



微米氟化物涂层对铝合金 焊丝抗气孔性的影响

李 红¹, 栗卓新¹, 丛 兴¹, 王义朋¹, 张 禹¹, 周 辰²

(1. 北京工业大学 材料与制造学部, 北京 100020;

2. 江苏恒熠金属制品有限公司, 泰州 225400)

摘 要: 设计了三种含量(质量分数)分别为5%、10%和15%的微米氟化物, 采用机械涂敷方法在ER5356铝合金焊丝表面制备了氟化物涂层, 并与无涂层商用焊丝进行了熔化极气体保护焊(GMAW)工艺性对比。结果表明: 微米氟化物涂层铝合金焊丝的焊缝中气孔率显著下降, 当涂层中氟化物含量为10%时, 焊丝抗气孔性最佳, 相比于无涂层的铝合金焊丝, 其焊缝气孔率降低约1.6%, 接头抗拉强度达到280.79 MPa, 提高约2.9%。表面涂敷氟化物涂层的焊丝通过改变电弧形态增加焊缝熔深, 从而影响成形外观和力学性能。

关键词: 铝合金焊丝; GMAW; 表面涂层; 气孔性; 力学性能

文章编号: 1004-0609(2022)-05-1373-10

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

引文格式: 李 红, 栗卓新, 丛 兴, 等. 微米氟化物涂层对铝合金焊丝抗气孔性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1373–1382. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40041

LI Hong, LI Zhuo-xin, CONG Xing, et al. Effect of fluoride lubricant coating on porosity resistance of aluminum alloy wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(5): 1373 – 1382. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40041

铝合金焊丝大量应用于航空航天、轨道车辆等重要工程领域。液-固转变过程中, 氢在液态和固态铝合金中溶解度变化较大, 由于铝合金热导率高, 凝固速率快, 导致熔焊时气泡难以有效浮出熔池, 在焊缝中形成氢气孔^[1]。氢气孔会降低焊缝的有效结合面积, 损害焊缝的强度和塑性^[2-4]。因此, 铝合金熔焊焊缝致密性问题始终是制约其推广应用的技术瓶颈。

许良红等^[5]研究表明, 在Ar保护气中加入He气可以显著减少焊缝气孔数量, 再加入1%(体积分数)CO₂后焊缝气孔数量进一步减少。此外, 在熔滴过渡过程中, 引入F⁻可以有效中和H⁺。KOU等^[6]

在保护气体中加入少量氟利昂, 起到了减少焊缝气孔的作用。唐良喜等^[7]提出, 采用摩擦因数较小的特氟龙送丝管代替尼龙管, 有助于提高送丝稳定性和降低焊缝氢气孔。尹玉环等^[8]焊前在母材表面刷涂一层含氟活性剂, 得到了几乎无气孔的A-TIG焊接头。类似方法在激光焊接中也有应用并取得了有益的结果^[9-10]。对焊丝进行表面改性有助于减少氢气孔, 光洁平坦的焊丝表面可以减少油污黏附和空气中的水汽吸附, 从而减少焊缝中的氢含量^[4]。

本文从焊丝表面处理角度出发, 在焊丝表面涂敷一层具有润滑性的微米氟化物材料, 采用X射线探伤和X射线显微镜观测两种方法分别研究了自制

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074017, 51905300); 北京市自然科学基金资助项目(3202002)

收稿日期: 2020-08-27; **修订日期:** 2021-11-17

通信作者: 李 红, 副教授, 博士; 电话: 010-67396168; E-mail: hongli@bjut.edu.cn

表面润滑涂层成分对焊缝Ⅰ类和Ⅱ类气孔率、焊缝成型和力学性能的影响。

1 实验

试验所用焊丝为直径 1.2 mm 的 ER 5356 铝合金焊丝。将粒径为 3 μm~200 nm 的 LiF+NaF 混合颗粒加入到挥发性乙醇丙酮复合溶剂中,持续搅拌得到均匀悬浮液。通过机械涂敷的方法将悬浮液匀速滴加于焊丝表面并做均匀化处理,溶剂随后快速挥发。根据混合溶质含量的不同,得到三种表面有氟化物润滑涂层的特制焊丝,焊丝编号、氟化物含量及混合溶质在焊丝中的比例如表 1 所示,焊丝 1#为未经涂层处理的商用 ER 5356 铝合金焊丝。

表1 焊丝编号及表面润滑涂层配比

Table 1 Number of welding wire and formulation of surface lubricant coating

Welding wire No.	Fluoride content, w/%	Proportion of hybrid solute in welding wire/ 10^{-3}
1 [#]	0	0
2 [#]	5	0.31
3 [#]	10	0.39
4 [#]	15	0.47

采用 FEI Quanta 200F 场发射扫描电镜观察焊丝表面。焊接设备采用松下 YD-500FD 焊机。焊接试验用母材为 5083-O 铝合金,尺寸为 300 mm×150 mm×10 mm,保护气体为纯氩气。母材和焊丝的化学成分如表 2 所示,焊接工艺参数如表 3 所示。焊接前先用钢丝刷打磨焊接区域至完全露出金属光

表2 焊丝及母材化学成份

Table 2 Chemical composition of welding wire and base material

Material	Mass fraction/%								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5356 filler wire	0.16	0.15	0.07	0.059	4.95	0.10	0.01	0.07	Bal.
5083-O base metal	0.4	0.09	0.1	0.4	4.5	0.25	—	—	Bal.

