DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.017

高镍球铁同质电焊条的焊接工艺性能

徐锦锋,张文莉,翟秋亚,齐朋展
(西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘　要:铸铁焊接效果在很大程度上取决于铸铁焊接材料,本文设计制造了新型高镍球铁同质电焊条。研究高镍球铁电焊条在冷焊条件下的焊接工艺性能和接头组织与性能。综合评价结果表明,高镍球铁同质电焊条焊接工艺性能良好,焊缝金属具有典型的铸铁结构,微观组织由奥氏体和球状石墨及晶间碳化物组成,熔合区宽度较窄,未产生莱氏体组织,接头抗拉强度为 399 MPa,硬度在 189~226 HB,加工性能优良,色泽与母材一致。新型焊材兼具镍基焊材和铸铁同质焊材双重优点,在铸铁焊接及焊补领域具有良好的工程应用前景。

关键词:高镍球铁电焊条;焊接工艺性能;焊缝组织

中图分类号: TG143.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0569-04

Research of Homogeneous High Nickel Ductile Iron Welding Electrode

XU Jinfeng, ZHANG Wenli, ZHAI Qiuya, QI Pengzhan
(School of Materials Science and Engineering, Xi′an University of Technology, Xi′an 710048, China)

Abstract: The welding effect of cast iron depends largely on the welding material. In this paper, a new homogeneous high nickel ductile iron electrode is developed. The welding technology characteristics of the electrode and the microstructure and properties of welded joint under cold welding conditions were researched. The comprehensively evaluating experiments show that: the electrode has good technical performance. The weld metal has typical cast iron microstructure which composed of austenite, graphite spheroid and intergranular carbides. The width of fusion zone is narrow and No eutectic ledeburite microstructure forms. The tensile strength of the joint reaches 399 MPa and the Brinell hardness is between 189 HB and 226 HB. The welding zone has good machining performance as well as color consistent with the base metal. Thus, the new welding material has the double advantages of nickel-based welding material and homogenous cast iron welding material, it has the better application prospect on cast iron welding and repair.

Key words: high-ni ductile welding electrode; welding performance; weld microstructure

当前,我国铸造产业正处于由大转强的关键时期,对铸铁件的焊接修复提出了更高的要求,体现在以下两个方面:①重要铸件不允许焊补或焊补区不容许存在各种常见焊接缺陷如夹渣、气孔等;②焊缝金属为铸铁组织,以保障焊缝色泽和力学性能与基体相一致,同时具有良好的机械加工性能和抗裂性能[1]。很显然,生产中常用的镍基焊条如 Z308、Z408、Z508,由于焊缝成分、性能和色泽与铸铁材质不匹配,抗裂性差,无法满足高端铸铁件生产质量要求[2,3],本文针对现有铸铁焊材在焊缝金属和焊接工艺两方面存在的不足,依据镍元素在焊接冶金过程中既促进石墨化又扩大奥氏体相区的作用原理,研制出高镍球铁同质电焊条,使其兼具异质焊材的冷焊工艺优点和同质焊材的同质焊缝优点,实现铸铁件低成本高效率优质焊接。

1　试验条件及方法

1.1　试验材料

1.1.1　电焊条的研制

白口和裂纹是铸铁焊接的两大难题[3]。异质焊材如镍基焊材 Z308 电焊条的主要问题是焊缝金属为异质金属,与母材色差大,热烈倾向大;同质焊材如 Z248 电焊条的主要问题是铸铁焊缝对冷却速度敏感,白口倾向大,加工性不良;前者适于冷焊,后者依赖热焊。可以说,两类焊材在焊接冶金和焊接工艺两方面的表现恰好相反。如果设计一种铸铁合金焊材,使其在冷焊条件下能获得镍基焊缝金属的柔软性而又在熔池凝固过程中不因冷却速度的增大而产生白口组织,那么两类传统焊材所具有的优点就可能被同时发挥出来。在铸铁冶金中,镍是典型的石墨化元素,又是强的扩大奥氏体相区元素[4]。因此,在铸铁同质焊材中,加入足量的镍元素,就可以显著的

收稿日期:2020-06-03
基金项目:陕西省教育厅科研服务地方专项((17JF022)
作者简介:徐锦锋(1963-),陕西宝鸡人,教授.研究方向:凝固技术与焊接新材料研究.Email:jinfengxu@xaut.edu.cn

