

# 针对异物夹杂类缺陷的双道偏置补焊方法

石璟 邹敏 黄小鲁 黄举近

(中国航天科技集团公司长征机械厂,成都 610100)

**文 摘** 异物夹杂类缺陷是搅拌摩擦焊接过程中一类典型缺陷。一旦发生该类缺陷,只有对焊缝进行挖排来去除异物后,才能实施补焊。针对挖排造成焊缝材料缺失,现有的方法是通过熔焊或赛填固体颗粒来进行填充。上述方法不仅会在焊缝中引入有异于母材的材料,而且工艺过程繁琐。特别是熔焊的焊接热会对补焊区域周围的母材造成影响,从而造成补焊接头强度的削弱。针对现有补焊方法的不足,本文提出一种双道偏置补焊方法,实施过程简便,可实现等强度补焊。经试验证明,该方法可获得与原始焊缝具有相等强度的补焊焊缝。

**关键词** 搅拌摩擦焊接,焊接缺陷,补焊,多道焊接

中图分类号: TG4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.013

## Repairing Inclusion Defect by Dual-Pass Friction Stir Welding Method

SHI Jing ZOU Min HUANG Xiaolu HUANG Jujin

(Changzheng Machinery Factory of China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100)

**Abstract** Inclusion of foreign bodies is a typical kind of defect in friction stir welding. The included foreign bodies must be eliminated before performing the joint repairing. By using some fused material, or that one in solid-state, some additional material with the same volume as the removed one must be compensated into the eliminated area in the joint. This process is cumbersome, and would bring in some elements which is not existing in the base material. Furthermore, the thermal treatment induced by the fusion in the joint which need to repair would affect the microstructure in the joint. And, it would weaken the strength of the repaired joint. All above are the shortages in existing repairing methods. In this paper, we proposed a dual-pass friction stir welding method, which can repair the joint after removing inclusion of foreign bodies. Without additional material addition, this method can produce the repaired joint that has the same strength as the original one. And it is convenient in application. Especially, the repaired joint has improved elongation. It can be conclude that the proposed repairing method is practical, and has a great application prospect. It has been proved by experiments that the proposed method can make a repairing joint with the same strength as the original one.

**Key words** Friction stir welding, Welding defect, Joint repairing, Multi-pass welding

### 0 引言

搅拌摩擦焊接技术在铝合金焊接方面表现出的独到优势,使得其在航天飞行器的结构件制造方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。但是在工程化的应用过程当中,不可避免地会出现焊接缺陷,其缺陷形式可简单分为表面成型缺陷、材料缺失性缺陷和强度削弱类缺陷三大类。其中表面成型缺陷主要包括飞边毛刺、鱼鳞纹、焊缝起皮等<sup>[2]</sup>;材料缺失性缺陷主要包括孔洞、隧道、犁沟等;而强度削弱类缺陷主要有根部未焊透、S形线及异物

夹杂等。对于后两种缺陷,由于其直接影响焊缝的接头强度,危害性更大。因此,目前针对搅拌摩擦焊接缺陷的补焊研究,以消除影响焊缝接头强度的缺陷为主。文献[3-12]记录的现有主要缺陷消除方法,均采用在焊接缺陷处进行重复焊接来实现,其主要差别表现在针对焊缝材料缺失的补充手段上。但是,这些方法也暴露出一定的局限性,首先,现有方法主要针对以匙孔缺陷为代表的点状缺陷;其次,对于以挖排方式去除的缺陷,其挖排方法和挖排量的大小并没有统一的规范。

收稿日期:2016-01-07

作者简介:石璟,1984年生,工程师,博士,主要从事搅拌摩擦焊工艺开发与相关焊接自动化技术研究。E-mail: lzrocking@163.com

表 1 实验用搅拌针结构参数

Tab.1 Geometrical parameters of tools

类型	锥角/(°)	根部直径/mm	针长/mm	轴肩直径/mm	轴肩内凹角/(°)
预焊用	18	3	2.0	12	7
正式焊用	18	6	5.8	20	7

## 1.2 思路及流程

实验过程主要包含以下步骤。

(1) 采用固定轴肩式搅拌针,通过预焊、正式焊接两步来制备合格的搅拌摩擦焊缝。事后将其中一块用于补焊试验,另一块用于接头性能对比。其中预焊工艺参数为:搅拌针转速 800 r/min,进给速度 400 mm/min,搅拌针倾角为 2.5°,焊前停留时间为 5 s。正式焊工艺参数为:搅拌针转速 600 r/min,进给速度 200 mm/min,搅拌针倾角为 2.5°,下压量为 0.2 mm,焊前停留时间为 8 s。

