

多层波纹管电子束焊接气孔缺陷的控制

蔡菁青 房冬青 郭盛斌 白 淳 张丽娜 王 炜 谷文博

(首都航天机械有限公司, 北京 100076)



摘要: 基于多层 GH4169 波纹管组件电子束焊接过程中的气孔缺陷问题, 开展了工艺优化试验, 并进行了气孔缺陷显微组织分析。研究表明: 降低焊接速度、添加扫描功能或脉冲功能对气孔缺陷的控制有直接影响。其中, 使用脉冲功能补焊, 气孔抑制效果最明显, 最终可形成符合标准要求的焊接接头。

关键词: 电子束焊接; 焊缝气孔; 多层波纹管; 脉冲功能

中图分类号: TG456.3 **文献标识码:** A

Control of Porosity Defects in Electron Beam Welding of Multi-layer Bellows

Cai Jingqing Fang Dongqing Guo Shengbin Bai Chun Zhang Lina Wang Wei Gu Wenbo

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

Abstract: In this paper, based on the problem of porosity defects in electron beam welding of multi-layer GH4169 bellows assembly, the process optimization experiment was carried out and the microstructure of porosity defects was analyzed. The results of research shows that reducing welding speed and adding scanning function or pulse function have direct influence on the control of porosity defects. Among them, the porosity inhibition effect is the most obvious and finally the welding joint meeting the requirements can be formed when pulse function is used for repair welding.

Key words: electron beam welding; weld porosity; multi-layer bellows; pulse function

1 引言

GH4169 合金(美国牌号 Inconel718)是一种时效强化 Ni 基高温合金^[1-3], 该类合金具有较高的力学性能以及良好的抗氧化及抗腐蚀性能、优异的疲劳性能和断裂韧性, 且在-253~650℃范围内组织性能稳定, 成为航空航天领域及国防建设发展中必不可少的一种材料。因此, 某型号发动机活门系统的波纹管选用 GH4169 合金^[4], 满足了该型号发动机的技术要求。但在实际生产中, 层间间隙大的多层 GH4169 波纹管易存留气体, 烘干过程其内部水蒸气等不易充分排出。在焊接过程中残留气体来不及从熔池逸出, 导致焊后易出现气孔缺陷。气孔缺陷会影响焊接接头的密封性, 减小接头的有效承载面积, 出现应力集中, 并降低接头的疲劳强度。

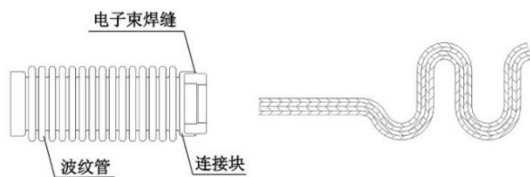
电子束焊接是高能束焊接方法中较成熟的加工方法之一, 其利用电子经过磁场加速后产生高速运动的动能形成热源, 电子束流在磁场中加速使金属熔融形成非常细小熔池^[5-6]。和传统的焊接方法相比, 电子束焊接具有深宽比大, 变形小以及热影响区小等优势。通过增加电子束斑、降低焊接速度以及选用多种的电子束扫描图形, 可以有效降低焊缝气孔率^[7-8]。目前, 针对航天发动机波纹管组件电子束焊接消除气孔的补焊工艺尚缺乏系统性研究, 相关工艺有待深入摸索。

某型号航天发动机多层波纹管产品由于夹层间距较大, 烘干过程未能完全排出夹层内气体, 导致残留气体在焊接时形成超标气孔淤积在焊缝处, 降低接头有效承载面积, 不满足产品使用要求。基于层间间隙大的多层 GH4169 波纹管组件产品克服气孔缺陷突出的问题亟需开展电子束焊接试验, 研究气孔缺陷的工

艺调控,进行接头显微组织检测,获得层间间隙大的多层波纹管电子束焊接消除气孔缺陷的最佳工艺方案,也为后续该类波纹管消除气孔缺陷的电子束焊接工艺提供技术指导。

2 焊接结构及试验方案

2.1 试验结构及材料



a 波纹管连接套对接结构示意图 b 波纹管结构示意图

图1 焊接结构示意图

焊接产品为波纹管组件,由波纹管和连接块组焊而成,焊接接头类型为锁底对接结构,结构示意图如图1a所示。波纹管和连接套材料均为固溶态GH4169。

其中,波纹管为4层结构,单层波纹管厚为0.22mm,波纹管结构示意图如图1b所示。

图2所示箭头指向为多层波纹管较大的层间间隙处,其中层间间隙最大处可达80.54 μm 。针对上述多层波纹管的状态,设计了不同焊接参数试验,补焊试验参数和一次焊接参数分别如表1和表2所示,其中补焊试验波纹管产品原焊接参数如表2所示。在保证焊缝熔深符合要求的情况下,尽量采用较小的焊接电流,减小焊接变形以及避免GH4169波纹管出现裂纹等。焊后对焊接接头组织进行光学显微镜分析。

