358	0.67	31.0

表 4 试验钢冲击性能 KV_2 J

编号	纵向			横向		
	常温	0℃	-20℃	常温	0℃	-20℃
1#	275	114	33	110	22	10
2#	286	152	99	282	147	47
3#	294	158	102	268	140	80

注:试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 15 mm。

由本文章节 2.1 可知,随着稀土 Ce 含量的增加,试验钢的珠光体片层距逐渐减小。这是因为屈服强度和片层间距的 1/2 次方成正比,而片层间距对抗拉强度的作用要弱些,稀土能减小珠光体片层间距,因此稀土使试验钢屈服强度提高得更多^[8]。随着稀土 Ce 含量的增加,屈服强度增幅大于抗拉强度,从而导致屈强比升高。

本文中稀土 Ce 对含 Ti 夹杂物及 MnS 夹杂物的影响都是稀土对夹杂物变质作用的体现。稀土 Ce 使矩形的含 Ti 夹杂物球化,避免了尖锐棱角处因应力集中导致微裂纹产生,使钢的韧性大为改善;同时,稀土 Ce 使长条状 MnS 断开并球化,形成稀土化合物,稀土化合物在钢热加工变形时,仍保持细小的球形或纺锤形,较均匀地分布在钢材中,消除了原先存在的沿钢材轧制方向分布的呈长条状 MnS 等夹杂物。控制硫化物为主的夹杂物形态所带来的好处,明显地表现在改善钢的横向韧性。稀土夹杂物的热膨胀系数和钢的接近,可以避免钢材热加工冷却时在夹杂物周围产生大的附加应力,有利于提高

钢的疲劳强度。夹杂物的变性,能增加夹杂物与晶界抵抗裂纹形成与扩展的能力^[2]。因此,加入稀土 Ce 后,试验钢的韧性得到改善,特别是低温韧性改善明显,横向韧性的提高要比纵向韧性的提高幅度大,减小了试验钢的横纵差异性,提高了试验钢各向性能的均匀性。

3 结论

(1)随着稀土 Ce 含量的增加,珠光体片层距逐渐减小,使 V、Ti 微合金化钢的屈服强度及抗拉强度均呈增长趋势,屈服强度增幅大于抗拉强度,屈强比变大,延伸率基本不变。

(2)稀土 Ce 使 V、Ti 微合金化钢中的长条状 MnS 和矩形含 Ti 夹杂物球化,变性为稀土夹杂物,夹杂尺寸变小,形状更加圆滑,减小了应力集中,与基体的结合更加紧密,使 V、Ti 微合金化钢的韧性大幅提高。

(3)随着稀土 Ce 含量的增加,V、Ti 微合金化钢的韧性得到改善,特别是低温韧性改善明显,横向韧性要比纵向韧性的提高幅度大,减小了试验钢的横纵差异性,提高了试验钢各向性能的均匀性。

参 考 文 献

- [1] 雍岐龙. 微合金钢:物理和力学冶金[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [2] 王龙妹,杜挺,卢先利,等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究[J]. 稀土,2021,22(4):37-40.
- [3] 于雅樵. 稀土对钢组织和性能的影响[J]. 稀土信息,2017(10):30-33.
- [4] 王龙妹,杜挺. 09CuPTi(RE)耐候钢中稀土作用机制研究[J]. 中国稀土学报,2003,21(5):491-494.
- [5] 曹晓恩. 稀土 Ce 对 X80 管线钢组织和性能的影响[D]. 包头:内蒙古科技大学,2013.
- [6] 尚卿. 稀土对结构钢 Q345B 组织和性能的影响[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.
- [7] 李梅,王强,高宏文,等. 钒含量对新型高强钢性能的影响[J]. 钢铁钒钛,2019,40(6):118-121,142.
- [8] 林勤,宋波,郭兴敏,等. 钢中稀土微合金化作用与应用前景[J]. 稀土,2021,22(4):31-36.