

2205/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头 组织结构及扩散过程分析

吴文杰, 张万欣, 胡亚真
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对新型双相不锈钢 2205 与奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 进行钎焊性试验。通过设计波纹板结构模盒, 模盒爆破强度试验, 开展钎焊接头微观组织结构分析, 钎焊接头元素扩散行为及其影响分析, 钎焊接头元素扩散能力计算分析, 结果认为 2205 与 1Cr18Ni9Ti 钎焊可形成结合强度优良的钎焊接头。

关键词: 2205 不锈钢; 模盒试验; 组织结构分析; 钎焊接头

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 01-0060-05

Analysis on microstructure and diffusion process of 2205/1Cr18Ni9Ti brazed joint

WU Wenjie, ZHANG Wanxin, HU Yazhen
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The brazability of new duplex stainless steel 2205 and Austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti was tested. The microstructure, element diffusion behavior and its effect of the brazed joint were analyzed by the bursting strength tests of designed mould box specimens with corrugated plate structure. And the element diffusibility of the brazed joint was analyzed as well. It's found that the reliable brazed joint with excellent bonding strength can be formed by the brazing of 2205 stainless steel and Austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti.

Keywords: 2205 stainless steel; mould box specimen test; microstructure analysis; brazed joint

0 引言

新型不锈钢 2205 名义牌号 022Cr22Ni5Mo3N, 目前在我国船舶、化工等领域已是应用比较普遍的双相不锈钢品种^[1-2]。2205 属超低碳

双相不锈钢, 在保证优良力学性能及抗腐蚀性能的同时, 不加入 Ti 元素, 从而避免了 Ti (C, N) 类夹杂物在钢中聚集分布的可能性。1Cr18Ni9Ti

收稿日期: 2016-08-09; 修回日期: 2016-09-13

作者简介: 吴文杰 (1982—), 男, 工程师, 研究领域为材料金相分析

属奥氏体不锈钢,是目前应用较为普遍的不锈钢之一^[3-4]。本试验设计波纹板结构模盒^[5-6],使用 2205 作为盖板材料,与 1Cr18Ni9Ti 制作的波纹板、底板进行模盒钎焊试验。通过模盒爆破强度试验并开展钎焊接头微观组织结构分析,钎焊接头各元素扩散行为及其对接头组织性能的影响分析,接头主要元素相互扩散能力计算分析等,研究 2205 与 1Cr18Ni9Ti 波纹板结构的钎焊性。

1 试验方案设计

盖板选用壁厚 2 mm 的 2205 板材,波纹板与 1 mm 厚底板选用 1Cr18Ni9Ti 板材,装配结构如图 1 所示,钎焊接头选用 $\delta 0.12$ mm 的 1# 合金带材作为钎焊料。采用真空钎焊方法,钎焊温度 1 100 ℃,保温 25 min。X 光无损检查焊后钎料

漫流填充情况,钎焊后模盒通过液压爆破试验考核钎焊接头的连接强度。试验件共计 10 件。模盒所用原材料化学成分见表 1。

爆破试验使用 M700-41 型试验机,焊接接头微观结构观察使用德国徕卡 LEICA MEF4M 型金相显微镜,接头元素浓度分布分析使用牛津 OXFORD6647 型能谱仪。

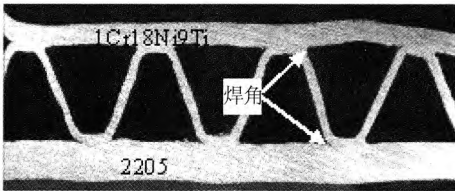


图 1 模盒装配结构

Fig. 1 Assembly structure of mould box specimen

表 1 模盒试验件所用原材料化学成分

Tab. 1 Chemical composition of raw material used by box specimen

材料牌号	化学成分							
	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	Ti	N
	含量/%							
2205	0.59	1.06	21.93	5.73	3.31	余	—	0.14
1Cr18Ni9Ti	0.61	1.77	17.26	9.20	—	余	0.62	—
1# 合金	—	69.88	4.88	25.29	—	—	—	—