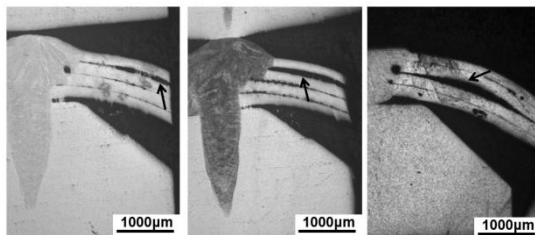


图2 层间间隙大的多层波纹管

表1 补焊试验参数

焊缝编号	加速电压/kV	电子束流/mA	聚焦电流/mA	焊接速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	工作距离/mm	扫描幅值/mm	扫描频率/Hz	扫描波形	脉冲峰值束流/mA	脉冲频率/Hz	脉冲占空比/%
1	60~70	5~11	表面	600	250	100	700~1000	o形	/	/	/
2	60~70	5~11	表面	1000	250	/	/	/	/	/	/
3	60~70	5~11	表面	600	250	/	/	/	/	/	/
4	60~70	5~11	表面	600	250	/	/	/	27	60	50

表2 一次焊接参数

焊缝编号	加速电压/kV	电子束流/mA	聚焦电流/mA	焊接速度/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	工作距离/mm	扫描幅值/mm	扫描频率/Hz	扫描波形	脉冲峰值束流/mA	脉冲频率/Hz	脉冲占空比/%
1(原焊接参数)	60~70	5~11	表面	1000	250	/	/	/	/	/	/
2	60~70	5~11	表面	600	250	/	/	/	/	/	/

2.2 试验方法

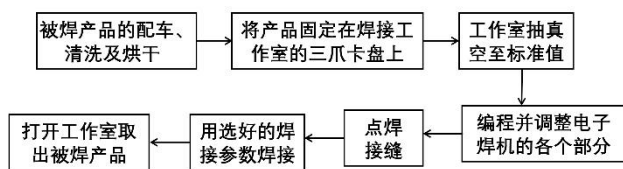


图3 焊接顺序图

焊接试验采用小型尺寸中压真空电子束焊机设备,型号为THDW-6。焊前用无水乙醇和无尘布清洗波纹管和连接块,并在电热鼓风干燥箱内成套烘干(烘

干时间2h,烘干温度110 $^{\circ}\text{C}$),保证待焊接面和波纹管夹层内干净无油污。在焊接前将真空度抽至标准值,使得波纹管夹层内残存气体充分地排出,控制焊接气孔缺陷。该波纹管组件产品真空电子束焊接顺序,如图3所示。

3 试验结果及分析

3.1 原焊缝显微组织分析

用一次焊接参数焊接多层波纹管产品,如表2焊缝编号1所示,焊缝横截面剖切检查焊缝熔深及内部

质量,得到图4所示的焊缝剖切金相图。可以看到,该多层波纹管局部层间间隙较大。气孔缺陷出现于波纹管一侧的焊缝熔合线处,且尺寸较大,图4a和图4b分别有2处和1处气孔,为 $180\mu\text{m}$ 、 $110\mu\text{m}$ 和 $110\mu\text{m}$,不满足产品使用要求。

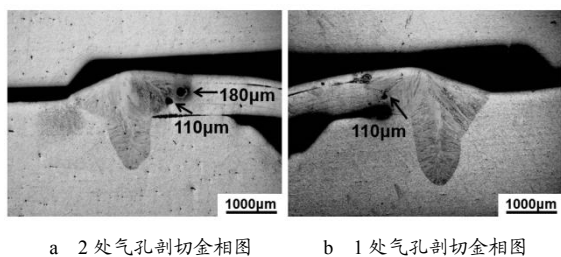


图4 原焊缝剖切金相图

众所周知,对于电子束焊接,由于焊接速度快,热输入小,当焊接层间间隙较大的多层波纹管时,气体来不及从熔池逸出,气孔易出现在焊缝与波纹管夹层的交界处,呈淤积未排除的形貌。因此,从根本上消除气孔的产生主要考虑如何对熔池进行充分搅拌,使气体排除更完全。在选择可靠的焊前处理方法基础上,为进一步提高焊缝质量,拟定了一系列有利于焊缝气孔排出的补焊参数。

