# 氧化物弥散强化高温合金 MGH956 的基本焊接性研究

## Weldabilities of the Oxide-dispersion-strengthened Superalloy MGH956

淮军锋, 郭万林, 李天文, 袁 鸿, 姜 维
(北京航空材料研究院 焊接及锻压工艺研究室, 北京 100095)
HUAI Jun-feng, GUO Wan-lin, LI Tian-wen, YUAN Hong, JIANG Wei (Laboratory of Welding and Forging, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 氧化物弥散强化(ODS)高温合金 MGH956 是机械合金化工艺制造的氧化物弥散强化高温合金, 针对 MGH956 材料采用电子束、氩弧焊、钎焊及扩散处理等连接工艺方法进行了基本的焊接性研究。对接头组织及接头性能进行了测试分析, 三种焊接方法室温接头力学性能相当, 接头强度系数均达到 95% 左右, 氩弧焊焊缝中的气孔较多, 而电子束焊焊缝中气孔相对比较少、室温塑性比较明显。从接头高温强度而言, 真空钎焊工艺有明显优势。

关键词: ODS; MGH956 高温合金; 电子束; 钎焊及扩散处理
中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)09-0052-04

**Abstract:** Oxide-dispersion-strengthened (ODS) MGH956 superalloy is one kind of superalloy fabricated by mechanical alloying process. The weldabilities of MGH956 are investigated using TIG welding and electron beam welding, as well as vacuum brazing technology accompanied with diffusion process. The microstructure of joint is studied by means of SEM. At room temperature, the joint tensile strength reached about 95% of the base material for the above three joining methods. It is found that there are more pores in the TIG welding joint than the electron beam welding joint. In the view of high temperature strength of the joints, vacuum brazing method is superior to other two methods.

**Key words:** ODS; MGH956 superalloy; electron beam welding; brazing and diffusion treatment

随着航空航天事业的迅速发展, 对材料的高温要求越来越高。传统的高温合金一般采用析出相的沉淀硬化作为其主要强化手段, 但析出相在高温下会聚集长大或重新固溶于基体中, 失去了强化的作用, 限制了高温合金使用温度[1,3]。$Y_2O_3$, $Al_2O_3$ 等氧化物具有很好的热稳定性和化学稳定性, 其强化效果可以维持到接近合金的熔点温度, 氧化物弥散强化(Oxide Dispersion Strengthened, ODS)高温合金正是采用这些超细的氧化物质点对基体进行强化[2,3], 使其具有高温力学性能、高温抗氧化性能、高温抗腐蚀性能等综合性能优异[2-7]的特点。ODS 高温合金 MGH956 就是机械合金化工艺制造的这类氧化物弥散强化高温合金, 因此在航空发动机热端零部件的选材方面有突出的优势。目前, 该材料已经在一些发达国家的航空、航天以及能源等领域得到应用。比如应用于航空发动机高效冷却结构——多空层板结构等。

根据国内外的发展现状及需求, 本工作针对 ODS 高温合金 MGH956 材料采用电子束、氩弧焊、钎焊及扩散处理等连接工艺方法进行实验, 并对接头组织及接头性能进行了测试和对比分析。

## 1 实验

### 1.1 基体材料

实验用基体材料为采用机械合金化方法制备并经过轧制加工的氧化物弥散强化(ODS)高温合金 MGH956 板材, 加工状态为轧制后在 1300 ℃退火 1~4h 热处理状态, 板材厚度为 4mm。基体材料的化学成分大致如表 1 所示。

表 1 MGH956 合金的名义成分[3](质量分数/%)

Table 1 Nominal composition of MGH956 alloy (mass fraction/%)

| Fe | Cr | Al | Ti | $Y_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|
| Bal | 20 | 4.5 | 0.5 | 0.5 |

### 1.2 焊接材料及工艺

真空电子束焊接采用板材对焊的连接方式, 不加入填充材料。气体保护氩弧焊采用板材对焊的形式, 填充材料选用 MGH956 基体材料。真空钎焊采用对接的接头形式, 选用镍基中间层合金作为焊接材料, 使用的钎焊材料为自行研制的镍基钎料, 钎料状态为非晶态箔带, 厚度为 0.04mm, 固相线温度 1150℃, 液相线温度 1200℃。

