[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.04.005

脉冲微束等离子弧焊参数对丝网焊点 组织与性能的影响

王 龙,何建萍,吴 鑫,陶旭阳

(上海工程技术大学 材料工程学院,上海 201620)

摘 要:为了获得具有良好性能的不锈钢丝网焊点,课题组采用脉冲微束等离子弧焊(P-MPAW)的方法,对丝径为0.35 mm, 孔隙为1.25 mm的方孔状丝网进行脉冲电流对接焊。利用超景深显微镜、显微硬度计和微拉伸机研究不同脉冲频 率、占空比和基值电流对丝网焊点显微组织和力学性能的影响,以获得最佳的工艺参数组合。结果表明:在脉冲频率为 100 Hz、占空比为50%、基值电流为1.2 A 时,焊点处形成的晶粒最为细致且具有802 MPa 的最高抗拉强度;当基值电流 和占空比不变时,焊点晶粒随脉冲频率的增大而逐渐细化;当频率超过100 Hz 时,焊点由细小等轴晶向粗大骨骼状晶转 变。当脉冲频率和基值电流不变时,焊点晶粒随占空比的增大先细化后粗大,焊点力学性能先升高后下降;当脉冲频率 和占空比不变时,焊点晶粒随基值电流的增大逐渐粗化,力学性能逐渐下降。

关 键 词:不锈钢丝网;脉冲微束等离子弧焊;脉冲频率;占空比;脉冲电流

中图分类号:TG456.2;TH142.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)04-0028-06

Effect of Pulsed Micro-Plasma Arc Welding Parameters on Microstructure and Properties for Wire Mesh Welding Spots

WANG Long, HE Jianping, WU Xin, TAO Xuyang

(School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to obtain good performance stainless steel wire mesh welding spots, pulsed micro-plasma arc welding (P-MPAW) was applied to butt welding for square hole shape wire mesh with wire diameter 0.35 mm and hole gap 1. 25 mm. Ultra depth of field microscope, microhardness tester and micro tensile machine was used to study the effects of different pulsed frequency, duty ratio and base value current on the microstructure and mechanical properties of wire mesh welding spots to obtain the best combination of welding process parameters. The result shows that the welding spots had superior microstructure and highest tensile strength of 802 MPa; The welding spots grains were gradually refined as the pulsed frequency increase when the base value current and duty ratio are constant but transformed from fine equiaxed crystals to coarse skeletal crystals when the pulsed frequency over 100 Hz; When the pulsed frequency and base value current are constant, the welding spots grains are refined first and coarsened after as the duty ratio increases, and mechanical properties of welding spots grains coarsened with the increase of base value current and gradually decreased with the mechanical properties.

Keywords: stainless steel wire mesh; P-MPAW (pulsed microplasma arc welding); pulsed frequency; duty ratio; pulsed current

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2019-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775327);上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700)。

第一作者简介:王龙(1990),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要研究方向为丝网微束等离子弧焊工艺。通信作者:何建萍(1964),女,上海人,博士,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为超薄细微束弧焊电弧熔池系统物理过程的动态数值模拟和成形质量控制。E-mail:janejphe@163.com

不锈钢丝网是一种被广泛应用于航空航天、纺织印刷、化工化纤、矿山机械、食品及医疗等领域内的材料。因其具有优良的通透性、耐高温和耐腐蚀性,在工业生产中常被用作酸、碱环境下介质的筛分与过滤^[1]。

丝网特殊的网状结构使其焊接工艺具有异于普通 超薄板焊接的特定难点。其焊接接头中常出现未熔 合、夹杂等焊接缺陷^[2]。被焊丝线在焊接方向上分布 不连续,金属丝熔化后形成的熔池金属难以充满相邻 丝线之间的间隙,接头处形成的是不连续的焊点^[34]。 微束等离子弧焊具有电弧拘束度高、能量高度集中、小 电流电弧稳定、焊接效率高和成品率高等优点,在超细 丝网焊接中具有较大的优势^[57]。

课题组主要研究不同的脉冲频率、占空比和基值 电流在其他2个参数不变的条件下另一参数对超细不 锈钢丝网脉冲微束等离子弧焊"长毛边-长毛边"对接 焊的焊点显微组织和力学性能的影响及变化规律,制 定合理的超细丝网焊接工艺参数,获得了良好的焊点 成形质量。该项研究对今后超细丝网的焊接具有极其 重要的工程应用价值和实际意义。

