

基于不同焊材的超高强钢与 BS700 高强钢 焊接接头裂纹的试验研究^①

王德军^{1,2}, 王彤^{2,3}

(1.山河智能特种装备有限公司技术中心,湖南长沙 410100; 2.湖南省岩土施工装备与控制工程技术研究中心,湖南长沙 410100; 3.湖南福力科技有限公司技术部,湖南长沙 410100)

摘要: 采用熔化极活性气体保护焊对抗拉强度大于 1 600 MPa 的超高强钢与抗拉强度大于 760 MPa 的 BS700 高强钢进行焊接时,组合接头焊缝易出现焊接裂纹,为解决该问题,使用直径 1.0 mm 的 ER70-G 焊材或 ER307Mo 焊材,在打底焊接电流 160~180 A、电压 21~24 V,盖面焊接电流 190~210 A、电压 23~26 V 条件下开展了焊接对比试验。工艺性和焊接性试验结果表明,使用 ER307Mo 焊材焊接的试样弯曲性能明显优于使用 ER70-G 焊材焊接的试样;使用 ER70-G 焊材焊接的试样焊缝存在未贯穿的微裂纹,焊缝断面裂纹率达到 35.29%;使用 ER307Mo 焊材焊接的试样焊缝断面未发现裂纹。ER307Mo 焊材更适合超高强钢与 BS700 高强钢的焊接。试验解决了超高强钢与 BS700 高强钢组合接头的开裂问题,为抗拉强度相差较大的异种高强钢的焊接提供了解决方案。

关键词: 焊接; 超高强钢; 高强钢; 焊接接头; 裂纹; 焊材; 刚性拘束; 熔化极活性气体保护焊; 异种钢焊接; 轻量化

中图分类号: TG457.11

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.037

文章编号: 0253-6099(2024)03-0176-06

Experimental Study on Cracks in Welding Joints of Ultra-high Strength Steel and BS700 High Strength Steel with Different Welding Materials

WANG Dejun^{1,2}, WANG Tong^{2,3}

(1. Technology Center of Sanhe Intelligent Special Equipment Co Ltd, Changsha 410100, Hunan, China; 2. Hunan Provincial Research Center of Geotechnical Construction Equipment and Control Engineering Technology, Changsha 410100, Hunan, China; 3. Technology Department of Hunan Fuli Technology Co Ltd, Changsha 410100, Hunan, China)

Abstract: When ultra-high strength steel with tensile strength more than 1 600 MPa and BS700 high-strength steel with tensile strength more than 760 MPa are joined together by metal active gas welding, weld cracks are prone to occur in the seam of joint. To solve this problem, comparative welding tests were performed by using ER70-G or ER307Mo welding wire with diameter of 1.0 mm, respectively, with initial welding current of 160–180 A, voltage of 21–24 V, and final welding current of 190–210 A, voltage of 23–26 V. The comparison of process and weldability show that welding with ER307Mo can lead to the sample with bending property obviously better than that by welding with ER70-G. The sample after welding with ER70-G can be found to have micro-cracks not going through the whole cross section of welding seam, with cracking rate on the cross section of seam reaching 35.29%, but no cracks are found on the section of welding seam by using ER307Mo. It is concluded that the ER307Mo welding wire is more suitable for welding ultra-high strength steel and BS700 high strength steel. The study has solved the cracking problem in the joint of ultra-high strength steel and BS700 high strength steel, which can provide a solution for the welding of dissimilar high-strength steel with larger difference in tensile strength.