将待焊接头的焊接表面经过研磨、清洗, 去除表面氧化膜和油污; 电子束与氩弧焊的待焊接头对齐, 必要时可采取定位点焊或采用夹具定位; 钎焊试样用钎料箔带采用超声波清洗方法去除表面的油污, 然后将钎料和试样按次序装配好。

电子束焊接在 ELA-30 型真空电子束焊机上进行, 氩弧焊在局部氩气保护的环境下施焊, 根据基体材料的特性及规格选择合适的焊接工艺。钎焊在真空钎焊扩散炉中进行, 焊接工艺参数: 钎焊温度 1200~1250℃、真空钎焊时热态真空度 $1\times10^{-2}$ Pa、保温时间 60min、压力 1~5MPa。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 接头力学性能测试结果与分析

表 2 是针对基体材料和不同连接方法加工的接头试样进行力学性能测试的结果。

从表 2 的测试数据可知, 在室温测试条件下, 无论是电子束焊、氩弧焊还是真空钎焊, 接头抗拉强度 $\sigma_b$ 都较高, 约为基体材料强度的 95% 左右, 真空钎焊略有优势; 三种连接方法接头屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 也基本一致, 略高于基体材料的屈服强度。在接头延伸率 $\delta_5$ 指标方面电子束焊接有较大的优势, 一方面是电子束焊接的热场高度集中, 因此热影响区很窄, 对基体材料的影响范围小, 影响时间也较短, 因此电子束焊接的试样仍然保留着一部分基体材料固有的塑性; 而氩弧焊和真空钎焊对应的接头延伸率基本为 0。这是由于一方面氩弧焊的焊缝缺陷较多, 易形成应力集中断裂; 另一方面氩弧焊熔池宽, 热影响区域大, 对基体材料中固有的强化相分布产生较大的影响; 而钎缝区域极窄, 尽管略有韧性断裂特征, 但实测延伸率基本为 0。

表 2 接头力学性能测试结果

Table 2 Mechanical properties of MGH956 superalloy fore different welding process

| Temperature / ℃ | Welding process | $\sigma_b$ / MPa | $\sigma_{0.2}$ / MPa | $\delta_5$ / % | Fracture characteristic of welding joint |
|---|---|---|---|---|---|
| 23 | Base material | 725 | 570 | 14 | Ductile fracture |
| 23 | Electron beam welding | 705 | 590 | 6.5 | Ductile and brittle fracture |
| 23 | TIG welding | 675 | 595 | – | Brittle fracture |
| 23 | Vacuum brazing | 715 | 600 | – | Brittle fracture |
| 1100 | Base material | 84 | 79 | 8.5 | Ductile fracture |
| 1100 | Electron beam welding | 33 | 30 | 3.5 | Ductile and brittle fracture |
| 1100 | TIG welding | 26 | 24 | 15 | Ductile fracture |
| 1100 | Vacuum brazing | 55 | 49 | – | Brittle fracture |

从高温拉伸强度而言真空钎焊有明显的优势, 但也仅达到基体材料的 65%, 作为热端零部件使用, 还需优化钎焊材料及钎焊扩散焊工艺, 以进一步提高钎焊接头的高温力学性能。

