

MGH956 合金钎焊接头力学性能分析

Analysis of Mechanical Property of MGH956 Superalloy Brazing Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 滕俊飞 侯金保 张 胜

[摘要] 以 MGH956 合金钎焊接头高温抗拉强度为考察对象进行了正交试验设计。结果表明,考察的 3 个因素对接头性能影响的主次顺序为:钎料成分 > 保温方式 > 焊缝间隙;对应较优工艺参数为:钎料为 KCo₃, 保温方式为:1240℃/10min 加 1000℃/30min;焊缝间隙为 0.02mm。在所进行试验中,1000℃拉伸试验结果最好的焊缝强度接近了母材水平。

关键词: MGH956 钎焊 强度

[ABSTRACT] Orthogonal experimental design is done according to the high temperature tensile strength of the MGH956 joints, the analysis result shows that the affecting order on the joint properties of the three considered factors is composition of the solder > insulation manner > weld gap. The better parameters are that solder is KCo₃, insulation manner is 10min under 1240 °C +30min under 1000 °C, weld gap is 0.02mm. Among the tests, the best result of the tensile test under 1000 °C is that the intensity of the weld approach to the level of the material.

Keywords: MGH956 Braze welding Intensity

采用机械合金化方法制造的氧化物弥散强化合金具有高温力学性能好、高温抗氧化和抗腐蚀性好的综合优势,特别适合于航空发动机中要求耐高温、抗腐蚀、抗氧化、抗热疲劳的使用工况^[1-2]。国外的资料报道,采用 MGH956 合金制造的多孔层板已应用于 F119 发动机中。

ODS 合金处于冶金不平衡状态,不是用熔炼技术来制造,而是通过特殊的机械合金化的粉末冶金工艺以及热态挤压来制造和成形的。在材料中形成了沿轧压方向的纤维组织。弥散分布的 Y₂O₃ 质点抑制了晶粒在温度、应力作用下的长大,在轧压方向上获得了良好的力学性能。熔焊时的熔化过程会破坏 ODS 合金的这种不平衡状态,从根本上破坏了材料原先的组织 and 性能,特别是耐高温的性能。因此,该类合金的焊接通常采用钎焊或扩散焊。

本研究采用自制焊料,通过正交试验设计,对不同焊接工艺条件下试件的高温性能进行试验研究和对比

分析,为该材料在航空领域的工程应用提供一定的技术储备。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用材料为机械合金化合金 MGH956,基体成分为 Fe-Cr-Al 的固溶体组织。其化学成分如表 1 所示。试验材料的热处理条件是 1350℃下 4h 时效处理。材料组织为扁平状的盘状晶组织。

表1 MGH956合金的主要化学成分 %

成分	Fe	Cr	Al	Ti	Y ₂ O ₃	C
质量分数	余量	18.5~21.5	3.75~5.75	0.20~0.60	0.30~0.70	≤ 0.10

1.2 试验方法

将 MGH956 板料线切割成 25mm × 50mm × 3mm 的焊接试样,经磨床加工、超声清洗、烘干处理后,利用定位片固定钎焊试件,然后将焊料添加到待焊区域,试验设备为 VBF-80 真空钎焊炉。

本试验的目的是研究在不同成分钎料和不同工艺参数下 MGH956 合金钎焊接头力学性能。通过比较确定更适于钎焊 MGH956 合金的钎料成分和工艺参数。MGH956 合金的主要应用目标是高温条件下工作的航空部件,故以该合金钎焊接头的高温抗拉强度 Y 作为考察目标。本试验考察的因素有:

A (钎料成分): $A_1=KNi10$, $A_2=KCo3$;

B (保温方式): $B_1=1240^\circ\text{C}/30\text{min}$,

$B_2=1240^\circ\text{C}/10\text{min}+1000^\circ\text{C}/30\text{min}$;

