

氧化物弥散强化 MGH956 合金 TIG 焊缝气孔问题分析

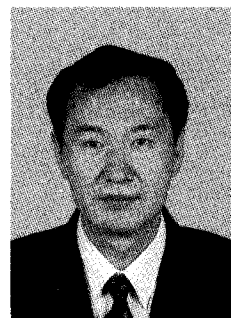
雷玉成, 任闻杰, 谢伟峰, 黄巍*

(江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 通过 X 射线探伤和金相分析相结合的方法, 对氧化物弥散强化 (ODS) 合金 MGH956 的 TIG 焊接气孔的产生机理、分布、数量及焊接工艺参数的影响进行了研究。结果表明, 气孔的产生与 ODS 合金本身的制造工艺特点、弥散氧化物颗粒和焊缝组织有关; 在焊缝的边缘发现许多小泡; 焊缝气孔在焊缝两侧的熔合线附近呈链状分布, 这是由熔池各部位的特点、焊接接头的组织和温度分布共同作用形成的; 调整焊接工艺参数会影响焊缝气孔量的变化, 较小的热输入, 如小电流、快速度和适合的脉冲频率能在一定程度上减少焊缝气孔量。

关键词: ODS 合金; MGH956; TIG 焊接; 气孔

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)11-0001-04



雷玉成

0 序 言

MGH956 合金是一种国产先进的铁基耐高温合金——氧化物弥散强化 (oxide dispersion strengthened, ODS) 合金, 由于该 ODS 合金采用纳米尺寸的氧化物质点对基体进行强化^[1,2], 所以具有高温力学性能、高温抗氧化性能、高温抗腐蚀性能等特点, 并应用于航空航天和能源等领域, 比如航空发动机高效冷却机构—多空层板结构等^[2-4]。ODS 合金 MGH956 的加工工艺十分复杂, 包括机械合金化制粉—热挤压—热锻—冷轧—再结晶退火。这就给 ODS 合金熔化焊接造成了较大的困难, 如 MGH956 合金的焊缝气孔问题十分突出, 在 TIG 焊缝中密布着小气孔^[4], 这些气孔会对 MGH956 合金焊缝质量和接头的力学性能 (特别是高温蠕变强度) 产生严重的破坏, 因此 MGH956 合金的焊接气孔问题成为了制约其应用的瓶颈和亟待解决的关键问题。

目前国内外关于对 ODS 合金的焊接研究方面的报道很少。文中采用 TIG 焊对 ODS 合金 MGH956 进行平板堆焊, 重点分析焊缝中气孔的形成机理、分布和焊接工艺参数对气孔形成倾向的影响, 从而为实现 ODS 合金的电弧焊奠定技术基础。

1 试验方法

试验材料采用机械合金化方法制备并经过轧制的 ODS 合金, 加工状态为热轧、冷轧后在 1 350 ℃ 进行再结晶退火 1 h, 板厚为 2 mm。MGH956 合金的化学成分如表 1 所示。

表 1 MGH956 合金化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of MGH956

Cr	Al	Ti	Y ₂ O ₃	O	N	C	Fe
19.34	5.06	0.50	0.51	0.26	0.017	0.018	余量

焊接前, 试板 (60 mm × 30 mm) 表面用手持角磨机打磨出金属光泽, 并用丙酮超声清洗。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、直流正接, 采用纯度为 99.9% 的氩气作为保护气, 气体流量为 9 L/min, 脉冲幅比为 50%, 脉冲宽比为 50%。

焊接试样经 X 射线探伤检查, 使用放大镜在 X 射线透视底板上观察气孔分布并计算焊缝气孔量。从焊缝的中部每隔 2 ~ 3 mm 沿垂直于焊接方向截取 4 个试样进行金相组织观察和分析, 腐蚀液为 10% HNO₃ + 10% HF + 80% H₂O (质量分数)。使用 LEICADM-2500M 正置透反射显微镜和 JEOLJSM 7001F 扫描电子显微镜 (SEM) 对焊缝组织和气孔形貌进行观察, 气孔分为宏观气孔和微观气孔。宏观气孔可由 X 射线探伤观察, 微观气孔只能由光学显微

收稿日期: 2011-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075191); 江苏大学科技创新团队资助项目 (JD00019)

* 参加此项研究工作的还有朱强, 张琦

镜或者 SEM 观察. 文中的气孔量是指 10 mm 焊缝中的宏观气孔数量 (N_p).

