

粉煤灰 A-TIG 熔池流动行为及焊缝性能分析

马 壮^{1,2}, 于秀秀¹, 时海芳¹, 张 勇¹, 董世知¹

(1. 辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院,阜新 123000; 2. 辽宁科技学院 冶金工程学院,本溪 117004)

摘 要:采用粉煤灰作为活性剂对 Q235 钢进行钨极氩弧焊,研究其对熔池流动及焊缝的组织 and 性能的影响. 对 Q235 钢焊接后在基体上的铺展面积进行了测试;采用点扫描的方法确定了熔池内部不同位置钨粒子的含量;对焊缝的截面形貌、显微组织和性能进行了观察和测试. 结果表明,焊缝的深宽比增大,显微组织出现细化;熔池的流动方向发生了改变,即熔池流动方向为从边缘向中心流动;焊缝的显微硬度较无活性剂时有所提高,耐磨性及耐蚀性也得到了一定的提高,冲击吸收功增加.

关键词:低碳钢; 活性焊; 粉煤灰; 熔池流动; 焊缝性能

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **doi:**10. 12073/j. hjxb. 20151103003

0 序 言

煤炭是自然资源中极为丰富的矿产,而中国是全球煤炭消费量最大的国家. 截至 2004 年国内的煤炭消耗量已达 18.45×10^8 t,其中发电厂所消耗的煤炭量已超过总消耗量的 53%,随之产生的粉煤灰总量高达 2×10^8 t,而到 2013 年产量已达 5.32×10^8 t^[1-2]. 粉煤灰是燃煤发电厂中煤粉高温燃烧后排放的工业副产品^[3-4]. 目前粉煤灰的利用领域主要是交通、建材、矿山、水利、冶金等行业,粉煤灰的平均利用率仅 45%~50%,所以每年尚有未利用的粉煤灰大量堆积^[5-7].

活性化焊接(activating flux - TIG,简称 A-TIG)是在焊前将母材表面涂敷上一层助焊剂(活性剂),提高材料的可焊接性^[8-9]. 活性化焊接技术在国外受到广泛的重视,PWI、美国的爱迪生焊接研究所(EWI)与海军连接中心(NJC),以及英国和日本都有了用于碳钢、不锈钢、镍基合金和钛合金等材料 A-TIG 焊的活性剂产品^[10]. 从 90 年代末开始,国内的哈尔滨工业大学、甘肃工业大学、陕西工学院、洛阳 711 所,还有北京航空制造工程研究所等都在积极开展此项研究^[11-14]. 截至目前,A-TIG 焊活性剂已经广泛应用于压力容器、机械船舶、核电管道和能源电力设备的焊接制造^[15].

通过国内外多年的研究发现活性剂成分基本由

氧化物与卤化物构成^[16-17]. 粉煤灰中所含氧化物的含量在 95% 以上,并且其化学成分中有将近 60% 的 SiO₂,这为其应用于活性焊接研究提供了可能性. 但在其可行性方面,国内外很少涉及相关方面的研究. 因此文中以粉煤灰作为活性剂,研究其在低碳钢上 A-TIG 的可行性,并阐明多组分的粉煤灰活性剂影响熔池流动的规律,在此基础上分析活性剂对焊接接头组织及性能的影响.

1 试验方法

试验所选用的材料为 Q235 钢,尺寸为 100 mm × 25 mm × 6 mm. 粉煤灰为活性剂,成分如表 1. 焊前,将粉煤灰进行预处理:通过中温箱式电阻炉加热至 800 ℃进行脱碳,保温 2 h 后冷却至室温,过 200 目筛. 用丙酮除去钢板表面油渍,然后打磨直到露出金属光泽为止. 将处理好的粉煤灰与丙酮均匀混合后,涂敷在钢板表面,阴干 24 h 后进行焊接,焊接时采用的工艺参数见表 2.

表 1 粉煤灰成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of fly ash

成分	含量	成分	含量
SiO ₂	59.82	Na ₂ O	1.37
Al ₂ O ₃	17.32	TiO ₂	0.79
TFe ₂ O ₃	8.23	P ₂ O ₅	0.26
CaO	3.64	MnO	0.11
K ₂ O	2.75	LOS	2.90
MgO	2.61		

表 2 活性氩弧焊焊接工艺参数

Table 2 Parameters of activating flux argon arc welding

钨极直径	焊接电流	焊接速度	电弧长度	氩气流量
<i>d</i> /mm	<i>I</i> /A	<i>v</i> /(mm·min ⁻¹)	<i>L</i> /mm	<i>q</i> /(L·min ⁻¹)
2.0	160	110	3	7

为了观察粉煤灰活性焊熔池的流动方向,在距离母材钢板中心线 1.5 mm 处的两侧通过线切割加工成 100 mm×4.5 mm×0.6 mm 的槽,放入相应尺寸的高熔点钨板进行阻流. 将质量比为 1:1 的粉煤灰和钨粒子(粒度为 100 目)均匀混合在丙酮溶液中,涂敷及焊接方法同上,为移动焊接.

