稀土防护用钢板成分及热处理工艺优化[*1]

于雅樵[1], 袁晓鸣[2], 卢晓禹[2], 高日增[1]

(1. 包钢稀土研究院, 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: 为了考察不同稀土加入量及不同热处理工艺对稀土防护用钢板BT700E性能的影响规律, 在实验室进行了稀土合金加入量为5×10^{-6}、10×10^{-6}、15×10^{-6}的中试试验, 同时匹配不同的热处理制度, 采用淬火温度880 ℃, 回火温度分别为560 ℃、580 ℃、600 ℃的热处理工艺。比较不同稀土加入量、不同热处理制度对试验钢性能的影响。结果表明, 稀土加入量为10×10^{-6}, 热处理工艺880 ℃淬火+580 ℃回火, 力学性能满足SSAB相关技术规范要求。

关键词: 稀土; 高强钢; 调质; 防护
中图分类号: TG113.25; TG142.13 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2017)06-0039-03
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.06.014

Optimization of Composition and Heat Treatment Process for Rare Earth Protective Steel Plate

YU Ya-qiao[1], *YUAN Xiao-ming*[2], *LU Xiao-yu*[2], *GAO Ri-zeng*[1]

(1. *Rare Earth Research Institute of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*;
2. *Technical Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: In order to investigate the effects of different rare earth additions and different heat treatment processes on the properties of rare earth protective steel BT700E, in the laboratory, the pilot test with rare earth alloy adding quantity 5×10^{-6}, 10×10^{-6} and 15×10^{-6} are carried out, and different heat treatment systems are matched, and the heat treatment process with 880℃ quenching temperature and 560 ℃, 580 ℃ and 600 ℃ tempering temperature are respectively carried out. The effects of different rare earth additions and different heat treatment systems on the properties of test steels are compared, and results show that the 10×10^{-6} rare earth addition, 880 ℃ quenching + 580 ℃ tempering in heat treatment process, mechanical properties can meet the requirements of SSAB related technical specifications.

Key words: rare earth; high-strength steel; quenching and tempering; protection

稀土防护用BT700E高强度钢板是包钢针对国内某军工集团研制的X轻型战术车而开发的防爆用钢板产品[1-3], 主要用于特种战术车的底板。国际上主流特种防雷车的底板大多采用的是瑞典SSAB公司生产的WELDOX系列高强度钢板, 该类钢板具有各向异性小、强塑积高、冲击韧性好、工艺

* **收稿日期**: 2017-09-05
作者简介: 于雅樵(1958-), 男, 内蒙古包头市人, 高级工程师, 现从事稀土合金制备相关工作。

中国知网 https://www.cnki.net

性能好等特点,优良的综合性能使该类钢板具有抵御地雷及简易爆炸装置的能力。国际上较先进的特种战术车为南非派拉蒙掠夺者,其底板可以抵得住8 kg的TNT爆炸的威力,而国内该类钢板基本处于空白。通过前期对进口瑞典WELDOX 700E钢板[4-5]开展实物质量剖析、热处理工艺研究,结合包钢在长期稀土钢研究与应用的基础上,制定了采用稀土微合金化成分设计,开发稀土防护用钢板BT700E。满足特种战术车的使用要求,同时实现高端板材国产化的目标。

1 产品技术要求

1.1 WELDOX 700E 化学成分要求

WELDOX 700E是瑞典SSAB公司开发的低合金高强度系列钢板,化学成分要求见表1。

表1 化学成分要求(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	P	S	Nb
成分	≤0.20	≤0.60	≤1.60	≤0.02	≤0.01	≤0.04
元素	V	Ti	Cr	Mo	Cu	B
成分	≤0.09	≤0.04	≤0.70	≤0.70	≤0.30	≤0.005

1.2 WELDOX 700E 力学性能要求

1.2.1 拉伸试验

SSAB技术规范对拉伸性能要求见表2。

表2 拉伸试验

要求	厚度/mm	试样方向	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%
技术规范	4~53	横向	≥700	780~930	≥14
	53~100	横向	≥650	780~930	≥14