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝中气孔的形成机理及形成倾向

MGH956 合金 TIG 焊缝气孔主要与其本身制造工艺的特点有关. ODS 合金加工过程中, 机械合金化(MA)粉末在高速球磨过程中产生碎片, 新生碎片断口表面具有较强的活性, 容易吸附氩气, 水蒸气, 并易氧化, 同时 MGH956 合金机械合金化是在用氩气作为保护条件下进行的, 氩气是惰性气体并且扩散慢; 加工后的小孔仍然留在基体中, 只是变得更细小^[5,6]. MGH956 合金的致密性要远低于熔炼出来材料, 并且材料中的气体含量较高, 因此在 TIG 焊接过程中, MGH956 合金的孔洞受到了热激活而扩散并聚集膨胀, 这些充满气体的小孔在熔池金属流动中造成不规则的形状, 这种不规则形状的小孔在快速凝固过程中, 产生气孔. 文献[4]简要地指出焊缝中密布的微小气孔与基体材料中弥散分布的氧化物密切相关. 图 1 为 MGH956 合金 TIG 焊缝的 SEM 形貌及 X 射线能谱曲线, 由图 1 可以发现, 有部分小孔(直径约为 1~10 μm)与焊缝中的 Al-O-Y

氧化物共同存在, 孔洞与氧化物相结合是 ODS 合金中晶内孔洞的特征之一^[2], 焊接过程中, 纳米弥散氧化物聚集, 聚集过程中吸附在上面的小孔也聚集, 冷却后并残留在焊缝中.

图 2 显示了 MGH956 合金 TIG 焊缝柱状晶之间的宏观气孔. 宏观气孔倾向于残留在焊缝柱状晶之间, 这是由于焊缝边界的过冷度较大, 熔池从边界开始凝固, 以柱状晶的形式向焊缝中心生长. 同时焊缝气体的形成经过气泡形核, 长大和上浮的过程. 气泡的形核过程需要大量的不均匀溶质质点, 而相邻柱状晶的凹陷处是气泡形核的最佳表面^[7]. 进入焊缝的凝固后期, 合金液粘度的增大, 使气泡的上浮速度降低, 柱状晶结晶相互连接, 阻止了气泡的进一步上浮, 最后留在焊缝中并在柱状晶之间形成气孔.

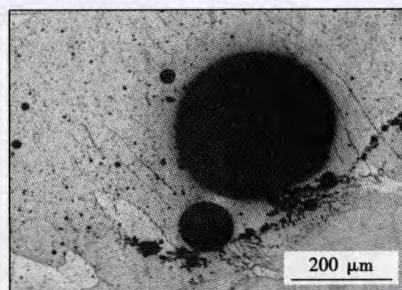


图2 焊缝中柱状晶之间的宏观气孔
Fig. 2 Pores among columnar crystal in weld

2.2 焊缝气孔分布

2.2.1 焊缝表面气孔

对 MGH956 合金的焊接过程进行观察, 发现有大量的气体从焊缝边缘冒出, 呈现出“开水沸腾”的现象. 在焊缝的边缘发现许多小泡, 如图 3 所示. 这是由于焊接过程中, 焊缝边缘的加热温度比焊缝中间低, 凝固速度较快, 使气泡来不及逸出, 呈现出“小泡”的现象.

