

GH3536 蜂窝钎焊界面组织与性能

静永娟¹, 贾崇林², 刘尧², 李思思¹, 尚泳来¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 焊接与塑性成形研究所, 北京 100095; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

摘要: 针对 GH3536 高温合金开展研究, 以提供一种用于小芯格且薄壁的高温合金蜂窝的高强度钎焊工艺。采用芯格内切圆直径为 0.8 mm、蜂窝壁厚为 0.05 mm 的 GH3536 蜂窝, 使用 BNi2 粘带钎料, 优化了钎料用量、分析了不同钎料用量对应钎焊蜂窝界面组织形貌, 并测试了 GH3536 蜂窝元件的拉伸性能、压缩性能及弯曲强度, 评价 GH3536 蜂窝元件的基础力学性能。结果表明, 所获得蜂窝结构焊合率达到 99.5%; 钎焊蜂窝界面晶粒细小、组织均匀、无钎缝溶蚀; GH3536 蜂窝元件具有优异强韧性、平面抗拉强度达到 50 MPa。

关键词: GH3536 合金; 蜂窝结构; 钎焊; 界面组织; 强度

中图分类号: TG454 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220331001

Microstructure and properties of honeycomb brazed interface for GH3536 alloy

Jing Yongjuan¹, Jia Chonglin², Liu Yao², Li Sisi¹, Shang Yonglai¹

(1. Welding and Plastic Forming Division, Aero Engine Corporation of China Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Aero Engine Corporation of China Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The study on GH3536 superalloy was carried out to provide a high-strength brazing process for small core grid cutting thin-walled superalloy honeycomb. GH3536 honeycomb with inner tangent circle diameter of 0.8 mm and honeycomb wall thickness of 0.05 mm was adopted. BNi2 adhesive brazing filler metal was used to optimize amount of brazing filler metal and analyze microstructure of brazed honeycomb interface corresponding to different amount of brazing filler metal. Tensile properties, compressive properties and bending strength of GH3536 honeycomb component were tested to evaluate its basic mechanical properties. The result showed that welding rate of honeycomb structure reached 99.5%. Brazed honeycomb interface had fine grains, uniform microstructure and no brazing seam corrosion. GH3536 honeycomb component had excellent strength and toughness, and plane tensile strength reached 50 MPa.

Key words: GH3536 superalloy, honeycomb structure, brazing, interface microstructure, strength

0 前言

封严件工作于高温、高压且具有腐蚀性气体冲刷的环境, 要求蜂窝材料必须有良好的耐高温、抗氧化和耐腐蚀能力^[1-4]。目前, 航空发动机封严结构采用蜂窝材料主要是高温合金, 如 GH3536 合金。GH3536 合金具有良好的抗氧化和蠕变强度, 冷、热加工成形

性和焊接性良好^[5-8]。中国研制了 GH3536 高温合金, 是一种利用 Cr 和 Mo 元素固溶强化及碳化物强化的镍基变形高温合金, 其综合性能水平相当于美国航空发动机生产中用量最大的高温合金 Hastelloy X。中国某型发动机燃烧室和加力燃烧室共计 118 个零件选用了 GH3536 合金^[9-12]。高温合金蜂窝封严结构涉及到钣金件的弯曲成形、箔材波纹带冷成形、蜂窝

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51804286); 北京市自然科学基金项目 (3212014); 装备预先研究基金项目 (6141C26)。

环制造及组件整体装配和整体钎焊等多个工序^[13-19]。在钎焊技术方面多涉及接头性能评价、焊接工装设计及结构件制备技术等,但对于蜂窝钎焊界面微观组织分析、元素扩散等基础工艺方面,尚且需要深入研究和必要的工艺优化,以提高构件的焊接质量。

