

搅拌摩擦焊接头隧道类缺陷等强补焊工艺

姚君山¹ 张春杰¹ 魏 薇²

(1 上海航天设备制造总厂,上海 200245)

(2 上海航天技术研究院,上海 201109)

文 摘 针对搅拌摩擦焊接头隧道类缺陷等强补焊的应用要求,开发了基于TIG熔补材料、搅拌摩擦焊增强组织性能的等强补焊工艺,对补焊后的接头进行了微观组织观察与力学性能分析,评价了补焊工艺对接头性能的影响。结果表明,对焊缝同一位置进行不大于三次的重复搅拌摩擦焊,接头力学性能不会明显下降;TIG熔补焊缝经再次搅拌摩擦焊后,其焊缝组织与搅拌摩擦焊焊缝组织特征相似,不会导致接头组织恶化。采用本文开发的等强补焊工艺对某型号火箭液氧贮箱纵缝的隧道缺陷进行了等强补焊,表明该方法有效可行。

关键词 搅拌摩擦焊,隧道类缺陷,贮箱,补焊

Repair Welding Technique for Tunnel Defects of FSW Joints

Yao Junshan¹ Zhang Chunjie¹ Wei Wei²

(1 Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245)

(2 Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109)

Abstract Arc welding and multipass friction stir welding (Multi-FSW) were applied as the repair welding technique for tunnel defects of FSW joints. Microstructures and mechanical properties of repaired joints were analyzed and the influences of the repair welding process on joint properties were evaluated. The experimental results indicate that mechanical properties of Multi-FSW joints will not decrease obviously. Compared with FSW joints, repaired joints made using TIG + FSW have similar microstructures and show no microstructural deterioration. The repair welding method is proved to be effective and feasible for the repair of the longitude welding tunnel defect of a rocket fuel tank.

Key words FSW, Tunnel defect, Fuel tank, Repair welding

0 引言

搅拌摩擦焊(FSW)是一种基于微区锻造的固相焊接技术^[1],以其接头质量优异、工艺操作简单已应用于航空航天领域,如运载火箭、航天飞机、大型客机、相控阵雷达面板等产品的焊接制造^[2~4]。在铝合金焊接结构制造上逐渐取代传统的熔焊工艺成为一种重要而可靠的连接手段。

搅拌摩擦焊较熔焊具有参数简单、工艺稳定性好等突出优势,但会出现因操作不当、工艺参数突变或装配质量变化而导致的焊接缺陷问题,其中隧道类缺陷的危害性最大。由于搅拌摩擦焊接头属于锻造组织,不同于熔焊接头铸造组织,获得等强的补焊接头成为搅拌摩擦焊工程应用必须解决的重要课题之一。

美国NASA、波音曾采用拉锻式摩擦塞焊来修补熔焊和搅拌摩擦焊的缺陷,获得良好的等强补焊效果。但摩擦塞焊的实施需要专用的设备与工装,工艺实施繁琐,并且对接头的厚度有一定的要求—接头厚度6 mm以上。因此,摩擦塞焊工艺用于大型航天结构(如贮箱等)焊缝的等强补焊有较大局限性,需开发工艺实施简便的新型等强补焊工艺。

本文基于隧道类缺陷搅拌摩擦焊接头等强补焊工程应用需求,深入研究了多次搅拌摩擦焊、“熔焊+搅拌摩擦焊”的等强补焊工艺,对比分析了补焊接头的力学性能与微观组织,研究结果对于指导搅拌摩擦焊工程应用具有重要意义。

1 试验

采用二维搅拌摩擦焊设备对 6 mm 厚 T62 状态 2219 铝合金标准试板进行了搅拌摩擦焊试验,设备如图 1 所示。为了获得不同尺寸的隧道缺陷,采用了预置 2219 铝合金适用范围以外的焊接参数,并利用简单形状的搅拌工具来进行焊接,焊接工具见图 2。

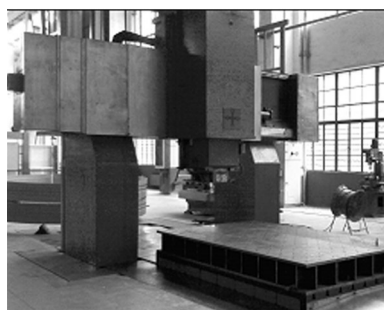


图 1 二维搅拌摩擦焊设备

Fig. 1 Two dimensional FSW equipment

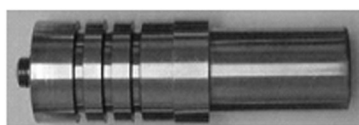


图 2 6 mm 搅拌工具

Fig. 2 FSW tool for a 6mm welding thickness

将焊后的接头进行 X-射线无损检测,选择具有不同隧道缺陷的搅拌摩擦焊缝,采用相应的补焊工艺,并从补焊焊缝的抗拉强度、微观组织对其性能进行评价。在此基础上,确定了适当的补焊工艺对火箭循环预冷贮箱纵缝隧道缺陷进行了等强无变形补焊。