1.2.2 冲击试验

SSAB技术规范对冲击性能要求为横向,试验温度-40 ℃,冲击功平均值不低于69 J。相比国标同级别钢种,冲击功要求明显提高。

2 实验室研究

2.1 实验钢化学成分

实验室采用25 kg真空中频感应炉进行了不同稀土加入量的小炉试验钢冶炼,通过四辊可逆轧机完成了轧制试验,试验钢板匹配不同的热处理工艺,开展热处理试验研究,优化出最佳的加入量及热处理工艺。实验室共冶炼3炉试验钢,稀土加入量分别为5×10^{-6}、10×10^{-6}、15×10^{-6};其它元素含量保持不变,化学成分见表3。

表3 不同稀土加入量化学成分(质量分数) %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cr	Mo	B	Ce
技术规范	≤0.20	≤0.60	≤1.60	≤0.020	≤0.010	≤0.040	≤0.70	≤0.70	≤0.005	
1#	0.13	0.26	1.18	0.008	0.002	0.013	0.31	0.17	0.014	0.000 5
2#	0.13	0.24	1.09	0.009	0.002	0.013	0.30	0.16	0.015	0.001 0
3#	0.13	0.25	1.11	0.009	0.002	0.016	0.31	0.17	0.014	0.001 5

2.2 轧制工艺

轧制过程时,将钢锭在加热炉升温至1 200 ℃,使钢锭能够进行均匀加热,采用四辊轧机轧制后空冷至室温。轧制车间要进行全封闭,以便能够在恒定的温度下操作,为后续冷却得到优异的组织性能提供了良好的条件。

2.3 热处理工艺

实验钢采用淬火温度880 ℃,回火温度分别为560 ℃、580 ℃、600 ℃的热处理工艺。比较不同稀土加入量、不同热处理制度对试验钢性能的影响。

3 试验结果与讨论

表4、表5为试验钢的拉伸试验。结果表明,在相同的热处理工艺条件下,不同的稀土加入量对于强度的影响较小。在相同稀土加入量的情况下,试验钢的力学性能主要受热处理制度影响较大。随着回火温度的升高,强度逐渐下降,稀土加入量为10×10^{-6},热处理工艺880 ℃淬火+580 ℃回火时,力学性能满足SSAB相关技术规范要求,余量适中。同时考虑该类钢板的特殊用途,要求钢板具有良好的延伸率。由表4可见,稀土加入量为10×10^{-6}

中国知网 https://www.cnki.net

时,试验钢的延伸率明显优于其它稀土含量的试验钢。表 6、表 7 为试验钢的冲击试验,结果表明不同稀土加入量配合不同的热处理制度的冲击值都保证在 200 J 以上。

表 4　不同稀土加入量拉伸试验

状态	温度/℃(淬火 + 回火)	稀土加入量/10^{-6}	拉伸试验			
			屈服/MPa	抗拉/MPa	延伸率/%	强塑积
技术规范			≥700	≥780	≥14.0	
回火态	880 + 580	5	740	818	17.5	14 315
	880 + 580	10	739	831	18.5	15 374
	880 + 580	15	727	810	16.5	13 365

表 5　不同热处理工艺拉伸试验

状态	温度/℃(淬火 + 回火)	稀土加入量/10^{-6}	拉伸试验			
			屈服/MPa	抗拉/MPa	延伸率/%	强塑积
技术规范			≥700	≥780	≥14.0	
回火态	880 + 560	10	758	855	17.0	14 535
	880 + 580	10	739	831	18.5	15 374
	880 + 600	10	730	815	19.0	15 485

表 6　不同稀土加入量冲击试验

状态	温度/℃(淬火 + 回火)	稀土加入量/10^{-6}	-40 ℃冲击功/J			
			1	2	3	平均值
技术规范						≥69.0
回火态	880 + 580	5	220	216	208.0	214.7
	880 + 580	10	207	204	202.0	204.3
	880 + 580	15	208	209	216.0	211.0