采用 BNi_2 钎料及 GH3536 合金蜂窝开展钎焊工艺研究与元件性能评估,研究结果为 GH3536 蜂窝制品钎焊技术提供参考。

1 试验及方法

试验所用 GH3536 合金为箔带材料,厚度为 0.05 mm;将箔带裁剪为 5.5 mm 宽度的条带、并采用专用模具制备为六边形芯格(内切圆直径为 0.8 mm)对应的波纹带。采用电阻点焊方法将波纹带拼焊为一定尺寸规格且平面形状的蜂窝芯体。使用 BNi_2 粘带钎料(钎料熔化曲线如图 1 所示)、粘带厚度为 0.5 mm,其中粉末比例为 90%~92%;将粘带钎料均匀压制于蜂窝芯体内部。设计钎料用量为 1 层和 2 层钎料。采用 2 mm 厚度的 GH3536 板材作为蜂窝元件的上下面板材料。将上下面板、装配好焊料的蜂窝芯体在垂直方向对中,利用焊接工装保证组件之间精密贴合。采用真空钎焊炉(真空度不低于 1×10^{-3} Pa)和 $1050^\circ\text{C} \times 15 \text{ min}$ 参数将组件间钎焊为蜂窝元件。测试室温下 GH3536 蜂窝元件的抗拉强度、弯曲强度及抗压强度,采用扫描电镜观察 GH3536 蜂窝界面组织形貌。试验涉及到钎焊技术和检测标准包括 JY/T 0584—2020《扫描电子显微镜分析方法通则》、GB/T 17359—2012《微束分析能谱法定量分析》、GJB 130.6—86《胶接铝蜂窝夹层结构和芯子平面剪切试验方法》及 Q/AVIC-03040—2015《蜂窝封严件的真空钎焊工艺》。

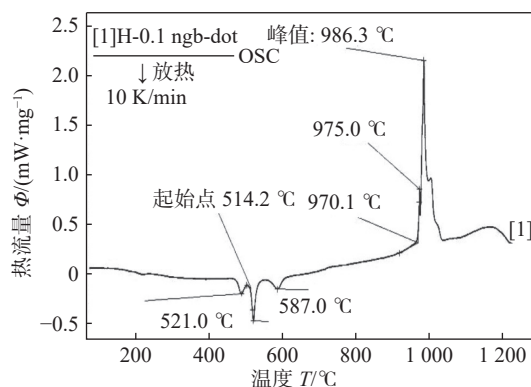


图 1 BNi_2 粘带钎料熔化情况

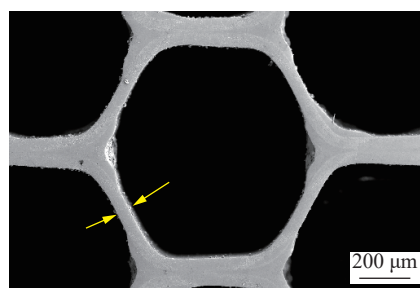
2 结果与讨论

2.1 钎焊 GH3536 蜂窝界面组织及界面元素分布

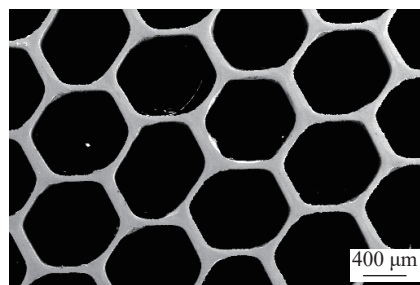
分别采用 1 层和 2 层粘带钎料对 GH3536 蜂窝元件进行钎焊,界面组织如图 2 所示。焊后蜂窝呈金属白亮色、未有氧化现象;芯格完整,无芯格变形、塌陷现象;蜂窝边缘未见溶蚀。该研究采用蜂窝规格仅为 0.8 mm(蜂窝对边距离),因此,钎料用量不当时,



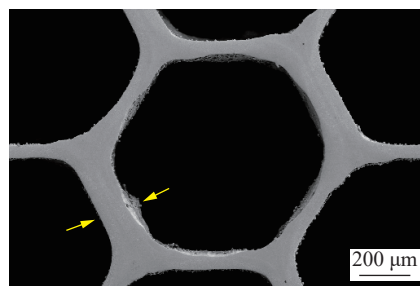
(a) 1 层钎料(低倍)



