

2219 铝合金直流正极性 A-TIG 焊接技术

栗 慧^{1,2}, 邹家生¹, 姚君山², 曲文卿³

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 镇江 212003;

2. 常州工学院 机械与车辆工程学院, 常州 213002; 3. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种用于 2219 铝合金焊接的新方法, 焊前在待焊表面预先涂敷一层除气去膜活性剂, 实现了 2219 铝合金的直流正极性焊接. 研究不同的活性剂浓度对 2219 铝合金直流正极性活性 TIG 焊(A-TIG)焊缝表面成形、气孔缺陷、微观组织以及力学性能的影响. 结果表明, 当活性剂浓度为 10% 时可以获得无气孔缺陷、表面成形和力学性能良好的 2219 铝合金直流 A-TIG 焊缝. 与变极性 TIG 焊相比, 焊接过程电弧稳定性好, 热输入小, 焊缝质量优异.

关键词: 直流正极性; 活性 TIG 焊; 活性剂浓度; 气孔; 2219 铝合金

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.2018390075

0 序 言

2219 铝合金具有较高的比强度、比模量、断裂韧性、疲劳强度和耐腐蚀稳定性, 同时具有良好的成形工艺和焊接性能, 因而在航天运载器中获得了广泛的应用^[1-2], 成为了新一代运载火箭低温贮箱的主体结构材料.

在火箭低温贮箱的焊接制造中, 箱体、瓜瓣与外部的法兰之间的连接以及变截面型材框等结构的焊接, 受条件限制, 只能采用传统的熔化焊. 2219 铝合金的熔化焊焊缝具有较高的焊接气孔, 严重影响了贮箱结构的完整性. 因此, 如何改进或开发新的焊接工艺, 降低焊缝内部气孔的发生率, 同时获得良好的焊缝成形和接头强度, 满足产品高质量、高标准要求, 成为 2219 铝合金熔化焊所要解决的一个重要难题.

铝合金焊接气孔主要来源于焊接气氛中夹杂的水蒸气、母材及焊接材料表面氧化膜吸附的水分在电弧作用下分解形成的氢气孔^[3]. 母材和焊材中的氢通过熔化吸收进入熔池, 周围环境中的氢随着交流电弧的过零不稳而进入熔池. 因此, 如果能采用一种特殊的焊剂, 一方面隔离周围环境和焊接熔池, 同时去除焊接气氛和熔池中的氢气, 另一方面能够在焊接过程中去除表面氧化膜, 使用直流焊接铝合金替代交流焊接方式, 从而避免电弧不稳引起的气孔现象, 可以减轻 2219 铝合金焊接气孔问题.

活性焊接法是一种简单、高效、节能的焊接方法. 它通过在 TIG 焊接过程中引入活性元素, 使得

焊缝熔深显著增加, 形成了活性 TIG 焊(activating-TIG welding, A-TIG)^[4-7]. 近几年来, 国外学者加大了对 A-TIG 接头焊缝组织结构、力学性能和数值模拟的研究^[8-11]. 国内学者主要对 A-TIG 的活性剂成分选配和熔深机理方面的进行了研究^[12-15], 重点以增加焊缝熔深为目的. 用于 2219 铝合金的直流正极性 A-TIG 焊的新方法, 以达到除气去膜的目的, 从而能够获得了较高强度、无缺陷的高质量焊接接头.

在前期活性剂配方优化的基础上, 研究了不同的活性剂浓度对 2219 铝合金直流 A-TIG 焊焊缝表面成形、气孔缺陷以及力学性能的影响, 获得无气孔缺陷、表面成形良好、力学性能优异的直流 TIG 焊接头.