Key words: welding; ultra-high strength steel; high strength steel; welding joint; crack; welding materials; rigid constraint; metal active gas (MAG) welding; dissimilar steel welding; lightweight

① 收稿日期: 2023-11-23

作者简介: 王德军(1970—),男,山东临沂人,高级工程师,主要研究方向为焊接制造技术及工装设计制造。E-mail: congcikaishi@163.com

低合金高强钢通常指抗拉强度 500~1 200 MPa 并考虑焊接性而生产制造的钢材,抗拉强度在 1 200 MPa 以上的称超高强钢^[1];低合金高强钢和超高强钢组成的焊接结构不仅具有较高的抗拉强度和屈强比,同时兼具较好的塑韧性,被广泛应用于工程机械、压力容器、海洋工程、军用装备等钢结构领域^[2-4]。BS700 高强钢的抗拉强度不低于 760 MPa,是一种低合金高强钢。为实现轻量化,本文选取了一种抗拉强度不低于 1 600 MPa、屈服强度不低于 1 350 MPa、伸长率不低于 8%的超高强钢(以下简称 J 钢),并将 J 钢与 BS700 高强钢组合成一种焊接接头,获得一种强度高、塑性好的异种钢焊接结构。J 钢具有较大的淬硬倾向,焊接冷裂敏感性较大,易导致焊接接头脆化,所以热影响区容易产生冷裂纹^[5-7];车用

焊接结构件存在较大残余应力时,会严重影响车辆的使用性能^[8-11]。为解决以上问题,基于相同焊接参数,分别使用 ER70-G 和 ER307Mo 焊材焊接 J 钢与 BS700 高强钢,寻找更适合 2 种异种钢焊接的焊材。

1 试验方法

焊接试板母材为 J 钢板和 BS700 高强钢板,应用熔化极活性气体保护焊(Metal Active Gas Arc Welding, MAG)进行焊接^[12],填充材料分别为直径 1.0 mm 的 ER70-G 焊材和 ER307Mo 焊材,以多层多道的焊接方式得到 J 钢与 BS700 高强钢组合接头(以下简称组合接头)。试板母材和焊材的化学成分、机械力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 试板母材、焊材化学成分(质量分数)

材料名称	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Mo	V	Nb	Ni
超高强钢(J 钢)	0.40~0.45	≤0.30	1.30~1.60	≤0.015	≤0.005	0.70~1.10	0.05~0.10	0.25~0.35	/	/	/
BS700 高强钢	≤0.12	≤0.60	≤1.75	≤0.025	≤0.015	/	≤0.22	≤0.50	≤0.20	≤0.09	/
ER70-G	≤0.08	≤0.58	≤1.58	≤0.007	≤0.005	/	/	≤0.38	/	/	≤0.85
ER307Mo	≤0.10	≤0.80	3.5~5.5	≤0.030	≤0.025	16.0~19.0	≤0.25	0.50~2.0	/	≤0.20	6.0~9.0

表 2 试板母材和焊材的机械力学性能

材料名称	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_e /MPa	伸长率 A /%
超高强钢	≥1 600	≥1 350	≥8
BS700 高强钢	≥760	≥730	≥25
ER70-G	≥690	≥600	≥14
ER307Mo	≥550	≥500	≥25

焊接保护气体为 80% Ar + 20% CO₂ 混合气体, MAG 焊接主要参数如表 3 所示。

表 3 主要焊接参数

层级	道次	焊丝直径 D /mm	电流 I /A	电压 U /V	焊接速度 v /(cm·min ⁻¹)	气体流量 Q /(L·min ⁻¹)	热输入 E /(kJ·cm ⁻¹)
打底焊接	1	1.0	160~180	21~24	30~40	20~25	4.7
盖面焊接	2	1.0	190~210	23~26	20~30	20~25	8.1

焊接性试验依据 GB 4675.1—84 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法、GB 4675.3—84 T 型接头焊接裂纹试验方法和 GB/T 13817—92 对接接头刚性拘束焊接裂纹试验方法,对 Y 型坡口接头、T 型接头及对接接头进行射线探伤及表面裂纹检测;试样形状和尺寸见图 1(b)~(d)。

刚性固定对接裂纹试验又称巴东拘束对接裂纹试验,简称巴东试验,是一种用于评估焊接材料及其焊接工艺抗裂性的重要试验方法。巴东试验遵循 GB/T 13817—92 规定。