(b) 1 层钎料(高倍)



(c) 2 层钎料(低倍)



(d) 2 层钎料(高倍)

图 2 GH3536 蜂窝钎焊界面组织

将导致 GH3536 蜂窝结构的焊合率不足或发生蜂窝芯格堵孔。采用 1 层粘带钎料获得的 GH3536 蜂窝焊合率为 99.5%，且未见堵孔现象，如图 3 所示(尺寸 20 mm × 60 mm)。采用超声显微镜检测蜂窝元件，在个别样品一侧边缘部位出现局部未焊合，如箭头所示。分析认为这是由于边缘部位施加工装未达到钎焊间隙要求。此外，2 层粘带钎料下偶见蜂窝堵孔问题，堵孔率为 1%。

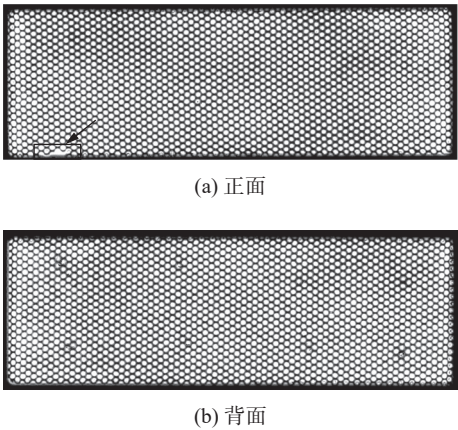


图 3 GH3536 蜂窝元件焊后超声 C 扫描图像

蜂窝未钎焊时，原始态蜂窝壁厚为 0.05 mm；蜂窝钎焊后，理论上蜂窝经焊接后连接部位由 3 部分组成，一侧蜂窝壁、对侧蜂窝壁及钎料。理论上焊接连接部位宽度是 0.05 mm + 0.05 mm + 0.5 mm = 0.6 mm。然而，由于一部分蜂窝壁材料将与钎料发生反应，导

致蜂窝壁厚度减少；同时，钎料中粘结剂将发生挥发，导致实际钎料用量不足于装配的钎料用量。因此，实际上钎焊蜂窝连接部位的宽度会远低于 0.6 mm。对比可见，1 层粘带钎料对应界面尺寸较小、组织更加细小。当钎料用量为 2 层时，蜂窝钎焊界面平均宽度为 38 μm，连接部位平均厚度为 130 μm(即 0.13 mm)；而在 1 层粘带钎料情况下，相应蜂窝钎焊界面的平均宽度为 18 μm，连接部位的平均厚度为 100 μm(即 0.1 mm)。可见，采用 1 层钎料，不仅保证该研究下蜂窝较高焊合率且蜂窝壁连接部分宽度小、钎焊界面较窄，有利于获得高强度连接接头。故采用 1 层焊料进行蜂窝性能测试元件的钎焊和力学性能评价。

钎焊蜂窝界面元素包含钎料元素和基体材料元素。Ni 元素占 73.6%，Cr 元素占 9.3%，C 和 Fe 元素均为 6.0%，其与元素包括 Si, Mo, W 元素。而 Co 元素与 B 元素几乎为零。GH3536 蜂窝元件界面元素分析结果如图 4 所示(1 层焊料情况)。蜂窝胞壁三边界面可以划分为两类区域：一类为三角形区域 I，一类为胞壁区域 II。Si 元素含量较少，集中分布在三角形界面区域，Ni 元素同时存在于胞壁和界面部位；相比胞壁，界面处 Ni 元素含量更多，这主要归因于钎料中含有大量 Ni 元素；钎料中 Ni 含量远高于基体材料中 Ni 含量。

