

超声电弧激励电流对 MGH956 合金 TIG 焊缝气孔和拉伸性能的影响

雷玉成^{1,2}, 黄巍¹, 夏晓萍³, 赵凯¹, 肖波^{1*}

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013;

2. 江苏大学 江苏省高端结构材料重点实验室, 镇江 212013; 3. 天津新港船舶重工有限公司, 天津 300456)

摘 要: 通过高频调制 TIG 焊电弧激发超声电弧, 对 MGH956 合金进行 TIG 焊接, 对比了在不同激励电流作用下焊缝的气孔数量和性能的变化, 分析了超声电弧的作用机制。结果表明, 与未施加超声电弧相比, 在激励电流为 5 A 或 10 A 时, 焊缝气孔明显长大, 但数量并没有减少, 在激励电流提高到 20 A 或 30 A 后, 气孔数量急剧减少; 超声电弧的引入, 使焊接接头的抗拉强度得到提高, 且在激励电流为 20 A 时, 焊缝的抗拉强度达到最大为 550 MPa, 达到母材的 76%, 同时接头由完全的脆性断裂变成脆性-韧性混合断裂形式。

关键词: MGH956 合金; 超声电弧; TIG 焊接; 气孔

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)04-0023-04



雷玉成

0 序 言

MGH956 合金是采用机械合金化方法制造的氧化物弥散强化 (oxide dispersion strengthened, ODS) 高温合金, 具有高温力学性能、高温抗氧化和抗腐蚀性能好的综合优势, 在航空、航天和核能领域得到广泛的应用^[1]。MGH956 合金采用粉末冶金方法制取, 材料受到烧结和压制条件的限制, 不可能达到熔炼材料一样的致密性, 材料中气体含量较高。在熔焊过程中, 除了弥散相的数量、尺寸、分布都会发生变化外, 焊缝中还会产生大量气孔, 降低焊缝质量和接头性能, 因此解决 MGH956 合金熔焊焊缝中的气孔问题是提高焊缝质量的关键之一。

功率超声在金属凝固过程中有良好的除气效果^[2-4], 但传统功率超声在焊接中的机械耦合方式存在许多缺陷, 在焊接过程中难以实现^[5]。超声电弧技术的发展解决了这一难题, 它将高频激励电流与焊接电流进行耦合, 对焊接电弧实施高频调制, 使其激发出超声波并直接作用于熔池。

目前国内对 MGH956 合金熔焊气孔问题的研

究仅在影响因素方面进行了简单的分析^[6], 没有提出具体的解决方案。文中采用超声电弧 TIG 焊对 MGH956 合金进行平板对焊, 重点研究了激励电流对焊缝中气孔和接头力学性能的影响规律, 为 ODS 合金的熔化焊接提出了新的研究思路。

1 试验方法

1.1 超声电弧试验系统

文中所用超声电弧试验系统由超声频激励电源和 TIG 焊接电源组成。超声电源的激励电流和激励频率均可调, 激励电流调节范围为 0~30 A, 激励频率调节范围为 28~80 kHz。超声频激励电源和 TIG 电源通过自行研制的隔离耦合装置连接, 试验系统如图 1 所示。

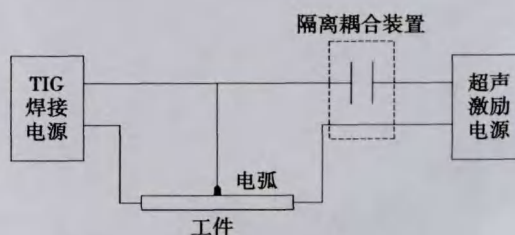


图 1 超声电弧焊接试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TIG arc-ultrasonic test system

收稿日期: 2012-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075191); 江苏省博士创新计划资助项目 (CX12_0638); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

* 参加此项研究工作的还有 承龙, 李猛刚, 朱强

1.2 试验材料及过程

试验所使用的 MGH956 合金化学成分如表 1 所示. 采用线切割方法将 MGH956 合金加工成 70 mm × 35 mm × 1.3 mm 的板材, 焊接前将试件用 150 号的 SiC 砂纸打磨去氧化皮, 并用丙酮洗净. 试验中使用的焊机型号为 MW3000 逆变全数字化钨极氩弧焊机. 钨极直径为 2.4 mm, 保护气为纯度约为 99.9% 的氩气, 气体流量为 8 L/min, 焊接电流 72 A, 电弧电压 12 V, 焊接速度为 120 mm/min. 焊接时待电弧稳定后再打开超声频激励源, 选取超声激励频率为 30 kHz, 激励电流分别为 0, 5, 10, 20 和 30 A.