(2) 模拟焊缝中存在夹杂物的情况,沿焊接方向在焊缝背面对的预定区域进行材料挖排。

(3) 以正式焊接搅拌针为工具,采用双道偏置补焊方法对挖排后的焊缝进行补焊,消除由挖排造成的空隙。其焊接过程所采用的工艺参数与正式焊接一致。

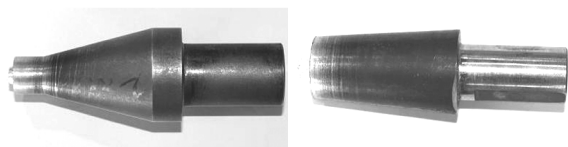
(4) 对比补焊前后的焊缝宏观和微观特征,检验补焊方法的有效性。

并且在挖排后涉及焊缝材料缺失的情况下,其材料补充手段均借助外部添加。特别是利用熔焊方法进行材料补充,其焊接热必然对原有的焊缝及周边母材组织造成影响;再者,搅拌摩擦焊接过程中,如果遇到异物夹杂类的缺陷,并且夹杂深入焊缝程度较深,只能采用挖排去除的方法进行去除。如果利用熔焊进行材料填充外,除了引入异于母材的材料外,其在材料填充面高出的突起物不利于补焊工件的复位贴胎,整个补焊过程费时费力。特别是在航天产品的生产过程中,由于材料和结构的特殊性,对于某些搅拌焊结构不适宜使用熔焊进行补焊。因此,针对异物夹杂类缺陷,有必要开发一种简单有效,切实可行的补焊方法,这也是本文主要的研究内容。

## 1 实验

### 1.1 材料及工具

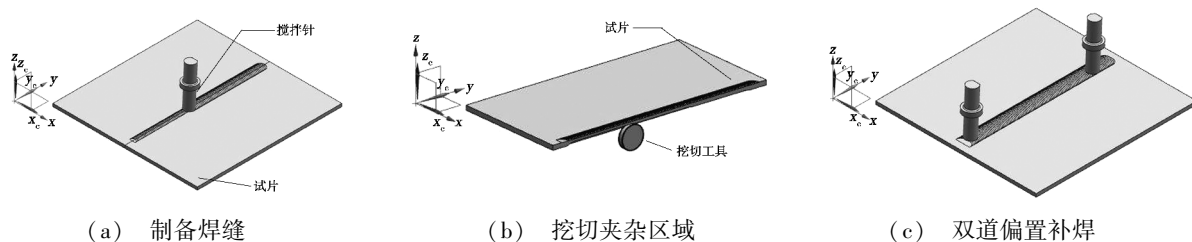
2219-T87 铝合金板材<sup>[13]</sup>,其规格为 300 mm×150 mm×6 mm。采用的焊接工具见图 1,实验使用的搅拌针为自行研制,其参数见表 1。



(a) 预焊用 (b) 正式焊用

图 1 实验使用的搅拌针

Fig.1 Tools for friction stir welding experiments



(a) 制备焊缝

(b) 挖切夹杂区域

(c) 双道偏置补焊

图 2 实验流程示意图

Fig.2 Steps chart of experiments

由于该工艺针对焊接过程中的异物夹杂缺陷展开,而造成夹杂的原因除焊缝预处理不完善外,搅拌针扎伤背部垫板也是重要的原因。上述因素造成夹杂物一般分布在焊缝的背部,多集中于焊缝中心,其弥散范围一般不超过搅拌针的针尖的直径范围,其分布的深度范围不超过板厚的一半。鉴于上述分析,在模拟材料挖切的过程中,由于所采用的正式焊搅拌针直径为 6 mm,因此焊缝背部的沟槽宽度选用 6 mm。为模拟不同的挖切深度,本文采用 1、2、3 mm 三种挖切深度,构造三段彼此相邻的沟槽,每条沟槽长度 80 mm,如图 3 所示。