3.2 扫描参数对消除气孔缺陷的影响

电子束扫描可以使熔池的搅拌更加剧烈,在焊接时添加了700Hz的圆扫描规范(见表1,焊缝编号1),该参数是从前期扫描补焊试验中选取的最佳参数。光镜观察波纹管与连接套对接接头焊缝金相剖切结果如图5所示,该瓣焊缝共有2处气孔,气孔尺寸分别为 $114.57\mu\text{m}\times 87.5\mu\text{m}$ 和 $112.5\mu\text{m}\times 84.2\mu\text{m}$,且气孔均于焊缝熔合线附近。相较于图4剖切金相图,可见添加扫描补焊方式后形成的新气孔尺寸有降低的趋势,在电子束焊接时,通过匙孔的迁移形成搅拌作用,增加熔池在垂直于焊接方向的流动,有利于焊缝中已经形成的气孔逃逸出熔池表面,达到降低气孔尺寸的目的。然而,搅拌效果仍不能完全消除气孔缺陷,焊缝质量仍不满足要求。

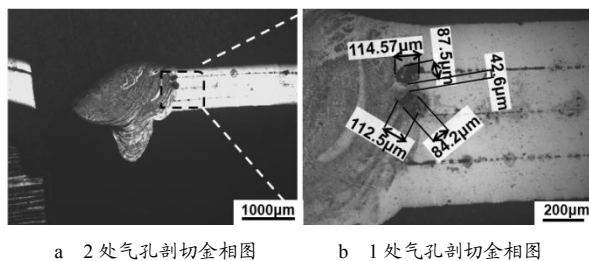


图5 扫描补焊剖切金相图

3.3 焊接速度对消除新焊缝气孔缺陷的影响

焊接速度可以影响焊缝熔池的冷却速度,进而影响残余气体等能否及时从焊缝中逸出,因此对焊接速度的适当选择,是抑制间隙波纹管气孔缺陷的最为一个因素。分别用原速焊 $1000\text{mm}/\text{min}$ 和慢速焊 $600\text{mm}/\text{min}$ (见表1,焊缝编号2和3)补焊原焊缝,观察金相剖切图。

图6为用原速焊补焊后的剖切金相图,该瓣焊缝共观察有3个气孔,气孔尺寸分别为 $109.32\mu\text{m}\times 67.25\mu\text{m}$ 、 $214.14\mu\text{m}\times 111.01\mu\text{m}$ 和 $63.88\mu\text{m}\times 46.03\mu\text{m}$ 。所有气孔缺陷均位于补焊一侧的焊缝熔合线附近。

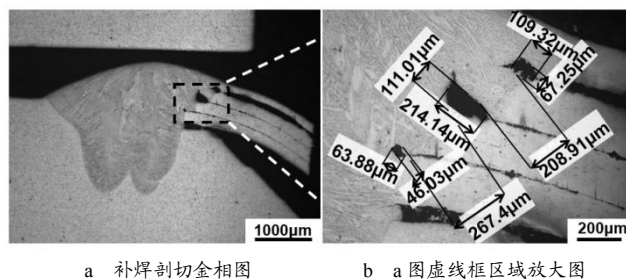


图6 原速焊 $1000\text{mm}/\text{min}$ 补焊剖切金相图

图7为用慢速焊补焊后的金相剖切试验图,该瓣焊缝的1处气孔尺寸大小为 $138.64\mu\text{m}$,位于波纹管一侧的焊缝熔合线附近。

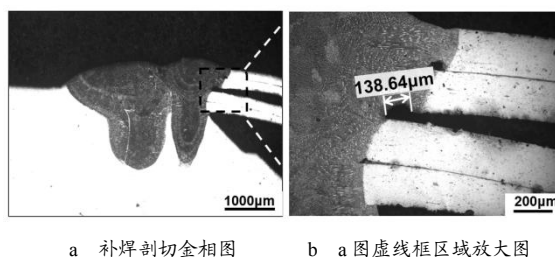
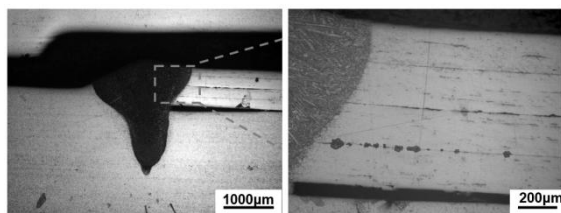


图7 慢速焊 $600\text{mm}/\text{min}$ 补焊剖切金相图

慢速焊和原速焊补焊的试验结果分析得出,当焊接速度减小时,气孔缺陷数降低,尺寸也随之变小。电子束补焊过程中,原焊缝再次熔化,通过适当降低焊接速度,可延长熔池停留时间,有利于原焊缝熔合线处及波纹管夹层内气泡的逃逸,降低气孔的产生概率。

