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。研究结果表明: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,通过填加较多的铝、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

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 la 所示。因钣金成形工艺方法局限性导致钢套与电铸 镍之间存在贴合间隙, 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为固溶态,厚度 4mm; 电铸镍试板为退火态,厚度为 5mm。 搭接试板结构示意如图 1b 所示。



图1 焊接结构示意图

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, 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。



a 0mm b 0.24mm c 0.35mm d 0.56mm e 0.81mm f 1.05mm 图 3 搭接间隙(0~1mm)对焊缝截面形貌的影响

mm

表3	焊缝横截	戊面测量	
应该	操控问题	て日ま声応	

试样编号	焊缝总熔深	搭接间隙	下层表面熔宽	进入熔深
а	6.82	0	0.55	2.65
b	6.93	0.24	0.55	2.49
с	6.70	0.35	0.53	2.25
d	7.30	0.56	0.48	2.92
е	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≥0.5mm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≤0.7mm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 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> 0.7mm 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。



a 焊缝1 b 焊缝2 c 焊缝3 d 焊缝, 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。



a 焊缝宏观截面

图 6 下层进入熔深大的断口形貌

b 断口宏观形貌

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。

c 韧窝断口

4 结束语

针对某航天型号发动机产品结构及焊接需求开展 GH4169与电铸镍搭接电子束焊接工艺试验,其结果分 析得出以下结论:

a. 因 GH4169 与电铸镍材料物理化学性能差异, 焊缝进入下层电铸镍时熔宽变窄。

b. 随着搭接间隙的增加,结合面的焊缝宽度及下 层进入熔深均发生变化; 当搭接间隙介于 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,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",搭接处焊缝熔宽与间隙呈 正相关; 当搭接配间隙大于 0.7mm 时,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。

c. 焊接过程中增加电子束束斑扫描功能,有效增加了焊缝宽度及搭接面焊缝熔宽;在同一工作距离下,随着焊接热输入的增加,下层进入熔深增加。

d. GH4169 与电铸镍搭接接头断口呈现韧窝形貌, 为韧性断裂。

参考文献

- 1 李胡燕. GH4169 镍基高温合金的组织和性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2014
- 2 明宪良,陈静,谭华,等.激光修复 GH4169 高温合金的持久断裂机制研究[J].中国激光,2015,42(4):63~69
- 3 周振丰,张文钺.焊接冶金与金属焊接性[M].北京:机械工业出版社, 1993
- 4 张海泉,赵海燕,张彦华,等. 镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂 纹特征分析[J]. 材料工程,2005(3):22~25
- 5 李亚江, 王娟. 特种焊接技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014
- 6 熊然,韩冬,胡春海,等.电子束焊接技术在高强合金上的应用和发展[J]. 电焊机,2013(6):81~85
- 7 史春园,于启湛.异种金属的焊接[M].北京:机械工业出版社,2012

合不同的切钻样板工作部分,可以完成不同状态中间 框产品零件的生产制造,如图9所示。

中间框缺口切钻样板的模块化设计,满足中间框 的生产制造要求,验证了此种设计方案的可靠性和创 新性,降低了生产过程中人为超差的概率,保证了产 品质量,提高了生产效率,大幅度缩减了生产制造周 期,节约了大量的产品零件加工成本,大幅度缩减了 此类样板的整体尺寸,节省了样板存放的空间,使搬 运、运输和操作更加便捷。

5 结束语

提出了一种切钻样板模块化结构的设计方案,通 过模块化分体式结构的中间框缺口切钻样板设计,一 方面大幅度节约了产品零件的生产制造成本,缩短生 产制造周期,缩减了此类切钻样板的整体尺寸,节省 了存放空间,便于搬运和操作;另一方面实现了板材 类中间框稳定高效加工生产,为后续其它部段中使用 的板材类中间框缺口切钻样板设计提供了技术参考。

后续在设计和使用过程中不断完善、积累,将中间框缺口切钻样板工作部分按一定角度进行分段设计,逐步涵盖某些型号部段壳体中间框上桁条缺口所可能出现的角度分布。中间框产品零件在生产制造过程中,切钻样板工作部分与支撑架部分组合使用,其工作部分可根据状态要求互相匹配选用和替换,实现此类中间框缺口切钻样板的产品化设计与应用^[5]。

参考文献

- 易志斌,李殿忠,唐瑞润,等.航空制造工程手册飞机模线样板[M].北 京:航空工业出版社,1993
- 2 朱耀祥, 普林祥. 现代夹具设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019
- 3 林清安. Pro/ENGINEER Wildfire2.0 钣金设计[M]. 北京:电子工业出版 社, 2005
- 4 成大先. 机械设计手册第2卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016
- 5 石晶. 数字化条件下三维数模在模线样板设计中的应用[J]. 科技创新与应用, 2016(11): 17~18