C (焊缝间隙): $C_1=0.05\text{mm}$, $C_2=0.02\text{mm}$ 。

A (钎料成分)是影响焊接效果的重要因素。钎料的成分不同,得到的焊缝组织也不同,接头的性能也存在差异。KNi10 和 KCo₃ 是从对 MGH956 合金钎焊的多种钎料中优选出来的 2 种,通过对接头组织的观察,2 种钎料均能实现接头的良好结合。

B (保温方式)经试验研究发现, MGH956 合金在进行高温钎焊时,若延长保温时间,可以消除焊缝中的低熔点共晶组织,使焊缝中的低熔点组元更充分地母

材扩散;同时,还可使焊缝内以及焊缝和母材元素间进行更充分的扩散,使焊接接头中合金成分分布更均匀,有利于形成高强度的焊接接头。但是,延长保温时间也会引起从母材进入焊缝中的弥散相聚集程度增加,有可能在一定程度上破坏其弥散特点。而焊后冷却过程中,在低于钎料熔点的某一温度下进行扩散处理,可以避免这种情况,并且也能促进焊缝中低熔点组元向母材的扩散,促进焊缝成分均匀化。但就促进焊缝成分均匀化方面而言,其效果没有 1240℃ /30min 的效果好。

C (焊缝间隙)是影响钎焊接头质量的重要因素之一,在其他条件相同的情况下,不同焊缝间隙下得到的焊缝组织有显著差异。

上述 3 个因素对焊接接头的性能都会产生影响,并且三者对焊缝的作用相对独立,因此 3 个因素之间的相互影响可以忽略。这是一个三因素、两水平的问题,可以选择正交试验表 $L_4(2^3)$ 进行试验。

把 3 个不同的因素 A、B、C 排入正交试验表 $L_4(2^3)$ 的第一、二、三列上,试验表中的数值对应 3 个因素的水平值,即得试验方案,如表 2 所示。

表2 正交试验方案

因素 试验号	A (钎料成分)	B (保温方式)	C (焊缝间隙)
1	A_1	B_1	C_1
2	A_1	B_2	C_2
3	A_2	B_1	C_2
4	A_2	B_2	C_1

2 拉伸试验结果及分析

高温拉伸测试温度为 1000℃,试验结果如表 3 所示。

表3 高温拉伸试验结果

试验号	拉伸强度原始数据 σ_b /MPa			平均值
	试件 1	试件 2	试件 3	
1	55	48	35	46.0
2	76	65	59	66.7
3	74	70	65	69.7
4	86	71	78	78.5

本试验的考察对象为 MGH956 合金钎焊试验件的高温抗拉强度 Y 。试验采用的是正交试验设计,试验为一个三因素、两水平的正交试验。为了避免偶然因素对试验结果的影响,每组试验用 3 个试验件。从试验结果可以看出,即使采用同一工艺参数,不同试件接头的抗

拉强度也存在较大差异,在此以每组试验结果的中间值(表 3 中试件 2 一列)作为对应工艺参数下强度值的数学期望值进行了数学分析。

2.1 建立数学模型和参数估计

$$\begin{cases} Y_1 = \mu + a_1 + b_1 + c_1 + \varepsilon_1 \\ Y_2 = \mu + a_1 + b_2 + c_2 + \varepsilon_2 \\ Y_3 = \mu + a_2 + b_1 + c_2 + \varepsilon_3 \\ Y_4 = \mu + a_2 + b_2 + c_1 + \varepsilon_4 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $\varepsilon_i (i=1,2,3,4)$ 是一组相互独立且服从 $N(0, \sigma_2)$ 的随机变量, $a_i, b_i, c_i (i=1,2)$ 分别为 A、B、C 各水平的效应,满足关系式:

$$\sum_{i=1}^2 a_i = \sum_{i=1}^2 b_i = \sum_{i=1}^2 c_i = 0, \quad (2)$$

将式(1)所有等式相加,并利用式(2)得到:

$$\sum_{i=1}^4 Y_i = 4\mu + \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i,$$