2 试验结果及分析

2.1 钎焊模盒液压爆破试验结果及分析

10 件钎焊模盒 X 光检查均未发现未焊上现象,液压爆破试验爆破压强范围 50~56 MPa,平均爆破压强 53.1 MPa,大于工艺规定的 50 MPa 爆破值要求。爆破后模盒形貌如图 2 所示。从模盒爆破断口观察,爆破鼓起均为 1Cr18Ni9Ti 底板侧,且大部分断口位于波纹板基体,2205 侧钎焊接头则连接牢固。底板鼓起是由于 1Cr18Ni9Ti 壁厚较薄,但大部分从波纹板基体撕裂现象证明,钎缝连接强度高于波纹板基体强度。由此可见 2205 盖板与 1Cr18Ni9Ti 波纹板通过 1# 合金钎焊可形成结合强度优良的钎焊接头。

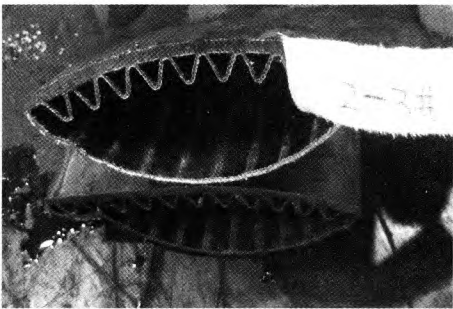


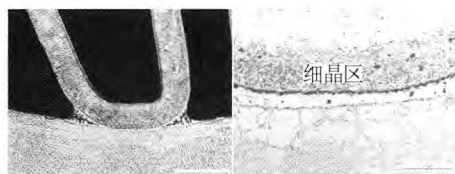
图 2 爆破试验后模盒形貌

Fig. 2 Box specimen morphology after bursting test

2.2 钎焊接头微观组织结构分析

10 件爆破模盒 2205 盖板与 1Cr18Ni9Ti 波纹板侧钎焊接头均未发生鼓起开裂现象,本试验仅

对 2205 与 1Cr18Ni9Ti 钎焊接头微观组织结构进行分析。金相观察, 钎焊缝钎料填充饱满, 钎角钎料堆积较为充足, 钎焊缝宽度 $40\ \mu\text{m}$ 至 $50\ \mu\text{m}$, 钎焊缝整体形貌如图 3(a)所示。



(a) 钎焊接头整体形貌 (b) 钎缝高倍形貌

图 3 模盒 2205 侧钎焊接头微观形貌

Fig. 3 Brazed joint microstructure of box specimen made by 2205 stainless steel

2205 侧基体经过钎焊高温后, 在靠近钎缝 $0.3\ \text{mm}$ 宽度范围内铁素体晶粒迅速粗化, 而奥氏体相 (γ) 相应减少。根据双相不锈钢相变特点, γ 相在高温是不稳定的, 随着加热温度的升高, 铁素体相逐渐增多, 甚至有 γ 相消失的现象。但本试验铁素体长大仅在靠近钎缝附近 $0.3\ \text{mm}$ 范围内, 该区域 γ 相含量仅在 25% 水平, 而远离焊缝的基体则维持着基本的相比比例平衡, 奥氏体及铁素体含量各占 50%, 这种现象显然与钎焊缝 1# 合金钎料的扩散作用密切相关。1# 合金作为 Mn 基钎料, 虽然 Mn 和 Ni 元素是奥氏体稳定元素, 但其在 2205 基体的扩散作用并不足以阻止铁素体晶粒长大, 相反元素强烈的互扩散作用所引起的浓度起伏, 促进了两类稳定元素的再分布, 提供了铁素体晶界扩长的相变驱动力, 因此会出现在钎缝附近铁素体的长大增多现象。在铁素体晶界, 可看到奥氏体呈不规则形态向铁素体晶粒内生长, 这主要是高温冷却过程中形成的二次奥氏体 γ_2 。大量研究表明^[7-10], 过大比例的铁素体, 尤其是 γ 相比比例低于 20% 时, 会降低双相钢基体的韧塑性能以及抗腐蚀能力, 本试验奥氏体含量在 25%, 基本满足相比比例控制要求。

