稀土对低合金高强度结构钢Q345E疲劳性能的影响*

张凤明[1,2], 魏 淼[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: 文章对比分析了稀土元素对低合金高强度结构钢Q345E焊接接头力学性能及金相组织的影响, 从稀土元素对Q345E的晶粒度和夹杂物控制方面分析了稀土对母材及焊缝疲劳性能的影响。

关键词: 稀土; Q345E; 焊接性能; 疲劳强度
中图分类号: TG131 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2019)06-0055-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.014

Effects of Rare Earth on Fatigue Property of Low-alloy High-tensile Structural Steel Q345E

Zhang Feng-ming[1,2], *Wei Miao*[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 the paper, the effects of rare earth elements on the mechanical properties and metallographic structure of welded joints of low-alloy high-tensile structural steel Q345E are compared and analyzed. The effects of rare earth on fatigue property of base metal and welded joint are analyzed from the control of grain size and inclusion of Q345E steel by rare earth elements.

Key words: rare earth; Q345E; welding performance; fatigue strength

低合金高强度结构钢Q345E综合力学性能、焊接性、低温性能良好, 被广泛应用于建筑、桥梁、车辆、船舶、压力容器等。钢材焊接性能、疲劳性能、夹杂物等的优劣会直接影响到产品的使用性能, 最终关系到产品是否安全可靠。因此, 稀土元素对钢的综合力学性能、焊接性能、组织晶粒度、夹杂物方面的作用越来越引起重视[1]。

1 焊接材料和方法

1.1 试验材料

收稿日期: 2019-09-16

作者简介: 张凤明(1987-), 男, 内蒙古赤峰市人, 工程师, 现从事焊接工艺研究工作。

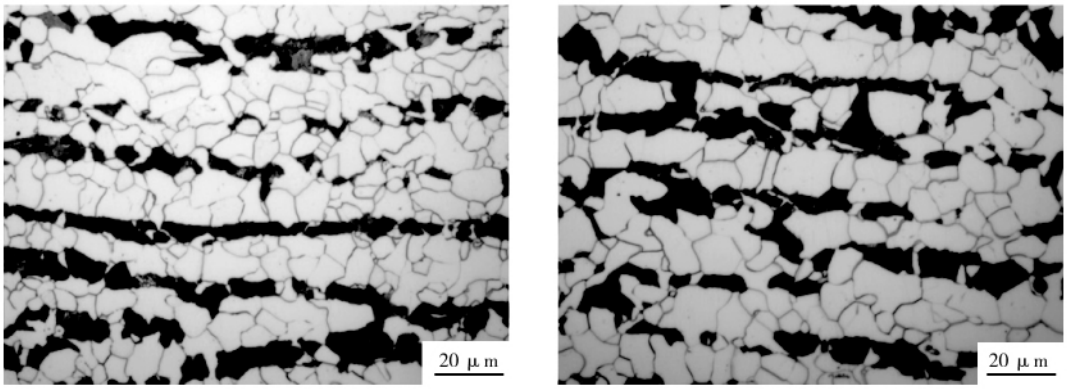
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验用 Q345E 母材化学成分及力学性能见表1、表2。

试验用 Q345E 母材的金相显微组织为铁素体+珠光体，加稀土后的母材晶粒比不加稀土的晶粒要细小，见图1(a、b)。

表1 Q345E 化学成分及焊丝力学性能

编号	牌号	化学成分(质量分数)/%						焊丝力学性能				
		C	Si	Mn	Al_s	Ce	CEV	KV_2(-20 ℃)/J	板厚/mm	R_{el}/MPa	R_m/MPa	A/%
1#	Q345E+Ce	0.17	0.25	1.35	0.026	22×10^{-6}	0.39	30	380	520	25	35.5
2#	Q345E	0.165	0.30	1.36	0.022		0.39	30	370	530	25.0	34.0



(a) 1# 加稀土　　(b) 2# 未加稀土

图1 (a、b) 母材的金相显微组织

1.2 焊接实验设备及焊丝

1.2.1 焊接实验设备

焊缝打底焊机;

焊机: OTC DIGITAL INVERTER DP500;

摆动式自动焊接小车 HK-100K;

焊缝填充焊机;

埋弧焊机: KZ-1 型双丝埋弧焊机。

1.2.2 焊丝力学性能

焊缝气体保护焊打底焊丝及埋弧焊填充焊丝力学性能见表2。

表2 焊丝力学性能

焊丝名称	规格/mm	批号	R_{el}/MPa	R_m/MPa	A/%	KV_2(-30 ℃)/J	HDM/(mL·g^{-1})	等级
ER70S-2	1.2	2012-4-1	450	545	28	92	0.05	超低氢型
JW-2	4.0	2013-5-6	500	405	29	58	0.07	超低氢型