两边除以 4 得到:

$$\bar{Y} = \mu + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i.$$

显然考察对象 MGH956 合金钎焊件的高温抗拉强度 Y 的数学期望为 $E\bar{Y} = \mu$, 因此确定 μ 的无偏估计量 $\hat{\mu} = \bar{Y}$ 。

将式(1)的前两项求和,再除以 2,并利用式(2)得到 $\frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) = \mu + a_1 + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$, 由此确定 a_1 的无偏估计 $\hat{a}_1 = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) - \bar{Y}$, 同样的方法可以得到 a_2 的无偏估计 $\hat{a}_2 = \frac{1}{2}(Y_3 + Y_4) - \bar{Y}$ 。

同理可以确定式(1)中其他各参数的无偏估计,得到所有参数的无偏估计量为:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \bar{Y} \\ \hat{a}_1 = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_2) - \bar{Y} \\ \hat{a}_2 = \frac{1}{2}(Y_3 + Y_4) - \bar{Y} \\ \hat{b}_1 = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_3) - \bar{Y} \\ \hat{b}_2 = \frac{1}{2}(Y_2 + Y_4) - \bar{Y} \\ \hat{c}_1 = \frac{1}{2}(Y_1 + Y_4) - \bar{Y} \\ \hat{c}_2 = \frac{1}{2}(Y_2 + Y_3) - \bar{Y} \end{cases}, \quad (3)$$

可以验证 $\sum_{i=1}^2 a_i = \sum_{i=1}^2 b_i = \sum_{i=1}^2 c_i = 0$ 。

将 α_i 记为正交试验表中第 i 列为数码“1”对应的试验结果之和 ($i=A、B、C$)； β_i 为正交试验表中第 i 列为数码“2”对应的试验结果之和 ($i=A、B、C$)；有：

$$\begin{cases} \alpha_A=113 < \beta_A=141 \\ \alpha_B=118 < \beta_B=136 \\ \alpha_C=119 < \beta_C=135 \end{cases}, \quad (4)$$

说明在对 MGH956 合金进行焊接时, 试验考察的 3 个因素 $A、B、C$ 中, 较优的水平分别为 $A_2、B_2、C_2$, 即在其他条件相同的情况下, 采用钎料 KCo3 的焊接效果优于采用钎料 KNi10。经 1240℃ /10min 钎焊, 然后经过 1000℃ /30min 扩散处理的焊接接头的高温强度要高于 1240℃ /30min 钎焊的接头强度。焊缝间隙为 0.02mm 接头的高温抗拉强度比焊缝间隙为 0.05mm 的接头强度高。

将式(4)代入(3)可以得到：

$$\hat{a}_1 = \frac{\alpha_A}{2} - \bar{Y}, \quad \hat{b}_1 = \frac{\alpha_B}{2} - \bar{Y}, \quad \hat{c}_1 = \frac{\alpha_C}{2} - \bar{Y},$$

$$\hat{a}_2 = \frac{\beta_A}{2} - \bar{Y}, \quad \hat{b}_2 = \frac{\beta_B}{2} - \bar{Y}, \quad \hat{c}_2 = \frac{\beta_C}{2} - \bar{Y}.$$

2.2 计算因素的极差 R 并确定各因素的主次顺序

第 i 列因素的极差 $R_i = \max(\alpha_i, \beta_i) - \min(\alpha_i, \beta_i)$ ($i=A、B、C$),

$$\begin{cases} R_A=R_1=141-113=28 \\ R_B=R_2=136-118=18 \\ R_C=R_3=135-119=16 \end{cases},$$