改变铸铁焊缝的冶金学特性和结晶模式，在快冷条件下获得综合性能优良的铸铁同质焊缝。

基于上述思路并结合高镍球铁铸造合金的凝固特性和成分特点，本工作设计的铸铁焊芯化学成分列入表 1。

表1 铸铁焊芯化学成分 w(%)
Tab.1 chemical composition of electrode core

元素	C	Ni	Si	Mn	P	S	Fe
含量(%)	3.6~3.9	30~40	3.6~5.0	0.1~0.5	≤0.07	≤0.06	其余

高镍球铁焊芯采用真空吸铸专利技术铸造成形。采用桐油砂制芯并装配于专用真空箱中。用 50 kg 中频感应炉熔炼铁液，将铁液过热到 1 500~1 520 ℃时进行炉前球化和孕育处理，随之浇入铸型，待冷却凝固后，落砂清理备用。焊芯规格为 ϕ5 mm×400 mm。

在理论分析和反复尝试的基础上，配制 Cao-CaF_2-SiO_2 碱性石墨化型药皮，用 JHY-25 型液压涂粉机在焊芯表面压涂药皮，将压涂好的焊条放入 ZYH-60 型号自控远外焊条烘干炉中烘干备用。

1.1.2 焊接试板

试验用焊件的材质为 QT450-10，试件尺寸为 500 mm×300 mm×30 mm 的板材。在试件上加工出 V 形坡口作为人工缺陷，如图 1。

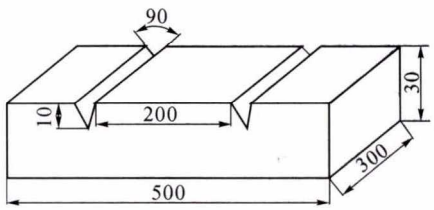


图 1 焊接试件的坡口意图
Fig.1 Schematic diagram of weld specimen

1.2 焊接设备及工艺

采用手工电弧焊实施冷焊作业。按经验公式，焊接电流选取 3 个水平：180、200、220 A。

1.3 接头微观组织和力学性能表征

按标准金相技术制备金相试样。选用 4%硝酸酒精溶液对试样进行浸蚀，焊缝浸蚀时间 40 s，熔合区浸蚀时间为 1 s。用 JSM-6700F 型金相显微镜分析接头的组织形态。用 HB-3000 型布氏硬度计测量接头硬度，制取 ϕ14 mm 的单肩拉伸试棒，在 HT-2402-100 kN 万能试验机上测试接头抗拉强度。

2 高镍球铁同质焊条的焊接工艺性能

参照机械行业标准《电焊条焊接工艺性能评定方法》对电弧稳定性、焊缝成形性、飞溅、脱渣性以及药皮发红性进行测定和分析。

2.1 电弧稳定性

通常用断弧长度和再引弧长度来表示电弧稳定性。实验测定的断弧长度和再引弧长度随焊接电流的变化如图 2 所示。从图 2 可以看出，焊条断弧长度在 45~55 mm 范围，再引弧时间在 9~15 s，因此电弧稳定性良好。由于焊条药皮中存在大量的低电离电位物质大理石及碳酸钡，以及导电性良好的石墨，所以电弧稳定性良好。同时随着焊接电流的增大，断弧长度增长，再引弧间隔时间增长。原因是在于，电弧温度随着焊接电流的增大而升高，从而增加了电极热电子的发射能力，电弧稳定性提高[5]。大电流焊接电弧的温度要比小电流焊接的温度高，因而电弧中的热电离要比小电流焊接时强烈，能产生更多的带电粒子。

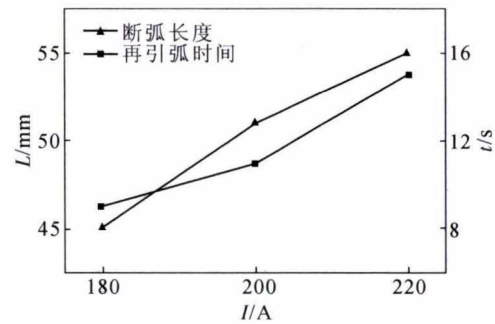


图 2 焊条断弧长度和再引弧时间测试结果
Fig.2 Testing result of arc restarted interval of electrode

2.2 飞溅性

采用观察法进行飞溅性评定，发现，随着焊接电流的增大，飞溅程度逐渐增大。当焊接电流为 220 A 时，飞溅程度较大，焊条的工艺性能有少许降低。这主要与药皮中含有较多石墨，其在焊接过程中被氧化，析出大量的 CO_2 和 CO 气体所致[6]。