1 试验方法

焊接材料为厚度 5 mm 的 2219-T6 铝合金板材, 化学成分见表 1, 试板尺寸为 300 mm×100 mm. 采用直径 3.2 mm 的 2319 焊丝, 保护气体为 99.99% 的氩气, 氩气流量为 11 L/min, 电弧长度为 3 mm. 焊接设备为 Lincoln Electric Square TIG 355. 采用直流正极性焊接方式, 打底焊电流为 190 A, 盖面焊电流为 165 A, 焊接速度为 140 mm/min, 送丝速度为 1 500 mm/min.

表 1 试验用铝合金的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Aluminum alloy chemical composition

Cu	Mn	Fe	Ti	V	Zn	Si	Zr	Al
6.48	0.32	0.23	0.06	0.08	0.04	0.09	0.02	余量

通过前期的空烧、堆焊以及堆焊优化试验获得了 $\text{AlF}_3 + 36\% \text{LiF} + 14\% \text{KF} \cdot \text{AlF}_3 + 11\% \text{K}_2\text{SiF}_6$ 成分的活性剂。焊前对焊接表面的油污等杂质进行清理,然后将活性剂用无水乙醇溶解,搅拌成糊状后用毛刷均匀涂敷在待焊区域表面,活性剂涂覆时只能涂一层,然后进行焊接。焊接过程采用不同的活性剂浓度配比(活性剂质量与无水乙醇质量的百分比,简称浓度)见表 2。为了进行对比研究,采用变极性 TIG 焊焊接试板(活性剂浓度为 0),打底焊电流为 205 A,盖面焊电流为 180 A,焊接速度为 140 mm/min,送丝速度为 1 500 mm/min。

表 2 活性剂浓度

Table 2 Concentration of activating flux

活性剂质量 m/g	无水乙醇体积 V/mL	浓度 $c/(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$
5	100	5
10	100	10
15	100	15
20	100	20

2219 铝合金的直流 A-TIG 焊和变极性 TIG 焊,采用零间隙装配和平板对接方式,背面垫板采用带 6 mm × 1 mm (宽 × 深) 的焊接凹槽的不锈钢垫板。焊后观察焊缝表面成形,并对焊缝内部进行 X 射线探伤检测。采用 WDW3050 型电子万能拉伸试验机进行力学性能测试,每块试板取拉伸试样 5 个。采用 Olympus BX51M 显微镜进行金相组织分析。

2 试验结果及分析

2.1 活性剂浓度对表面成形的影响

采用表 2 所示的不同浓度的活性剂配比,均能获得良好的焊缝表面成形。直流 A-TIG 与变极性 TIG 焊相比,焊缝表面成形光洁程度无明显差异,焊缝成形良好,宽度比较均匀,两侧没有黑边,表面活性剂残渣容易去除,如图 1a ~ 1b 所示。焊缝背面成形很好,如图 1c 所示。

从焊缝宽度上来讲,直流 A-TIG 所获得的 2219 铝合金焊缝要明显小于变极性 TIG 焊焊缝,如图 2 所示。采用直流 A-TIG 方式焊接的 5 mm 2219 铝合金焊缝的宽度为 13 mm,焊缝余高为 0.49 mm;而采用变极性 TIG 焊方法焊接的 5 mm 2219 铝合金焊缝的宽度达到了 18 mm,焊缝余高为 0.52 mm。原因是在直流正极性 A-TIG 焊接方式下,钨极的电子发射能力强,发射出来的高能电子流高速冲击焊件,将全部能量传输到焊件上^[3],从而使其形成深而窄的焊