2 结果与讨论

2.1 隧道类缺陷特征与补焊工艺

隧道型缺陷形貌特征是:在焊缝内部沿焊接方向连续线状的孔洞,图 3 是隧道缺陷的 X-射线照片,图 4 为焊缝隧道缺陷横截面金相照片。



图 3 隧道型缺陷 X-射线照片

Fig. 3 X-ray photograph of a tunnel defect

从图 4 可看出,隧道的外形为带锐边的菱形。该缺陷直接表现为焊缝内部材料缺失,产生的原因有可能是装配间隙过大、焊接顶锻力较小、焊接参数偏低而造成热量小、材料没有充分转移或搅拌工具自身设计不足。

对于不同的隧道缺陷尺寸应采用如下不同的补焊方法。

(1)对于 4 ~ 10 mm 板厚的铝合金焊缝,当隧道横截面积小于 1 mm^2 时,补焊不需要添加填充材料,

直接进行重复搅拌摩擦焊进行补焊。

(2)当隧道横截面积大于 1 mm^2 时,首先填充足够的材料→实现补充材料与焊缝金属界面的冶金结合→冶金结合的补充材料转化为锻造组织。根据该思路,首先应进行缺陷排挖,将隧道缺陷暴露出来,然后用电弧填丝熔焊的方法将缺陷填补,之后再重复搅拌摩擦焊补焊。

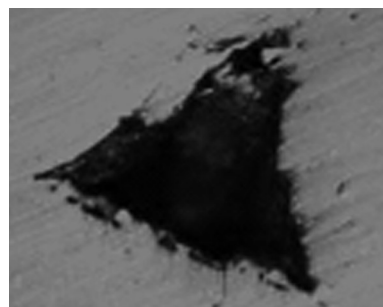


图 4 隧道型缺陷截面金相图

Fig. 4 Cross-section of a tunnel defect

2.2 小尺寸隧道缺陷补焊接头性能

对于小尺寸隧道缺陷,拟定的补焊方法为重复搅拌摩擦焊,焊缝金属由于再经历一次搅拌摩擦热循环,其微观组织结构与接头力学性能会相应发生变化。传统的熔焊工艺手段下,铝合金同一位置多次加热熔化后将导致接头组织恶化,焊缝金属力学性能急剧下降。因此,对于铝合金重要构件,熔焊的补焊次数一般规定不允许超过 3 次。

对于搅拌摩擦焊而言,隧道缺陷的出现与焊接工艺参数、接头装配情况、搅拌工具参数等因素有关,当缺陷出现时,很难进行一次补焊即能把缺陷消除。因此,必须分别确定每一次补焊过程对接头性能的影响。

本文以 6 mm 厚 M 状态 2219 铝合金标准试板搅拌摩擦焊接头的重复补焊接头抗拉强度对母材抗拉强度进行评定试验,确定小尺寸隧道缺陷可允许的补焊次数。图 5 给出了相同焊接工艺参数、不同搅拌摩擦焊补焊次数条件下的接头抗拉强度试验结果。

从图 5 可见,重复搅拌摩擦焊次数不超过 3 次,接头抗拉强度没有明显变化,当重复焊接次数超过 4 次时,接头抗拉强度开始小幅度下降。据分析,由于搅拌摩擦焊类似于材料的局部锻造,在有限次的挤压锻造过程中,由于形变强化的作用其抗拉强度呈小幅提高趋势。当补焊次数超过 4 次时,由于接头形变强化效应微乎其微而接头厚度减薄造成的抗拉强度下降明显,带来接头抗拉强度明显下降。因此,对于小尺寸隧道缺陷的补焊工艺应为不超过 3 次的重复搅拌摩擦焊。

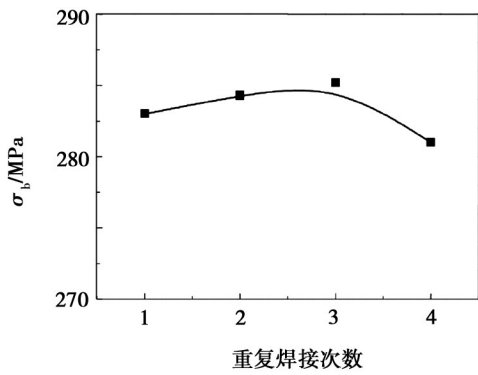


图5 多次搅拌摩擦焊对接头抗拉强度的影响

Fig. 5 Tensile-strength of repair joints made by multi-FSW

2.3 大尺寸隧道缺陷补焊

2.3.1 补焊接头力学性能

当隧道横截面积大于 1 mm^2 时,需要对缺陷进行排挖,然后填充材料并使填充金属与工件金属实现冶金结合,再将该处组织转变为锻造组织。填充材料工艺拟采用手工 TIG 焊填充相应焊丝材料,解决填充材料与焊缝金属间的界面冶金问题,然后采用搅拌摩擦焊工艺对补焊部位进行搅拌摩擦焊,将手工 TIG 焊填充材料转换为锻造组织,并消除熔焊气孔等缺陷。