所有试样均采用线切割方式获得。

本文通过工艺性试验和焊接性试验确定焊接组合接头的合适焊材。

工艺性试验依据 GB/T 19869.1 钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验标准要求,进行拉伸、弯曲、冲击等试验以及金相检验等。冲击试样按照 GB/T 2650—2008 的规定制作;拉伸试样按照 GB/T 2651—2008 的规定制作;弯曲试样按照 GB/T 2653—2008 的规定制作。力学性能检测试样尺寸和取样位置见图 1(a)。

2 试验结果分析

2.1 J 钢与 BS700 高强钢组合接头焊接工艺性试验

2.1.1 无损探伤检测

分别使用直径 1.0 mm 的 ER70-G 和 ER307Mo 焊材焊接 J 钢与 BS700 高强钢,组合接头无损探伤检测结果见图 2。应用相控阵检测仪对组合接头焊缝做无损探伤检测,焊缝内部均未发现气孔、裂纹等缺陷(图 2(a)、(c));对焊缝表面进行磁粉检测,未发现裂纹(图 2(b)、(d))。无损探伤检测结果表明,使用 2 种焊材焊接的组合接头焊缝内部及外部质量均合格,且区别不明显。

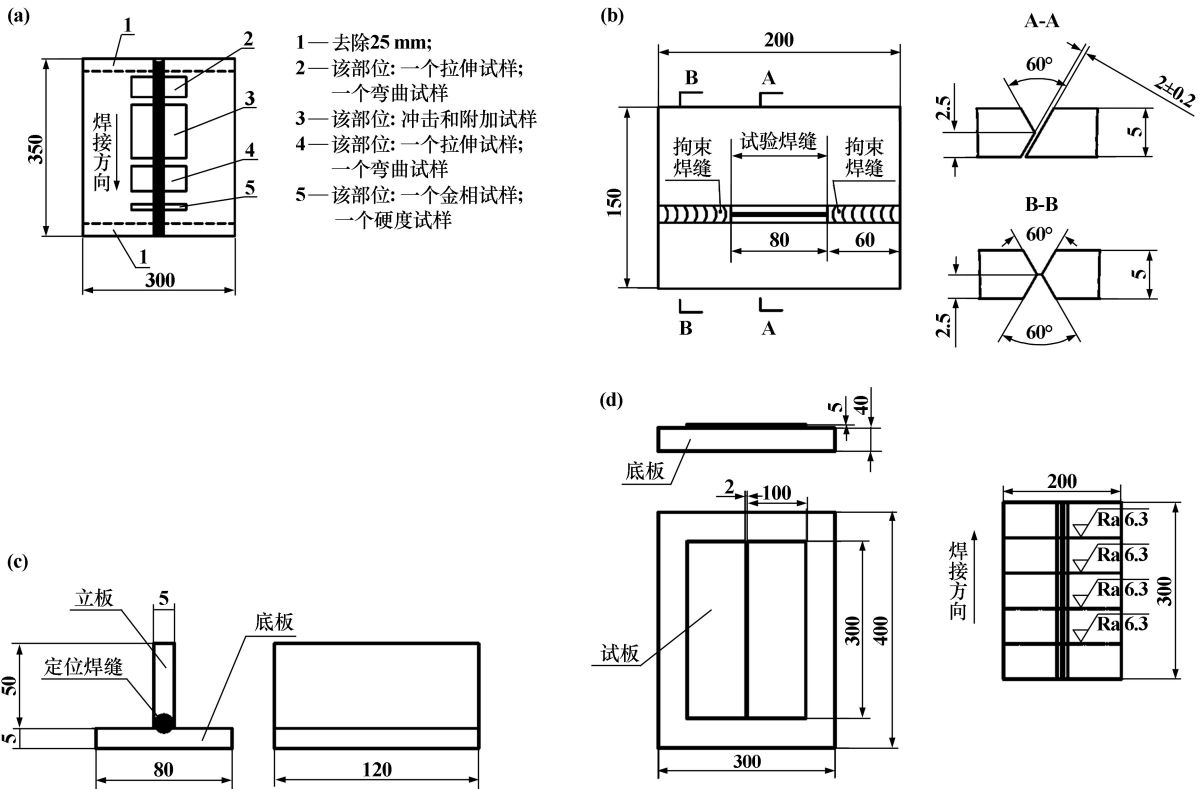
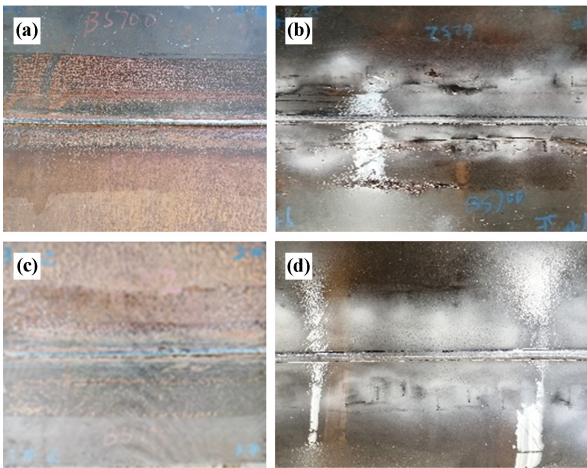
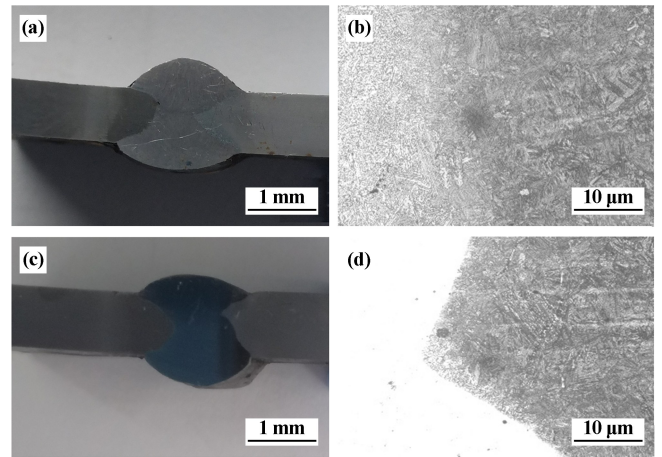