表 1 MGH956 合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of MGH956 alloy

Cr	Al	Ti	Y	O	N	C	Fe
19.64	5.06	0.52	0.40	0.22	0.020	0.007	余量

焊后用光学显微镜和扫描电镜(SEM)对焊缝气孔分布与特点进行观察, 并用能谱分析(EDS)对颗粒成分进行鉴定. 拉伸试验在 Instron 电子万能试验机上进行, 拉伸速度为 1 mm/min.

2 试验结果及分析

2.1 未施加超声电弧焊缝中气孔分布与特点

2.1.1 焊缝气孔分布

图 2 为未施加超声电弧 MGH956 合金的焊缝气孔分布图, 由图 2 可知: 焊缝与母材间的界限非常明显, 焊缝布满大量气孔, 气孔尺寸大多为几微米到几十微米, 最大可达 200 ~ 300 μm, 并且越接近焊缝表面气孔尺寸越大. 焊缝中气孔分布并不均匀, 上部气孔较多, 下部气孔较少, 主要是由于焊缝底部小气孔聚集、长大, 并上浮所引起的.

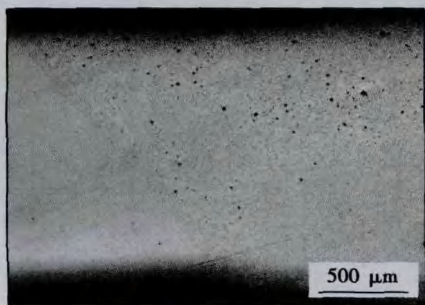


图 2 未施加超声电弧焊缝气孔分布

Fig. 2 Porosity distribution of welds without arc-ultrasonic

2.1.2 焊缝气孔特点

如图 2 所示, 焊缝中的气孔大部分呈球形, 也有一部分呈椭圆形. 图 3 为焊缝的 SEM 图, 在焊缝中存在许多在光学显微镜无法观察的微小气孔, 仔细观察气孔, 其内壁粗糙, 并聚集着一些颗粒物质, 用 EDS 对孔洞内颗粒成分分析得知, 除了基体成分 Fe 和 Cr 元素外, 还有 Al, Ti, Y, O 元素存在(图 4), 可以推断, 这些物质为母材中纳米增强颗粒 Y_2O_3 的团聚物. 文献[7, 8]指出焊缝中气孔的形成与这些团聚物有着密切的关系. 熔化焊时, 这些纳米级的氧化物颗粒容易团聚, 团聚过程中吸附在上面的小气孔也聚集, 冷却时来不及逸出, 并残留在焊缝中形成气孔[6].



图 3 未施加超声电弧焊缝 SEM 图

Fig. 3 SEM images of welds without arc-ultrasonic

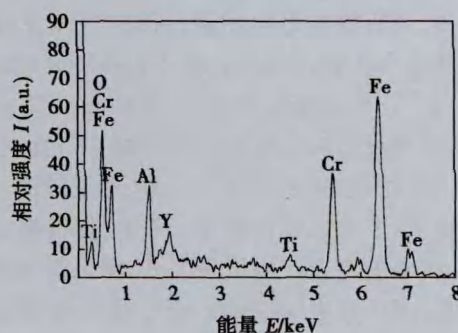


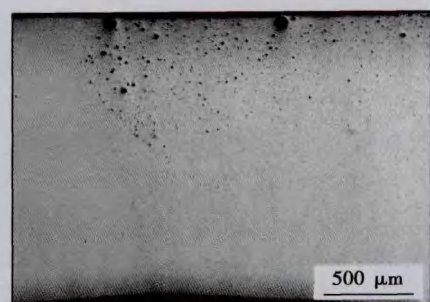
图 4 气孔内颗粒 EDS 分析结果

Fig. 4 EDS of particles within holes

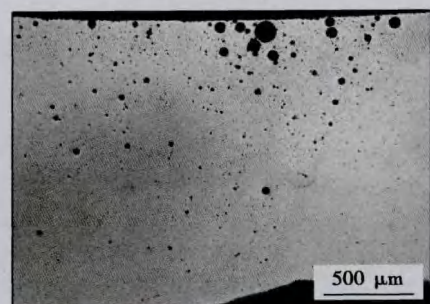
2.2 超声电弧对焊缝中气孔的影响

图 5 为施加不同激励电流的焊缝气孔分布图. 由图 5 可见, 在激励电流为 5 A 和 10 A 时, 焊缝中的气孔尺寸明显变大, 但气孔数量并没有减少. 当激励电流提高到 20 A 和 30 A 时, 气孔数量急剧减少, 只在焊缝近表面存在少量气孔.

