包钢含稀土Q690CF高强钢的研制*

勤 牧[1,2],杨 雄[1,2],杨维宇[1,2]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区稀土钢产品研发企业重点实验室,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章介绍了一种含稀土的低焊接裂纹敏感性Q690CF高强钢的成分设计、工艺参数及实验室试制结果。通过合理的化学成分体系,并采用合理的控轧控冷及离线调质工艺,所研发的Q690CF在强度级别上达到标准要求,强韧性匹配优良;通过降低碳当量(Ceq)及焊接裂纹敏感性指数(Pcm),达到焊接免预热的成分要求,具有广泛的市场开发前景。

关键词: Q690CF;低焊接裂纹敏感性;Pcm;调质
中图分类号: TG142 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2020)02-0052-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.02.016

Research and Development of Q690CF High Strength Steel with Rare Earth in Baotou Steel

Qin Mu[1,2], *Yang Xiong*[1,2], *Yang Wei-yu*[1,2]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Rare Earth Steel Products Research & Development, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In this paper, the composition design, process parameters and results of trial production in laboratory for Q690CF high strength steel with rare earth and low welding crack susceptibility are introduced. Its strength level could meet the standard requirements as well as the strength and toughness match well by adopting reasonable chemical composition system, controlled rolling and controlled cooling as well as off-line quenching and tempering process; the component requirements of welding without preheating can be met by reducing the carbon equivalent (Ceq) and welding crack susceptibility index (Pcm) so that it is with an extensive market development prospect.

Key words: Q690CF; low welding crack susceptibility; Pcm; quenching and tempering

随着我国能源需求的快速增长,煤炭开采装备制造业进入突飞猛进的发展阶段。作为煤炭综合开采主要装备的液压支架是综合采煤工作面机械装备的核心,支架在使用过程中承受动、静载荷,要求液压支架具有高强度、高灵活性和高可靠性。液压支架主体几乎完全采用焊接结构,所选钢材除强度级别较高以外,还要具有良好的焊接性、缺口韧性及低敏感性。开发低焊接裂纹敏感性钢是改善此类工程机械用钢的焊接性能,创造适合高效焊接技术环境的目标和方向[1]。低焊接裂纹敏感性钢是指在不

* 收稿日期:2019-12-04
作者简介:勤 牧(1987-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现从事板材产品研发及用户技术服务工作。

预热或低预热的情况下焊接不出现裂纹，国际上称为 CF 钢，在工程机械、压力容器以及水电、海洋等工程有着广泛的应用，这类钢材主要具有低的 Pcm 值、低碳当量、优异的焊接性能，同时具有高纯净度、高强度、高韧性等特点[2]。本文依托包钢技术中心先进的中试试验装备，结合本土稀土资源优势，开发具有稀土特色、低碳当量成分设计、强韧性匹配良好、焊接性能优良的 CF 钢，提升包钢在此类钢材的竞争力。

1　试制过程

1.1　成分设计原则

CF 钢中的焊接裂纹敏感性指数(Pcm)是基于化学成分设计来评估钢种可焊性的重要指标，Pcm 越小，钢的可焊性越好；同时，碳当量(Ceq)也表征焊接性能的好坏，它将钢中所有元素对淬硬倾向、冷裂纹倾向折合成碳元素的相对含量进行焊前理论分析。当 Pcm 不大于 0.25%，Ceq 小于 0.50% 时，钢材在不预热条件下焊接也不会产生焊接冷裂纹[3]。

Q690CF 试验钢成分设计原则是通过低碳高锰成分设计以及微合金化降低可焊性参数(碳当量和焊接冷裂纹敏感性指数)，在此前提下优化化学成分配比实现免预热或低预热焊接的成分要求。同时，稀土加入钢中可以有效提高钢的低温冲击韧性，同时改善钢板的焊接性能，还可以利用稀土替代部分合金元素，降低成本，保证钢材力学性能，并充分利用稀土资源。

1.2　工艺参数的确定

包钢在工程机械高强钢板的生产技术上已经具备系列化生产能力，因此对试验钢的成分设计，控轧控冷、热处理工艺参数的制定等方面具有一定的借鉴意义[4]。参照传统 Q690 生产工艺，小炉冶炼的铸坯加热温度设定在 1 200 ℃左右，温度不宜过高，避免奥氏体晶粒过度粗大。实验室轧制过程采用两段式轧制，其中精轧开轧温度设定在 930 ℃左右，精轧终轧温度设定在 840 ℃左右，根据现场铸坯断面规格及试验钢铸坯厚度，将试验钢轧制的最终厚度设定在 12 mm，轧后冷速为 10 ℃/s，终冷温度设定在 550 ~ 650 ℃。