表3 MIG 焊工艺参数

Table 3 MIG welding parameters

Current/A	Voltage/V	Dry extension of electrode/mm	Argon flow/(L·min ⁻¹)	Welding speed/(cm·min ⁻¹)
180	21.5	12-14	18	35

泽,然后用丙酮擦拭待焊表面。

光学显微镜观察和 X 射线探伤是观察焊缝气孔尺寸、形状和分布的常用方法,但是受分辨率的影响,这两种方法只能观察二维平面内尺寸大于 50 μm 的气孔,小于该尺寸的气孔将被忽略。X 射线显微镜(X-Ray CT)也可用于观测气孔尺寸和形状,其显示精度可达 0.7 μm^[11],测量精度大幅高于上述两种方法并更接近真实值^[12]。分别采用 Global XT2600 型 X 射线探伤仪和 Xradia 520 Versa 型 X 射线显微镜检测焊缝Ⅰ类气孔和Ⅱ类气孔。对接焊缝横截面及 X 射线显微镜测试的取样位置如图 2 所示,在焊缝中部距表面 1~2 mm 处,采用线切割制取尺寸为 4 mm×4 mm×4 mm 的立方体试样。采用 X 射线显微镜检测焊缝内部微观气孔分布特性,测试电压为 60 kV,电流为 83 μA,像素分辨率为 4.208 μm。采用 Matlab 软件处理探伤图像。

按照 GB 2651—2008 国家标准,通过线切割加工拉伸试样并在 MTS Landmark 液压万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速度为 2 mm/min,拉伸结果测量 5 次并取平均值。采用 i-SPEED 716 高速摄像机观察熔滴过渡特征。

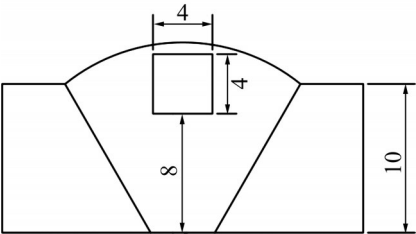


图1 X射线显微镜测试取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling position for X-ray microscope test (Unit: mm)

2 结果与讨论

2.1 微米氟化物涂层对焊缝气孔性的影响

扫描电子显微镜下观察的四种焊丝表面如图2所示, 焊丝1[#]表面平坦, 纵向仅存在微小划痕; 从含微米氟化物涂层焊丝2[#]、3[#]、4[#]表面可以看到零

星分布的大颗粒白色固体颗粒。图3所示为四种焊丝表面的高倍图像, 可以看出白色颗粒尺寸为几十纳米到3 μm 之间。

肉眼的极限分辨率为100 μm , 物体尺寸若小于此值则肉眼难以辨别, X射线探伤的分辨率也仅为几十微米, 因此本文将直径大于100 μm 的氢气孔定义为I类气孔, 其体积一般大于 $1 \times 10^6 \mu\text{m}^3$, 将

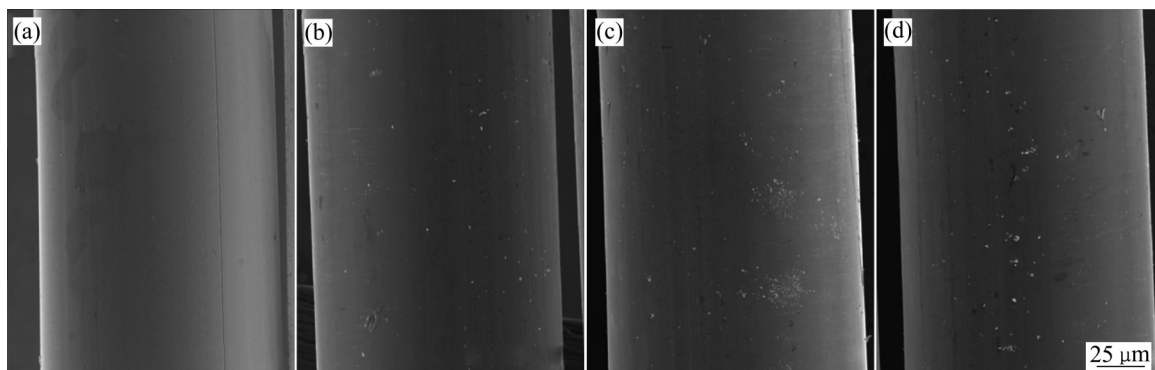


图2 铝合金焊丝表面的低倍SEM像

Fig. 2 SEM images of aluminum alloy wire surface under low magnification: (a) Welding wire 1[#]; (b) Welding wire 2[#]; (c) Welding wire 3[#]; (d) Welding wire 4[#]