### 2.2 接头断口与显微组织分析

采取宏观和微观分析方法分别对电子束焊、氩弧焊以及真空钎焊的焊缝组织及断口形貌进行分析, 其结果分别如图 1, 2, 3 所示。

图1a为电子束焊接焊缝未经过腐蚀的低倍形

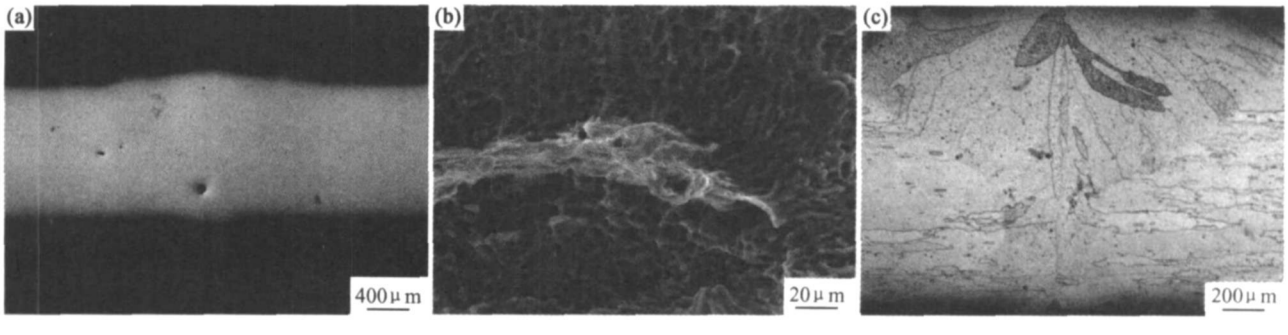


图 1 电子束焊接室温断口形貌和接头组织 (a) 焊缝低倍形貌; (b) 断口形貌; (c) 焊缝微观组织

Fig. 1 Fracture surface and microstructure of electron beam welding joint

(a) macrostructure of welding joint; (b) fracture surface; (c) microstructure of welding joint

貌,从图中可以看出,电子束焊接焊缝中的气孔较少,但是仍然难以避免存在着气孔。图 1b 为采用对接形式电子束焊接的试样室温拉伸后断口的形貌,从断口形貌可以明显看出断口有一定的塑性,断裂界面有部分气孔、韧窝和撕裂棱,根据断口的形貌断定电子束焊接接头室温断裂特征为韧性脆性混合断裂,表 2 中电子束焊接接头有较高的延伸率。图 1c 为经过腐蚀后的电子束焊接焊缝组织形貌,其晶界和晶粒取向十分清晰,基体的晶粒取向没有变化,焊缝的晶粒取向与基体材料的晶粒取向有一个角度,这一角度与热源、散热方向和晶体生长方向一致。焊缝内部缺陷较少。

图 2a 为氩弧焊焊缝不经过腐蚀的低倍形貌,也可以明显看出焊缝密布小气孔,分析认为这些缺陷的形成跟被焊基体材料中弥散分布的氧化物密切相关,而且密布小气孔的存在对焊接接头的强度和塑性必将产生不利影响图 2b 为采用对接形式氩弧焊焊接的试样室温拉伸后断口的形貌,从断口形貌可以看出塑性变形较少,断裂界面有许多大小不等气孔和部分浅小的韧窝,根据断口的形貌断定氩弧焊焊接接头室温断裂特征为脆性断裂。图 2c 为经过腐蚀后的氩弧焊焊缝组织形貌,腐蚀后仍能清晰看到焊缝中密布的小气孔,氩弧焊和电子束焊相比焊缝处的晶粒明显变得粗大,晶界分布和晶粒取向与电子束焊接情况相当,焊缝内部缺陷较多。