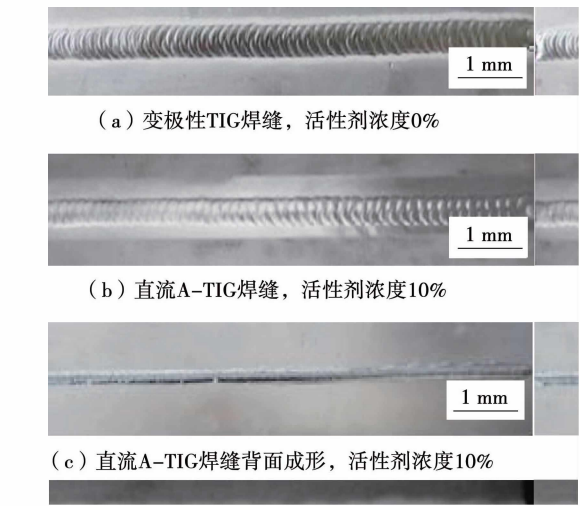


图 1 2219 铝合金 TIG 焊缝表面成形
Fig. 1 2219 aluminum alloy TIG weld surface forming

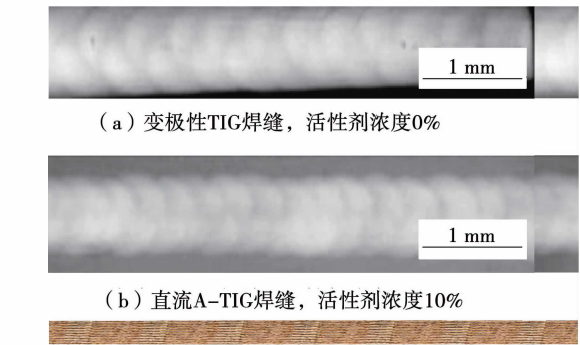


图 2 2219 铝合金 TIG 焊缝内部成形
Fig. 2 2219 aluminum alloy TIG weld forming inside

缝,所以在同等焊接厚度条件下,与变极性 TIG 焊相比,直流正极性 A-TIG 焊缝宽度更小,电弧热量更为集中,焊接热影响区更小,整个焊接过程对母材的损伤也要小一些。

2.2 活性剂浓度对内部质量的影响

由于 2219 铝合金的焊接气孔敏感性较大,因此焊缝内部是否存在气孔缺陷是评定焊缝质量的一个重要标准。2219 铝合金 TIG 焊缝的 X 射线探伤结果见表 3。表 3 为不同活性剂浓度条件下,从 X 射线探伤底片上获得的整条焊缝内部的气孔数量。

表 3 2219 铝合金焊缝内部气孔数量

Table 3 Number of 2219 aluminum alloy weld porosity

活性剂浓度 $c/(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	气孔数量 $n(\text{个})$
0	链状气孔, >17
5	2
10	0
15	2
20	3

当活性剂浓度为 0 时,即采用变极性 TIG 焊方式时,焊缝内部气孔呈链状分布,数量高于 17 个,如图 2a 所示. 当活性剂浓度为 5% 时,焊缝内部只存在 2 个气孔,气孔数量显著减少;随着活性剂浓度增大至 10%,焊缝内部质量得到进一步改善,完全消除了内部气孔缺陷,如图 2b 所示;继续增大活性剂浓度,当浓度分别为 15%,20% 时,焊缝内部又出现了少量气孔. 活性剂的使用首先去除了铝合金表面的氧化膜,使直流焊接方式成为可能;其次就是除气,因此直流 A-TIG 焊的气孔数量要明显少于变极性 TIG 焊. 随着活性剂浓度的继续升高(10% ~ 20%),电弧出现一定的扰动,稳定性变差,因此活性剂和保护气氛对熔池与周围环境的隔离效果变差,周围环境中的水蒸气进入熔池,导致焊接气孔数量出现微弱的增大趋势.

2.3 活性剂浓度对微观组织的影响

图 3 和图 4 分别为采用变极性 TIG 焊(活性剂浓度为 0 时)和直流活性 TIG 焊(活性剂浓度为 10%) 2219 铝合金焊缝接头的微观组织形貌. 图 3a 和图 4a 是焊缝接头母材区域的组织形貌. 从图 3a 和图 4a 可以看出,两种 TIG 焊母材区的组织是完全相同,母材组织是由沿着轧制方向(水平方向)存在的细长晶粒和弥散分布的强化相组成的.