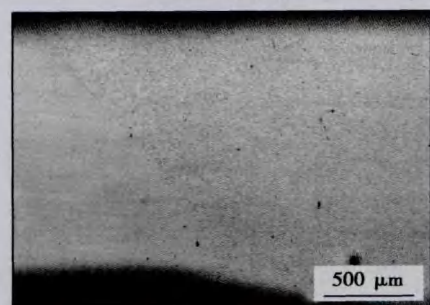
超声电弧的引入对焊缝气孔产生显著影响, 尤其是激励电流增加到 20 A 和 30 A 后, 达到了明显除气效果. 超声除气从原理上一般分为 3 个阶



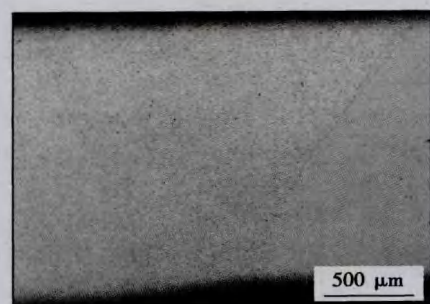
(a) 激励电流 5 A



(b) 激励电流 10 A



(c) 激励电流 20 A



(d) 激励电流 30 A

图5 施加不同激励电流的超声电弧后焊缝的气孔分布图

Fig. 5 Porosity distribution of welds under different excitation current

段^[4]: (1) 在空化核基础上空化气泡的形成过程和空化气泡的长大过程; (2) 多个空化气泡汇聚成大气泡的过程; (3) 大气泡漂浮至熔体表面逸出的过程。

超声电弧对焊缝气孔的减少与空化气泡存在“表面效应”和“壳层效应”有着密切的关系。在超声作用过程中, 空化气泡始终处于不断的膨胀与收

缩的脉动状态。在膨胀阶段, 气泡表面积变大, 内部压强降低, 熔池中的气体通过气泡壁面扩散到空化气泡中, 使空化气泡长大; 在压缩阶段, 气泡内有少部分气体扩散到熔池内, 但小于膨胀阶段进入空化气泡的气体体积, 这就是所说的“表面效应”^[2]。另一方面, 空化气泡的壁面周围存在一定厚度的液体扩散层, 气体的扩散受扩散层厚度的影响, 当空化气泡膨胀时, 扩散层变薄且浓度梯度升高, 进入气泡的气体流动速度增加; 当空化气泡收缩时, 扩散层变厚且浓度梯度降低, 进入气泡的气体流动速度减小, 这就是所谓的“壳层效应”^[2]。在两种效应的共同作用下, 经过几个周期后空化气泡不断长大。同时, 超声波会产生声流作用, 加大对熔池的搅拌作用, 使熔池流动性增加, 促进了小气泡聚集、长大, 使气泡长大的倾向增加。

超声电弧的除气效果与所产生超声波的强度有关^[4]。当激励电流较小时, 超声电弧产生的超声波强度较弱, 在熔体空化核基础上形成的空化气泡数量较少, 同时由于空化气泡的脉动轻微, 溶解于熔体中的气体只有少量向空化气泡内扩散, 这就导致气泡只有一定程度的长大, 但无法长大到可以逸出的尺寸。当激励电流增大时, 超声波的强度提高, 在空化核基础上容易形成空化气泡, 空化气泡数量增多, 空化泡的长大异常活跃, 气泡的脉动明显加强, 结果导致气泡之间的结合和长大, 受熔体浮力和声流共同作用下浮出表面, 使焊缝内气孔急剧减少。

2.3 超声电弧对接头强度的影响及断口分析

2.3.1 超声电弧对接头强度的影响

拉伸试验前去除焊缝的余高, 然后参照焊接接头拉伸试验国家标准 GB/T228—2002 制取试件, 在室温下对试件进行拉伸试验, 试件都在焊缝处断裂, 结果如表 2 所示。

表2 不同激励电流焊缝抗拉强度
Table 2 Tensile property of welded joint

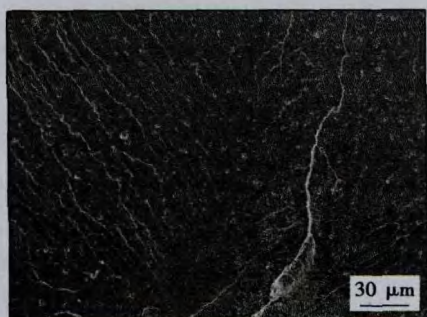
激励电流 I/A	0	5	10	20	30
抗拉强度 R_{el}/MPa	410	428	425	550	543

由表 2 可以看出在施加超声电弧后, 接头的抗拉强度得到提高。当电流为 5 A 和 10 A 时, 焊缝抗拉强度无太大变化。在激励电流提高到 20 A 和 30 A 后, 焊缝抗拉强度明显提高, 且在激励电流为 20 A 时达到最高, 达到母材的 76%。