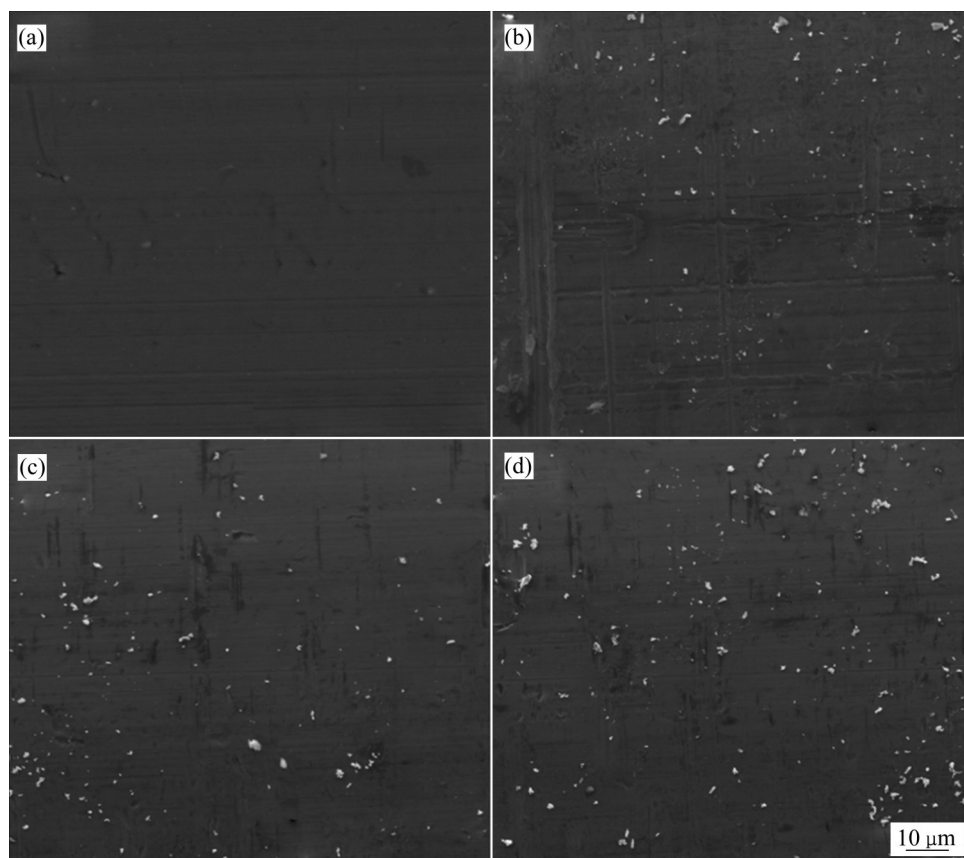


图3 铝合金焊丝表面的高倍SEM像

Fig. 3 SEM images of aluminum alloy wire surface under high magnification: (a) Welding wire 1[#]; (b) Welding wire 2[#]; (c) Welding wire 3[#]; (d) Welding wire 4[#]

直径小于100 μm 的氢气孔定义为II类气孔,其体积小于 $1\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 。将焊缝气孔分为I类和II类有助于深入分析氢气孔在铝合金焊缝中的存在形式及其对力学性能的影响,也有助于评价涂层成分对焊缝气孔的作用^[12]。

2.2 微米氟化物涂层对焊缝I类气孔的影响

四种焊丝对应的四种焊缝分别命名为焊缝A、B、C和D。四种焊缝的X射线探伤底片采用Matlab软件进行图像处理和统计,焊缝内部I类气孔(肉眼可见气孔)面积比率统计结果如表4所示。根据检测结果,焊缝A内部气孔面积比率为1.66%,焊缝B、C和D内部气孔率分别为1.39%、0.58%和0.83%。其中,焊缝C内部气孔面积最小,焊缝A内部气孔面积最大。

铝合金MIG焊接极易产生氢气孔,X射线探伤检测结果表明,四种焊缝内部均分布着I类气孔。将长度为300mm的焊缝平均分成前、中、后三个部分,可以看出焊缝前部气孔分布较多,气孔数量约占总量的40%~45%;焊缝中部气孔分布较均匀,气孔数量约占20%~35%;焊缝后部气孔数量较少,约占20%~30%。一方面,起弧阶段电弧燃烧不稳

定,气体保护效果较差,熔池中混入了较多的空气;另一方面,起弧阶段熔池冷却较快,熔池未经充分搅动,凝固时氢气泡来不及逸出形成大量氢气孔。

通过对比表3中四种焊缝气孔面积比率统计数据可见,焊缝C内部气孔面积最小,为0.58%,焊缝A内部气孔面积最大,为1.66%,三种含微米氟化物涂层焊丝均能起到降低焊缝内部气孔的作用,其中焊缝C的效果最显著。焊丝表面的微米氟化物涂层可以起到明显降低焊缝氢气孔的作用,焊缝B对应焊丝表面氟化物含量较低,未能达到最佳抗气孔效用;而焊缝D对应焊丝表面的氟化物含量较高,过量氟化物对焊接电弧稳定性的不利影响可能是焊缝D气孔量多于焊缝C的原因^[13]。