通过氩弧焊(定点焊接)使 10 mm×10 mm×1 mm 的小钢片熔化平铺在同质 Q235 钢基体表面(控制基体不熔化),采用 DM200 型数码显微镜对焊后的铺展面积进行测量,采用 S-3400 扫描电子显微镜对熔池内部不同位置钨粒子的含量进行了检测;对焊件截面进行抛光腐蚀处理后,采用 DM200 型数码显微镜对截面形貌进行观察,采用激光共聚焦显微镜对焊缝的显微组织进行观察.

采用 HV-50 型自动转塔显微硬度计对焊件截面硬度进行测试,加载时间为 10 s,载荷为 1 N;磨粒磨损在 ML-100 磨损试验机上进行,施加的载荷为 50 N,对磨材料为 1 号金相砂纸,磨损时间分别为 5 min,重复 4 次;采用 ZF-3 恒电位仪对焊缝进行塔菲尔极化曲线测试,采用铂片作为阳极,饱和甘汞电极作为阴极(参比电极),腐蚀溶液为 3.5% NaCl 溶液,扫描速度为 0.5 mV/s.

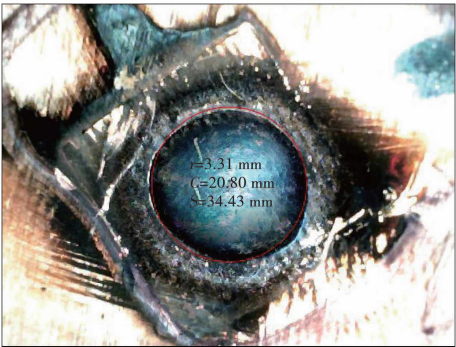
将所选用的 Q235 钢切割成尺寸 100 mm×10 mm×10 mm 的试样,进行双面活性焊接,焊接参数同表 2.

焊接后按照国家标准 GB/T229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对焊缝进行冲击试验,将焊接后的试样加工成 V 形坡口,规格为 55 mm×10 mm×10 mm,用型号为 CLC-300B 的落锤式冲击试验机冲击,记录每个试件的冲击吸收功. 冲击试验后,用 SSX-550 型扫描电子显微镜观察断口组织形貌.

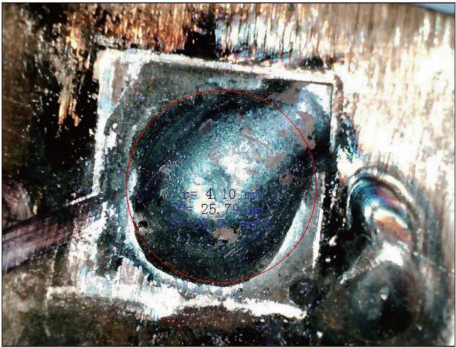
2 结果与讨论

2.1 母材焊后的铺展面积

图 1 是经过钨极氩弧焊熔化后基体表面形貌,可以看出,无活性剂时的铺展面积仅为 36.83 mm²,而涂敷粉煤灰后的铺展面积为 48.86 mm²,是无活性剂时的 1.3 倍,铺展面积增大,说明涂敷粉煤灰后,熔化金属的润湿性、流动性增加,即熔化金属表面的活性剂成分使得液态金属的表面张力降低.



(a) 无活性剂熔滴铺展形貌



(b) 涂敷粉煤灰熔滴铺展形貌

图 1 基体表面熔滴铺展形貌

Fig. 1 Substrate surface morphology of droplet spread

2.2 焊缝的熔池流动行为

对熔池内部三个不同位置的钨粒子含量进行了扫描,扫描位置如图 2 所示,结果如表 3 所示,无活性剂的焊件,1 号和 2 号位置的钨粒子含量分别为 0.82% 和 0.37%,而 3 号位置钨粒子含量达到 1.22%,相对 1 号和 2 号位置分别多了 0.40% 和 0.85%. 这说明焊接过程中熔化金属将涂敷在焊件表面的钨粒子带着流向两边,在熔池的边缘沿着熔合线向熔池底部流动,被钨板阻挡后,在外侧逐渐沉积在底部,说明无活性剂时,熔池内液体的流动方向是由中心向两侧边缘的.