Q690CF 最适宜的淬火温度为 930 ℃左右；考虑实际炉况和组织均匀化，淬火保温时间设定为 40 min。随后进行不同回火温度热处理试验，回火温度为 650 ℃、625 ℃、600 ℃、575 ℃、550 ℃、525 ℃，在炉时间为 50 min，将不同回火温度处理后的钢板经试样加工后进行力学性能检验。

2　试验结果

2.1　化学成分

在包钢技术中心冶轧实验室 25 kg 冶炼炉中共冶炼 3 炉 Q690CF 试验钢，炉号为 1#、2#、3#，分别加入 0.001%、0.002%、0.003% 的稀土元素，其钢水化学成分如表 1 所示，4#为从包钢 Q690 常规产品实际生产中选取的一炉实测成分，与试验钢进行比较分析。从表中可以看出，试验钢实测成分中碳当量(Ceq)及冷裂纹敏感性指数(Pcm)均达到标准要求[5]，符合免预热的成分前提，较传统 Q690，试验钢的冷裂纹敏感性指数有所下降，具有较低的焊接低冷裂纹倾向，可焊性得到提高。

表 1　Q690CF 试验钢实测化学成分

炉号	C/%	Si/%	Mn/%	P/%	S/%	Cr/%	Ni/%	Mo/%	Nb/%	Ti/%	RE/%	Ceq	Pcm
1#	0.06	0.22	1.7	0.010	0.002	0.28	0.20	0.21	0.058	0.019	0.001	0.47	0.20
2#	0.06	0.14	1.7	0.010	0.002	0.28	0.20	0.21	0.056	0.018	0.002	0.49	0.21
3#	0.06	0.23	1.7	0.010	0.002	0.28	0.20	0.21	0.056	0.018	0.003	0.48	0.20
4#	0.11	0.33	1.7	0.019	0.004	0.29	0.12	0.13	0.043	0.016		0.50	0.24

2.2　不同成分及工艺下的力学性能

表 2 为 0.002% 稀土加入量的 2#试验钢在不同回火温度下的力学性能检验结果。由检验结果可知，不同回火温度下试验钢的力学性能均符合 YB/T 4137—2005的标准要求[5]，屈服强度、抗拉强度随回火温度的升高而降低，延伸率升高，部分回火温度下的试验钢冲击试验结果也远超标准要求。综合强韧性匹配原则，考虑 550 ~ 600 ℃的回火温度比较合适。

表2 2#钢不同回火温度下的力学性能

回火温度/℃	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	冲击功(-20℃)/J		
525	854	873	16	148.8	142.9	140.8
550	835	859	15			
575	829	847	18.5	149.1	85.5	107.9
600	815	841	16.5			
625	788	818	17	173.4	141.4	146.9
650	799	814	18			
标准	≥690	770~940	≥14	≥47		

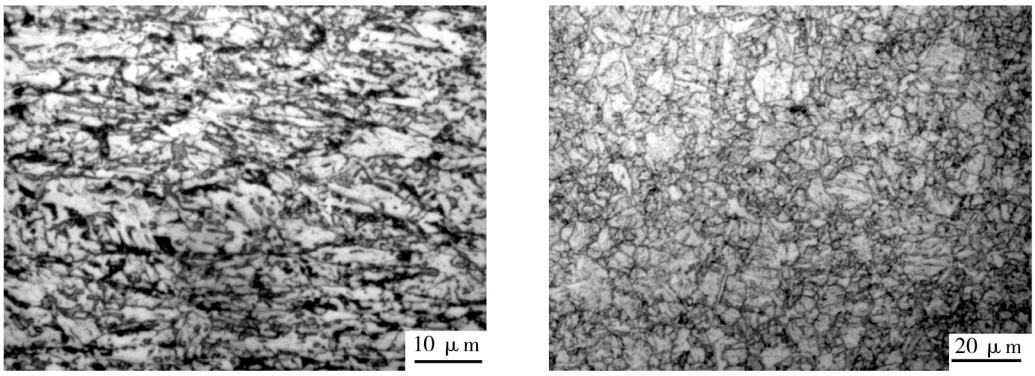
表3为Q690CF试验钢在回火温度为575 ℃下的典型力学性能指标，并与常规Q690进行比较分析。在此回火温度下，不同稀土添加量下的试验钢力学性能稳定，各项指标均能达到YB/T 4137—2005的标准要求[5]，并且由于稀土的加入，使得1#、2#、3#试验钢的冲击功均远远超过标准要求，与4#传统Q690产品的力学性能对比，其屈服强度、抗拉强度余量较为合理，延伸率有着显著提高，低温冲击功提升近2倍，因此更加适宜在低温潮湿、环境恶劣的矿井下进行应用。综合力学性能数据，添加0.002%稀土的Q690CF试验钢在回火温度为575 ℃下具有最佳的力学性能匹配。