1 试验方法

焊接工艺试验采用法国 SAF 的 Plasmafix51 焊接 电源进行超细丝网的脉冲微束等离子弧焊焊接。焊接 材料选用丝径为0.35 mm,孔隙为1.25 mm 的 304 不 锈钢超细方孔状丝网,其主要化学成分如表1 所示,母 材显微组织如图1 所示。焊前将试样裁剪成 50 mm × 30 mm,毛边留丝距离为1 mm,并用丙酮清理表面油 污,确保焊接接头处的留丝毛边的边缘平直、无毛刺。 装配时确保丝网两侧毛边留丝方向一致并紧贴,毛边 插入距离 a 为 0.8 mm,焊接接头的装配方式如图 2 所示。焊接过程中,控制离子气和保护气流量分别为 0.5 和 3.5 L/min,焊枪高度为 2 mm。焊接参数如表 2 所示。

表1 304 超细丝网化学成分

Table 1 Main chemical composition of 304

ultra-fine wire mesh							
С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0.042	0.535	1.503	18.016	9.084	0.389	0.071	余量
	the second					стана 5. 00 µm	



Figure 1 Microstructure of 304 ultra-fine wire mesh



图 2 焊接接头裁剪与装配示意图 Figure 2 Schematic diagram of cutting and assembly of mesh joint

表2 超组	1丝网焊接工艺参数
-------	-----------

占空	电测	秔/A	脉冲频	占空	电》	充/A	脉冲频	占空	电》	充/A	脉冲频
比/%	基值	峰值	- 率/Hz	比/%	基值	峰值	- 率/Hz	比/%	基值	峰值	- 率/Hz
			10				10				10
			25				25				25
30	0.80	4.46	50	50	0.80	3.00	50	70	0.80	2.37	50
			100				100				100
			200				200				200
			10				10				10
			25				25				25
30	1.20	3.53	50	50	1.20	2.60	50	70	1.20	2.20	50
			100				100				100
			200				200				200
			10				10				10
			25				25				25
30	1.60	2.60	50	50	1.60	2.20	50	70	1.60	2.02	50
			100				100				100
			200				200				200

Table 2 Welding parameters of ultra-fine wire mesh

在脉冲频率、占空比和基值电流3个参数中2个 不变情况下,分别改变其中1个参数对丝网试样进行 对接焊。焊接参数选择如表2所示。焊后抽取单根丝 作为样品,经过修剪、冷镶嵌和打磨抛光后使用试剂 (10% HF 酸+20% 硝酸+70%水)侵蚀(侵蚀时间1.5 min),并在基恩士 VHX-600K 超景深显微镜下观察焊 点的显微组织。使用 DHV-1000 型数字式维氏(HV) 显微硬度计对焊点进行显微硬度测量。施加载荷 1.96 N,作用时间15 s。

2 试验结果与分析

2.1 脉冲频率对焊点显微组织的影响

不同于薄板焊接,在基值电流和占空比不变的条件下,脉冲微束等离子弧焊焊接超细丝网随着脉冲频率的逐渐增加会出现"多脉一丝"的情况。在这种情况下,每个连续焊缝上的不连续焊点都经过多个脉冲周期电流的冲击与快速加热快速冷却的过程,从而使其显微组织出现不同的变化。其焊接形式如图3所示。脉冲频率

$$f > v/b_{\circ} \tag{1}$$

式中:f为脉冲频率,v为焊接速度,b为丝网相邻两丝 线之间的间距。





在基值电流为1.2 A 和占空比为50%不变时,不同脉冲频率下的焊点微观组织形貌如图4所示。当焊接电流为直流时,焊点晶粒尺寸较大;加入脉冲电流后,当脉冲频率为较低的25 Hz时,焊点开始由较粗大的晶粒向细小的晶粒转变。当脉冲频率逐渐增大到100 Hz,焊点组织以细小等轴晶为主,并伴有大量蠕虫状δ-Fe 析出,且与等轴晶交替均匀分布。当脉冲频率继续增大到200 Hz 时,焊点中等轴晶陆续减少,骨骼状晶数量明显增多。