1Cr18Ni9Ti 波纹板侧在距钎缝 $0.1\ \text{mm}$ 范围内形成细晶区, 这主要是因为钎焊升温过程中, 伴随钎料 Mn 和 Ni 元素向 1Cr18Ni9Ti 基体的扩散, 大量 γ 相重新形核并长大, 但在扩散成分的

阻碍作用下, 同时钎焊过程提供晶粒长大所需热能不足, 重新奥氏体化的晶粒形成一层相对于基体的细晶区, 如图 3(b)所示。根据奥氏体不锈钢特点, 细晶奥氏体对材料基体韧性有利, 因此 1Cr18Ni9Ti 侧的组织相对较为理想。

2.3 钎焊接头元素分布及影响分析

由钎焊接头基体及钎料主要元素能谱线扫描结果可知, 钎缝中 Mn 和 Ni 元素均已向两侧基体扩散, 但主要仍分布于钎缝中。2205 侧 Mo 元素向钎焊缝有一定程度的扩散。Cr 和 Fe 元素由于在两侧基体浓度均高于在钎料中的浓度, 所以发生由两侧基体向钎缝中扩散现象, 但扩散浓度仍低于两侧基体。

为定量分析钎焊缝及两侧近距离元素浓度分布规律及其影响, 用能谱点扫描分析 10 个点的元素浓度, 点间隔为 $8.4\ \mu\text{m}$, 10 点分布情况如图 4 所示, 其中 1 至 3 点位于 2205 侧, 4 至 7 点位于钎缝, 8 至 10 点位于 1Cr18Ni9Ti 侧。由定量分析结果可知, 经历高温扩散过程后, 2205 侧基体各元素分布浓度仍遵循两相分布规律, Cr、Ni 元素在 2205 侧基体浓度存在起伏, 引起了 α 与 γ 相重新分布的变化, 图 4 中 1 点 Cr 和 Ni 含量分别为 20.16% 和 7.10%, 与 γ 相成分一致; 而 2 点 Cr 和 Ni 含量分别为 23.62% 和 5.54%, 与 α 相成分一致, 3 点与 2 点相同。同时因为 Mn 和 Mo 元素在两相中的溶解度不同, 也存在相同的浓度分布规律, 即 1 点浓度 Mn 高 Mo 低, 2 点和 3 点浓度 Mn 低 Mo 高。钎缝内元素扩散后, 主成分 Mn 被 Fe 元素取代, Fe 浓度最高达到 53.62%, 同时 Cr 向钎缝中也有大量扩散, 最高浓度达到 14.90%, Mn 浓度大幅下降, Ni 浓度下降幅度不大, 随着 Ni、Cr 元素在钎缝中总体比重增大, 同时微量 Mo 元素的进入, 可显著提高钎焊缝的抗腐蚀性能。在钎缝中心因为 Mn 元素的扩散作用, 在原位形成细微空穴, 将成为应力条件下裂纹扩展的源区。在波纹板 1Cr18Ni9Ti 侧, Mn、Ni 元素与 γ -Fe 无限互溶, 在以奥氏体为基体的 1Cr18Ni9Ti 中扩散则比较容易, 浓度相对较高, 同时在扩散过程中为 γ 相重新形核长大提供条件, 促使靠近钎缝区域基体形成奥氏体细

晶区, 有利于提高材料基体的韧性性能。

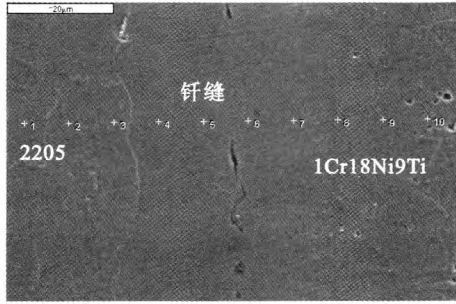


图 4 钎缝及两侧能谱分析点分布情况

Fig. 4 Distribution of energy spectrum analysis points at brazing seam and its two sides