2.3 脱渣性

药皮脱渣性测试结果如下表 2，可以看出在 100 m 焊道长度中，未脱渣总长为 10.4 mm，脱渣率高达 89.6%。脱渣性良好。

表 2 焊条脱渣性测试结果
Tab.2 Testing result of slag detachability of electrode

焊道总长 /mm	未脱渣 /mm	严重粘渣 /mm	轻微粘渣 /mm	未脱渣总长 /mm	脱渣率 (%)
100	0	8.0	12.0	10.4	89.6

2.4 其他焊接工艺性能

图 3 为焊道整体形貌。可以看出，焊缝外形整齐，几何尺寸均匀一致，向母材过渡平缓，表面光洁，没有大的“麻点”或疵坑，焊缝成形性良好。主要原因为药皮中含有较多的熔点较低的萤石，能够降低熔渣的熔点并提高熔渣的流动性，同时 CaF_2 和 CaO 的复合加入还能够改善熔渣的粘度及表面张力，从

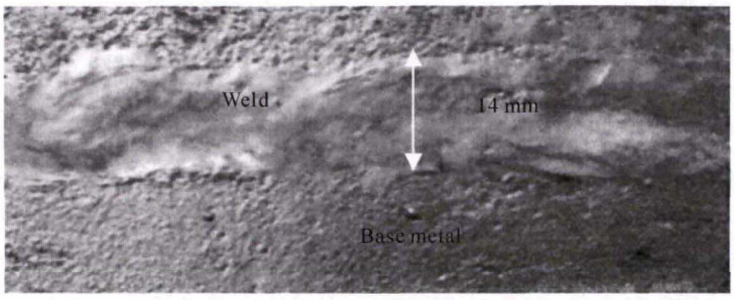


图 3 焊缝形貌
Fig.3 Weld appearance

而保证了良好的焊缝成形性。

通过直接观察可以看出，高镍球铁焊接接头区域未出现焊接裂纹。因此，高镍铸铁电焊条具有良好的抗裂性。

由于药皮中导电的铁合金和石墨含量较高，焊条在 3 种焊接电流下施焊时均未发生发红现象。

3 高镍球铁同质焊缝的微观组织与力学性能

3.1 接头微观组织特征

3.1.1 焊缝的相组成

焊接电流 I=220 A 时，焊缝金属的 XRD 图谱如图 4。可知焊缝组织由奥氏体和石墨相组成。

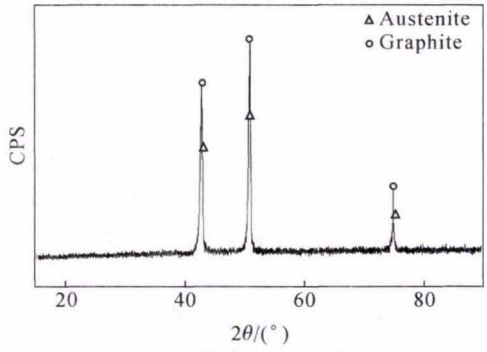
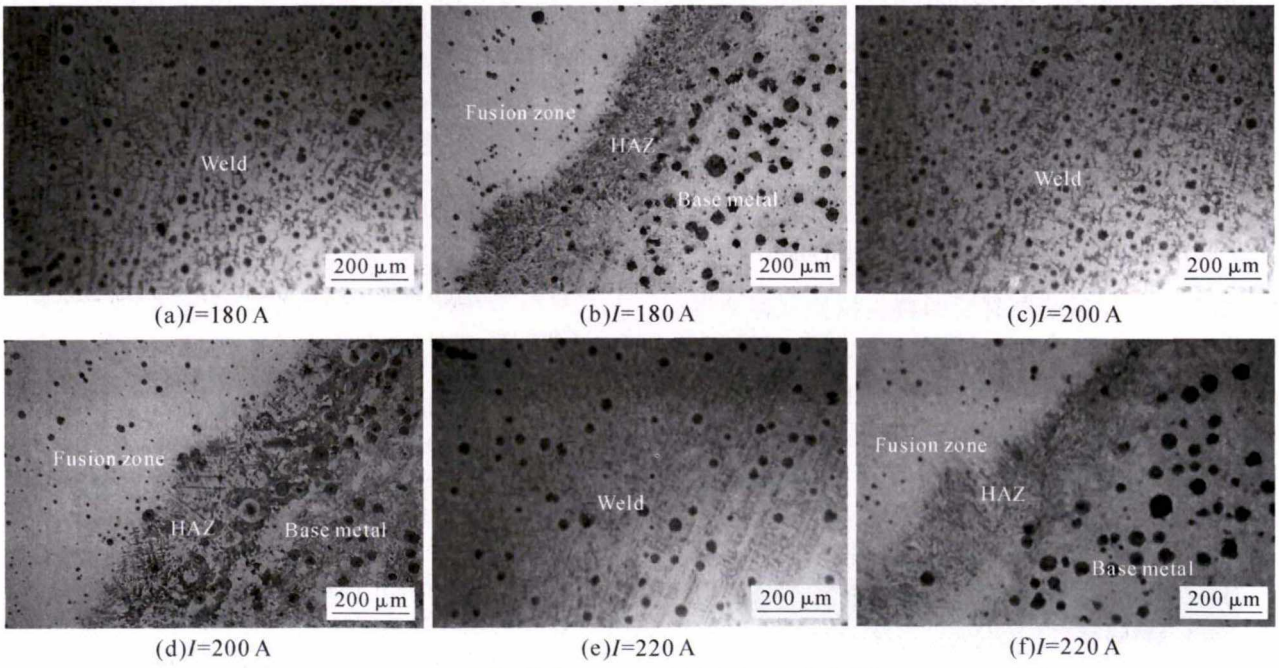