焊接时为了保证焊缝中氢含量应优先选择低氢的焊接材料。由表2可知，本实验所采用的焊丝扩散氢含量属于超低氢型满足焊接实验要求。按照本次实验等强匹配焊接原则，选用的焊丝各项力学满足低合金高强钢 Q345E 焊接实验要求。

2 焊接实验结果与分析

2.1 Q345E 焊接工艺

Q345E 焊接方式采用 X 型坡口，双面对接自动焊接，焊接前将坡口及坡口附近母材清理干净。使用气体保护焊进行打底焊接，保证焊接底部无气孔、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

夹杂、未融合等缺陷，使用埋弧焊机进行焊缝填充及盖面焊接，焊接工艺见表 3。

表 3　焊接工艺

焊丝	直径 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm·min^{-1})	E /(kJ·cm^{-1})	焊缝保护措施	焊接道次	焊丝干伸长度 /mm
ER70S－2	1.2	230	23.9	33.3	9.9	气体：80% Ar + 20% CO_2，流量 20 L/min	1 道次	15～18
JW－2	4.0	750	36.0	44.5	37.0	焊剂：SJ101 焊剂烘干处理	单面 5 道次	24～28

焊板平直度及焊缝外观成形较好，气保焊补充起弧及收弧处焊坑，防止产生裂纹源。焊缝经超声探伤及金相组织观察，未出现气孔、夹杂等焊接缺陷。

2.2　Q345E 焊缝力学性能及金相组织

2.2.1　Q345E 实验焊板力学性能

Q345E 实验焊板力学性能见表 4。

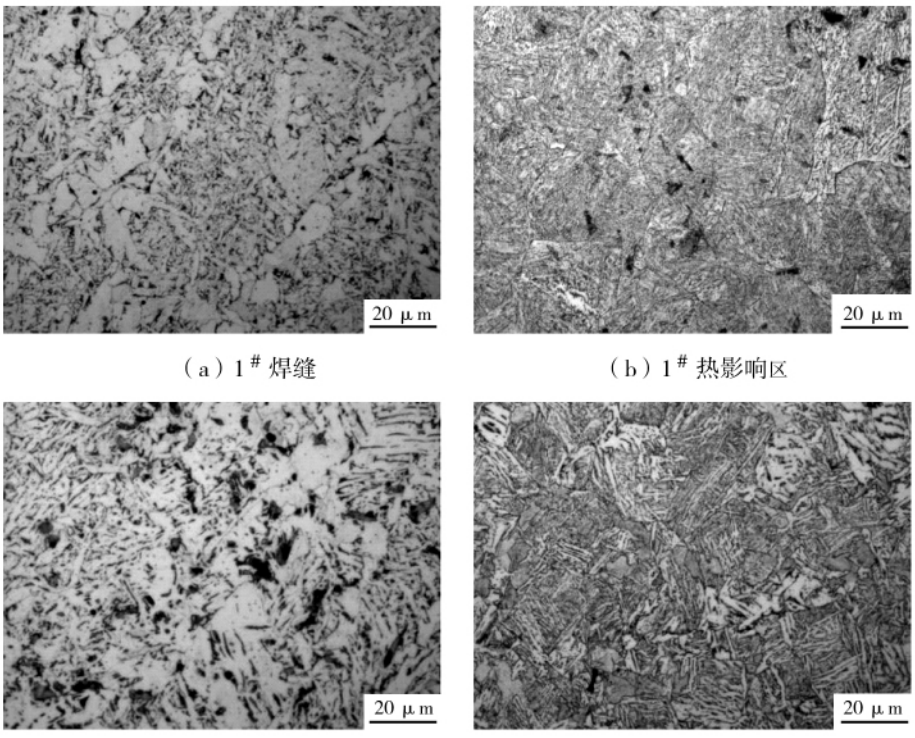
表 4　Q345E 实验焊板力学性能

编号	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A /%	KV_2(－20 ℃) /J	拉伸断裂位置	冷弯 D＝2.5a α＝180°
1#(加 RE)	517	365	20	48	母材	合格
2#(未加 RE)	516	369	17	30	母材	合格

由表 4 数据可知，当填充焊接热输入量 E 为 37 kJ/cm时，1#、2#试样拉伸断裂位置均为母材，1#、2#抗拉强度、屈服强度变化不大，延伸率有所降低，但加稀土的试样延伸率要高于未加稀土试样，1#加稀土试样低温冲击值明显高于 2#未加稀土试样冲击值，所以稀土元素可有效地的提高焊缝低温冲击韧性和延伸率。