图 3 试片沟槽挖切示意图

Fig.3 Different depths in the specimen

在双道偏置补焊过程中,采用与正式搅拌焊相同的搅拌针,搅拌针尖距离垫板距离依然为 0.2 mm。

以原始焊缝中心为对称线,分别向两侧偏置距离  $p$  后,进行补焊。在本文中,由于搅拌针针尖直径为 5 mm,因此选择偏置距离  $p=2.5$  mm。包括搅拌针转速、进给速度、倾角、下压量等工艺参数均与正式焊接相同。其不同之处在于第一道补焊轨迹位于原始焊接轨迹的前进侧,第二道补焊轨迹位于原始焊接轨迹的后退侧。这是由于在焊接过程中,材料在搅拌针的带动下,会在后退侧形成堆积,可以起到填充材料挖切处空腔的目的。其补焊轨迹的分布情况如图 4 所示。

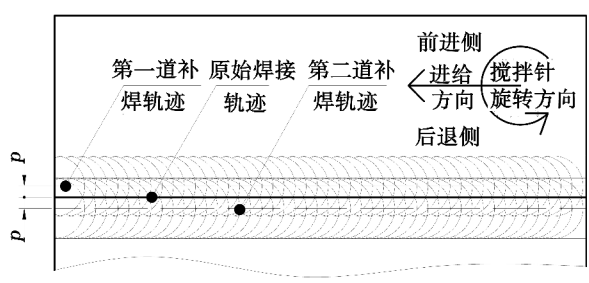


图 4 补焊顺序示意图

Fig.4 Steps chart in the repairing

### 1.3 试样测试

首先采用 X 光探伤与相控阵超声波检测补焊接头是否存在焊接缺陷。合格后沿垂直于补焊接头方向截取金相试样,用混合酸(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO<sub>3</sub>+95 mL H<sub>2</sub>O)溶液对抛光后的试样进行腐蚀,在莱卡 DMI3000M 型光学显微镜下进行典型区域金相组织分析。在焊接试片上截取拉伸试验,在 CMT5305 型拉伸试验机上进行拉伸试验,测试补焊后的拉伸力学性能。其取样方式如图 5 所示。

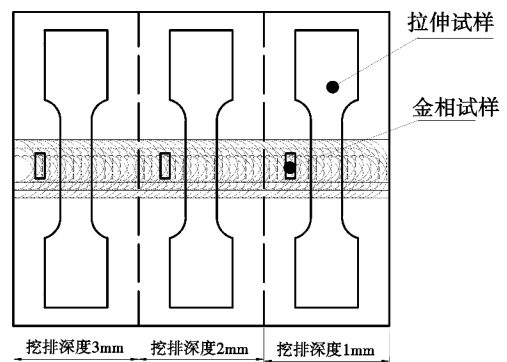


图 5 试样分布示意图

Fig.5 Diagram of specimen

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 补焊接头宏观形貌

如图 6 所示,经双道偏置补焊工艺完成的搅拌摩擦焊接缝通过 X 光和相控阵技术进行检测后正式未出现焊接缺陷。



图 6 经双道偏置补焊工艺完成的搅拌摩擦焊缝

Fig.6 Results of repairing by dual-pass friction stir welding method

搅拌摩擦焊接作为典型的固相连接结束,一般认为搅拌摩擦焊接过程中材料体积不发生变化。由于在本补焊方法过程中,采取了材料外切的处理方法,因此在本文的研究过程中,对补焊前后焊缝厚度的变化情况以及焊缝的收缩量进行关注与测量。如图 7 所示,在每个挖切区域内,布置两个测量点,每个点距区域边界的距离均为 40 mm。

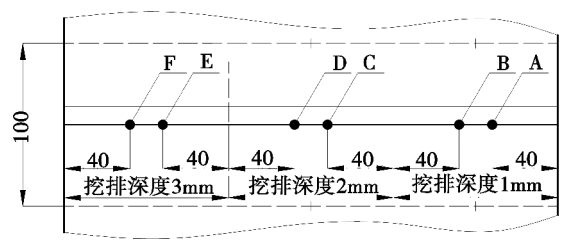


图 7 试片焊缝厚度测量示意图

Fig.7 Diagram for thickness testing on the specimen

为了体现是否进行补焊,以及补焊前后焊缝厚度的变化情况,本文对补焊试片在补焊前后的厚度,以及未进行补焊试片的补焊进行了测量和分析,其结果如表 2 所示,可以看出补焊前后其焊缝减薄量随着挖排深度的增加而增大。