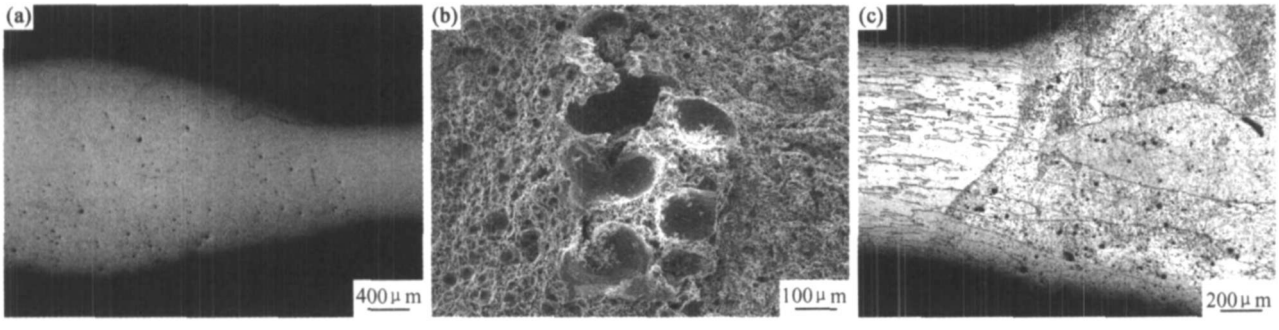


图 2 氩弧焊接室温断口形貌和接头组织 (a) 焊缝低倍形貌; (b) 断口形貌; (c) 焊缝微观组织

Fig. 2 Fracture surface and microstructure of TIG welding joint

(a) macrostructure of welding joint; (b) fracture surface; (c) microstructure of welding joint

图 3a 为采用对接形式真空钎焊接头试样室温拉伸后断口的形貌,总体表现为脆性断裂,略有韧性断裂的迹象,拉伸强度也与基体材料接近。图 3b 为真空钎焊接头截面背散射金相组织,可以看出钎缝截面均匀一致,钎缝中心尚有部分钎料层,钎料层已经明显变薄,且原始界面已经被弱化,在钎料层与基体材料的界面上可以清晰地看到已经有较厚的扩散层存在,说明经过钎焊与扩散处理后,已经使钎料与基体材料形成了有效的冶金结合。ODS 合金中晶内孔洞与氧化物相互结合[4, 9, 10],二次再结晶退火后,常出现 3% ~ 7% 的孔洞[4, 8],且孔洞随退火温度的增加而长大[4],钎焊扩散处理温度比较高接近于实验用 ODS MGH 956 的二次再结晶退火温度,由于扩散作用,钎缝中钎料在基体扩散层区域有颗粒氧化物相和孔洞在界面两侧附近有聚集和长大的倾向,对接头的力学性能产生一定的弱化影响。

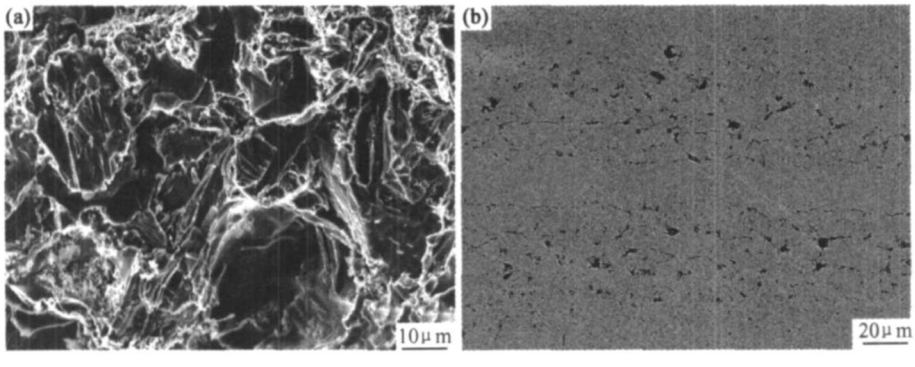


图 3 真空钎焊焊接室温断口形貌和接头组织 (a) 断口形貌; (b) 钎缝组织

Fig. 3 Fracture surface and microstructure of vacuum brazing joint

(a) fracture surface; (b) microstructure of brazing seam

## 3 结论

(1) 电子束焊、氩弧焊、钎焊及扩散处理等不同的连接工艺对应 MGH956 合金的接头室温力学性能相当, 强度系数均达到 95% 左右。

(2) 电子束焊焊缝中仅有少量气孔, 室温拉伸时接头表现为脆性-韧性混合断裂形式, 延伸率达到 6.5%; 氩弧焊焊缝中气孔较多, 室温接头基本为完全脆性断裂。

(3) 仅就 MGH956 合金接头的高温强度而言, 真空钎焊相对于氩弧焊和电子束焊均有明显优势。

参考文献


[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第 2 版第 2 卷. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[2] 美国金属学会. 金属手册 粉末冶金[M]. 第 9 版第 7 卷. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[3] 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.

