

GH4169-电铸镍异种金属 搭接接头电子束焊接工艺研究

刘 敏 张丽娜 马丽翠 王彦超 曹辉辉

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)



摘要: 结合型号产品焊接要求开展了限定下层进入熔深的 GH4169 与电铸镍搭接电子束焊接工艺试验, 进行了接头显微组织分析及断口检测分析。研究表明: 搭接间隙对焊缝横截面形貌及下层进入熔深有直接影响, 当装配间隙大于 0.7mm 时, 无法形成连续搭接焊缝; 增加焊接热输入可增大下层进入熔深, 束斑扫描功能有效增加了焊缝宽度及搭接面焊缝熔宽; GH4169 与电铸镍搭接接头断口呈现韧窝形貌, 为韧性断裂。

关键词: 搭接接头; GH4169; 电铸镍; 下层进入熔深

Study on Electron Beam Welding of GH4169-electroformed Nickel Dissimilar Metals Overlap Joints

Liu Min Zhang Lina Li Yue Wang Yanchao Cao Huihui

(Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

Abstract: According to the welding requirements of the model products, the electron beam welding technology test of GH4169-electroformed nickel dissimilar metals overlap joints which limit the lower penetration was carried out. The microstructure and fracture detection of the joints were analyzed. The results showed that the lap had a direct influence on the cross-section morphology of the weld and the lower layer penetration. When the assembly gap is larger than 0.7mm, continuous lap welds cannot be formed. The welding heat input can increase the lower layer penetration. Beam spot scanning function effectively increased the weld width and lap weld width. The fracture of GH4169 and electroformed nickel lap joints showed dimple morphology and ductile fracture.

Key words: overlap joints; GH4169; electroformed nickel; lower into the penetration

1 引言

GH4169 是时效强化镍基合金^[1~4], 在固溶合金基础上, 通过添加较多的铝、钛、铌和钽等元素而发展成的。这些元素除强化固溶体外, 还与镍结合形成共格稳定、成分复杂的金属间化合物, 同时, 铝、铜、硼元素与碳形成各种碳化物, 使合金的热强性大大提高。此外, 这类合金中还加入微量硼、锆和稀土元素, 形成间隙相, 强化晶界。电铸镍作为用电沉积方法获得的纯镍, 其耐腐蚀性、力学性能尤其是高温热稳定性优良。近年来, 随着航天发动机工作压力和热负荷的

提高, GH4169、电铸镍凭借优良的综合性能在航天发动机中受到广泛应用。

在焊接结构中, 搭接接头以其连接的灵活性优势被广泛应用于薄板构件连接、加强筋肋连接中。现役某航天型号发动机产品因材料强度和制造工艺的需求, 采用外层 GH4169 和内层电铸镍的异种金属搭接电子束焊接结构。电子束焊接作为高能量密度的一种焊接方法, 具有热输入量小、热影响区窄、焊接变形小、焊接效率高等优点, 通过电子枪产生的高速、高密度电子轰击待焊接区, 其固有的热冲击特性可获得不同于常规熔焊的焊缝形貌与焊缝组织, 其焊缝深宽

比更大^[5-6]。

某型号航天发动机产品结构复杂,要求下层进入电铸镍的熔深大于1.5mm且不大于4mm,基于型号需求开展限定下层进入熔深的GH4169与电铸镍搭接电子束焊接工艺试验,进行接头显微组织分析与性能检测,分析搭接间隙对下层进入熔深的影响,获得优化的电子束焊接工艺及满足设计指标的接头。

2 焊接结构及试验方案

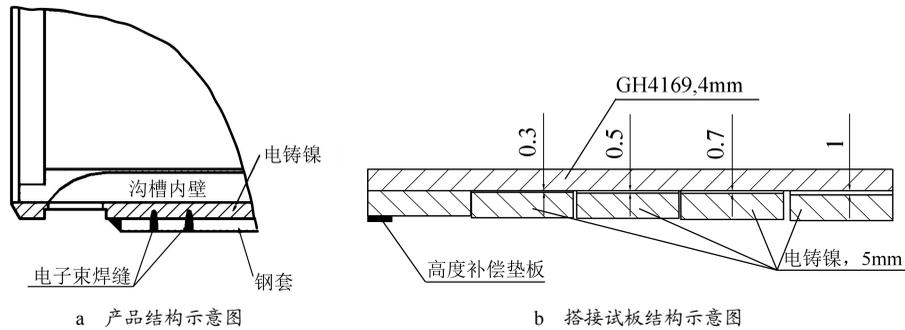


图1 焊接结构示意图

2.1 试验结构及材料

产品外层GH4169钢套厚度4mm,钣金成形;内层电铸镍厚度约5mm,机械加工型面,结构示意如图1a所示。因钣金成形工艺方法局限性导致钢套与电铸镍之间存在贴合同隙,对实际产品进行间隙测量,装配间隙具有随机性与不连续性,间隙范围为0~1mm。