图1 试板尺寸示意图(单位:mm)



(a) ER70-G 焊材,相控阵检测; (b) ER70-G 焊材,磁粉检测;
(c) ER307Mo 焊材,相控阵检测; (d) ER307Mo 焊材,磁粉检测

图2 组合接头无损探伤检测结果



(a) ER70-G 焊材,低倍金相; (b) ER70-G 焊材,高倍金相;
(c) ER307Mo 焊材,低倍金相; (d) ER307Mo 焊材,高倍金相

图3 组合接头焊缝金相图片

2.1.2 金相检测

图3为组合接头焊缝的金相图片。由图3可见,分别使用ER70-G和ER307Mo焊材焊接的组合接头,低倍金相图片皆显示试样熔合均匀,熔深正常;高倍金相图片显示靠近J钢一侧热影响区的金相均为马氏体加微量铁素体,且热影响区无裂纹等缺陷出现。检测结果表明,使用2种焊材焊接的焊缝,通过低倍和高倍

金相检测对比,区别不明显。

2.1.3 力学性能检测

按照GB/T 2653—2008焊接接头弯曲试验、GB/T 2651—2008焊接接头拉伸试验、GB/T 2650—2008焊接接头冲击功试验的要求,对2种焊材焊接的组合接头分别进行拉伸、弯曲、冲击试验,结果见表4~5。由表可知,拉伸试验中,使用ER70-G焊材时抗拉强度中

值比使用 ER307Mo 焊材时高 95 MPa, ER70-G 焊材的焊接效果更好; 弯曲试验中, 使用 ER307Mo 焊材时试样弯曲直径最佳可达到 $1.8a$, 远远优于 $8a$ 的要求, 且

弯曲无裂纹, 优于 ER70-G 焊材; 冲击功试验中, 两者热影响区 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冲击功中值相差 3 J, 使用 ER70-G 焊材要好一些。