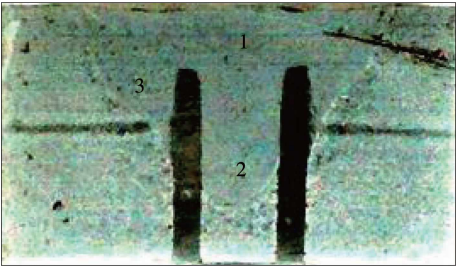


图 2 钨粒子面扫描区域分布

Fig. 2 Area distribution of tungsten particle surface scanning

表 3 钨粒子含量(原子数,%)
Table 3 The percent of atom

元素	无活性剂			粉煤灰		
	1 号位置	2 号位置	3 号位置	1 号位置	2 号位置	3 号位置
W	0.82	0.37	1.22	1.17	1.27	0.90
Fe	98.66	99.21	98.11	98.40	97.90	98.33
Mn	0.03	0.19	0.12	0.02	0.28	0.36
Ca	0.06	0.05	0.19	0.19	0.02	0.05
Si	0.16	0.04	0.14	0.10	0.16	0.20
Al	0.27	0.14	0.22	0.12	0.37	0.16

涂敷粉煤灰的焊件,钨粒子在熔池内部 3 号位置的含量为 0.90%,在 2 号位置含量为 1.27%,并且 1 号位置相对 3 号位置的钨粒子分布多出了 0.27%。分析在涂敷粉煤灰后进行氩弧焊焊接时,熔化金属由熔池的边缘向中心流动过程中将熔池两边缘的钨粒子带到熔池中心并绕过钨板向中心底部流动,由于两侧钨板的阻流作用致使钨粒子流动到熔池底部后无法向两侧流动而沉积,从而使熔池中心底部的钨粒子浓度最大,说明粉煤灰改变了熔池的流动方向,使焊接过程中熔池内部熔化金属流动方向是由熔池边缘向中心的。

产生以上现象的主要原因是粉煤灰中的多种氧化物活性剂在进行氩弧焊过程中会改变熔池表面张力梯度,从而使流动方向较无活性剂时发生了改变。

2.3 焊缝的截面形貌

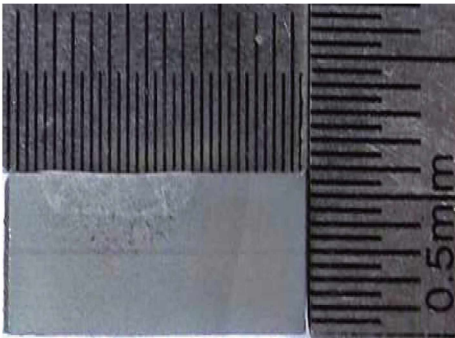
图 3 为氩弧焊后的截面形貌,可以看出涂敷粉煤灰的焊缝熔深较无活性剂时明显增大,同时熔宽无明显变化。无活性剂时,焊缝的熔深为 1.41 mm,深宽比为 0.208,涂敷粉煤灰后焊缝的熔深可达 3.87 mm,深宽比可达 0.509,熔深提高 2.74 倍,深宽比提高 2.45 倍。这是由于粉煤灰中含有多种活性元素,可以降低熔池的表面张力,使得熔池金属形成从熔池边缘向中心的表面张力流,熔池中心区的电弧热量随着液态金属的流动直接传向熔池底部,使得熔池底部的加热效率提高,从而形成更大的熔深。

2.4 焊缝的组织 and 硬度分析

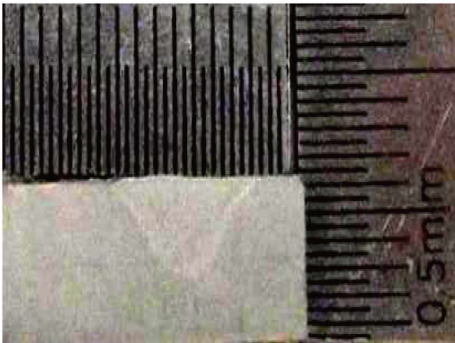
图 4 为焊缝组织的显微形貌,涂敷粉煤灰的焊缝显微组织较无活性剂时的出现了细化,焊缝中细小的铁素体数量增加,同时针状铁素体数量也相对无活性剂时减小。