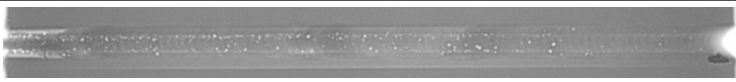
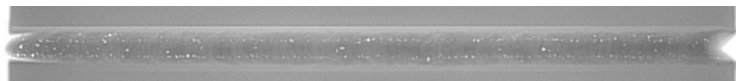
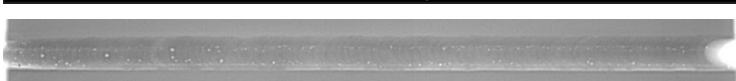
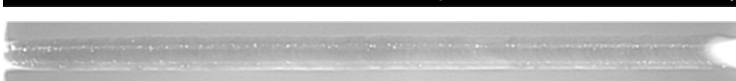
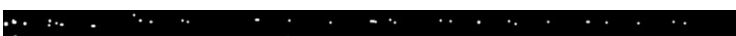
2.3 微米氟化物涂层对焊缝II类气孔的影响

测试所得两种焊缝试样三坐标方向气孔分布图像如图4所示。对两种焊缝试样内部气孔特征的统计结果如表5所示。根据统计结果,焊缝C的气孔总量、平均气孔体积以及焊缝气孔体积分数均显著低于焊缝A。

从图4可以看出,焊缝A中气孔分布密集,而

表4 四种焊缝的X射线探伤底片及气孔面积比率统计结果

Table 4 Statistical results of X-ray inspection film and stomatal ratio of four kinds of welding beads

Welding bead No.	Welding defect detection of X-ray images and images processed by Matlab software			Average area ratio of total pores/%
	Start	Middle	End	
	(Length of 100 mm)	(Length of 100 mm)	(Length of 100 mm)	
A				1.66
				
B				1.39
				
C				0.58
				
D				0.83
				

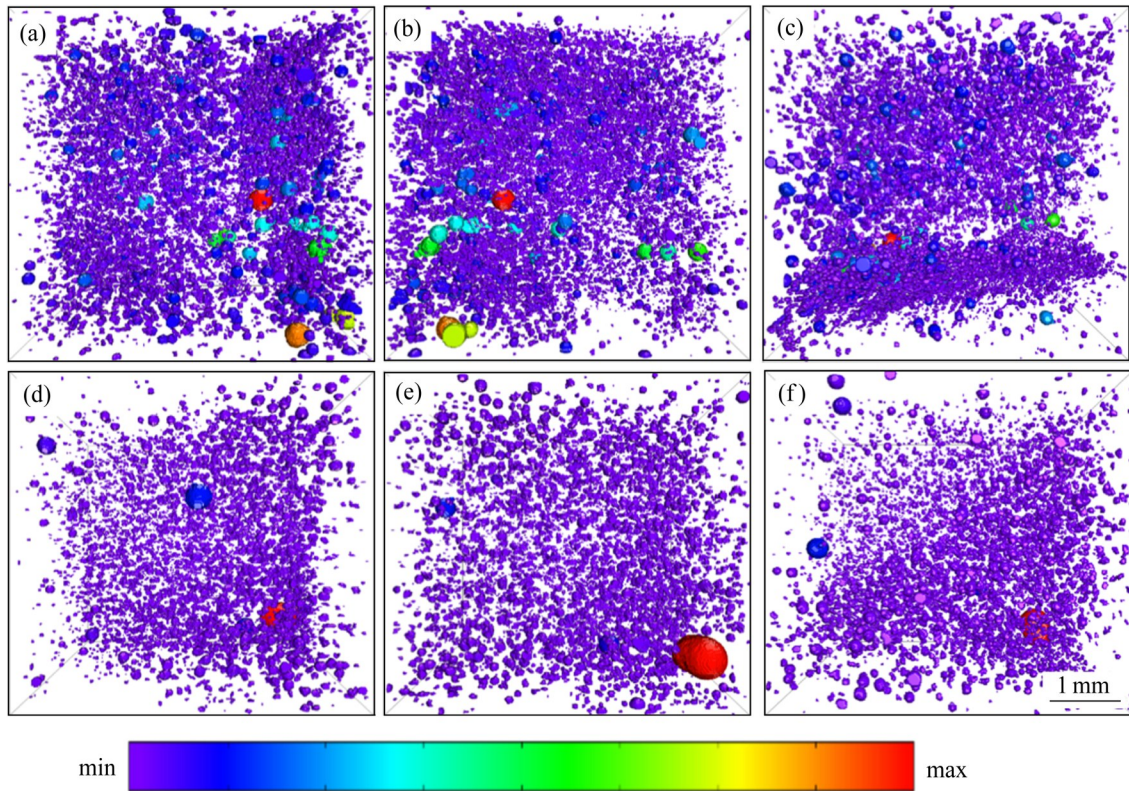


图4 X射线微米CT三坐标气孔分布图

Fig. 4 Stomatal distribution in three-dimensional detected by X-ray microscope: (a) Welding bead A, X axis; (b) Welding bead A, Y axis; (c) Welding bead A, Z axis; (d) Welding bead C, X axis; (e) Welding bead C, Y axis; (f) Welding bead C, Z axis

表5 焊缝A和C中II类气孔特征统计结果

Table 5 Statistical results of type II pores in welding beads A and C

Welding bead No.	Total number of pores	Average pore volume/mm ³	Pores volume fraction/%
A	11705	0.037	2.65
C	6175	0.028	1.08