图 4 焊接接头 XRD 图谱
Fig.4 XRD spectrum of welding joint

3.1.2 焊缝区微观组织形貌

图 5 为冷焊条件下焊接电流 I 分别为 180、200、220 A 时所获得的接头微观组织。可以看出，焊缝组织由(Fe、Ni)奥氏体枝晶加球状石墨及晶间碳化物组成。作为铸造合金，与焊缝成分相近的高镍球铁铸件中允许的晶间碳化物数量可达 20%，而不影响合金的力学性能和加工性能，亦即，焊缝中一定数量的晶间碳化物的存在是高镍球铁焊缝组织的基本特征。但是，由于其体积分数较小或因质量权重系数小，在 XRD 图谱中未能显露出来。熔合区宽度较窄，约 200 mm。熔合区组织主要由(Fe、Ni)奥氏体和少量细小的石墨球组成。在焊缝和熔合区中，均未发现有莱氏体组织的形成。这说明，在焊芯中加入足够高的镍含量和较高的硅含量，可使熔敷金属的石墨化能力显著增强，从而抑制了熔合区中莱氏体的产



(a)I=180 A　(b)I=180 A　(c)I=200 A
(d)I=200 A　(e)I=220 A　(f)I=220 A

图 5 不同焊接电流对应的接头微观组织形貌
Fig.5 Microstructure morphology of ductile iron joint in different current

生。与熔合区相毗邻的热影响区宽度较小，在80~200 μm。由于热影响区中铁素体基体在快速奥氏体化过程中溶入了较多的来自熔合区的碳元素和提高淬透性的镍元素，加之冷却速度较快，因而容易形成含有珠光体和下贝氏体及高碳马氏体的中低温转变组织。随着焊接电流的增大，焊接线能量增大，接头冷却速度减小，焊缝组织明显粗化，碳化物数量有所增大，球化率略有改善，热影响区中下贝氏体及高碳马氏体数量趋于增多。当 I=220 A 时，焊缝石墨球化率达到 89.1%，石墨球分布均匀，石墨圆整度好，球径大小一致，焊缝组织由奥氏体枝晶+球状石墨+晶间碳化物组成。

3.2 接头的性能特点

图 6 为 I=220 A 时接头各区硬度与微观组织之间的对应关系。可以看出，接头硬度在 189~226 HB 范围，焊缝和熔合区硬度与本体硬度基本一致，而热影响区硬度最高。与之对应的微观组织分别是，焊缝和熔合区的基体组织为奥氏体，而母材基体以铁素体为主，因而其硬度比较接近，唯独热影响区在快冷过程中形成了少量下贝氏体和马氏体组织，因而硬度明显增大。然而，尽管热影响区中存在下贝氏体等硬质相，但是由于热影响区宽度很窄，其两侧毗邻的都是软基体，硬度测试点覆盖了热影响区及毗邻区域，因此该区硬度值并不显高，低于 230 HB。