2.2 钎焊 GH3536 蜂窝元件力学性能

对采用 1 层钎料钎焊的 GH3536 蜂窝元件进行抗拉强度、弯曲强度和抗压强度测试。采用试样规

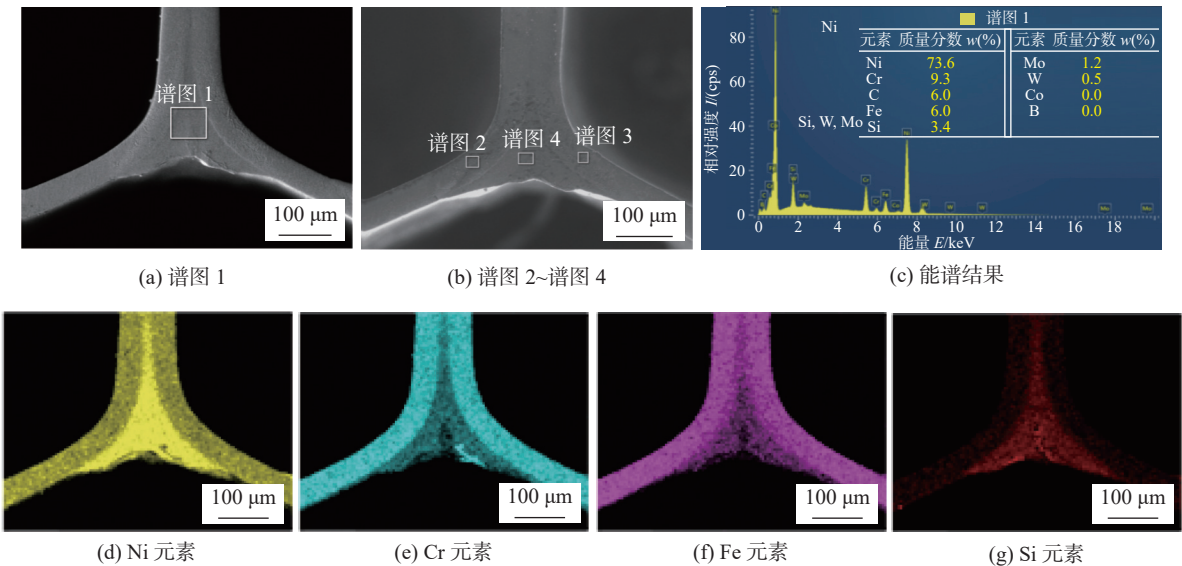


图 4 GH3536 蜂窝元件界面元素分析

格依次为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, $60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 和 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 结果见表1, 元件厚度均为 9.5 mm 。室温下钎焊 GH3536 蜂窝元件具有优异的强度; 平面抗拉强度分别为 50 MPa , 50 MPa 和 53 MPa 。此外, 钎焊 GH3536 蜂窝元件的三点弯曲强度及平面抗压强度分别达到了 700 MPa 和 200 MPa 以上。在三点弯曲测试试验中, 元件发生芯体破裂后撤掉载荷; 在平面抗压试验中, 元件发生失稳、但未破坏。

表1 GH3536 蜂窝元件力学性能

平面抗拉强度 R_m/MPa	三点弯曲强度 R_b/MPa	平面抗压强度 R_c/MPa
50, 50, 53	718, 720, 768	202, 206, 205

2.3 钎焊 GH3536 蜂窝元件的失效分析

图5为 GH3536 蜂窝元件失效图片。经受力方向与蜂窝平面垂直的拉伸加载后, 芯体发生撕裂而芯体与面板之间未破坏; 因此, 所测强度数值为钎焊 GH3536 蜂窝的强度水平。相应蜂窝平面为 $50\text{ mm} \times$