为进一步验证焊接速度与气孔缺陷产生的关系,同时也验证优化的焊接速度对层间间隙较大的波纹管抑制气孔效果的有效性。选择慢速焊接参数规范(见表2,焊缝编号2)焊接该类波纹管的新焊缝,焊后金相检测,波纹管与连接套对接接头焊缝剖切结果如图8

所示,焊缝内部质量合格,无焊接缺陷。通过适当降低焊接速度,冷却速度减慢,熔池金属液态停留时间增加,使波纹管夹层中残留气体完全逸出。因此,也证实了慢速焊接对一次焊接的新焊缝抑制气孔效果有显著影响。



a 补焊剖切金相图 b a图虚线框区域放大图

图8 新焊缝剖切金相图

3.4 脉冲参数对消除新焊缝气孔缺陷的影响

Kautz 等人^[9]采用脉冲电子束流电子束焊接 21-6-9 不锈钢,发现脉冲束流电子束焊接能够减少气孔缺陷,细化组织晶粒,并当焊接功率密度降低时,焊缝质量得到相应提升。因此,试用脉冲电子束焊验证其对层间间隙较大的波纹管补焊消除气孔缺陷的影响。通过前期脉冲试验在焊接时添加 60Hz 脉冲参数规范(见表 1,编号 4),剖切方式验证该补焊参数的可行性,剖切金相图见图 9 所示。电镜观察焊缝内部质量,无未熔合、裂纹、未熔合及气孔超标等缺陷,满足产品使用要求。这是由于脉冲束流能够周期性地冲击金属材料,使热输入能够传入波纹管组件产品内部;另一方面,脉冲电子束焊接过程中,未达到峰值束流时,金属材料继续熔化形成熔池,此时会产生一部分的金属蒸汽压力,由于匙孔壁上的熔化金属层的表面张力和金属蒸汽压力的共同作用,能最大程度地延迟匙孔的闭合^[10],有利于匙孔内的水蒸汽和残余气体等溢出,使熔合线及波纹管夹层的气孔孔洞等缺陷消失。可见,脉冲电子束补焊是控制焊缝中气孔缺陷的有效手段。

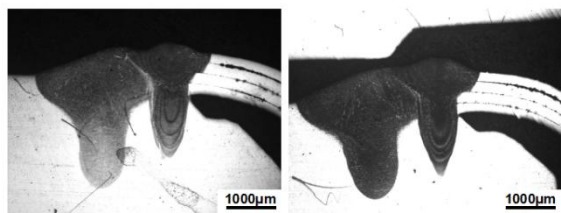


图9 脉冲补焊剖切金相图

4 结束语

针对航天某型号发动机多层波纹管组件产品层间间隙较大及存在焊接气孔的问题,开展 GH4169 波纹管与连接块的焊接参数工艺优化试验,通过结果分析得出以下结论:

a. 层间间隙较大的多层波纹管在电子束焊接时由于焊接速度快,残留气体来不及从熔池逸出,易于在焊缝与波纹管夹层的地方形成数量较多的气孔缺陷。

b. 添加扫描补焊方式能增加熔池在垂直于焊接方向的流动,进而增加熔池搅拌程度,气孔尺寸有明显降低的趋势。

c. 焊接速度可以影响焊缝熔池的冷却速度,补焊速度减小能增加熔池金属液态停留的时间,有利于消除气孔缺陷。同时,慢速焊的一次焊接能达到抑制气孔缺陷的效果。

d. 通过金属蒸汽压力的作用,脉冲束流电子束补焊能延迟匙孔闭合,有利于波纹管层间残留气体的逃逸,是消除气孔缺陷的最佳补焊方式。

参考文献

- 1 庄景云. 变形高温合金 GH4169[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- 2 赵新宝, 谷月峰, 鲁金涛, 等. GH4169 合金的研究新进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 768~774
- 3 齐欢. INCONEL 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8): 92~100
- 4 谢美蓉, 张益坤. GH4169 波纹管组件的电子束焊接[J]. 焊接, 2002(2): 40~41
- 5 赵兴科. 现代焊接与连接技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016
- 6 周山山. 电子束焊接技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020
- 7 马翔生. 电子束焊接气孔的控制[J]. 北京航空工艺研究所, 1995(10): 16~17
- 8 王素慧, 王俊元. 2A12 铝合金真空电子束焊接气孔缺陷分析[J]. 机械设计与制造, 2008(9): 139~141
- 9 Kautz D D, Olson D L, Burgardt P, et al. A characterization of pulsed electron beam welding parameters[J]. Welding Journal, 1991, 70(4): 100~105
- 10 许海鹰, 余伟, 左从进. 高压脉冲电子束的控制及其对焊缝形貌影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 1044~1048