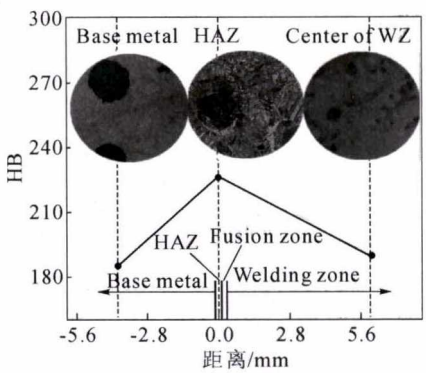


图 6 焊接接头硬度分布
Fig.6 Hardness distribution of welded joint

图 7 为抗拉试验断裂后的接头拉伸试棒分体。试棒从焊缝处断裂，平均抗拉强度为 399 MPa，与母材抗拉强度十分接近，接头加工性能良好。另外，焊缝加工表面颜色与母材一致，目视很难辨析焊缝与母材之间的结合界面。

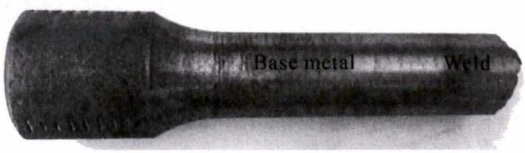


图 7 拉伸试棒断裂位置
Fig.7 Tensile test bar broken position

3.3 高镍球铁焊材与传统焊材的异同

生产中常用的镍基焊材所形成的焊缝金属，其化学成分、微观结构和色泽与铸铁材质不匹配，抗热裂性能较差，无法满足有性能要求的铸铁件的生焊接修复要求。而高镍球铁电焊条的焊芯金属被设计为铸铁合金，其中添加了 30%~40%的镍元素，致使焊缝金属在凝固过程中石墨化能力显著增强，碳元素以石墨方式析出，不产生自由渗碳体和莱氏体组织。在固态冷却过程中，高的镍含量使奥氏体相区扩大至室温，亦即奥氏体在连续冷却过程中不发生固态相变，几乎不产生新的晶间碳化物和硬质相。在冷焊条件下，所形成的焊缝金属具有典型的铸铁结构，微观组织由单相奥氏体基体加球状石墨及少量晶间碳化物组成。这就决定了焊缝金属与母材具有良好的成分、组织和性能及色泽一致性。同时，焊缝金属在凝固过程中所产生的石墨化膨胀有利于减小焊接应力，降低接头的热裂倾向。因此，高镍球铁同质焊材兼有镍基冷焊焊条和铸铁同质焊条的双重基因和工艺特性，能在冷焊条件下获得与母材高度匹配的抗裂性和加工性优良的铸铁同质焊缝。

正是由于在冷焊条件下，高镍球铁电焊条形成的焊缝和熔合区不形成莱氏体组织，从而避免了现有铸铁同质焊材只有在热焊、半热焊条件下才能获得综合性能和加工性优良铸铁同质焊缝的弊端，生产工艺简化，节能环保，降低了生产成本。

4 结论

高镍球铁同质电焊条焊接工艺性优良，抗裂性好，所形成的同质焊缝和熔合区具有典型的铸铁结构，微观组织由奥氏体和少量晶间碳化物及石墨球组成，接头抗拉强度高达 399 MPa，硬度在 189~226 HB，加工性能优良，色泽与铸件本体一致。

参考文献：

[1] 徐锦锋，翟秋亚. 铸铁件熔焊修复与微合金化铸铁同质焊材 // 绿色铸造与持续发展 -2015 重庆市铸造年会论文集 [C]. 重庆：2015, 8.

[2] 徐锦锋，任永明，翟秋亚. 焊条电弧焊焊补铸铁件焊区硬度控制 [J]. 焊接学报, 2012, 33(11): 105-109, 118.

[3] Pascual M, Cembrero J, Salas F, et al. Analysis of the weldability of ductile iron[J]. Materials Letters, 2008, 62(8-9): 1359-1362.

[4] 周振丰. 铸铁焊接冶金与工艺[M]. 北京：冶金工业出版社, 2001.

[5] Luksa K. Influence of weld imperfection on short circuit GMA welding arc stability[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1-3): 285-290.

[6] 翟秋亚，翟波，唐桢，等. 微合金化铸铁同质焊条焊接工艺[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 53-56.