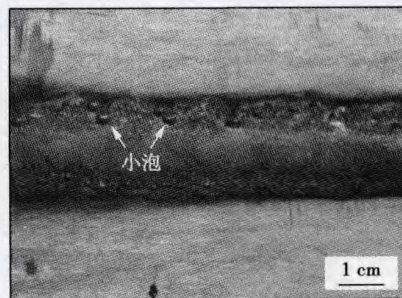


图3 焊缝表面“小泡”
Fig. 3 Bubbles on surface of MGH956 TIG weld

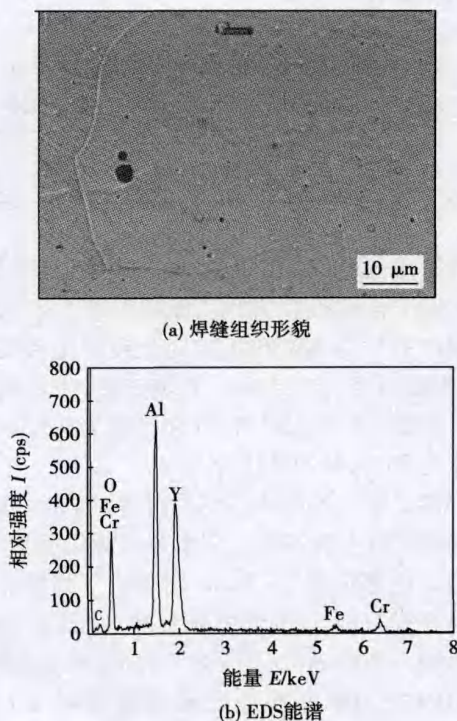


图1 焊缝组织 SEM 形貌及能谱曲线
Fig. 1 SEM micrographs of weld metal

2.2.2 焊缝气孔分布

对宏观气孔进行观察,发现熔合线附近容易出现大量气孔,如图 4 所示.这是由于:(1)熔合区是固-液两相并存的半熔化区,有大量分布不均匀的母材质点,为气泡的形成提供了场所,此处气泡形核所需能量大大低于熔池中心气泡形核所需能量,气泡易在熔合线处形核.(2)熔池是动态的,熔池各截面液态金属存在时间不同,熔合线附近液态金属存在时间很短,使气体来不及逸出.(3)MGH956 合金焊缝熔合区附近组织多以柱状晶形式存在,阻止了气泡上浮.(4)焊接过程中,MGH956 合金中的气体受热向熔池大量扩散并在熔合线处聚集.以上多种因素共同作用,导致在熔合线附近出现大量气孔.

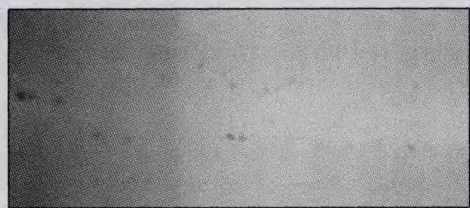


图 4 焊缝 X 射线探伤图片

Fig. 4 Photograph of X-ray inspections

2.2.3 焊缝气孔形貌

图 5 为合金 MGH956 焊缝气孔形貌.图 5a 中气孔呈球形,这种气孔在 MGH956 合金 TIG 焊缝中数量很多,而且尺寸有大有小.图 5b 中气孔呈豆荚形,分析表明其为两个气孔合并而成,尺寸较大,有较大的深度;观察金相组织发现,在这种气孔周围的各个方向上有很多气泡聚集在一起,形成团状气孔.观察此类气孔在焊缝中数量极少,多数出现在焊接电流为 120 A,焊接速度为 1.5 mm/s 的试样中.