表 4 使用 ER307Mo 焊丝的力学性能试验结果

检验总项目	检验分项目	计量单位	标准值	检验结果	单项判定	备注
拉伸试验	抗拉强度 R_m	MPa	≥ 550	675~750	合格	拉伸接头
	断裂位置	/	断焊缝	断焊缝	合格	
冲击功 ($KV_2, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	/	J	≥ 4	10~34	合格	热影响区
	/	/	/	17~18	合格	焊缝区
弯曲试验	正弯	/	按标准规定 ($d \leq 8a, \alpha = 90^{\circ} \sim 180^{\circ}$)	180°完好	合格	a 为试板厚度, α 为弯曲角度
	正弯			180°完好	合格	
	背弯			180°完好	合格	
	背弯			180°完好	合格	

表 5 使用 ER70-G 焊丝的力学性能试验结果

检验项目	检验分项目	计量单位	标准值	检验结果	单项判定	备注
拉伸试验	抗拉强度 R_m	MPa	≥ 690	787~828	合格	拉伸接头
	断裂位置	/	断焊缝	断焊缝	合格	
冲击功 ($KV_2, -40\text{ }^{\circ}\text{C}$)	/	J	≥ 4	18~32	合格	热影响区
	/	/	/	13~19	合格	焊缝区
弯曲试验	正弯	/	按标准规定 ($d \leq 8a, \alpha = 90^{\circ} \sim 180^{\circ}$)	120°完好	合格	a 为试板厚度, α 为弯曲角度
	正弯			180°完好	合格	
	背弯			120°完好	合格	
	背弯			180°完好	合格	

ER307Mo 和 ER70-G 焊材焊接的组合接头检测数据都能达到标准值要求, 但使用 ER70-G 焊材焊接的试样抗拉强度与冲击功都优于使用 ER307Mo 焊材焊接的试样。使用 ER307Mo 焊材焊接的试样, 弯曲试验结果明显优于使用 ER70-G 焊材焊接的试样, 弯曲 180° 无裂纹, 弯曲直径最小可以达到 $1.8a$; 而使用 ER70-G 焊材焊接的部分试样只能弯曲到 120° , 否则会出现裂纹, 甚至断裂。在拉伸、冲击功、弯曲等力学性能指标中, 通常优先选择弯曲性能, 因此对于 J 钢与 BS700 高强钢组合接头的焊接, 优选 ER307Mo 焊材。

2.2 J 钢与 BS700 高强钢组合接头焊接性试验

2.2.1 Y 型坡口焊接裂纹试验

按照 GB 4675.1—84 要求, 对 2 种焊材焊接的试样进行 Y 型坡口焊接裂纹试验。组合接头宏观形貌如图 4(a)、(c) 所示; 采用表面裂纹、射线探伤等检测手段, 对焊缝表面和内部进行对比检测, 试板均合格; 使用线切割方式, 按图 4(a)、(c) 标线位置分割试样, 对断面进行渗透着色检测, 未发现裂纹, 断面图片如图 4(b)、(d) 所示。

2.2.2 T 型接头焊接裂纹试验

按照 GB 4675.3—84 要求, 采用表面裂纹、射线探

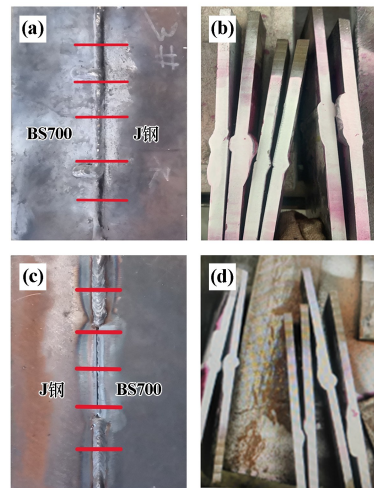


图 4 Y 型坡口焊接裂纹宏观及断面形貌
(a) ER70-G 焊材, 斜 Y 型坡口焊接; (b) ER70-G 焊材, 断面;
(c) ER307Mo, 斜 Y 型坡口焊接; (d) ER307Mo, 断面