图 3b 是 2219 铝合金变极性 TIG 焊接头焊缝组织照片. 从图 3b 可以看出,变极性 TIG 焊缝组织是由树枝晶组织、强化相和气孔构成的. 图 4b 是直流活性 TIG 焊焊缝组织,同样是由树枝晶组织和强化相构成的. 图 4b 中的晶粒尺寸明显小于图 3b 的晶粒尺寸,这主要是由于直流活性焊的焊接电流较小,对材料的热影响小,故形成的晶粒细小;而变极性 TIG 焊的焊接电流大,焊缝区的组织粗大. 由于变极性 TIG 焊焊接过程中电流存在电流换向过零点,电弧不断过零引燃,对电弧燃烧的稳定性的影响较大,因此交流电弧燃烧的稳定性的影响较大,其焊缝气孔发生率也必然增大,加上焊接过程中熔池结晶速度大于气泡形核、长大、上浮速度,气泡残留在焊缝中形成气孔,最终会影响接头的性能.

图 3c 是变极性 TIG 焊焊缝区与热影响区连接处的熔合区组织,铝合金焊接气孔的形成机理比较复杂,氢在液态铝合金中的溶解度为 0.69 mL/100 g,而在铝合金中溶解度仅为 0.036 mL/100 g,随着氢溶解度的突变,过饱和的氢来不及从凝固焊缝中析出,从而形成了气孔缺陷. 熔合区处于熔池的固液界面,气泡形核所需能量大大低于熔池中心气泡形核所需能量,气泡极易在熔合区处形核,熔合区附近液态

金属存在时间很短,这对熔合区处的气泡溢出极为不利. 图 4c 为直流活性 TIG 焊熔合区的组织形貌,熔合区组织是由细长的晶粒组织和强化相构成的,没有气孔形成.

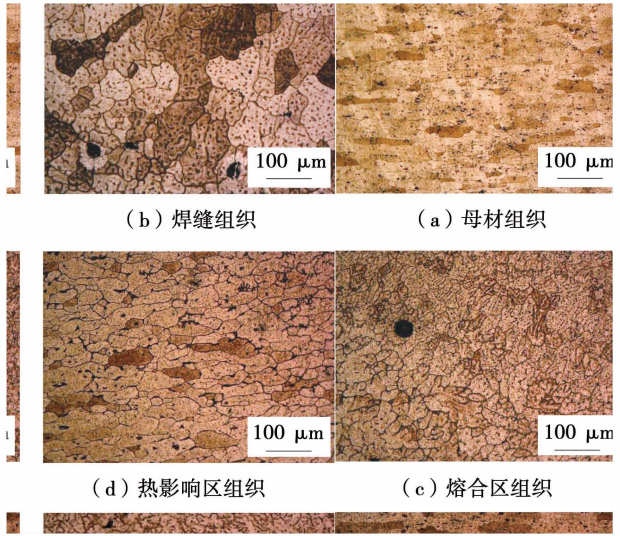


图 3 2219 铝合金变极性 TIG 焊接头微观组织
Fig. 3 Joint microstructure of 2219 aluminum alloy variable polarity TIG welding