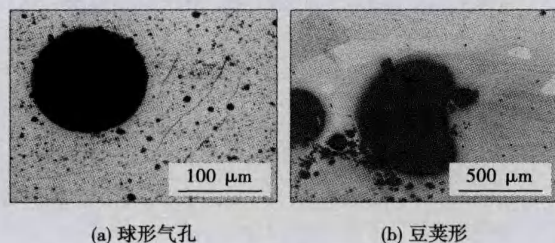


图 5 焊缝气孔形貌

Fig. 5 Morphologies of pores in welds

2.3 焊接工艺参数对气孔形成倾向的影响

2.3.1 焊接电流的影响

图 6 为焊接电流对焊缝气孔量的影响曲线,如

图 6 所示,在焊接速度为 2 mm/s 和无脉冲的条件下,MGH956 合金的 TIG 焊缝气孔量有明显的变化规律,即随着焊接电流的增大,焊缝气孔量也随之增大.焊接电流从 80 A 增加到 140 A 时,对应的焊缝气孔量从 4 个增加到 32 个.焊接电流较小时,焊接热输入较小,焊缝熔池小而浅,所以气孔量少而且直径小;当焊接电流增大时,熔深变大,热输入大,母材中气体扩散量增大,气孔多而大.

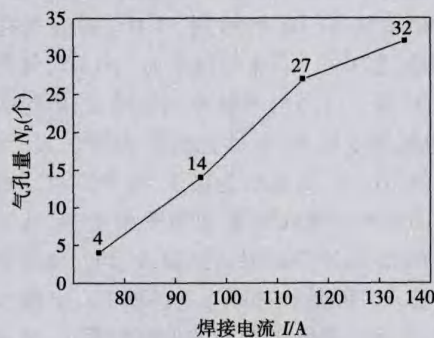


图 6 焊接电流对焊缝气孔量的影响

Fig. 6 Effect of current on NP of welds

2.3.2 焊接速度的影响

图 7 为焊接速度对焊缝气孔量的影响曲线,如图 7 所示,随着焊接速度的增大,气孔量明显减小.在焊接电流为 120 A 和无脉冲的条件下,焊接速度从 4 mm/s 减少到 1.5 mm/s,对应的气孔量从 1 个增加到 63 个.低焊接速度条件下气孔量显著增大,这是因为焊接速度的降低,单位长度内的热输入变大,焊缝的高温下停留时间增长,母材中气体能大量进入熔池,同时焊缝中气泡有足够的时间来扩散、聚集并长大,因此焊缝的气孔量增多.

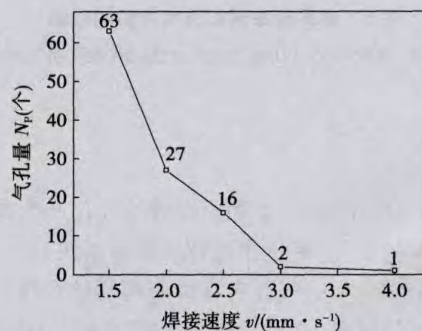


图 7 焊接速度对焊缝气孔量的影响

Fig. 7 Effect of velocity on NP of welds

2.3.3 脉冲频率的影响

低频脉冲 (0.5 ~ 10 Hz) 有利于消除焊缝缺

陷^[8],但是同时考虑到中频脉冲(20~100 Hz)具有电弧压缩效应,能改善电弧集中性和指向性,提高电弧的挺度^[8-10],所以在焊接电流为 140 A、焊接速度为 2 mm/s 条件下进行 TIG 脉冲焊接试验,分析脉冲频率对气孔量的影响,如图 8 所示. 脉冲频率从 0 增加到 2 Hz 时,脉冲电流对焊缝金属施加强有力的搅拌作用,因此焊缝气孔量先从 32 个减少到 20 个,然而脉冲频率为 3 Hz,气孔量增加到 45 个. 随着脉冲频率进一步提高,气孔量先减少后增大. 当脉冲频率从 10 Hz 增加到 50 Hz,焊缝气孔量从 29 个减少到 10 个,而脉冲频率为 100 Hz,气孔量又增加到 38 个. 这是由于脉冲频率增加,电磁收缩力增强,电弧刚度增大,对熔池的的搅拌增大,当脉冲频率为 50 Hz 时,气孔量为最少,可能是由于熔池固有的振动频率跟电弧的振动频率相当时,从而产生共振,使熔池的搅拌效果达到最大,同时也降低了焊接的热输入. 但是脉冲频率为 100 Hz,电弧压力变化很小,熔池表面液体振动的振幅也变小,熔池的搅拌作用变弱^[11],焊缝气孔量也增加. 但 MGH956 合金进行 TIG 脉冲焊接后,其气孔直径明显减少,其直径均小于 0.5 mm.