Figure 4 Microstructure of welding spot at different pulse rate

由电磁场理论可知,当脉冲频率逐渐增加时,焊接 熔池内部会产生高频脉动电磁场,熔池内部液态金属 粒子在高频脉动电磁力反复冲击下呈现复杂的循环和 涡旋运动^[89]。一方面高频脉动电磁力会引起熔池振 荡,可有效破碎焊点中的粗大晶粒组织,在抑制晶粒长 大的同时使破碎的晶粒成为新晶粒的形核中心;另一 方面在涡旋运动作用下,未熔的粒子被带入焊点中心, 成为高效的异质形核质点,进而增加焊点中心的非均 匀形核数量^[10]。从金属结晶热力学角度分析可知,熔 池内的液态金属的规律性流动使液态金属温度呈均勾 分布,这使得熔池金属的固液相界面前沿的液相温度 梯度降低,进而增大成分过冷范围,促进焊点中心细小 等轴晶的形成,最终明显细化焊点的晶粒组织^[11-12]。

脉冲频率为 200 和 500 Hz 时的实际脉冲波形如 图 5 所示。







当脉冲频率继续增大时,脉冲信号的上升沿和下 降沿逐渐增大。在上升过程中,脉冲电流尚未达到峰 值就已经开始下降,而在下降过程中,其尚未达到基值 又开始回升,脉冲电磁力对焊接熔池的冲击作用被削弱,在焊接超细丝网时,这种削弱作用尤其明显。由于脉冲电磁力的下降,且在同一焊点处反复作用高频脉冲电流,使得焊点在短时间内经过迅速反复的温度变化,其剧烈的温度变化已经超过脉冲电流对其产生的冲击破碎晶粒作用,导致焊点晶粒粗化,骨骼状晶数量明显增加。

2.2 脉冲频率对焊点力学性能的影响

在基值电流为1.2 A 和占空比为50%不变时,不同脉冲频率下的焊点力学性能如图6和表3所示。随着脉冲频率的增加,焊点的显微硬度与抗拉强度均逐渐提高,在100 Hz 时达到最大。因为脉冲频率的增大使得熔池的振荡作用增加,细化了焊点处的晶粒组织, 且弥散分布的蠕虫状δ-Fe 数量增多,进而提高了焊点的力学性能。当脉冲频率为200 Hz 时,焊点显微硬度与抗拉强度有所下降,这是因为焊点剧烈的温度变化已超过脉冲电流对晶粒的细化作用,引起焊点组织晶粒粗化,骨骼状晶数量增加。



图 6 不同脉冲频率下的焊点显微硬度 Figure 6 Microhardness of spots under different pulse frequency

表	3	不同	焊接	参数-	下的烂	旱点	力学	性能
---	---	----	----	-----	-----	----	----	----

Table 3	Mechanical properties of spots under
	different welding parameters

	焊接参数		抗拉强	断面收	断裂 位置	
频率/Hz	占空比/%	基值电流/A	度/Mpa	缩率/%		
0			713	89.5	熔合区	
25			771	91.7	熔合区	
100			802	95.3	热影响区	
200			783	92.7	热影响区	
	30		758	85.5	熔合区	
	70		768	84.0	熔合区	
		0.8	786	87.5	熔合区	
		1.6	770	70.9	熔合区	

2.3 占空比对焊点显微组织的影响

在脉冲频率100 Hz 和基值电流1.2 A 不变时,不同占空比下的焊点微观组织形貌如图 7 所示。当占空比为30%时,焊点组织为粗大的骨骼状晶与细小的等轴晶交替分布。随着占空比的增大峰值电流作用时间增加,但数值减小,在占空比达到50%时,峰值电流作用时间增加的因素与峰值电流数值减小的因素对接头处的热输入变化影响相当,因此此时得到的是如图4(c)所示细小的等轴晶与蠕虫状δ-Fe弥散分布。当占空比增加到70%时,焊点处粗大的骨骼状晶数量明显增加。这是因为峰值电流作用时间的增加大于峰值电流数值的减小,进而引起焊点熔透能力显著增强,焊点组织有粗化的趋势。



图 7 不同占空比下焊点显微组织形貌 Figure 7 Microstructure of welding spot under different duty ratio