另一方面,为了反映补焊对焊缝收缩量的影响,针对补焊试片,在补焊前在试片表面刻划两条间距为 100 mm 的基准线,在补焊后测量不同挖切区域的刻线间距离,来测量焊缝的收缩量。经实际测量发现,焊后挖排深度为 1 mm 的区域内焊缝收缩量约为 1.0 mm;挖排深度为 2 mm 的区域内焊缝收缩量约为 1.12 mm;挖排深度为 3 mm 的区域内焊缝收缩量约为 1.36 mm。其焊缝的收缩量同样随着挖排深度的增大而增加。通过对补焊前后焊缝宏观形貌的对比分析中可以发现,其焊缝的外形特征变化趋势符合搅拌摩擦焊中材料体积不变的假设。但是值得注意的是,虽然焊缝材料的最大挖排深度达到了试片厚度的 50%,但是焊缝厚度、焊缝宽度等并没有减少至原来



的一半,这说明本文所采用搅拌针对其周围材料具有良好的搬运能力,将周边母材的材料搬运至焊缝区域,实现对缺失材料的有效填充,以维持焊缝机构的基本形貌一致,这一特点有助于提升该技术在实际补焊过程中的应用价值。

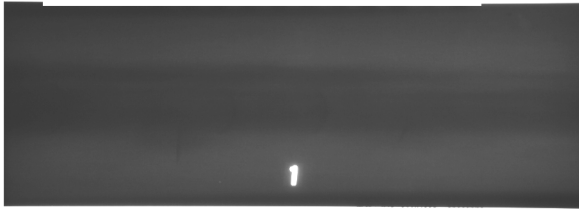
表 2 焊缝厚度

Tab.2 Results of thickness testing

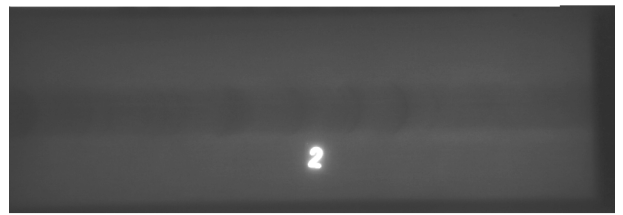
试片状态	A 点/mm	B 点/mm	C 点/mm	D 点/mm	E 点/mm	F 点/mm
未补焊	5.77	5.78	5.76	5.79	5.77	5.72
试片补焊前	5.85	5.86	5.83	5.87	5.80	5.84
试片补焊后	5.71	5.66	5.55	5.55	5.48	5.47
补焊后试片减薄量	0.14	0.20	0.28	0.32	0.32	0.37

## 2.2 焊缝 X 光透视结果

通过 X 光射线对经双道偏置补焊工艺处理的焊缝[图 8(a)]进行分析发现,其焊缝组织致密,且没有焊接缺陷。与正常焊缝[图 8(b)]进行对比,经双道偏置补焊工艺处理的焊缝区域较宽。



(a) 经双道偏置补焊工艺处理



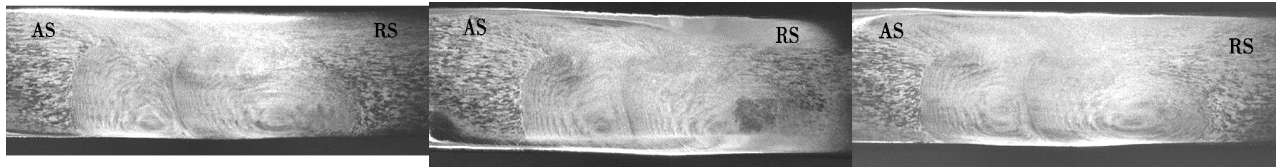
(b) 正常搅拌焊缝

图 8 焊缝 X 光透视结果对比

Fig.8 X-ray comparison of the repaired and normal joints

## 2.3 补焊接头微观金相组织

图 9 为补焊后三个不同挖切深度区域内的焊缝横截面宏观金相照片,其焊缝区域包含典型的搅拌摩擦焊焊缝组织特征,如焊核区(NZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(TAZ)等。而补焊焊缝的最大特点在于先后形成的两条补焊焊缝的焊核区域存在一定的重叠,但是各自又独立保留了搅拌摩擦焊典型的“洋葱环”焊核特征。通过对比可以发现,在三个不同挖排深度的区域内,其焊核的大小,形状基本一致。并且在焊缝中只包含两个焊核,没有出现孔洞、沟槽等材料缺失型缺陷。这说明搅拌针焊接过程中,原始焊缝周围的金属在搅拌针与轴肩的旋转、进给运动的带动下,经过充分软化后对挖排部位进行了有效的填充,其结果与文献[14]的分析吻合。