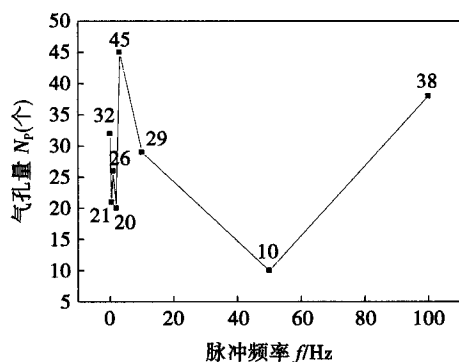


图 8 脉冲频率对焊缝气孔量的影响

Fig. 8 Effect of pulse frequency on NP of welds

3 结 论

(1) MGH956 合金 TIG 焊缝的气孔产生与母材本身的制造工艺、氧化物颗粒和焊缝组织有关.

(2) 焊缝中的气孔有在焊缝两侧熔合线附近呈链状分布的倾向,这是由熔池各部位的组织结构特点以及焊接接头温度分布共同作用形成的.

(3) 对于 MGH956 合金 TIG 焊接来说,调整焊接工艺参数会影响焊缝气孔量的变化,在保证焊缝被熔透的情况下,应尽量降低热输入;减少熔池的高温停留时间,如小电流、快速度和适合的脉冲频率能

在一定程度上减少气孔量.

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]. Powder Metallurgy Technology, 2001, 19(1): 20-23.
- [2] Gao Z Y, Han F S, Wu J, *et al.* Mechanism of void formation in grain interior of ODS alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 419: 126-132.
- [3] Molian P A, Yang Y M, Patnaik P C. Laser welding of oxide dispersion strengthened alloy MA754 [J]. Journal of Materials Science, 1992, 27: 2687-2694.
- [4] 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.
- [5] 李明,周张健,何培,等. 热处理工艺对氧化物弥散强化 Fe_2Cr 合金微观结构和致密化的影响[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(6): 552-555.
Li Ming, Zhou Zhangjian, He Pei, *et al.* Effect of heat treatment on microstructure and densification of oxide dispersion strengthened Fe_2Cr alloy [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(6): 552-555.
- [6] Chen Y L, Jones A R, Miller U. Origin of porosity in oxide dispersion-strengthened alloys produced by mechanical alloying [J]. Metallurgical and material transaction A, 2002, 33: 2713-2718.
- [7] 周振丰,张文钺. 熔焊原理与金属材料焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [8] 姜焕中. 电弧焊与电渣焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [9] 荆学东,尚久浩,侯高强,等. TIG 焊接中单面焊双面成型的研究[J]. 西北轻工业学院学报, 2000, 18(3): 66-69.
Jing Xuedong, Shang Jiuhao, Hou Gaoqiang, *et al.* Study of on-melt-through bead in TIG welding [J]. Journal of Northwest Institute of Light Industry, 2000, 18(3): 66-69.
- [10] 雷玉成,陈希章,朱强. 金属材料焊接工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [11] 李桓,郭胜,陈垚涛,等. 脉冲埋弧焊工艺研究及焊缝熔深特征[J]. 焊接, 2004(7): 10-12.
Li Huan, Guo Sheng, Chen Lietao, *et al.* Study on techniques and penetration characteristics of pulsed submerged arc welding [J]. Welding & Joining, 2004(7): 10-12.

作者简介: 雷玉成,男,1962 年出生,教授,博士研究生导师. 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