伤等检测手段, 对 2 种焊材焊接的 T 型接头焊缝表面和内部进行检测, 结果表明 2 种组合接头均合格; 使用线切割方式在试样横向位置四等分切开, 对断面进行渗透着色检测, 均未发现裂纹, 断面图片如图 5 所示。

将断面磨削, 进行宏观检查, 焊接热影响区域均无裂纹; 随后进行金相观察, 发现使用 ER70-G 焊材焊接

的试样存在未贯穿的微裂纹,此微裂纹相当小,可以视作隐藏裂纹,一般情况下不会开裂,但在拘束力足够大的时候会存在开裂风险,如图6所示。说明在T型接头焊接裂纹试验中所提供的拘束力,不能让ER70-G焊材焊接的焊缝通过微裂纹转化为裂纹源。



图5 T型接头焊接裂纹断面

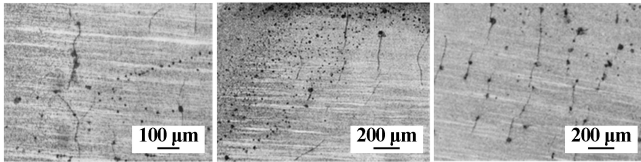


图6 使用ER70-G焊材焊接试样焊接影响区金相组织

2.2.3 对接接头刚性拘束焊接裂纹(巴东)试验

按照GB/T 13817—92要求进行巴东试验。ER70-G、ER307Mo焊材焊接的试样分别见图7、图8。2组试样正面进行渗透着色表面裂纹检测,无裂纹出现;然后采用冷加工方法,将6件试板从拘束底板上取下,对试样背面进行渗透着色表面裂纹检测,未出现裂纹。

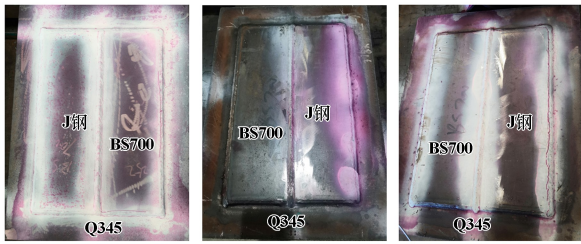


图7 使用ER70-G焊材焊接的试样

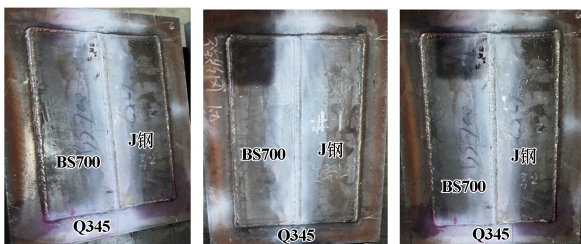


图8 使用ER307Mo焊材焊接的试样

按照GB-T13817—92要求,从取下的试板中各随

机选取一块,沿试验焊缝长度方向6等分,使用两种焊材的试板截取试样两组,见图9。每组得到6小块试样,随机2小块组合到一起,使用胶固定做成1个样块;两组试样共计做成6个样块,对检测面磨削加工,如图10所示。使用ER307Mo焊材焊接的试样焊缝断面,宏观检测未发现裂纹,如图10(a)所示;使用ER70-G焊材焊接的试样的焊缝都发现了裂纹,如图10(b)所示。裂纹共4处,裂纹长度分别为: h_1 为4 mm, h_2 为3 mm, h_3 为3 mm, h_4 为2 mm,焊缝厚度分别为: S_1 为6 mm, S_2 为5.5 mm, S_3 为5.5 mm, S_4 为5 mm, S_5 为6 mm, S_6 为6 mm。