焊缝C中气孔数量相对较少,两种焊缝中气孔体积均大多分布在 $100\ \mu\text{m}^3$ 到 $1\times 10^6\ \mu\text{m}^3$ 之间,且存在极少量体积为 $1\times 10^6\ \mu\text{m}^3\sim 3\times 10^7\ \mu\text{m}^3$ 的大尺寸气孔。根据厚度色图标尺,体积较小的II类气孔在图中示以紫色、蓝色和靛蓝色,体积较大的I类气孔在图中示以绿色、黄色和红色等。焊缝A中气孔以紫色和蓝色为主,也分布着一定量的绿色、黄色和红色等体积较大的II类气孔;而焊缝C以体积更小的紫色气孔为主且数量明显较少,仅含两个蓝色气孔和1个体积较大的II类红色气孔。根据表5中两种焊缝气孔统计结果,焊缝A中气孔总数为11705个,而

焊缝C中气孔总数为6175个,相比减少近一半。焊缝A中气孔总体积比率为2.65%,焊缝C中气孔总体积比率为1.08%,相比减少一半以上。焊缝C中平均气孔体积也小于焊缝A,两焊缝平均气孔体积分别为 $37\ \mu\text{m}^3$ 、 $28\ \mu\text{m}^3$ 。由此可见,焊丝表面的微米氟化物涂层可以显著降低焊缝内部II类气孔数量和总体气孔体积,不仅对减小气孔尺寸,并且将对I类气孔转变为II类气孔也有明显作用。

2.4 微米氟化物涂层影响焊缝抗气孔性的机制

图5所示为焊丝表面的微米氟化物涂层减少焊缝气孔的原理图。氟化物涂层中的氟在约 $400\ ^\circ\text{C}$ 下分解出 F_2 和 CO_2 气体^[14],进而在高温电弧作用下分解出F原子。F原子具有很强的电负性,易于捕获电弧气氛中大量的电子,发生 $\text{F}+\text{e}=\text{F}^-$ 的反应。在焊接过程中,由于电弧的波动性等原因,少量空气会越过保护气氛进入电弧气氛中,使电弧气氛中 H^+ 数量增加。 H^+ 易溶解进入熔池,待熔池凝固时滞留在焊缝内形成氢气孔。而氟化物涂层电离出大量

的 F^- 与 H^+ 结合发生 $F^-+H^+=HF$ (气体)的反应,降低电弧气氛中的氢分压,熔池中溶解的 H^+ 含量将减少。对于熔池中的 H^+ , F^- 在熔池表面也发生 $F^-+H^+=HF$ (气体)的反应,而 HF 气体几乎不溶于液态铝,在液态铝熔池凝固过程中,反应生成的 HF 气体可以快速逸出熔池^[15]。因此,焊丝表面的微米氟化物涂层降低了焊缝内部的 H^+ 含量,从而降低焊缝内部氢气孔的含量。

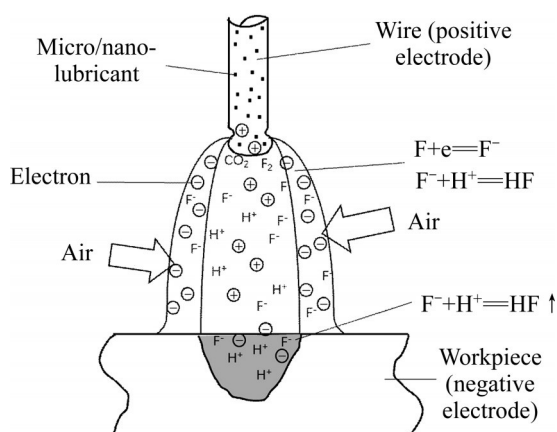


图5 焊丝表面的微米氟化物涂层降低焊缝气孔机制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of porosity reduction mechanism in welding bead with micro fluoride lubricant coating on welding wire surface

2.5 微米氟化物涂层对焊缝成型的影响

在180 A、21.5 V的焊接参数下,四种焊丝形成的焊缝的表面形貌和横截面轮廓如表6所示,四

种焊缝均呈细密的鱼鳞纹,表面光洁,焊缝宽度基本一致,无表面缺陷。然而在相同参数下,四种焊缝熔深随对应焊丝涂层中氟化物含量的增加而逐渐增大,焊缝深宽比也有所增大。

由表6中测试结果可见,四种焊缝表面成型光亮美观,无明显差别;在180 A、21.5 V脉冲电流焊接参数下,四种焊缝熔深分别为3.87 mm、4.01 mm、4.28 mm、4.56 mm,呈逐渐增大趋势;四种焊缝熔深均小于焊缝熔宽,其焊缝深宽比分别为0.514、0.536、0.550、0.568,即也呈逐渐增大趋势。因此,试验所用微米氟化物涂层焊丝可以在一定程度上增加焊缝熔深和深宽比,且随涂层中氟化物含量增多,效果越明显。