[4] 高占勇, 计云萍, 韩福生. 应力集中沿界面扩散弛豫引起的 ODS 合金晶内孔洞的形成机理[A]. 2005 年国际材料科学与工程学术研讨会论文集[C]. 太原: 太原理工大学, 中国机械学会热处理学会, 2005. 727- 730.

[5] 淮军锋, 郭万林, 李天文, 等. ODS 高温合金 MGH754 钎焊工艺与接头组织分析[A]. 中国航空学会 2007 学术年会议论文摘要汇编[C]. 深圳: 中国航空学会, 2007.

[6] 李天文, 郭万林, 淮军锋, 等. MGH754 合金钎焊接头断口与性能初步分析[A]. 中国航空学会 2007 学术年会议论文摘要汇编[C]. 深圳: 中国航空学会, 2007.

[7] MOLIAN P A, YANG Y M, PATNAIK P C. Laser welding of oxide dispersion-sthrengthended alloy MA754[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27: 2687- 2694.

[8] MIODOWNIK M A, MARTIN J W, LITTLE E A. Secondary recrystallisation of two oxide dispersion strengthened ferritic superalloys MA956 and MA957[J]. Mater Sci Tech, 1994, 10(2): 102- 109.

[9] GONZALEZ-CARRASCO J L, GUTTMANN V, FATTORI H. Void formation during oxidation of the ODS alloy MA 6000[J]. Metalll Mater Trans: A, 1995, 26(4): 915- 924.

[10] SHA W, BHADESHIA H. Modeling of recrystallisation in mechanically alloyed materials[J]. Mater Sci Eng A, 19997, 223: 91- 98.


收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-20

作者简介: 淮军锋(1980—), 男, 工学学士, 现从事钎焊材料研制、钎焊与扩散焊工艺研究工作, 联系地址: 北京市 81 信箱 20 分箱(100095)。E-mail: huai621@yahoo.com.cn

(上接第 51 页)

(3) TiNi SMA 与 304 采用 AgCu 中间层进行 TLP-DB 时, 温度越高, 保温时间越长, 界面元素扩散越充分, 中间反应过渡层的厚度增大, 但是界面的显微组织也随之粗化。界面生成 $TiNi_2$, $Ti_3Ni_4$, TiFe 等脆性金属间化合物, 影响接头质量。

参考文献


[1] CHAUA E T F, FRIEND C M, ALLEN D M, et al. A technical and economic appraisal of shape memory alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 438- 440: 589- 592.

[2] PREDKI W, KNOPIK A, BAUER B. Engineering applications of NiTi shape memory alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 481- 482: 598- 601.

[3] 孙新华, 朱宪春, 孙大谦, 等. 镍钛不锈钢复合矫治弓丝在正畸拔牙病例中的初步应用[J]. 口腔正畸学, 2005, 12(2): 53- 56.

[4] CASPER V E, FOSTERVOLL H, ZUHAIR K, et al. Plasma welding of NiTi to NiTi, stainless steel and Hastelloy-C276[C]. Pennsylvania: ASM Materials Solutions 2003 Conference, 2003. 13- 15.

[5] GUGEL H, SCHUERMANN A, THEISEN W. Laser welding of NiTi wires[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 481- 482: 668- 671.

[6] QIU X M, LI M G, SUN D Q, et al. Study on brazing of TiNi shape memory alloy with stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176(1- 3): 8- 12.

[7] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[8] 李红. 金属夹芯板轧制-扩散复合界面结合机理研究[D]. 北京: 北京科技大学博士论文, 2006. 72- 89.

[9] 吕晓春. TiNi 形状记忆合金电阻钎焊技术的研究[D]. 哈尔滨: 机械科学研究院硕士论文, 2004. 46- 49.


基金项目: 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室开放课题资助项目(焊接 06003)

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-07-16

作者简介: 汪应玲(1982—), 女, 硕士研究生, 现主要从事材料的扩散焊研究, 联系地址: 北京工业大学材料科学与工程学院(100124)。E-mail: wangyingling@emails.bjut.edu.cn