50 mm 。GH3536 蜂窝部位起裂于四周边缘、然后向芯部扩展, 最后失效。每个蜂窝芯格断面与拉伸方向呈 $30^\circ \sim 60^\circ$, 而非 90° 垂直撕裂, 故整体焊接芯体具有良好的塑韧性。钎焊 GH3536 蜂窝元件经三点弯曲(尺寸 $20\text{ mm} \times 60\text{ mm}$)试验后, 元件发生目视可见的明显的塑性变形, 芯体部位 S 形变形表明焊接芯体具有优异的塑性。元件最大变形部位是轴向中部, 以此为中心、两侧发生芯体扭曲, 在某一侧发生芯体破坏后元件失效。以上焊接 GH3536 蜂窝元件的失效模式表明所用焊接工艺合理, 且反映出 GH3536 蜂窝用箔材的强韧性匹配较好。

3 结论

(1) 采用单层 BNi2 粘带钎料, 厚度为 0.5 mm , 以及 $1050\text{ }^\circ\text{C} \times 10\text{ min}$ 工艺参数进行钎焊, 焊后 GH3536 蜂窝呈金属白亮色、未有氧化现象; 蜂窝芯格完整、无芯格变形且蜂窝无塌陷。

(2) 钎焊 GH3536 蜂窝(六边形蜂窝单元的对边距离 0.8 mm) 薄壁部位无溶蚀, 蜂窝界面晶粒细小、组织均匀, 蜂窝元件焊合率达到 99.5% 。

(3) GH3536 蜂窝经钎焊后具有优异的强韧性; 且蜂窝元件平面抗拉强度达到 $50 \sim 53\text{ MPa}$ 。钎焊 GH3536 蜂窝元件的三点弯曲强度及平面抗压强度水平分别达到了 $718 \sim 768\text{ MPa}$ 和 $202 \sim 206\text{ MPa}$ 。

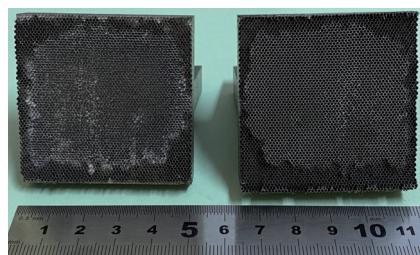
(4) 在拉伸载荷下钎焊 GH3536 蜂窝元件失效于蜂窝芯体, 且蜂窝单元呈剪切撕裂方式; 在弯曲载荷下蜂窝芯体呈现明显 S 形变形, 故钎焊 GH3536 蜂窝具有优异的塑性。

参考文献

- [1] 刘亚洲, 宋晓国, 程危危, 等. 钎焊超薄 GH99 蜂窝夹层结构力学性能分析[J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 1-7.
- [2] 马瑞, 刘林川, 王亚军, 等. 固溶温度对激光粉末床熔化 GH3536 合金组织演变及力学性能影响[J]. 焊接学报, 2022, 43(8): 73-79.
- [3] 陆业航, 李晋炜, 张庆云, 等. GH3536 高温合金电子束焊组织及显微硬度分析[J]. 焊接, 2010(9): 47-50.
- [4] 康丹丹, 赖世强, 欧亚. GH3030 高温合金焊接工艺性分析及评定[J]. 金属铸锻焊技术, 2010, 39(11): 165-167.
- [5] 李勇, 许鹤君, 巴发海. GH6336 合金的蠕变性能及蠕变行为[J]. 理化检验—物理分册, 2019, 55: 289-320.
- [6] Ojo O A, Richards N L, Chaturvedi M C. Microstructural study of weld fusion zone of TIG welded IN 738LC nickel-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2014, 51(7): 683-