对于活性剂增加焊缝熔深的报道已有很多,目前两种主要理论为“表面张力温度梯度改变理论^[16]”和“电弧收缩理论^[17]”。表面张力温度梯度改变理论认为:在液态熔池内部存在电磁力、浮力和表面张力,当熔池表面存在活性元素时,表面张力梯度由负变正,熔池液体循环模式变为从焊缝中心往焊缝深处循环,增加了热传导形成深而窄的焊缝。电弧收缩理论认为:氧化物、氯化物、氟化物等焊剂造成电弧收缩,电弧导电通道缩减造成电阻值增大,电弧电压因而增大,热输入也随之增大,同时电弧收缩使热输入集中,电极斑点处轴向电磁力也增大,使得熔池液态金属从熔池表面向熔池底部形成定向流动,最终使焊缝熔深显著增加。通过对电弧形态的高速摄像观测可知(见表7),使用微

表6 四种焊缝的表面形貌及横截面轮廓

Table 6 Surface appearance and cross-sectional profile of four welding beads

Welding bead No.	Surface appearance	Cross-sectional profile	Depth-to-width ratio
A			0.514
B			0.536
C			0.550
D			0.568

米氟化物涂层焊丝时电弧收缩效应显著, 使热源更加集中, 进而提高了熔深。微纳米颗粒的比表面积较大, 经历电弧高温区后难以进入熔池中。因此, 文中焊接试样观测到的熔深增加现象主要由微米氟化物通过电弧收缩效应引发。

表 7 所示为四种焊丝焊接高速摄像图像及相关物理特性, 可以明显看出随着焊丝涂层氟化物含量的增加, 电弧出现明显收缩, 电弧扩散角逐渐减小, 同时电弧长度随电弧扩散角收缩而逐渐增加。统计四种焊丝平均熔滴过渡频率分别为 80.18 滴/s、83.52 滴/s、85.29 滴/s 和 85.88 滴/s, 呈逐渐增大趋势。

对于氟化物而言, 在电弧高温下氟化物分解出电负性很强的 F 原子, F 原子捕获电弧中的电子形成 F⁻, F⁻与电弧中的 H⁺等正离子结合生成中性分子。这种不断地吸收电子的过程称作“消电离”作用。根据“最小电压”原理, 电弧失去电子造成电弧区域电子密度减少, 电弧自动缩小导电半径, 发生电弧收缩^[18]。导电通道的缩减使电弧电阻增大,

则电弧在焊接电路中的分压增大, 热输入的增加使熔滴过渡频率明显加快。与活性 TIG 焊(A-TIG)相比, 由于本试验所涂敷于铝合金焊丝表面的氟化物涂层含量较少且燃弧方式不尽相同, 对增大焊缝熔深的影响远小于 A-TIG 焊接^[19]。

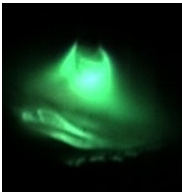
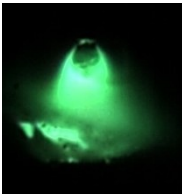
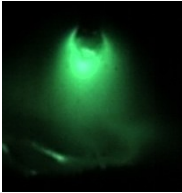
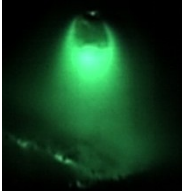
2.6 微米氟化物涂层对接头抗拉强度的影响

四种焊丝对应接头的抗拉强度、断后伸长率以及拉伸试样断面气孔率统计结果如图 6 所示, 焊缝 A、B、C 和 D 的平均抗拉强度值分别为 272.82 MPa、277.12 MPa、280.79 MPa 和 275.88 MPa, 断后伸长率分别为 9.05%、9.40%、9.52% 和 9.35%, 拉伸试样断面气孔面积比率分别为 0.88%、0.76%、0.72%、0.80%。其中, 焊缝 A 和 C 的拉伸试样断口 SEM 像如图 7 所示。

由图 6 可以发现, 三种含微米氟化物涂层焊丝对应接头的抗拉强度和断后伸长率均高于普通焊丝 1[#]对应接头, 其中, 焊丝 3[#]对应接头的拉伸性能最高, 抗拉强度与断后伸长率分别比普通焊丝 1[#]对应

表 7 四种焊丝电弧物理特性对比

Table 7 Physical characteristics of arc of four kinds of welding wires

Welding wire No.	High-speed photography of welding arc	Arc diffusion angle/(°)	Arc length/mm	Metal transfer rate/(Droplets·s ⁻¹)
1 [#]		79.73	3.84	80.18
2 [#]		78.82	4.04	83.52
3 [#]		77.39	4.66	85.29
4 [#]		76.74	5.33	85.88

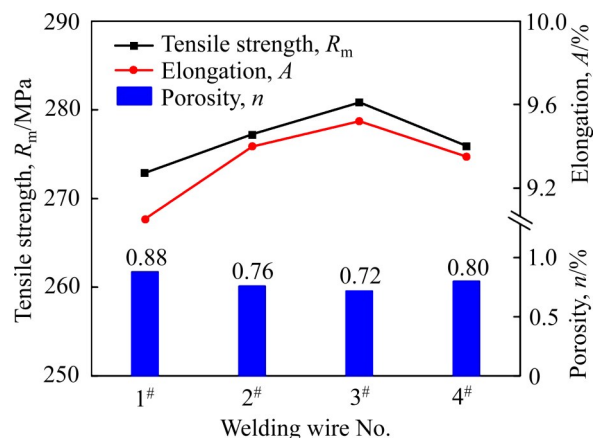


图6 四种焊丝对应接头的抗拉强度

Fig. 6 Tensile strength of welded joints corresponding to four kinds welding wires