隧道类缺陷采用人工预制的方法进行物理模拟,即在 FSW 焊缝表面采用成形刀具加工预制来模拟搅拌摩擦焊接头隧道缺陷,预制隧道缺陷尺寸: $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。工件采用 6 mm 厚 T62 状态的 2219 铝合金标准试板(抗拉强度 414 MPa ,伸长率 13% ,尺寸 $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$),熔焊电源为 Aero350 Miller VPTIG 电源,采用 2319 焊丝。对于 TIG 熔焊,分别考察 1 次熔补、2 次熔补(同一部位经历 2 次 TIG 加丝熔补)、3 次熔补(同一部位经历 3 次 TIG 加丝熔补),检验其补焊接头的力学性能和金相组织,确定其影响规律。表 1 给出了不同补焊条件下的接头抗拉强度试验结果(5 个试样的平均值)。

表 1 不同补焊条件下的接头力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of repaired joints made using different repair methods

补焊条件	σ_b / MPa	$\delta_5 / \%$	平均接头系数	断裂部位
非熔补部位(无缺陷)	292.5	8.0	0.707	热力影响区
1 次熔补	293.0	8.0	0.708	热力影响区
2 次熔补	297.0	8.5	0.717	热力影响区
3 次熔补	296.0	8.0	0.715	热力影响区

从表中可见,当熔焊补焊次数为 1 次、2 次、3 次,然后再进行搅拌摩擦焊的补焊接头,其抗拉强度与伸长率与未经补焊的无缺陷搅拌焊接头相比,基本等强。

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 1 期

为确定上述补焊工艺的有效性,设计了不同排挖深度的隧道缺陷,分别进行了补焊试验,同样对接头抗拉强度与伸长率进行了测试,每次排挖试验的试样量 5,表 2 给出了试验结果。

表 2 不同缺陷排挖深度补焊接头力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of repair welding joint with different defect digging depth

缺陷排挖深度/mm	σ_b / MPa	$\delta_5 / \%$	平均接头系数	断裂部位
非熔补部位	293	8.0	0.707	热力影响区
排挖 1 mm	280	10	0.676	热力影响区
排挖 2 mm	282	8.5	0.681	热力影响区
排挖 3 mm	292	8.0	0.705	热力影响区

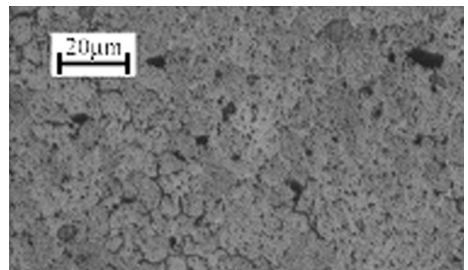
从表 2 中可见,在板厚方向的不同缺陷位置条件下,TIG 填丝熔焊+搅拌摩擦焊的补焊方法,仍可得到与无缺陷未补焊接头相近的力学性能。因此,可以认为,在不超过 3 次熔焊补焊条件下,采用熔焊+搅拌摩擦焊的方法是实现大尺寸隧道缺陷等强补焊的有效手段。

2.3.2 补焊接头微观组织

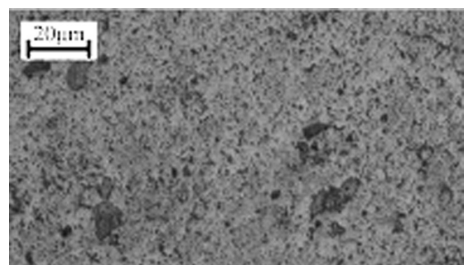
为了进一步确定补焊工艺的可行性,对不同补焊条件下的接头微观组织结构进行了金相观察。图 6 给出了不同熔焊补焊次数的焊核区金相照片。

由图 6 中可以看到,经历“TIG 熔焊+搅拌摩擦焊”补焊的接头,其微观组织与未经补焊的搅拌摩擦焊接头组织均为相似的锻造组织。

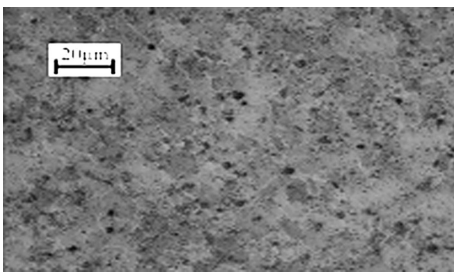
为了进一步分析补焊后的接头微观组织特征,对不同区域的晶粒大小进行测量和比较,每次熔补试验的试样量为 5,试验结果如表 3 所示。