得到 $R_A > R_B > R_C$ 。

极差的大小反映各因素作用的大小, 极差大的因素, 意味着对试验指标的影响较大, 由此 3 个因素的影响作用的主次顺序为 A (钎料成分)、 B (保温方式)、 C (焊缝间隙)。钎料成分起着最主要的作用, 由此可以看出, 对钎焊而言, 设计出合适的钎料是获得高质量焊接接头的关键因素; 由于 MGH956 材质材料本身的特殊性, 保温方式不同对焊接接头的强度也有很大影响; 焊缝间隙的选择, 也可以影响钎焊接头的力学性能。

2.3 选择较优生产条件和确定较优生产条件指标值

直接比较试验结果可以看出: 采用钴基钎料 KCo3 的钎焊试件接头强度优于采用 KNi10 的钎焊试件接头强度, 采用保温方式 1240℃ /10min 加 1000℃ /30min 焊接件的强度要优于采用 1240℃ /10min 的效果, 采用焊缝间隙为 0.02mm 的焊接件的接头强度要优于焊缝间隙为 0.05mm 的焊接件的接头强度。据此, 估计较优试验条件为 $A_2B_2C_2$, 即: 钎料选用 KCo3, 焊缝间隙选择 0.02mm, 保温方式是 1240℃ 保温 10min 加 1000℃ 保温 30min。

较优生产条件的指标值是: 钎料为 KCo3, 保温方式为 1240℃ 保温 10min 加 1000℃ 保温 30min, 焊缝间隙为 0.02mm。

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= \bar{y} + \hat{a}_2 + \hat{b}_2 + \hat{c}_2 \\ &= \bar{y} + \left(\frac{\beta_A}{2} - \bar{y}\right) + \left(\frac{\beta_B}{2} - \bar{y}\right) + \left(\frac{\beta_C}{2} - \bar{y}\right) \\ &= \frac{\beta_A}{2} + \frac{\beta_B}{2} + \frac{\beta_C}{2} - 2\bar{y} \\ &= \frac{141}{2} + \frac{136}{2} + \frac{135}{2} - 2 \times 63.6 \\ &= 79 \end{aligned}$$

说明在使用钎料 KCo3 焊接 MGH956 合金, 焊缝间隙选择 0.02mm, 经 1240℃ /10min 钎焊后经 1000℃ /30min 扩散处理后, 焊接接头 1000℃ 抗拉强度的数学期望为 79MPa。

对试验结果进行比较发现: 即使在同一批次, 相同的工艺参数下进行的钎焊试验, 不同试件的抗拉强度也有显著差异, 由于每批试验件的数量较少, 对各工艺参数下接头强度的数学期望存在一定的偏差。另外, 加热过程中, 真空度的优劣也是影响接头质量的一个工艺因素, 在试验的时候虽然尽量使其真空度保持一致, 但是仍存在一定的差异, 在进行正交分析的时候忽略其对试验结果的影响。因此, 作者认为正交分析的试验结果能反映较优的工艺参数值以及各工艺参数对接头性能影响的主次顺序, 但对最优生产条件指标值预测存在一定的偏差。

3 结论

本文以 MGH956 合金钎焊试验件的高温抗拉强度为考察对象, 以 A (钎料成分)、 B (保温方式)、 C (焊缝间隙) 为考察因素, 每个因素考察 2 个水平, 进行了正交试验, 并对试验结果进行分析, 得出如下结论。

(1) 3 个工艺参数中, 对焊接接头性能影响的先后顺序为: 钎料成分 > 保温方式 > 焊缝间隙。

(2) 通过正交试验分析, 较优的因素水平是: 钎料为 KCo3, 保温方式为 1240℃ 保温 10min 加 1000℃ 保温 30min, 焊缝间隙为 0.02mm。

参考文献

- [1] 侯金保, 张胜. 氧化物弥散强化合金过渡液相连接与检测技术研究. 北京: 北京航空制造工程研究所, 2001.
- [2] 田耘, 杨真. 民口配套研制项目可行性研究报告·高性能航空燃气涡轮动力技术用多孔层板结构 MGH956 合金的研制. 北京: 钢铁研究总院, 2002.

(责编 深蓝)