表3 Q690CF试验钢力学性能

炉号	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A/%	冲击功(-20℃)/J		
1#	818	839	16	179.8	169.2	138.3
2#	829	847	18.5	149.1	85.5	107.9
3#	821	839	16	159.1	143.7	163.9
4#	985	1 070	9.0	73.5	69.0	84.5
标准	≥690	770~940	≥14	≥47		

2.3 显微组织

选取添加0.002%稀土的2#试验钢进行轧态和调质后的金相组织检验，如图1所示。轧态组织为铁素体+珠光体+贝氏体，调质后的组织类型为回火索氏体，与传统Q690组织相似，且奥氏体晶界细小均匀，因此为钢板优良的力学性能提供了基础保障。



（a）轧态组织 （b）调质后组织

图1 试验钢的轧态及调质态金相组织

3　工艺参数分析

选择 930 ℃作为淬火加热温度，使 Q690CF 试验钢中更多的碳化物溶于奥氏体中，并且使加入 Q690CF 试验钢的合金元素得到充分固溶，淬透性得到提升。试验钢淬火得到的马氏体是一种亚稳相，碳原子有从晶格间隙自发脱溶的倾向，文中的试验钢中碳化物形成元素较多，具有较高的回火稳定性，在较高温度回火时，马氏体完全分解，过渡碳化物转变成与基体无共格关系的细粒状渗碳体，同时固溶的合金元素在回火后大量析出，阻碍位错运动，强化组织。在 525 ~ 650 ℃的回火过程中，奥氏体发生回复和再结晶，部分位错通过迁移发生合并或抵消，板条逐渐消失，使强度不断降低，并且随着回火温度升高，板条消失的比例增大，强度性能逐渐降低，说明回复和再结晶对强度性能的影响占据主要地位[6]。回火温度升高使得淬火时产生的宏观应力和微观内应力大大减小，同时弥散分布的碳化物使得实验钢的韧塑性不断提高，表现为延伸率和冲击功的提高[7]。

4　结论

(1)综合小炉冶炼结果，所研发的 Q690CF 试验钢成分设计合理，通过降低碳当量和焊接裂纹敏感性指数达到免预热焊接的技术要求，可焊性得到提高，较传统 Q690 具有更低的碳当量和冷裂纹敏感性指数。

(2)Q690CF 试验钢经 930 ℃淬火并于 550 ~ 650 ℃回火时，随着回火温度的升高，屈服强度、抗拉强度降低，延伸率升高。综合不同稀土添加量的试验结果，添加 0.002% 稀土的 Q690CF 试验钢在回火温度为 575 ℃下具有最佳的力学性能匹配，为后续的工业化生产奠定了基础。

参　考　文　献

[1] 姚连登. CF 钢在煤矿机械和水电工程中的应用现状及开发前景[J]. 机械工程材料，2004，28(12)：39 - 41.

[2] 王九清，罗应明，胡湘红. Q690CFD 钢焊接热模拟试验分析研究[J]. 宽厚板，2017，23(1)：1 - 7.

[3] 刘丽华. 低焊接裂纹敏感性低碳贝氏体高强钢板 Q800CFE 的研发[J]. 特殊钢，2014，35(2)：51 - 53.

[4] 黄楠，任慧平，王雪莲. 包钢 Q890D 高强钢的研制[J]. 包钢科技，2017，43(1)：37 - 39.

[5] YB/T 4137—2015 低焊接裂纹敏感性高强钢板[S].

[6] 苏世宇，斯松华，贺文文. 回火温度对 Q890 高强钢组织和性能的影响[J]. 热处理，2012，47(2)：44 - 47.

[7] 李红英，赖永秋. 直接淬火工艺对 Q690 钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺，2017，46(6)：195 - 197.

(上接第 33 页)

(2)生产 S250GD + Z 镀锌钢带产品，找到了保证锌层厚度符合点焊要求的连续生产控制工艺。

参　考　文　献

[1] 程轩挺. 镀层厚度对镀锌钢板点焊质量的影响[J]. 研究与设计，2001，(11)：28 - 30.

[2] 赵涛. 镀锌钢板电阻点焊工艺研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2005.

[3] 王广山，宁亮亮，霍仁杰. 镀锌板点焊工艺研究及应用[J]. 国网技术学院学报，2017，32(5)：41 - 45.