2.2.2　Q345E 接头显微组织

1#、2#试样焊缝显微组织均为贝氏体＋铁素体，热影响区组织为贝氏体，见图 2。



(a) 1# 焊缝　(b) 1# 热影响区

(c) 1# 焊缝　(d) 1# 热影响区

图 2　Q345E 实验焊板金相组织

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对比1#和2#金相组织可知，焊缝处组织为贝氏体+先共析铁素体，热影响区组织为贝氏体，添加稀土后的焊缝及热影响区金相组织比未加稀土的细，且加入稀土后可提高Q345E焊缝晶粒度约0.5~1.0个级。

2.3 稀土改善夹杂物对Q345E疲劳性能影响

材料的疲劳强度受本身的化学成分、组织状态、纯净度和残余应力等影响，这些因素的细微变化，均会造成材料疲劳性能的波动甚至大幅度变化。夹杂物本身或由它而产生的孔洞相当于微小缺口，在交变载荷作用下将产生应力集中和应变集中，成为疲劳断裂的裂纹源，对材料的疲劳性能造成不良影响。夹杂物对疲劳强度的影响取决于夹杂物的种类、性质、形状、大小、数量和分布，易变形的塑性夹杂物(如硫化物)对钢的疲劳性能影响较小，而脆性夹杂物(如氧化物、硅酸盐等)则有较大的危害。在材料的疲劳极限应力范围，夹杂物的存在造成局部应变集中成为塑性变形的主要因素，从而强烈地影响材料的疲劳强度。也就是说，夹杂物的存在主要是影响材料的疲劳极限。

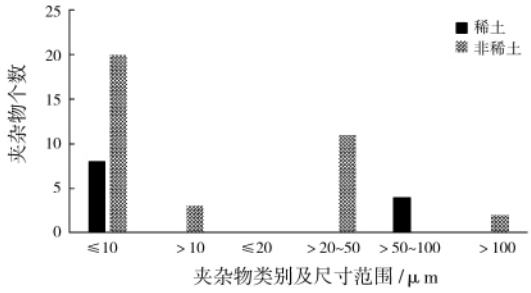


图3 稀土对Q345E夹杂物分布影响

由图3可知，Q345E加入稀土后钢中的B类、D或DS类夹杂物在尺寸和数量上都有所减少，从而可以有效的提高Q345E的疲劳性能，且稀土在细化晶粒、净化钢液、控制夹杂物形态等方面具有一定的作用。

2.3.1 Q345E母材疲劳性能对比

稀土对Q345E母材疲劳性能影响[2]，见图4、图5母材试样S-N曲线。

由图4、图5数据可知，Q345E加稀土1#试样疲劳极限为220 MPa，Q345E未加稀土2#试样疲劳极限为205 MPa。

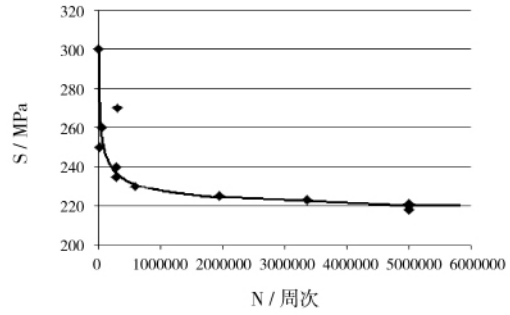


图4 母材1#试样(加稀土)

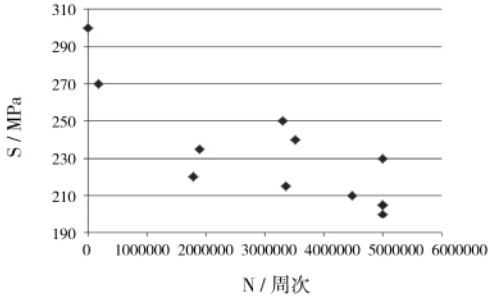


图5 母材2#试样(未加稀土)

2.3.2 焊缝疲劳性能对比

稀土对Q345E焊接接头疲劳性能影响，见图6、图7母材试样S-N曲线。

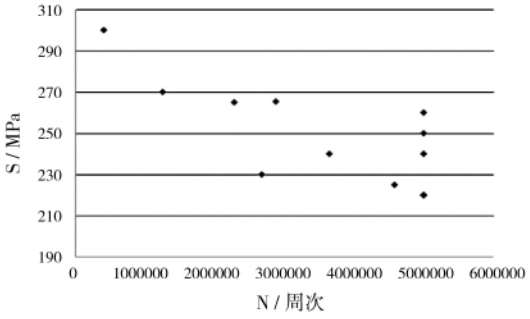


图6 焊缝1#试样(加稀土)