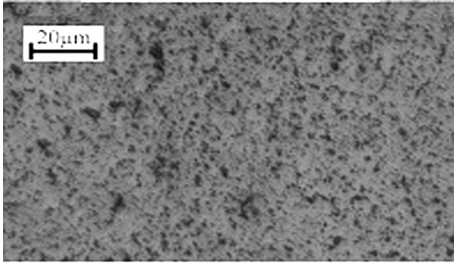
(a) FSW 接头焊核区组织



(b) 1 次熔补部位焊核组织



(c) 2次熔补部位焊核组织



(d) 3次熔补部位焊核组织

图6 不同补焊条件下接头焊核区金相照片

Fig.6 Micrographs of welding joints made by different repair method

从表3可见,在不超过3次熔焊补焊的条件下,补焊焊缝不同区域的组织晶粒度与未经补焊接头相应部位组织晶粒度相当,这种组织结构特征与接头力学性能是对应的。这是由于搅拌摩擦焊焊核区的组织是由经历动态回复再结晶过程而形成的细小等轴

晶构成,搅拌摩擦焊区域覆盖了原熔焊区域的组织影响区,使得补焊焊缝与原始焊缝具有相似的组织特征。

表3 不同补焊条件下接头晶粒大小比较

Tab.3 Grain size of joints made by different repair methods

补焊方法	晶粒度			组织特征
	焊核区	热影响区	母材	
1次熔补+FSW	12	6	4	基体为 α 相,晶界有 θ 相
2次熔补+FSW	11	6	4	分布,有少量的 FeMnAl_6 相,
3次熔补+FSW	11	6	4	无过烧组织

2.4 隧道缺陷补焊工艺的应用

前述的试验结果表明,对于隧道类缺陷,采用“手工VPTIG加丝熔补+FSW增强补焊”的工艺方法能够获得与原始焊缝基本等强、低变形的补焊效果,并且接头补焊部位的1~3次熔补以及各种深度的熔补,最终其接头强度与正常FSW接头强度基本相当。为了进一步验证该补焊工艺的可行性,对某运载火箭循环预冷贮箱筒段纵缝采用上述补焊工艺进行补焊修复,补焊焊缝外观如图7所示。

完成补焊后的贮箱见图8,补焊部位X光检验结果如表4所列。将补焊后的循环预冷贮箱进行了设计强度、气密试验,结果全部满足设计考核指标。

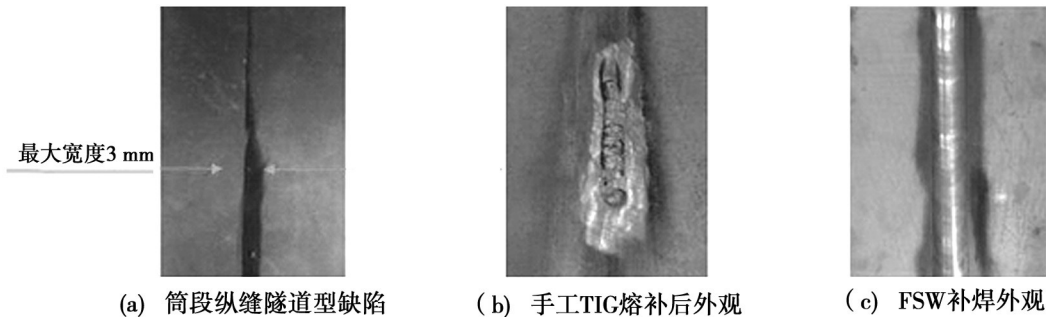


图7 补焊焊缝外观

Fig.7 Appearance of the repair welding joint

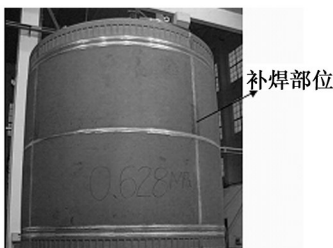


图8 等强补焊合格运载火箭循环预冷贮箱

Fig.8 Qualified circularly precooling rocket tank after equicohesive repair welding

表4 补焊部位X光检验结果

Tab.4 X-ray checkout of repair welding joint

补焊工艺	拍片顺序	I级焊缝
焊接缺陷	1	隧道型缺陷,不合格
FSW重复焊1次	2	隧道型缺陷扩大,不合格
手工TIG熔补1次	3	隧道型缺陷消失,但存在气孔等熔焊缺陷,不合格
FSW重复焊1次	4	熔补缺陷消失,合格

(下转第81页)