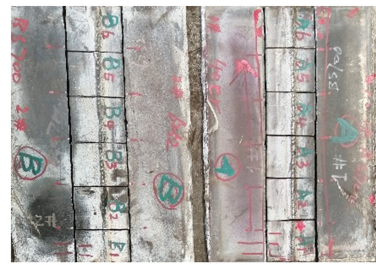
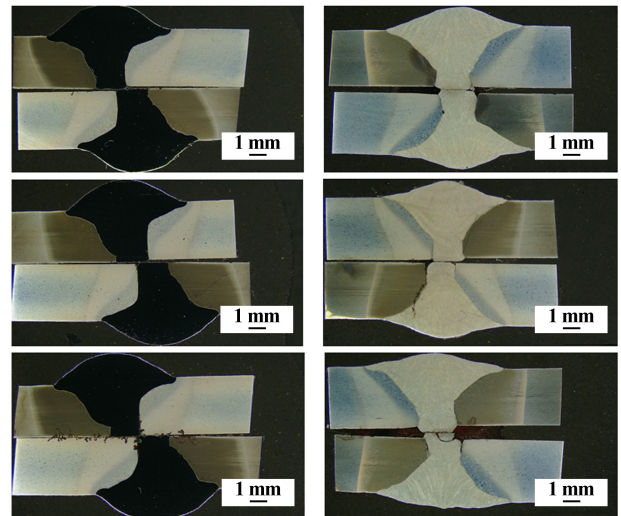


图9 试板6等分截取的两组试样



(a) ER307Mo焊材, 样块 (b) ER70-G焊材, 样块

图10 刚性拘束试验焊缝截面低倍宏观形貌

断面裂纹率计算公式如下:

$$\sum_{i=1}^4 h_i = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (1)$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \quad (2)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^4 h_i}{S} \times 100\% \quad (3)$$

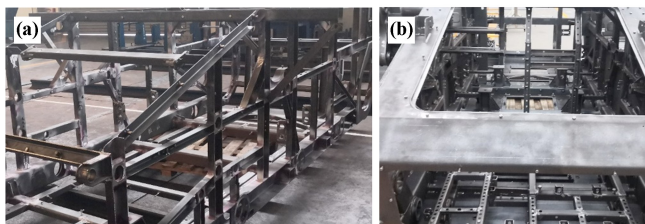
式中 h_i 为裂纹深度,mm; S 为焊缝总厚度,mm; C_s 为断面裂纹率,%。

通过对试验焊缝断面宏观腐蚀检测及断面裂纹率计算可知:在强大的拘束力作用下,使用 ER70-G 焊材焊接的试样焊缝断面裂纹率达到 35.29%,而使用 ER307Mo 焊材焊接的试样焊缝断面未发现裂纹。因此,J 钢与 BS700 高强钢组合接头应选用 ER307Mo 焊材焊接。

2.2.4 巴东试验结果在焊接结构产品上的再现实验

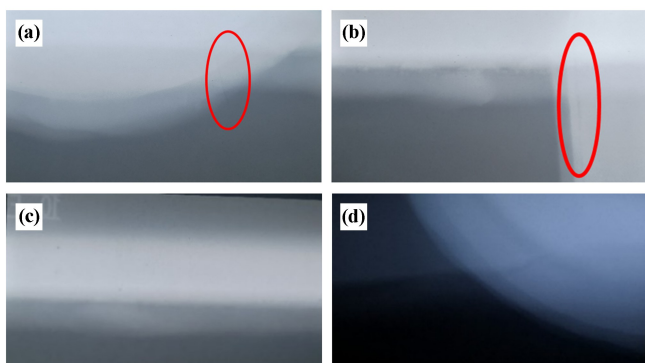
某产品焊接结构复杂,焊缝纵横交错;焊缝产生的收缩力使焊缝之间形成了强大的拘束力,拘束力状态等同于巴东试验刚性拘束状态;为推广应用巴东试验的研究结果,选择在此产品上对巴东试验结果进行再现。