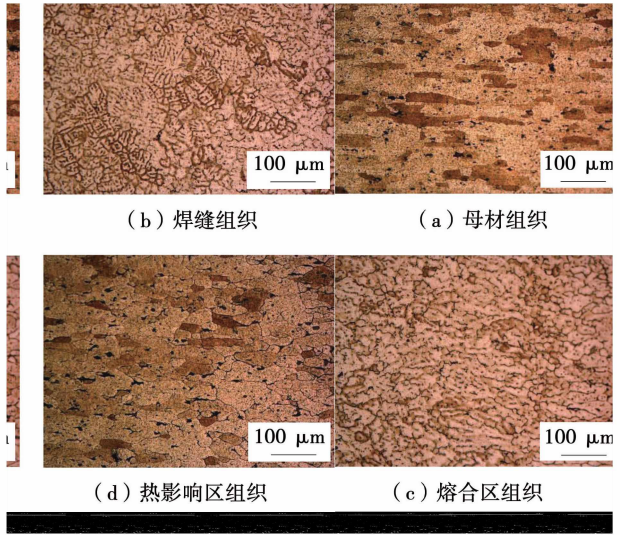


图 4 2219 铝合金直流 A-TIG 焊接头微观组织
Fig. 4 Joint microstructure of 2219 aluminum alloy direct current A-TIG welding

图 3d 和图 4d 是两种焊接方法的热影响区的组织形貌. 热影响区的组织均是由轧制晶粒组织和强化相构成的. 变极性 TIG 焊接的 2219 铝合金接头的热影响区组织要比直流活性焊技术所焊接的 2219 铝合金接头的热影响区组织粗大.

综合上述分析表明,采用变极性 TIG 焊和直流

活性焊焊接相同厚度的 2219 铝合金材料,由于直流活性焊能够大大降低焊接电流,电弧热量更为集中,更容易形成深而窄的焊缝,焊接热影响区更小,直流活性焊焊缝熔池金属凝固冷却的速度相对加快,晶粒长大的时间缩短,表现为一定程度的细化,并且焊缝区没有任何气孔的存在,因此,其焊缝组织要优于变极性 TIG 焊缝组织。

2.4 活性剂浓度对力学性能的影响

图 5 为 2219 铝合金 TIG 焊焊接接头力学性能随着活性剂浓度的变化情况。当活性剂浓度为 0,即采用变极性 TIG 焊焊接时,接头的抗拉强度为 263 MPa,性能最差;随着活性剂浓度的增加(0~10%),2219 铝合金直流 A-TIG 焊焊接接头的抗拉强度逐渐增大,当活性剂浓度为 10% 时,抗拉强度达到最大值 296 MPa;随着活性剂浓度的进一步增大(10%~20%),2219 铝合金直流 A-TIG 焊焊接接头的抗拉强度呈现出先下降后升高的趋势,如图 5 所示。虽然当活性剂浓度为 15% 时,2219 直流 A-TIG 焊焊接接头的抗拉强度较差,为 285 MPa,但与变极性 TIG 相比,仍表现出明显的优势,抗拉强度提高了 22 MPa。2219 铝合金直流 A-TIG 焊焊接接头抗拉强度的提高是焊缝内部气孔缺陷数量减少和晶粒细化的直接结果。

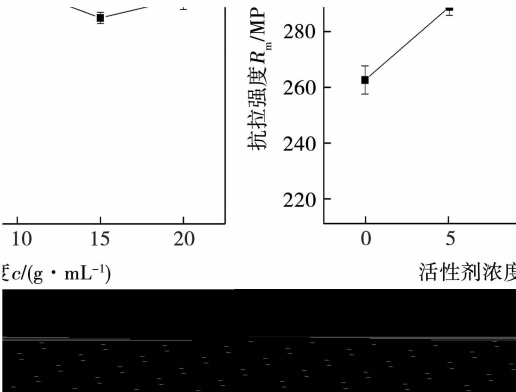


图 5 2219 铝合金直流正极性 A-TIG 焊接接头的力学性能
Fig. 5 The mechanical properties of 2219 aluminum alloy direct current A-TIG

与变极性 TIG 相比,采用直流 A-TIG 焊接方式时,焊接接头力学性能的一致性得到了显著改善,如图 5 所示的标准偏差范围。从该范围的变化情况可以说明,在变极性 TIG 焊接条件下,5 个平行试样的抗拉强度数值的离散程度较大,这与焊缝内部气孔缺陷的分布是密切相关的,试样内部气孔数量多,抗拉强度就会出现明显的降低,气孔数量少,则会得到改善。