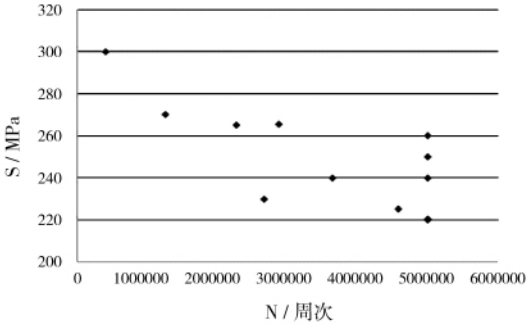


图7 焊缝2#试样(未加稀土)

(下转第74页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

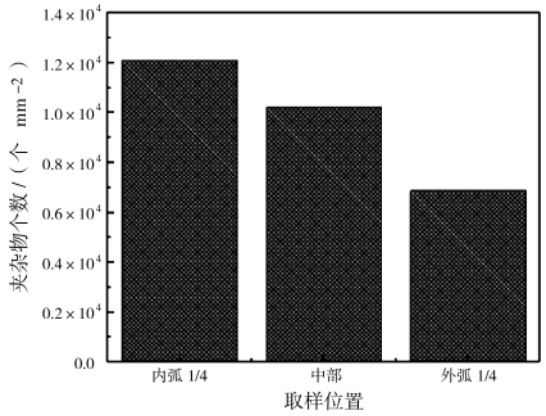


图5 板坯不同位置夹杂物数量

5 结论

(1) 稀土Ce元素除具有脱氧能力外,在RH加入稀土合金后 w[S]降低了0.000 6%,说明当钢中 w[S]为痕量时,稀土铈可起到深度降低钢中 w[S]的作用。

(2) 在RH处理末期加入200 kg稀土合金(w[Ce]为30%),分别对不同时间节点取样以化验稀土 w[Ce],根据化验后中包 w[Ce]计算获得稀土铈的收得率为38.35%和42.14%。

(3) 加入稀土炉次所形成的稀土复合夹杂物尺寸较小且形状呈现椭圆状,边缘较光滑,未发现大颗粒状 Al_2O_3 类夹杂物或条状MnS类夹杂存在,钢中全氧含量有所降低,钢液的洁净度有所提升。

(4) 观测加入稀土炉次板坯不同位置夹杂物数量,夹杂物数量由内弧1/4处、中部到外弧1/4处逐渐递减,外弧1/4处夹杂物无6 881个/mm^2。

参 考 文 献

[1] Waudby P E. Rare earth additions to steel [J]. International Metals Reviews, 1978, 23(1): 74.

[2] 杨吉春,杨昌桥,周莉,等. Ce对IF钢显微组织和力学性能的影响[J]. 稀土,2014,35(5): 25.

[3] 李中元,李长荣. 稀土Ce元素对钢中夹杂物变质的影响[J]. 材料热处理学报2018,39(10): 75.

(上接第58页)

由图6、图7数据可知,Q345E加稀土1#试样焊缝疲劳极限为230 MPa,Q345E未加稀土2#试样焊缝疲劳极限为220 MPa。

由以上实验数据可知,Q345E加入稀土元素后钢中的B类、D或DS类夹杂物在尺寸和数量上都有所减少,从而可以有效的提高Q345E母材及焊缝的疲劳性能,母材疲劳强度提高15 MPa以上,焊缝疲劳强度提高10 MPa以上。

3 结论

(1) 稀土对Q345E母材的力学影响不大,Q345E母材的金相显微组织均铁素体+珠光体,加稀土后的母材晶粒比不加稀土的晶粒要细小,说明稀土元素可以细化Q345E母材金相组织。

(2) Q345E加稀土后焊缝的强度和延伸没有明显变化,从焊缝的金相显微组织对比,焊缝处组织为贝氏体+铁素体,加稀土后的焊缝热影响区组织比未加稀土的细。

(3) Q345E加入稀土后晶粒度可以提高0.5~1.0个级,且加入稀土的试样B类、D或DS类夹杂物在尺寸和数量上都有所减少。稀土在细化晶粒、净化钢液、控制夹杂物形态等方面具有一定的作用,从而可以有效的提高Q345E母材及焊缝的疲劳性能,母材疲劳强度提高15 MPa以上,焊缝疲劳强度提高10 MPa以上。

参 考 文 献

[1] 程友明. 低合金高强度钢的焊接性能分析[J]. 广东造船,2002,(4): 16.

[2] GB T3075—2008,金属材料轴向疲劳试验[S].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net