2.4 钎焊过程元素扩散能力的计算

2.4.1 扩散系数求解模型建立

为反映在本试验钎焊高温条件下, 钎焊接头主要元素的相互扩散能力, 根据金属学原理定量计算主要元素扩散系数, 以便于今后对钎焊参数下主要元素扩散程度进行预测。扩散系数求解数学模型是根据经典 A·Fick 扩散第二定律: $\frac{\partial C}{\partial t} =$

$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$, 为求解方便, 认为与扩散物质浓度无

关, 通常作为常数处理。详细推导过程不再赘述, 利用边界条件和初始条件可得 (1) 式:

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} - \frac{C_2 - C_1}{2} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1)$$

式中: C_1 为基体某一元素含量; C_2 为扩散元素初始时刻初始位置含量。

假设各元素扩散互不影响, 引入中间变量后, 利用误差函数表查出 β 值, 进一步计算出某点扩散系数 D 值, 其中 $t=1\ 500\ \text{s}$ 。

2.4.2 Mn 元素扩散系数的计算与分析

Mn 作为钎料主要元素, 钎焊后在钎缝中浓度大幅下降, 虽然两侧基体中 Mn 浓度并不高, 但其仍作为主要扩散元素对两侧基体产生影响, 因此有必要对其扩散系数进行计算。用能谱点扫描分析 2205 侧和 1Cr18Ni9Ti 侧各 20 个点元素浓度, 能谱点间距分别为 2205 侧 $26.6\ \mu\text{m}$, 1Cr18Ni9Ti 侧 $24.9\ \mu\text{m}$, 以焊缝中心为原点建立一维坐标系。根据能谱定量分析结果得出各点

Mn 元素实测 C 值, 由 (1) 式计算出在每个点的扩散系数, 然后求出扩散系数平均值 D_{Mn} , 其中 2205 侧基体 $C_1=1.06\%$, $C_2=69.88\%$; 1Cr18Ni9Ti 侧基体 $C_1=1.77\%$, $C_2=69.88\%$ 。利用得到的 D_{Mn} 值再根据 (1) 式求解出 Mn 元素在各点浓度的计算值, 并与实测值进行比较, 分析求解的扩散系数 D_{Mn} 的拟合性。

通过计算的得出 Mn 在两侧基体的平均扩散系数为 $D_{\text{Mn-2205}}=4.30 \times 10^{-8}\ \text{cm}^2/\text{s}$, $D_{\text{Mn-1Cr18Ni9Ti}}=4.65 \times 10^{-8}\ \text{cm}^2/\text{s}$ 。利用扩散系数 D_{Mn} 计算得出的 Mn 元素在 2205 基体和 1Cr18Ni9Ti 基体分布浓度与实测值比较图如图 5~6 所示。

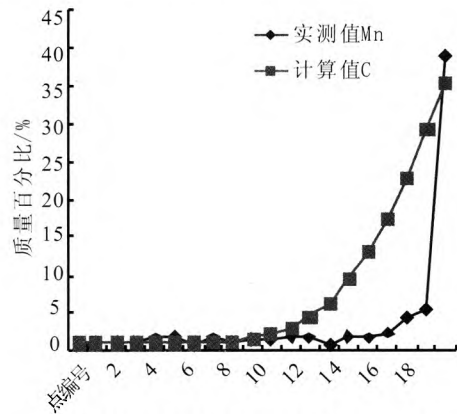


图 5 Mn 在 2205 侧含量计算与实测值

Fig. 5 Calculated values vs. measured values of Mn content on 2205 stainless steel side