涂敷粉煤灰后,焊缝熔深的增加使得熔池面积增大,即散热面积增大,加快了散热速度,使熔池中熔化金属冷却速度加快,降低了晶粒的长大时间。另外在焊接过程中,其内部熔化金属因表面张力的降低,流动速度也会相对增大,促进了熔池结晶过程

的破碎效应,因此出现晶粒细化现象。



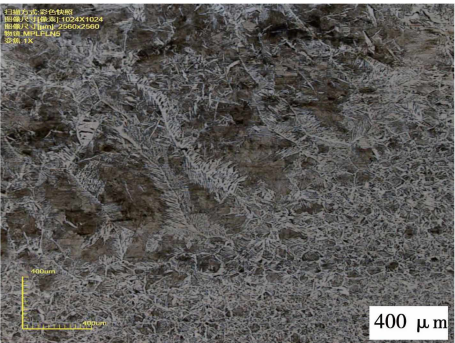
(a) 无活性剂的截面形貌



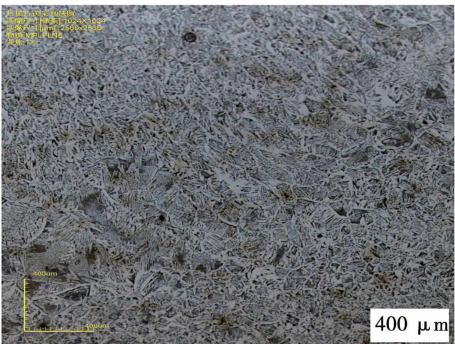
(b) 涂敷粉煤灰的截面形貌

图 3 焊缝的截面形貌

Fig. 3 Weld cross-section of welding



(a) 无活性剂焊缝组织形貌



(b) 涂敷粉煤灰的焊缝组织形貌

图 4 焊缝的显微组织

Fig. 4 Microstructure of welding

图 5 为焊缝的显微硬度分布曲线,可以看出,在无活性剂的焊缝中,熔池中心的硬度为 146.0 HV,随着距熔池中心距离的增加其硬度也逐渐增大,当距熔池中心 3 mm 时硬度为 158.4 HV 达到峰值. 然后随着距离的增加硬度值又逐渐下降. 涂敷粉煤灰后,熔池中心的硬度为 151.6 HV,当距离熔池中心 4 mm 时,硬度为 173.1 HV 达到峰值,相对于无活性剂时提高 33.1 HV. 这是由于涂敷粉煤灰进行焊接过程中,熔池内金属的流动速度加快,晶粒较无活性剂时细化,因而硬度提高.

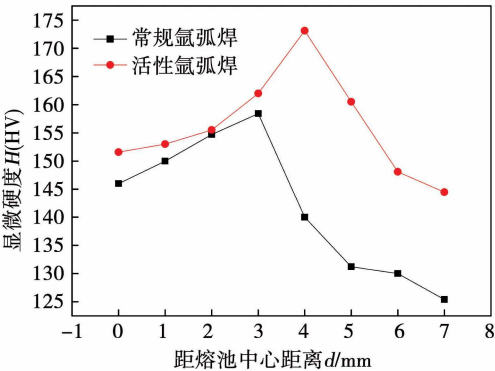


图 5 焊缝的显微硬度分布曲线

Fig. 5 The distribution curve of microhardness of welding

2.5 焊缝的耐磨性及耐蚀性

由表 4 可以看出,涂敷粉煤灰的焊缝耐磨性较无活性剂时有所提高,是无活性剂时的 1.12 倍. 氩弧焊焊接过程中,粉煤灰中的活性剂元素随着熔池的流动方向的改变而更多的进入内部引起熔池内部熔化金属流动速度加快,使晶粒细化,引起接头力学性升高,耐磨性增强.

表 4 磨粒磨损测试结果

Table 4 Result of wear resistance

成分	单位面积失重 $\Delta G/(10^3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2})$			相对耐磨性
	5 min	10 min	15 min	
无活性剂	1.769	3.644	5.308	1.00
粉煤灰	1.451	3.008	4.742	1.12

在 3.5% NaCl 溶液中的电化学试验结果如表 5 所示,无活性剂焊缝的腐蚀速度比涂敷粉煤灰的焊缝快. 涂敷粉煤灰后进行活性焊接时,熔池流动加快使得焊缝组织细化,而且添加的活性成分并没有进入熔池内部,只是在焊接过程中形成浮于表面的熔渣,焊后即可去除,并未造成内部成分波动. 焊接工件在上述两种因素的作用下提高了焊缝的耐蚀性. 所以综上可知其涂敷粉煤灰焊缝的耐蚀性优于无活性剂焊缝.