(a) 拉伸元件



(b) 拉伸元件断口



(c) 失效弯曲元件

图5 GH3536 蜂窝元件失效图片

- 688.
- [7] Schramm V, Willenborg K, Kim S. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(1): 140 – 146.
- [8] 魏振伟, 刘昌奎, 顾玉丽, 等. GH536镍基高温合金焊接接头力学性能与断裂特征研究[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(5): 70 – 74.
- [9] Li J, Li Z G, Feng Z P. Numerical investigations on the leakage and rotordynamic characteristics of pocket damper seals—part I: effects of pressure ratio, rotational speed, and inlet preswirl[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(3): 1 – 15.
- [10] 杨烁, 杜静, 李文学. 重型燃机蜂窝结构真空钎焊工艺技术研究[J]. *工业技术*, 2011, 24: 185.
- [11] 许鹏, 康慧, 曲平. 铜对调剂钎料钎焊Ti₃Al和GH3536的影响[J]. *中国稀土学报*, 2007, 25(2): 253 – 256.
- [12] 徐卫平, 白文彬, 邱望标. 蜂窝材料的真空钎焊工艺及应用[J]. *材料研究与应用*, 2008, 2(1): 71 – 74.
- [13] 姜立忠, 王智田, 王治国, 等. 高温合金冲压件翻孔成形工艺改进研究[J]. *冲压*, 2014(1): 73 – 76.
- [14] 刘艳辉, 童国权, 王辉, 等. GH99高温合金蜂窝条的制备及力学性能[J]. *机械工程材料*, 2013, 37(2): 82 – 85.
- [15] 陈秀秀, 晏鑫, 李军. 蜂窝叶顶密封对透平气动性能的影响研究[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(4): 1 – 7.
- [16] 李志刚, 李军, 丰镇平. 蜂窝密封流动特性的数值研究和泄漏量计算公式的构造[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 142 – 148.
- [17] 李军, 邓清华, 丰镇平. 蜂窝汽封和迷宫式汽封流动性能比较的数值研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(16): 108 – 111.
- [18] 李志刚, 宁霄, 晏鑫. 蜂窝面迷宫密封泄漏特性和鼓风加热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(6): 1196 – 1200.
- [19] 吕江, 何立东, 王晨阳. 蜂窝密封在小功率汽轮机轴端密封上的应用[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(6): 90 – 94.
-
- 第一作者:** 静永娟, 博士, 高级工程师; 主要从事航空领域金属材料钎焊与扩散焊技术研究; 已发表论文30余篇; jingyongjuan1982@126.com。
- (编辑: 王龙权)

本文引用格式:

静永娟, 贾崇林, 刘尧, 等. GH3536 蜂窝钎焊界面组织与性能[J]. *焊接*, 2023(3): 22 – 26.

Jing Yongjuan, Jia Chonglin, Liu Yao, et al. Microstructure and properties of honeycomb brazed interface for GH3536 alloy[J]. *Welding & Joining*, 2023(3): 22 – 26.

(上接第 21 页)

- [70] Chandra N. 超塑性工业应用展望[J]. *航空工艺技术*, 1998(1): 2 – 5.
- [71] 许晓静. SiC晶须增强纯铝基复合材料的高应变速率超塑性[J]. *江苏理工大学学报(自然科学版)*, 1999, 20(2): 55 – 58.
- [72] 王齐伟, 左秀荣, 黄晓辉. 镁合金超塑性的研究现状及发展趋势[J]. *世界有色金属*, 2008(7): 54 – 55.
- [73] Hsiao I C, Huang J C, Su S W. Grain structure, texture evolution and deformation mechanism during low temperature superplasticity in 5083 Al-Mg alloy[J]. *Materials Transactions*, 1999, 40(8): 744 – 753.
- [74] Luo T, Ni D R, Xue P, et al. Low-temperature superplasticity of nugget zone of friction stir welded Al-Mg alloy joint[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 727: 177 – 183.
-
- 第一作者:** 韩莹, 硕士研究生; 主要从事铝合金超塑性的研究; hychina10@163.com。
- (编辑: 王龙权)

本文引用格式:

韩莹, 何实, 吕晓春, 等. 粗晶铝合金超塑性变形机理的研究现状[J]. *焊接*, 2023(3): 11 – 21, 26.

Han Ying, He Shi, Lü Xiaochun, et al. Research status of superplastic deformation mechanism of coarse-grained aluminum alloys[J]. *Welding & Joining*, 2023(3): 11 – 21, 26.