(a) 挖排深度 1 mm

(b) 挖排深度 2 mm

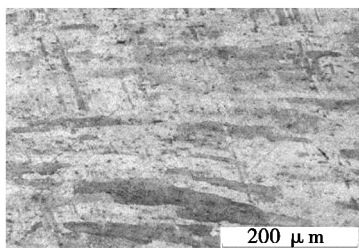
(c) 挖排深度 3 mm

图 9 补焊后焊缝横截面宏观金相图片

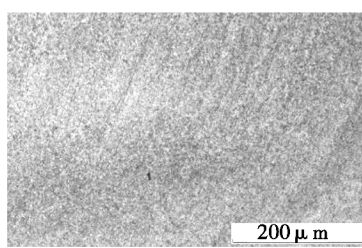
Fig.9 Cross section metallograph of specimens

图 10 为经材料挖排后通过双道偏置补焊所形成接头的微观形貌。图 10(a)为 2219 铝合金母材的微观组织,主要由一系列长条状晶粒组成,且具有方向一致的特征,这与板材在制备过程中的轧制工艺有密切的关系。图 10(b)显示出焊核区在搅拌针带动下发生剧烈的变形与塑性流动,碾压紧实后所形成的致密锻造组织,其晶粒组织主要为由再结晶过程所形成

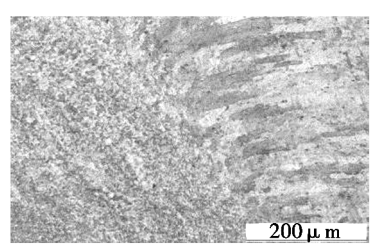
的细小等轴晶粒。图 10(c)、(d)分别为补焊接头顶部的前进侧与后退侧的热机影响区的微观组织。补焊后的接头热机影响区组织发生了一定程度的变化,主要体现在该区域由于在补焊的过程中,将原始焊缝中的热影响区带入了新的焊缝中,组织发生了不同程度的粗化长大,并逐渐丧失了原始母材轧制晶粒边界形貌,但依然具有典型的搅拌摩擦焊组织的特征。



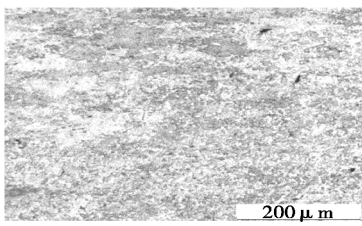
(a) 母材



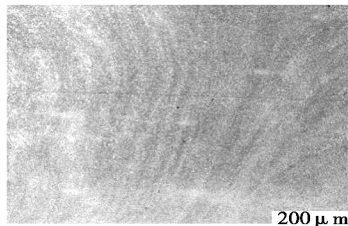
(b) 焊核区



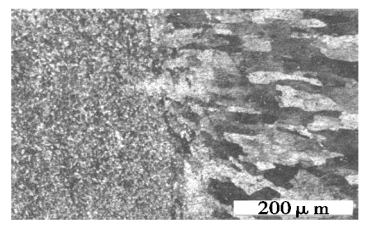
(c) 前进侧 TMAZ(T)



(d) 后退侧 TMAZ(T)



(e) 双焊核重叠区域



(f) 前进侧 TMAZ(B)

图 10 双道偏置补焊接头微观组织形貌(T:焊缝顶部,B:焊缝底部)

Fig.10 Microstructure of specimens by dual-pass friction stir welding method

图 10(e)为补焊过程中两焊核区重叠区域的微观组织形貌,可以看到起焊核组织在搅拌针剧烈的带动下材料形成上下流动的特征,这主要由于搅拌针表面的螺纹特征带动材料运动所造成。图 10(f)为焊缝底部前进侧的热机影响区,其焊核晶粒与母材晶粒之间形成明显的界限,从而使得该区域成为整个补焊接头的薄弱环节。在接头拉伸试验中,试件的断裂位置均分布在补焊后的前进侧,也证实了这一点。