试验试板热处理状态与产品一致,GH4169为固态,厚度4mm;电铸镍试板为退火态,厚度为5mm。搭接试板结构示意图如图1b所示。

2.2 试验方法

焊接试验采用真空电子束焊接,焊接设备型号为GENEOVA98。焊前使用无水乙醇或汽油清洗GH4169试板、电铸镍试板,保证待焊接面干净无油污。

结合实际产品装配状态,设计同一焊接参数不同间隙焊接试验与无间隙不同焊接参数焊接试验,试验参数选择如表1、表2所示。焊后对焊缝横截面、断口进行光学显微镜、扫描电镜分析。

表1 不同间隙(0~1mm)试板焊接参数

加速电压/kV	电子束流/mA	聚焦电流/mA	焊接速度/mm·min ⁻¹	工作距离/mm	配合间隙/mm
60	40	表面	1000	300	0~1

表2 无间隙试板焊接参数

焊缝编号	加速电压/kV	电子束流/mA	聚焦电流/mA	扫描波形	扫描频率/HZ	焊接速度/mm·min ⁻¹	工作距离/mm	扫描幅值/mm
1	60	40	表面	/	/	1000	300	/
2	60	40	表面	○形	1000	1000	300	1
3	65	40	表面	○形	1000	1000	300	1
4	65	45	表面	○形	1000	1000	300	1

3 试验结果及分析

3.1 焊缝显微组织分析

采用金相显微镜分析GH4169-电铸镍搭接试板电子束焊缝的横截面与纵截面,焊缝宏观形貌如图2所示,可见电子束焊缝横截面呈钉帽形状。其中,焊缝中心熔化期由柱状晶组成,焊缝熔合线清晰,因电子束焊缝的工艺特性无明显热影响区。焊缝纵截面腐蚀后金相观察可见焊缝根部熔深尺寸不稳定,沿着焊接

方向呈现锯齿状分布。这与电子束焊缝形成机理特征一致,与“匙孔”的形成相关。

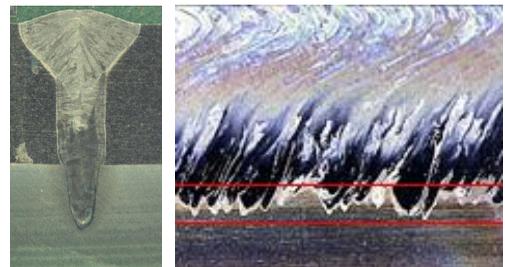


图2 焊缝横-纵界面形貌

3.2 间隙对焊缝成形的影响

采用表 1 焊接参数进行不同间隙 (0~1mm) 搭接试板的电子束焊接, 获得焊缝横截面形貌如图 3 所示,

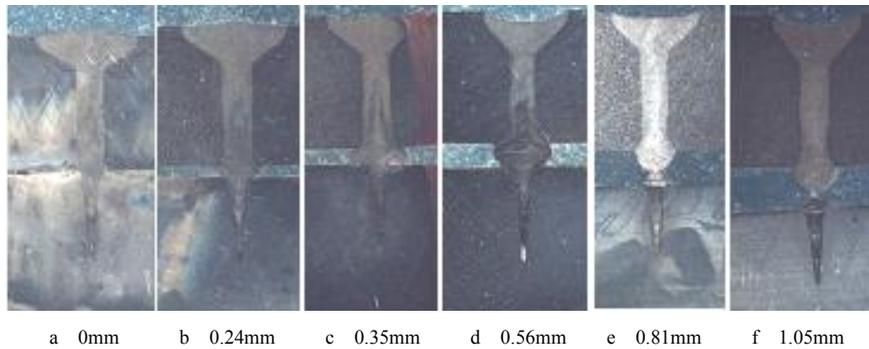


图 3 搭接间隙 (0~1mm) 对焊缝截面形貌的影响

表 3 焊缝横截面测量 mm

试样编号	焊缝总熔深	搭接间隙	下层表面熔宽	进入熔深
a	6.82	0	0.55	2.65
b	6.93	0.24	0.55	2.49
c	6.70	0.35	0.53	2.25
d	7.30	0.56	0.48	2.92
e	6.99	0.71	0.42	2.01
f	7.06	1.05	0.42	2.15