3 分析与讨论

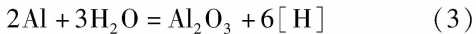
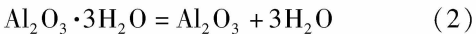
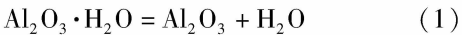
影响 2219 铝合金焊接氢气孔的因素主要是材料、焊枪结构、焊接方法和工艺、环境及保护气氛、操作技术等^[16]。所以根据焊接氢气孔的影响因素,对比分析 2219 铝合金的直流 A-TIG 焊与变极性 TIG 焊。

(1) 材料的影响。母材和焊丝是氢气孔的重要来源,尤其是焊丝表面。由于对母材和焊丝的处理已常规化,所以基本没有更好的措施。

(2) 焊枪结构的影响。目前生产中对焊枪结构已经成形,尚未有更好的措施。

(3) 焊接方法和工艺的影响。焊接方法目前最常用的是交流 TIG 焊,焊接工艺参数也是影响氢气孔产生的重要原因,此外操作人员的技术水平也会影响氢气孔的产生。研究认为正是因为铝合金 TIG 焊采用了交流焊方式,存在焊接电流过零点而电弧不稳定问题,从而导致对熔池保护变差,周围环境中的水分进入到熔池中。而采用直流正极性焊接方式,直流焊接过程中电弧稳定,可以防止交流电弧不稳定现象的发生。

(4) 保护气氛的影响。保护气氛对氢气孔的形成有明显的影响,但是这些方面无法调整,目前采用氩气保护方式也是常规方法,没有改进措施。通过前期的堆焊及对焊优化试验获得 $AlF_3 + 36\% LiF + 14\% KF - AlF_3 + 11\% K_2SiF_6$ 混合组分的活性剂。试验结果表明, AlF_3 可以明显增加焊缝熔深,能达到与 SiO_2 增加熔深的效果; LiF 可以去除焊缝表面氧化膜和残渣效果良好,但增加熔深效果一般; $KF - AlF_3$ 去除焊缝表面氧化膜和残渣效果良好,但焊缝熔深效果差,焊缝余高比较大; K_2SiF_6 具有增加电弧稳定性的作用,添加过多会导致焊接过程中看不到熔池变化,焊缝两侧易出现严重的黑边,去膜效果一般。优化后的混合组分的活性剂一方面可以增加熔深,减小焊接电流,提高热量的利用率,节约能源。另一方面去除铝合金表面氧化膜,使焊缝表面保持光洁度。铝合金表面氧化膜中存在许多毛细孔隙,在潮湿环境下,表面氧化膜转化为含水氧化膜 $Al_2O_3 \cdot H_2O$, $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 。在焊接电弧高温作用下,母材及焊丝表面的含水氧化膜分解为



析出的原子氢进入焊缝熔池,铝合金在高温状态下氢的溶解度很大,而在低温状态下氢的溶解度

很小,当熔池冷却凝固时,多余的氢来不及溢出,则留在焊缝中成为过饱和的氢,为焊缝中氢气孔的产生提供了前提条件。因此去除铝合金表面氧化膜,可以很好的抑制焊缝氢气孔的产生。此外,活性剂可以用来隔离和清除熔池中的氢,这种活性剂在焊接过程中熔化覆盖在熔池上,能够起到隔离焊接气氛中水分进入熔池、与熔池中的氢反应生成不溶于金属溶液的气体。活性剂的主要成分是氟化物,氟化物在电弧作用下能够电离出大量的 F 离子。熔池中溶解的 H 离子能够与 F 离子发生反应,生成 HF, HF 在熔池中溶解度非常小,容易在焊接过程中溢出熔池。大量的 F 离子在电弧气氛中能够将周围环境中侵入的水蒸气以及焊丝中带来的水蒸气电离出来的 H 离子迅速反应掉,生成 HF,不会进入到熔池中,这样有效地改善了由于交流焊接方式电弧不稳定而带来的 H 离子。