2.4 占空比对焊点显微硬度的影响

在脉冲频率和基值电流不变时,不同占空比下的 焊点显微硬度和抗拉强度如图 8 和表 3 所示。从图中 可以看出,随着占空比的增大,焊点处的显微硬度先增 大后减小。在占空比为 50% 时硬度最大为 HV252.4。 这是因为在占空比为 30% 时,峰值电流远高于平均电 流,在脉冲频率不变时,峰值电流的大小在焊接过程中 起主导作用,这增大了焊点处的热积累,不利于晶粒组 织的细化,因此焊点处显微硬度与抗拉强度较低。随 着占空比的增大,峰值电流值减小,在 50% 占空比时 峰值电流值与作用时间达到平衡,此时的焊点显微组 织细小均匀,焊点显微硬度与抗拉强度明显增大。在 占空比为 70% 时,此时峰值电流值已减小至接近平均 电流,而作用时间的增大不会明显增大焊点处的热输 入,因此其显微硬度和抗拉强度与占空比为 50% 时相 比略小并没有明显变化。

2.5 基值电流对焊点显微组织的影响

在脉冲频率为100 Hz 和占空比为50%不变时,不同基值电流作用下的焊点微观组织形貌如图9所示。





在基值电流为0.8 A 时,焊点由部分等轴晶粒与骨骼 状晶粒交替穿插分布。这是因为在超细丝网焊接过程 中,随着电弧能量的周期性变化,基值电流较小时,其 主要对焊点起到熔池冷却,减小焊点热积累的作用,此 时峰值电流占主导作用;而峰值电流值明显高于平均 电流,焊点处的热输入较高,不利于晶粒的细化。在基 值电流为1.6 A 时,焊点处骨骼状晶的数量明显增多, 这是因为随着基值电流的增大,对焊点产生一定的预 热作用,这使得焊点冷却凝固的温度梯度降低,热量不 易散去,更利于焊点的晶粒成长。





2.6 基值电流对焊点显微硬度的影响

图 10 所示为脉冲频率和占空比不变时不同基值 电流对焊点显微硬度的影响。在基值电流为 0.8 和 1.6 A 时,焊点处力学性能均低于基值电流为 1.2 A 时的力学性能。这是因为在基值电流较小时焊点处的 热输入主要来自峰值电流,热输入的增大使得焊点晶 粒尺寸增大降低了焊点的力学性能;同时在基值电流 为 1.6 A 时,基值电流值已比较接近平均电流,其对焊 点的预热作用降低了成分过冷范围,因此更利于焊点 晶粒的成长,进而引起焊点处的力学性能的下降。



图 10 不同基值电流下的焊点显微硬度 Figure 10 Microhardness of spots under different base value current

3 结论

1) 留丝毛边为上翘和下弯的焊点其显微组织基本相同,在脉冲频率为100 Hz、占空比为50%、基值电流为1.2 A时,焊点处形成的晶粒最为细致且具有良好的力学性能。

2)当占空比和基值电流不变时,脉冲频率由0Hz 增大到100Hz时,焊点晶粒逐渐细化,力学性能逐渐 提高;当脉冲频率超过100Hz后,焊点晶粒粗化,力学 性能显著下降。

3)当脉冲频率和基值电流不变时,占空比由 30%增大到50%时,焊点晶粒逐渐细化,为等轴晶与 蠕虫状δ-Fe弥散分布,且焊点力学性能有所提高;当 占空比由50%增大到70%时,焊点粗大的骨骼状晶增加,焊点力学性能随之下降。

4)当脉冲频率和占空比不变时,随着基值电流的 增大,焊点晶粒逐渐粗大,骨骼状晶数量增加,焊点力 学性能有所下降。

参考文献:

- [1] ZHAO Z H, PELES Y, JENSEN M K. Properties of plain weave metallic wire mesh screens [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2):690-697.
- [2] 王晓军,刘天佐,何成旦. 钛合金板与不锈钢丝网异质接头焊接[J].焊接学报,2006,27(8):95-98.
- [3] LEE M G, KANG K J. Mechanical properties of three variations of a wire-woven metal subjected to shear [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(25/26);4504-4518.
- [4] KRAWCZYK R, SLANIA J. Reduction of deformations during welding metal wire mesh with frames [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2):529-534.
- [5] PRASAD K S, RAO C S, RAO D N. Study on weld quality characteristics of micro plasma arc welded austenitic stainless steels [J]. Procedia Engineering, 2014, 97:752-757.

(下转第42页)