表 7　不同热处理工艺冲击试验

状态	温度/℃(淬火 + 回火)	稀土加入量/10^{-6}	-40 ℃冲击功/J			
			1	2	3	平均值
技术规范						≥69.0
回火态	880 + 560	10	209	211	217.0	212.3
	880 + 580	10	207	204	202.0	204.3
	880 + 600	10	210	220	217.0	215.7

研究表明,高强钢延伸率的提高主要归结为钢质纯净,或夹杂物变性。夹杂物的“形态控制”是稀土在钢中的主要作用之一。稀土可控制硫、氧夹杂物的形态。用少量的 Al 终脱氧并加入稀土,会形成高熔点的在晶内任意分布的球形夹杂,取代沿晶界分布的第二类硫化物。当稀土加入量适宜,稀土硫化物可完全取代 MnS。稀土化合物在热加工变形时,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,明显地改善横向韧性、高温塑性、焊接性能、疲劳性能、耐大气腐蚀性能等。稀土

(下转第 46 页)

中国知网　https://www.cnki.net

所示,断裂机理属于沿晶断裂和穿晶断裂的混合。而且随着应变速率的增大,穿晶韧性断裂逐渐占主导地位。这是因为温度的下降促使铁素体的进一步析出,与此同时,由于晶界存在较多伸长变形的MnS析出物,促进了应变诱导铁素体在晶界和基体内同时形成,随着铁素体析出量的增加,使晶界处的应力集中得以缓解或消除。根据实际生产经验,常把断面收缩率($Z=60\%$)作为判断产生裂纹的门槛,当断面收缩率小于门槛值,铸坯极易产生各种裂纹缺陷。

3 结束语

X65实验钢在应变速率为2.0×10^{-3}/s变形条件下,塑性凹槽谷底温度为800 ℃,此时断面收缩率降到最低值为50.31%,塑性最差。归其原因:一是由于低温奥氏体发生相变析出薄膜网状铁素体,铁素体强度小于奥氏体,在变形过程中引起不均匀变形,裂纹易在铁素体上形成;二是奥氏体低温区域合金元素钒、钛、铌的碳氮化物或氮化物在晶界析出,易成为应力集中点,造成晶界破坏,导致晶间脆断。因此,结合生成经验判断,X65实验钢在实际连铸矫直区温度应大于850 ℃。

参 考 文 献

[1] 蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[2] 贺道中. 连续铸钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2013.

[3] L. Li, Zhou J, Duszczyk J. Determination of a constitutive relationship for AZ31B magnesium and validation through comparison between simulated and real extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(3): 372-380.

[4] 邸洪双,康向东. 低碳钢的高温力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版),2004,25(1): 26-27.

(上接第41页)

铈延展性较好,可避免钢材冷加工过程中在夹杂物周围产生大的附加应力,有利于提高钢板的成型性能。同时夹杂物的变质,能增加夹杂物与晶界抵抗裂纹形成与扩展的能力。

4 结论

通过实验室进行不同稀土加入量,不同热处理工艺优化试验,试制结果表明稀土加入量为10×10^{-6},热处理工艺淬火880 ℃ + 回火580 ℃时,试验钢的各项性能,特别是延伸率指标最优。

参 考 文 献

[1] 田志凌. 钢铁材料最新进展[J]. 焊接,2009,(12): 14-19.

[2] 匡震邦,顾海澄. 材料的力学行为[M]. 北京:高等教育出版社,1997.

[3] Zhang Wenyue. Research on hardening factor of welding HAZ[J]. China Welding, 1992, 1(1): 1-8.

[4] BertilAhlbon. Fast Bridge Svetsen special issue[J]. Swedish Welding Society, 1995, (5): 26-27.

[5] 董明水,陈明,秦珠峰. 低合金高强钢WELDOX700与WELDOX900的焊接工艺[J]. 机械工人:热加工,2006,(7): 27-31.

中国知网 https://www.cnki.net