测量图 3 所示截面焊缝的几何参量, 测量结果见表 3。从图 3、表 3 中可以看出, 因 GH4169 与电铸镍材料物理化学性能差异^[7], 焊缝进入下层电铸镍时熔宽变窄。随着搭接间隙的增加, 焊缝的熔深和搭接接头结合面熔宽变得不稳定: 熔化区焊缝形貌逐渐从电子束焊缝典型“钉帽形”转变为“类纺锤型”至“断层形”。

当焊接间隙由 0 逐步增大至 1mm 时, 焊缝正面余高逐渐减少, 搭接间隙 $\geq 0.5\text{mm}$ 后, 焊缝正面成形出现凹陷 (图 3d、图 3e、图 3f)。

当 GH4169 与电铸镍搭接紧密无间隙时, 电子束液态熔池金属在“匙孔”效应下扎入下层金属, 形成良好的“钉帽形”焊缝形貌 (图 3a)。

当焊接间隙 $\leq 0.7\text{mm}$ 时, 液态金属蒸汽沿搭接间隙溢出, 且液态金属在间隙处溢出凝固形成较宽的间隙凝固金属; 间隙凝固金属的宽度随间隙的增大呈现正向相关, 分析认为, 间隙越大, 对熔融金属的容纳能力越大, 在此处热累积越多, 填充金属凝固速度相对较慢, 在间隙处的宽度较宽。反之, 间隙越小, 对

电子束焊缝均呈现钉帽形, 焊缝两侧熔合线清晰, 无气孔缺陷。

熔融金属的容纳能力越小, 在此处热累积越少, 填充金属凝固速度相对较快, 在间隙处的宽度较窄; 当间隙介于 0~0.7mm 时, 相同的焊接热输入获得的下层进入熔深基本保持相同, 分析认为, 焊接热输入相同时熔池中熔融金属的体积相同, 间隙的变化只能使部分间隙金属随着电子束流搅拌作用上涌形成间隙填充金属, 因此下板熔深基本保持不变。

电子束焊接过程是基于小孔效应实现焊缝成形的过程, 不同搭接间隙的试板焊接试验表明: 单一金属或多层紧贴的金属焊接时, 电子束的小孔形成过程是相对稳定的。但是, 多层焊接时, 如果焊接的搭接面有间隙, 如图 3b 至图 3f, 间隙使小孔气流变得不稳定, 从而使焊缝的熔深和搭接接头结合面的焊缝宽度变得不稳定, 不同的间隙大小影响也不同; 如果间隙 $> 0.7\text{mm}$ 时, 由于 GH4169 表面张力作用, 熔化的上层液态金属在搭接间隙处形成类背面余高的饱满圆滑成形, 与下层金属出现断层, 无法形成连续焊缝 (图 3e、图 3f), 无法满足产品的密封性需求。

3.3 焊接参数对焊缝成形的影响

电子束焊接主要工艺参数为加速电压 U (kV)、电子束流 I_b (mA)、聚焦电流 I_f (mA)、焊接速度 v (mm/min)、工作距离 d (mm)。基于产品的搭接焊缝, 针对无间隙搭接焊缝设计 4 组参数进行焊接, 参数见表 2。基于聚焦电流、焊接速度、工作距离相同的前提下, 开展焊接试验, 分析加速电压、电子束流、电子束扫描焊接对搭接焊缝熔深及截面形貌的影响。获得焊缝横截面形貌如图 4 所示。