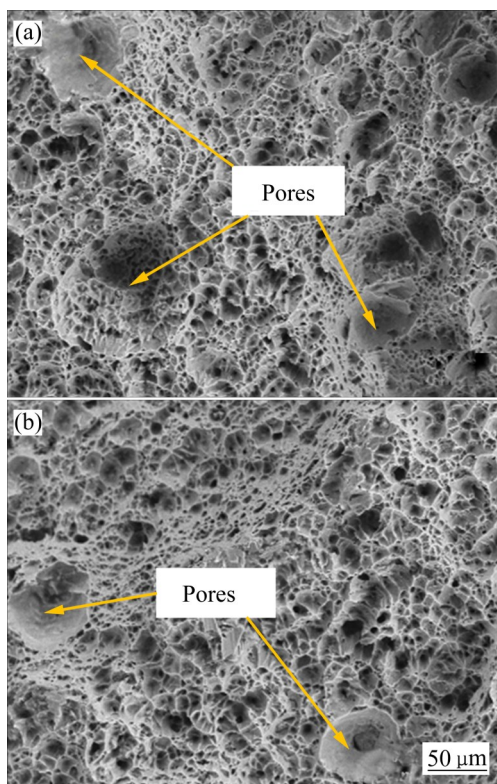


图7 拉伸试样断面SEM像

Fig. 7 SEM images of fracture surface of tensile specimens: (a) Welding bead A; (b) Welding bead C

接头提高约2.9%和0.47%。焊丝1#和3#对应接头的断面形貌分别如图7(a)和(b)所示。四种焊丝对应接头的拉伸试样均断裂于焊缝中,焊缝断面均分布着大量细密的韧窝,呈典型韧性断裂;同时断面分布着数量不等且内壁光滑的气孔,焊缝A的断面气孔率约为0.88%,而焊缝C的断面气孔率约为

0.72%。从图6中可以发现,四种焊丝对应接头的力学性能与断面气孔率呈负相关关系,断面气孔率越大,接头抗拉强度与断后伸长率越低。这是因为与普通焊丝1#相比,三种含微米氟化物涂层焊丝降低了焊缝气孔量,增加了焊缝内部有效结合面积,使接头抗拉强度提高。另外,在拉伸过程中,焊缝气孔沿拉伸方向发生变形,当变形量达到一定值时易产生开裂,形成裂纹源,从而降低材料的塑性^[11]。因此,随着气孔量减少,断后伸长率增大。同时,较少的气孔量有助于减少因气孔分布的不确定性而导致力学性能的离散程度,提高接头力学性能的稳定。

3 结论

1) 以固体粉末涂敷方式在焊丝表面制备微米氟化物涂层,涂层与基体结合性较好,颗粒分布较均匀。

2) 相比于无涂层焊丝,含微米氟化物涂层焊丝对应的焊缝内部气孔量显著降低;当焊丝涂层中氟化物含量为10%时,焊缝气孔率降低约1.6%;气孔率降低的原因是氟化物分解出的 F^- 与熔池和电弧气氛中的 H^+ 结合,生成不溶于液态铝的HF气体,降低了焊缝内部氢含量。

3) 随着焊丝涂层中氟化物含量增加,焊接电弧收缩,弧长增加,热输入升高,焊缝成型良好,熔深增大;焊丝涂层中氟化物质量分数为10%时,由于焊缝内部气孔量降低,接头抗拉强度提高约2.9%。

REFERENCES

- [1] 李安敏, 范晓烁, 董涛, 等. 铝镁合金焊丝的研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(17): 144–149.
LI An-min, FAN Xiao-shuo, DONG Tao, et al. Research progress on the Al-Mg alloy welding wire[J]. Materials Review, 2015, 29(17): 144–149.
- [2] 廖传清, 宿国友, 高艳芳, 等. 7075/5A06异种铝合金TIG焊接头的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 43–48.
LIAO Chuan-qing, SU Guo-you, GAO Yan-fang, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075/5A06