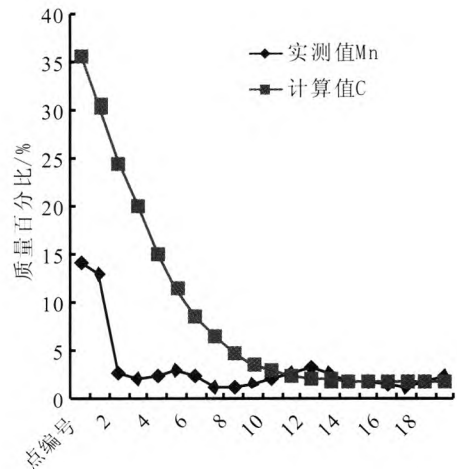


图 6 Mn 在 1Cr18Ni9Ti 侧含量计算与实测值

Fig. 6 Calculated values vs. measured values of Mn content on 1Cr18Ni9Ti side

由图5和图6 Mn元素浓度计算值与实测值比较可知,在靠近钎缝中心约100 μm 范围内, Mn元素浓度的吻合性较差,尤其距离钎缝越近差异性越大,造成这种差异的原因一是由于实际 D 值往往是随浓度变化的,求解过程中发现距离钎缝越远处 D 值越大。二是测试点的随机性,会导致越靠近焊缝位置,所用数据偏离实际越多。但从元素扩散深度比较,两者吻合性较好,从焊接工艺预测方面考虑,虽然成分浓度有一定误差,但也可在一定程度上反映出钎料元素扩散情况,扩散系数与钎焊温度、时间均有密切关系,对扩散不充分、求解的扩散系数低于本试验所得数值情况下,则需确认扩散温度与时间是否在要求范围之内、或者真空度等其他引起的扩散系数降低的因素,扩散系数的求解对工艺改进仍具有指导作用。

3 结论

1) 试验模盒钎缝钎料填充饱满,液压爆破平均压强 53.1 MPa, 2205 盖板与 1Cr18Ni9Ti 波纹板通过 1# 合金钎焊可形成结合强度优良的钎焊接头。

2) 钎焊接头 2205 侧基体靠近钎缝 0.3 mm 范围内铁素体长大,相含量占比 75%; 1Cr18Ni9Ti 侧基体靠近钎缝 0.1 mm 范围形成一层奥氏体细晶区,有利于提高波纹板韧性。

3) 钎焊扩散规律为 Mn 和 Ni 向两侧基体扩散, Fe, Cr 和 Mo 向钎缝扩散; 钎缝内元素扩散后,主成分 Mn 被 Fe 取代, Ni, Cr 和 Mo 在钎缝中总体比重增大,可提高抗腐蚀性能。Mn 和 Ni 向 1Cr18Ni9Ti 中扩散促进了奥氏体细晶的形核。

4) 本试验条件下 Mn 元素扩散系数求解为 $D_{\text{Mn-2205}}=4.30 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$, $D_{\text{Mn-1Cr18Ni9Ti}}=4.65 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$,

可一定程度上反映出钎料扩散情况,对工艺改进具有指导作用。

参考文献:

- [1] 干勇,田志凌.钢铁材料工程 [M].北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 余明辉,王晋宝,游江,等.2205 双相不锈钢的焊接工艺研究综述[J].中国水运,2012,12(9): 79-81.
- [3] 晁代义,核电用 2205 双相不锈钢组织与性能的研究 [D].烟台:烟台大学,2013.
- [4] 李吉承.2205 双相不锈钢焊接接头组织与耐蚀性研究 [D].辽宁:辽宁石油大学,2010.
- [5] 单黎波,金作花,贺云龙,等.液体火箭发动机钎焊、扩散焊质量检测技术研究[J].火箭推进,2009,35(6): 47-51.
SHAN Libo, JIN Zuohua, HE Yunlong. Testing techniques of brazing and diffusion welding quality of liquid rocket engine[J]. Journal of rocket propulsion, 2009, 35(6): 47-51.
- [6] 李薇.钢-钢钎焊件冷却通道防堵塞工艺[J].火箭推进,2010,36(6): 42-45.
LI Wei. Anti-blocking technics of cooling channels of steel-steel brazed components[J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(6): 42-45.
- [7] 杨卓越.1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢相变及脆化倾向性研究 [D].北京:钢铁研究总院,2004.
- [8] 李继红,唐江,张敏.固溶处理对 2205 双相不锈钢焊接接头组织与性能的影响[J].金属热处理,2013,8(7): 13-16.
- [9] 李为卫,高荣,吉玲康,等.线能量对 2205 双相不锈钢焊缝及热影响区组织的影响[J].热加工工艺,2007,36(3): 7-9.
- [10] 张帅谋,王小平,陈彪,等.2205 钢不同焊接方法接头 CTOD 断裂韧性试验及分析 [J].热加工工艺,2013,42(3): 140-142.

(编辑: 陈红霞)