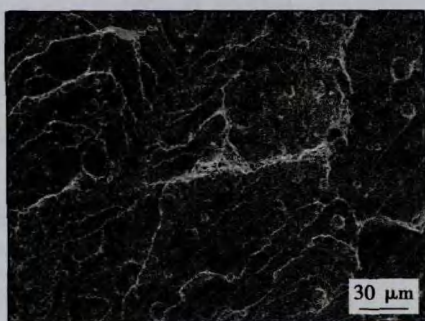
2.3.2 焊缝断口分析

图 6 为不同激励电流的试样拉伸断口的 SEM 图。未施加超声时, 如图 6a 所示, 接头拉伸断口呈河流花样, 断裂界面有许多大小不等气孔, 且无韧

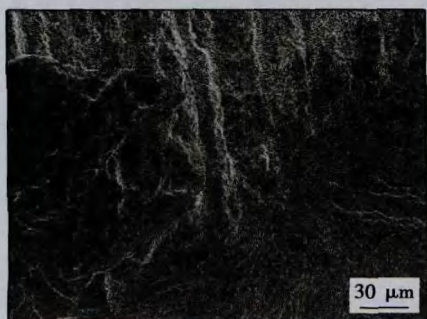
窝,根据断口形貌断定为完全脆性断裂.当激励电流为10 A时,如图6b所示,断口形貌中局部存在少量韧窝,断裂界面的气孔尺寸明显变大,但仍表现出脆性断裂.当激励电流为30 A时,如图6c所示,从断口形貌可以明显看出断口有一定的塑性,断裂界面出现大量的韧窝,且断口无明显气孔,根据断口形貌可判定断裂特征为韧性-脆性混合断裂.这可能是由于超声的引入,空化效应和声流效应加剧了熔池的振动、搅拌作用,使增强颗粒在基体弥散分布并改善与基体的结合性,使接头的抗拉强度和韧性得到提高.



(a) 激励电流0 A



(b) 激励电流10 A



(c) 激励电流30 A

图6 焊缝拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of welds

3 结 论

(1) 与未施加超声电弧相比,在激励电流为5或

10 A时,焊缝气孔明显长大,但数量并没有减少,在激励电流提高到20或30 A后,气孔数量急剧减少.

(2) 超声电弧的引入,使焊接接头的抗拉强度得到提高,在激励电流为20 A时,焊缝的抗拉强度达到最高,为550 MPa,达到母材的76%,同时接头由完全的脆性断裂变成脆性-韧性混合断裂形式.

参考文献:

- [1] 柳光祖,田耘,单秉权.氧化物弥散强化高温合金[J].粉末冶金技术,2001,19(1):20-23.
Liu Guangzu, Tian Yun, Shan Bingquan. Oxide dispersion strengthened superalloys [J]. Power Metallurgy Technology, 2001, 19(1): 20-23.
- [2] Naji M R, Hasan M. A study of hydrogen bubble growth during ultrasonic degassing of Al-Cu alloy melts [J]. Mater Process Tech, 2004, 147: 311-320.
- [3] Xu H B, Jian X G, Thomas T M. Degassing of molten aluminum A356 alloy using ultrasonic vibration [J]. Materials Letters, 2004, 58, 3669-3673.
- [4] Puga H, Barbosa J, Seabra E, et al. The influence of processing parameters on the ultrasonic degassing of molten $Al_1Si_9Cu_3$ aluminium alloy [J]. Materials Letters, 2009(63): 806-808.
- [5] 吴敏生,何龙标,李路明,等.电弧超声焊接技术[J].焊接学报,2005,26(6):40-44.
Wu Mingsheng, He Longbiao, Li Luming, et al. Arc-ultrasonic welding technology [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 40-44.
- [6] 雷玉成,任闻杰,谢伟峰,等.氧化物弥散强化(ODS)合金MGH956 TIG焊缝气孔问题的实验研究[J].焊接学报,2011,32(11):1-4.
Lei Yucheng, Ren Wenjie, Xie Weifeng, et al. Study on pores in TIG welding of Oxide dispersion strengthened (ODS) alloy MGH956 [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 1-4.
- [7] 淮军锋,郭万林,李天文,等.氧化物弥散强化高温合金MGH956的基本焊接性研究[J].材料工程,2008(9):52-55.
Huai Junfeng, Guo Wanlin, Li Tianwen, et al. Weldabilities of The Oxide-dispersion-strengthened superalloy MGH956 [J]. Chinese Journal of Materials Engineering, 2008(9): 52-55.
- [8] 田耘,郭万林,杨峥,等. MGH956合金板材电子束和氩弧焊的接头组织与性能研究[J].航空材料学报,2011,31(4):33-38.
Tian Yun, Guo Wanlin, Yang Zheng, et al. Microstructures and properties of MGH956 sheet joints with EB and TIG welding methods [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 33-38.

作者简介: 雷玉成,男,1962年出生,教授,博士生导师.主要从事焊接工艺及设备、焊接过程控制及模拟、先进材料连接技术等方面的研究与开发.发表论文80余篇. Email: yclei@ujs.edu.cn