4 结 论

(1) 焊前在待焊区域表面预先涂敷一层表面除气去膜活性剂,实现了 2219 铝合金的直流正极性 A-TIG 焊接,获得了无气孔缺陷、表面成形良好、力学性能优异的 2219 直流 A-TIG 焊缝。

(2) 2219 铝合金直流 A-TIG 焊焊缝表面成形与变极性 TIG 焊相似,但电弧热量更为集中,焊缝宽度从 18 mm 减小为 13 mm。2219 铝合金变极性 TIG 焊焊缝内部气孔呈链状分布,高于 17 个;而 2219 铝合金直流 A-TIG 焊内部气孔数量显著减少,当活性剂浓度为 10% 时,内部气孔数量为 0,实现了 2219 铝合金的无气孔缺陷焊接,同时焊缝区组织得到了一定程度的细化。

(3) 2219 铝合金变极性 TIG 焊接头抗拉强度最低,为 263 MPa,焊接接头性能一致性差;2219 铝合金直流 A-TIG 焊接头抗拉强度均高于变极性 TIG 焊接头,焊接接头性能一致性也得到明显改善,当活性剂浓度为 10% 时,抗拉强度最好,可达 295 MPa。

参考文献:

- [1] Immarigeon J P, Holt R T, Koul A K, *et al.* Light weight materials for aircraft applications[J]. *Materials Characterization*, 1995, 35(1): 41-67.
- [2] 刘志华, 赵 兵, 赵 青. 21 世纪航天工业铝合金焊接工艺技术展望[J]. *导弹与航天运载技术*, 2002(5): 63-65.
Liu Zhihua, Zhao Bing, Zhao Qing. Prospects for welding technology of aluminum alloy in aerospace industry in 21st century[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2002(5): 63-65.

- [3] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接 第 1 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 黄 勇, 樊 丁, 邵 锋. 活性剂增加铝合金交流 FZ-TIG 焊熔深机理[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(16): 113-118.
Huang Yong, Fan Ding, Shao Feng. Mechanism of activating fluxes increasing weld penetration of AC FZ-TIG welding for aluminum alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 113-118.
- [5] 严 铿, 高莉华, 杨 刚, 等. 单组分活性剂对铝合金 A-TIG 焊焊缝的影响[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 55-62.
Yan Keng, Gao Lihua, Yang Gang, *et al.* Effect of single-component activating flux on weld morphologies in A-TIG welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 55-62.
- [6] 严 铿, 杨 刚, 赵 勇, 等. 铝合金 A-TIG 焊电弧光谱分析[J]. *焊接学报*, 2012, 33(3): 73-76, 105.
Yan Keng, Yang Gang, Zhao Yong, *et al.* Spectrum analysis of A-TIG welding for aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 73-76, 105.
- [7] 陈 俐, 胡伦骥, 巩水利. 活性剂焊接技术研究[J]. *新技术新工艺*, 2005(4): 39-41.
Chen Li, Hu Lunji, Gong Shuli. Research on welding with active flux[J]. *New Technology & New Process*, 2005(4): 39-41.
- [8] Arivazhagan B, Vasudevan M. Studies on A-TIG welding of 2.25Cr-1Mo (P22) steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 18: 55-59.
- [9] Srirangan A K, Paulraj S. Experimental investigation of the A-TIG welding process of Incoloy 800H[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30: 1154-1159.
- [10] Vishnuvaradhan, Chandrasekhar N, Vasudevan M, *et al.* Intelligent modeling using adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) for predicting weld bead shape parameters during A-TIG welding of reduced activation ferritic-Martensitic (RAFM) Steel[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2013, 66(1): 57-63.
- [11] Nanda N K, Balasubramanian K R, Vasudevan M. Finite element simulation of A-TIG welding of duplex stainless steel 2205 using sysweld[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 592-594: 374-379.
- [12] 王林志. 活性剂对 AZ31 镁合金钨极氩弧焊和激光焊接接头微观组织和力学性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [13] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响[J]. *焊接学报*, 2002, 23(1): 1-4.
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Effect of activating fluxes on weld form in TIG welding of stainless steel and titanium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(1): 1-4.
- [14] 吴飞虎. 钛合金的 A-TIG 焊活性剂的研制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [15] 黄 勇, 樊 丁, 樊清华. 活性剂增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深机理研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(5): 45-49.
Huang Yong, Fan Ding, Fan Qinghua. Study of mechanism of activating flux increasing weld penetration of AC A-TIG welding for aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 45-49.

Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, JinFeng. Research on local dry automatic underwater welding system[J]. Electric Welding Machine, 2009, 39(8): 10-13.

[13] 朱加雷, 王殿舒, 焦向东, 等. 气室式局部干法水下焊接[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 329-332.

Zhu Jialei, Wang Dianshu, Jiao Xiangdong, *et al.* A chamber local dry underwater welding[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(3): 329-332.

[14] 朱加雷, 焦向东, 沈秋平, 等. 核电厂检修局部干法自动水下焊接实验[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(S11): 126-128.

Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, Shen qiuping, *et al.* Study on local dry auto underwater welding in nuclear power plant repair[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(S11): 126-128.

[15] 张 彤, 钟继光, 王国荣. 药芯焊丝微型排水罩局部干法水下焊接的研究[C]//中国机械工程学会焊接学会. 第九次全国焊接会议论文集. 哈尔滨: 中国机械工程焊接学会, 1990: 358-361.

[16] 古志明, 李尚周, 梅福欣. 同轴式水下局部干法 TIG 电弧焊接[J]. 华南理工大学学报, 1988, 16(3): 1-8.

Gu Zhiming, Li Shangzhou, Mei Fuxin. A study of local dry TIG

underwater welding with coaxial vision way[J]. Journal of South China University of Technology, 1988, 16(3): 1-8.

[17] American welding society. AWS D3.6M: 2010 Underwater weld code [S]. America: American National Standard Institute, 2010.

[18] 黄江中, 高文斌, 赵翠华, 等. DH36 水下湿法焊接接头组织和力学性能分析[J]. 电焊机, 2014, 44(6): 107-112.

Huang Jiangzhong, Gao Wenbin, Zhao Cuihua, *et al.* Analysis on microstructure and mechanical properties of DH36 underwater wet welding joints [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(6): 107-112.

[19] 殷亚运, 杨新岐, 崔 雷, 等. DH36 高强度钢摩擦柱塞焊工艺与接头组织性能[J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 109-112.

Yin Yayun, Yang Xinqi, Cui Lei, *et al.* Friction hydro pillar processing and joint structure property of DH36 high strength steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 109-112.

作者简介: 沈相星,男,1992 年出生,硕士. 主要从事水下焊接方面的科研工作. Email: shxx@tju.edu.cn

通讯作者: 邸新杰,男,博士,硕士研究生导师. Email: dixinjie@tju.edu.cn

[上接第 93 页]

[16] 张志勇, 张晓牧, 彭 云, 等. 高强度铝合金厚板焊接气孔形态分析及混合保护气体效应[J]. 焊接, 2004(7): 13-15.

Zhang Zhiyong, Zhang Xiaomu, Peng Yun, *et al.* Analysis of porosity characteristics in weld metal of high strength aluminum alloy thick plate and effect of mixed protective gas[J]. Welding &

Joining, 2004(7): 13-15.

作者简介: 栗 慧,女,1980 年出生,硕士,副教授. 主要从事材料连接方面的科研和教学工作. 发表论文 10 余篇. Email: lihui2@czu.cn

通讯作者: 邹家生,男,教授. Email: lihui2@czu.cn