- dissimilar aluminum alloy joints made by TIG welding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 43-48.
- [3] 白利兵. 薄板铝合金光纤激光-MIG复合焊工艺与性能研究[J]. 焊接技术, 2020, 49(4): 35-40.
- BAI Li-bin. Study on the technology and performance of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy sheet[J]. Welding Technology, 2020, 49(4): 35-40.
- [4] 范平章. 铝合金表面状态对焊接气孔的影响[J]. 航天制造技术, 2000(2): 19-23.
- FAN Ping-zhang. Effect of surface state of aluminum alloy on welding porosity[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2000(2): 19-23.
- [5] 许良红, 田志凌, 张晓牧, 等. 保护气体对高强铝合金的焊缝组织及气孔敏感性的影响[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 69-73, 116.
- XU Liang-hong, TIAN Zhi-ling, ZHANG Xiao-mu, et al. Effect of protective gas on weld structure and porosity sensitivity of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2006, 27(12): 69-73, 116.
- [6] KOU S. Welding metallurgy[M]. 2nd ed. Hoboken, NJ: [s.n.], 2003.
- [7] 唐良喜, 肖 云, 兰志刚, 等. 铝及铝合金MIG焊接预防气孔的措施[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2011(5): 35-39.
- TANG Liang-xi, XIAO Yun, LAN Zhi-gang, et al. Prevention measures of porosity in MIG welding of aluminum and aluminum alloy[J]. Machinery Manufacturing Digest (Welding Catalogue), 2011(5): 35-39.
- [8] 尹玉环, 张 聘, 余 果, 等. 2219铝合金无气孔直流A-TIG焊接技术[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 61-64.
- YIN Yu-huan, ZHANG Dan, YU Guo, et al. Porosity free direct current A-TIG welding of 2219 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(12): 61-64.
- [9] 周金亮. 铝合金活性剂激光焊接工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2012. ZHOU Jin-liang. Laser welding of Al alloy with activating flux[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [10] QIN G L, WANG G G, ZOU Z D. Effects of activating flux on CO₂ laser welding process of 6013 Al alloy[J]. Transactions of the Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 23-29.
- [11] MA Tie-jun, GE Jing-guo, CHEN Yan, et al. Observation of in-situ tensile wire-arc additively manufactured 205A aluminum part: 3D pore characteristics and microstructural evolution[J]. Materials Letters, 2019, 237: 266-269.
- [12] 刘 鹏, 李 阳, 郭 伟. 焊接质量检验及缺陷分析实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- LIU Peng, LI Yang, GUO Wei. Examples of welding quality inspection and defect analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [13] SIDDIQUE S, IMRAN M, WALTHER F. Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 94: 246-254.
- [14] 武 丹, 裘荣鹏. 氟化物对药芯焊丝熔敷金属扩散氢含量和焊接电弧稳定性的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(9): 35-38.
- WU Dan, QIU Rong-peng. Effect of fluorides on diffusible hydrogen content of weld metals and weld arc stability in flux cored wire[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(9): 35-38.
- [15] 张 聘, 尹玉环, 孙耀华, 等. 2A14铝合金直流A-TIG焊接技术[J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 93-97, 132.
- ZHANG Dan, YIN Yu-huan, SUN Yao-hua, et al. Analysis of direct current A-TIG welding of 2A14 aluminum alloy[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2018, 39(10): 93-97, 132.
- [16] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. 活性剂涂敷量对A-TIG焊熔深影响的研究[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(3): 310-313.
- LIU Feng-yao, LIN San-bao, YANG Chun-li, et al. Effect of coating quantity of fluxes on weld penetration depth in A-TIG welding. Material science and technology, 2002, 10(3): 310-313.
- [17] 张富巨, 王 燕, 张晓昱. 药芯焊丝电弧焊电弧形态与熔滴过渡行为的研究[J]. 焊接技术, 2004, 33(4): 11-13, 68.
- ZHANG Fu-ju, WANG Yan, ZHANG Xiao-yu. Research on arc shape and droplet transfer behavior of flux cored arc welding. Welding technology, 2004, 33(4): 11-13, 68.
- [18] SIMONIK A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of the electro-negative elements[J]. Weld Product, 1976(3): 49.
- [19] 黄 勇, 樊 丁, 樊清华. 表面活性剂对铝合金直流正接A-TIG焊熔深的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 60-62, 131.
- HUANG Yong, FAN Ding, FAN Qing-hua. Effect of surface activating flux on welding penetration of A-TIG welding with DSCP mode of aluminum alloy. Transactions of The China Welding Institution, 2004, 25(5): 60-62, 131.

Effect of fluoride lubricant coating on porosity resistance of aluminum alloy wire

LI Hong¹, LI Zhuo-xin¹, CONG Xing¹, WANG Yi-peng¹, ZHANG Yu¹, ZHOU Chen²

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Jiangsu Henyi Metal Production Company, Taizhou 225400, China)

Abstract: Three kinds of micro fluoride with mass fractions of 5%, 10% and 15%, respectively were designed. Then the fluoride lubricants were coated on ER 5356 aluminum alloy welding wire by using mechanical coating method. The weldability of coated wires for GMAW was evaluated in comparison to the uncoated wire. The results show that the porosity is distinctly reduced by using the micro fluoride lubricant coated wire. The coating with 10% (mass fraction) fluoride has the highest porosity resistance. In this case, the porosity of the welding bead is decreased by around 1.6% compared with the uncoated welding wire. Meanwhile, the tensile strength of the welding joint reaches 280.79 MPa, which is about 2.9% higher. The penetration depth of the welding bead is increased by the fluoride lubricant coated wire through changing the arc profile, thereby the weld formation and joint mechanical properties are improved.

Key words: aluminum alloy wire; GMAW; surface coating; porosity; mechanical property

Foundation item: Projects(52074017, 51905300) supported by the National Natural Science Foundation of China;

Project(3202002) supported by the Natural Science Foundation of Beijing, China

Received date: 2020-08-27; **Accepted date:** 2021-11-17

Corresponding author: LI Hong; Tel: +86-10-67396168; E-mail: hongli@bjut.edu.cn

(编辑 龙怀中)