## 2.4 补焊接头力学性能

表 3 为采用双道偏置补焊工艺的焊缝接头强度与普通搅拌焊接头拉伸性能对比结果。可以看出补焊接头的抗拉强度为 325 MPa,接头的抗拉强度系数为 73.86%,其抗拉强度平均值与未经补焊的无缺陷搅拌焊接头基本等强,且略微有所提升。但是其接头的延伸率从 5%变为 7%,有较为明显的改善。

表 3 双道偏置补焊接头拉伸性能对比

Tab.3 Mechanical property comparison of the repaired and normal joints

试样类别	挖排深度/mm	抗拉强度/MPa	延伸率/%	强度系数/%
双道偏置 补焊接头	1	325	7.0	73.86
	2	320	7.0	
	3	330	7.0	
未补焊搅拌 摩擦焊接头	未挖排	315	5.0	73.48
	未挖排	325	5.0	
	未挖排	330	5.0	

文献[12]认为通过多道补焊形成的焊缝,特别是其补焊次数不超过三次,其焊缝强度并不会发生明显的降低。通过本文的实验,再次证明上述结论的有效性,并且可以发现,该结论在偏置多道焊接的情况下同样适用。而对于接头延伸率的显著提升,其主要原因是通过偏置搅拌针轨迹进行两次搅拌摩擦的焊接,由于其焊核区域存在重叠,晶粒组织发生细化的区域进一步扩大,从而有助于提升整个接头的延伸率。

## 3 结论

(1)本文所研究的双道偏置补焊方法,针对以异物夹杂为代表的缺陷,是一种切实有效的补焊方法。该方法具有无需额外添加材料,无需特制补焊工具与工艺条件就可以实施补焊的优点。且可沿焊缝实现大深度挖切(最多可达母材厚度的 50%),具有良好

的工程应用价值。

(2)采用双道偏置补焊的方法,对挖切后的焊缝可实现等强度补焊。虽然其焊缝厚度会存在一定的减薄,并会进一步造成焊缝收缩,但是均在工程应用的可接受范围之内,有效避免了因局部缺陷造成整件零件报废的问题。

(3)通过多次搅拌摩擦焊补焊后,对焊缝晶粒尺寸进一步细化,并且由于双道偏置的原因使得焊核区域宽带变大,晶粒细化的范围增加,从而进一步提高了补焊后焊缝接头的延伸率。

## 参考文献

- [1] 范平章. 搅拌摩擦焊在航天工业中的应用与发展[J]. 航天制造技术, 2003, 3(6): 32-35.
- [2] 曹丽洁. 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷的研究进展[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 68-71, 100.
- [3] 席伟民, 张涌健. 搅拌摩擦焊返工工艺研究[J]. 金属加工, 2013, 22: 53-55.
- [4] 侍光磊. 搅拌摩擦焊返工工艺研究[J]. 现代机械, 2013, 2: 24-27, 31.
- [5] 刘会杰, 张会杰, 黄永宪, 等. 搅拌摩擦焊接缺陷的补焊方法[J]. 焊接学报, 2009, 30(1): 2-4.
- [6] 王国庆, 赵刚, 郝云飞, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔形缺陷修补技术[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(3): 24-28.
- [7] 刘杰, 杨景宏, 韩凤武, 等. 厚板铝合金搅拌摩擦焊匙孔补焊接头组织与性能[J]. 材料工程, 2012(7): 29-33.
- [8] 王国庆, 赵刚, 郝云飞, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔形缺陷修补技术[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(3): 24-28.
- [9] 黄永宪, 韩冰, 吕世雄, 等. 基于固态连接原理的填充式搅拌摩擦焊匙孔修复技术[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 5-8.
- [10] 郝云飞, 白景彬, 田兵, 等. 熔焊填充 FSW 修补搅拌摩擦焊缝匙孔型缺陷的接头组织性能研究[J]. 航空制造技术, 2014(10): 83-87.
- [11] 王国庆, 杜岩峰, 冯秀云, 等. 搅拌摩擦焊在 2219 铝合金 VPPA 熔焊接头缺陷补焊中的应用[J]. 航天制造技术, 2010(2): 4-9.
- [12] 姚君山. 搅拌摩擦焊接头隧道类缺陷等强度补焊工艺[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(1): 73-76, 81.
- [13] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 8.
- [14] 柯黎明, 潘际奎, 邢丽, 等. 搅拌摩擦焊焊缝金属塑性流动的抽吸—挤压理论[J]. 机械工程学报, 2009(4): 89-94