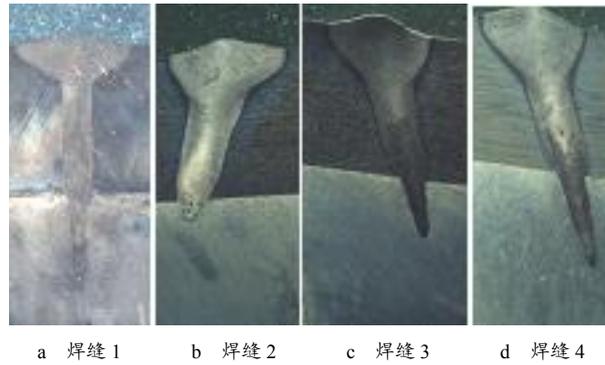


图4 焊接参数对焊缝截面形貌的影响

在加速电压、电子束流、聚焦电流、焊接速度一致的前提下，通过增加束斑扫描功能，图4b电子束焊缝的熔宽较图4a明显增加，搭接焊缝的界面连接宽度增大，确保产品焊缝满足设计的气密性要求。但焊缝熔深及下层进入深度减小，若想获得相同熔深，需增大电子束流或提高加速电压，如图4c和图4d。比较图4c与图4d可以看出，当加速电压、聚焦电流、焊接速度、束斑扫描波形与幅值相同时，一定程度内增加焊

接束流即提升焊接热输入，所获得的电子束焊缝熔宽、熔深和下层进入熔深、界面熔宽均增加，同时焊缝正面余高也有所增加。

3.4 断口分析

选择不同下层进入熔深的搭接焊接试板进行接头机械打开，在扫描电镜下观察断口微观形貌，结果如图5、图6所示。

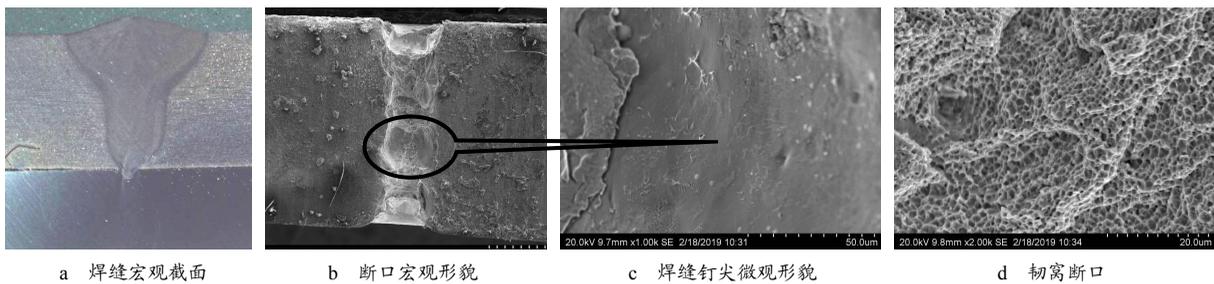


图5 下层进入熔深小的断口形貌

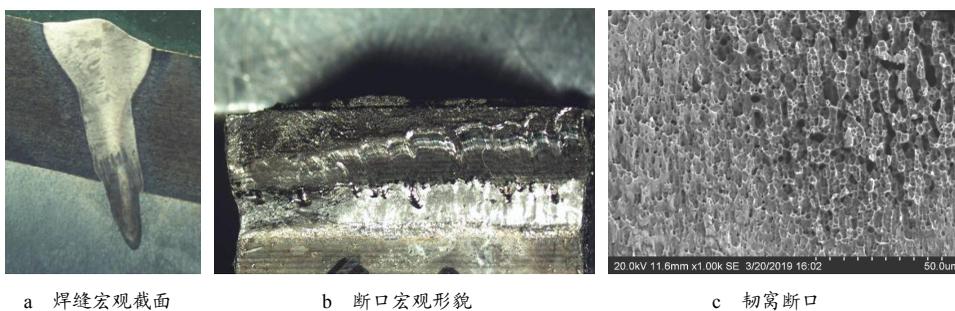


图6 下层进入熔深大的断口形貌

所检剖面进入下层电铸镍基体熔深为0.30mm(图5a)，将焊缝试样沿钢套与电铸镍结合面人工打断，体式显微镜下观察可见焊缝连续，断面呈新鲜金属光泽，将断口置于扫描电镜下观察，焊缝试样局部表面呈光滑形貌(图5b、图5c)，该处断裂面为焊缝钉尖，由此也可证实焊缝深入电铸镍基体的熔深较浅。断面其他位置均为新鲜的韧窝断口形貌(图5d)。

所检剖面进入下层电铸镍基体熔深为1.97mm时，焊缝宏观形貌如图6a所示，将焊缝试样沿钢套与电铸镍结合面人工打断，体式显微镜下观察可见焊缝连续，断面呈新鲜金属光泽，如图6b所示，对断口进行扫描电镜观察，如图6c，断口为典型的韧性断裂形貌。

4 结束语