按照图纸焊接制造了产品如图 11 所示。随后对试制产品进行了射线检测,发现使用 ER70-G 焊材的产品出现了焊接缺陷,横向裂纹及纵向裂纹如图 12(a)及图 12(b)圈标位置所示。使用 ER307Mo 焊材的产品没有出现焊接缺陷,如图 12(c)~(d)所示。工程应用与巴东试验结果完全一致。因此,组合接头焊接建议选用 ER307Mo 焊材。



(a) 试制产品骨架焊接; (b) 试制骨架蒙皮焊接

图 11 巴东试验结果在焊接结构产品上的再现实验



(a) ER70-G 焊材,横向裂纹; (b) ER70-G 焊材,纵向裂纹;

(c) ER307Mo 焊材,直焊缝; (d) ER307Mo 焊材,圆形焊缝

图 12 两种焊材所得焊接产品的射线检测结果

3 结 论

1) 由 ER307Mo 或 ER70-G 焊材焊接的 J 钢和 BS700 高强钢组合接头在冲击、拉伸和弯曲试验中都

表现出优异的力学性能。使用 ER307Mo 焊材焊接的组合接头的弯曲性能明显优于使用 ER70-G 焊材焊接的组合接头,弯曲 180° 无裂纹,弯曲直径最小可以达到 $1.8a$; 而使用 ER70-G 焊材焊接的组合接头只能弯曲到 120°, 否则会出现裂纹,甚至断裂。

2) 金相观察发现,使用 ER70-G 焊材焊接的试样存在未贯穿的微裂纹,此微裂纹相当小,可以视作隐藏裂纹,一般情况下不会开裂,T 型接头焊接裂纹试验中所提供的拘束力不能让 ER70-G 焊材焊接的焊缝通过微裂纹转化为裂纹源。

3) 在强大的拘束力作用下,使用 ER70-G 焊材焊接的试样焊缝断面裂纹率达到 35.29%,使用 ER307Mo 焊材焊接的试样焊缝断面未发现裂纹,J 钢与 BS700 高强钢组合接头焊接应该选用 ER307Mo 焊材。

参考文献:

- [1] 李亚江. 高强钢的焊接[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.
- [2] 宁 静,王 敖,苏 杰,等. W 含量对新型超高强度钢热塑性的影响[J]. 锻压技术, 2020,45(9):181-186.
- [3] 安同邦,魏金山,单际国,等. 保护气成分对 1000 MPa 级高强熔敷金属组织特征的影响[J]. 金属学报, 2019,55(5):575-584.
- [4] 高 野,任家宽,李志锋,等. 奥氏体化温度对 900 MPa 级 HSLA 钢显微组织和晶体学演变的影响[J]. 材料研究学报, 2020,41(12):44-48.
- [5] 雷爱娣,王立军,蔡庆伍. 1500 MPa 级低合金超高强钢微观组织与力学性能[J]. 金属学报, 2010,46(6):687-694.
- [6] Berdnikova O, Pozniakov V, Alekseienco T, et al. Effect of the structure on the mechanical properties and cracking resistance of welded joints of low-alloyed high-strength steels[J]. Procedia Structural Integrity, 2019,16:89-96.
- [7] 滕 彬,李小宇,雷 振,等. 低合金高强钢激光-电弧复合热源焊接冷裂纹敏感性分析[J]. 焊接学报, 2010,31(11):61-64.
- [8] 罗 登,张志云,郑生斌,等. Q690 钢焊接接头微观组织对冷裂纹的影响研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):114-118.
- [9] 潘龙博,张 硕,江 济,等. 连铸中间包焊接残余应力数值模拟[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):147-150.
- [10] Thibault D, Cagnon M, Godin S. Bridging the gap between metallurgy and fatigue reliability of hydraulic turbine runners [C]//27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Montreal, Canada, 2014;012019.
- [11] LU Y, YE D, YONG O, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011,18(11):60-66.
- [12] 李 扬,王金凤. MAG 焊过程中热输入对 DL510 超高强钢焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):151-155.

引用本文: 王德军,王 彤. 基于不同焊材的超高强钢与 BS700 高强钢焊接接头裂纹的试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):176-181.