表 5 塔菲尔极化曲线测试结果

Table 5 Results of tafel polarization curve

试样	自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}/\text{mV}$	自腐蚀电流密度 $i_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$
无活性剂	-496.090	1.226 0
粉煤灰	-459.999	0.362 3

2.6 焊缝的耐冲击性能

由表 6 可以看出,涂敷粉煤灰焊接后的焊缝平均冲击吸收功为 173.5 J,无活性剂焊接后的焊缝平均冲击吸收功为 157.9 J,母材的平均冲击吸收功为 103.0 J. 涂敷粉煤灰的焊缝冲击吸收功较无活性剂的焊缝增大,说明粉煤灰能够提高焊缝在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力,韧性较好,使焊缝具有良好的冲击韧性.

表 6 冲击试验结果

Table 6 Results of impact test

试样	冲击吸收功 $A_{\text{KV}1}/\text{J}$	冲击吸收功 $A_{\text{KV}2}/\text{J}$	冲击吸收功 $A_{\text{KV}3}/\text{J}$	平均冲击吸收 功 A_{KV}/J
母材	105.7	98.7	104.6	103.0
无活性剂	168.0	148.5	157.1	157.9
粉煤灰	160.7	186.2	173.7	173.5

图 6 为冲击断口的 SEM 组织形貌,母材断口微观形貌出现较浅韧窝;无活性剂焊缝断口微观形貌为分布均匀且较小的等轴韧窝;粉煤灰活性剂焊缝的端口微观形貌为等轴韧窝且大小不均匀,出现部分的大而深的韧窝,断裂形式为韧性断裂.

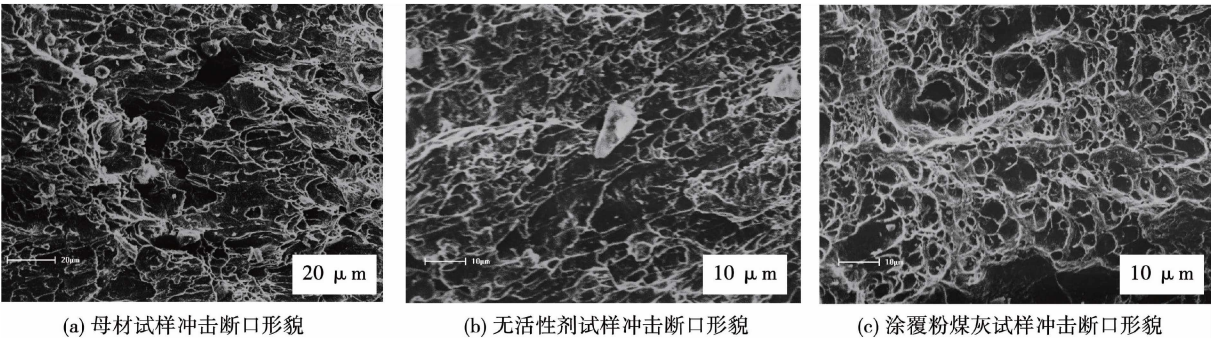


图 6 试样冲击断口形貌

Fig. 6 The SEM of impact fracture

综上所述,粉煤灰活性剂的涂敷并没有因为少量非金属夹杂物的存在而降低焊缝冲击韧性,相反粉煤灰活性剂的加入提高了焊缝的韧性。出现这种现象原因可能是粉煤灰活性剂对显微组织的细化作用造成。

3 结 论

(1) 涂敷粉煤灰后,焊缝的熔深及深宽比均增大,熔深为无活性剂时的 2.74 倍,深宽比为无活性剂时的 2.45 倍。焊接过程中也降低了熔池的表面张力。

(2) 试验采用粉煤灰进行焊后熔池流动方向发生了改变即从熔池边缘向熔池中心流动,流动速度也相应加快,从而使显微组织出现细化。

(3) 与无活性剂相比,涂敷粉煤灰后硬度值最大提高 33.1HV,耐磨性提高 1.12 倍,耐蚀性提高 2.64 倍,冲击吸收功增加,焊缝的性能得到了优化,粉煤灰可以作为活性剂应用于材料加工领域。

参考文献:

- [1] 杨 静,蒋周青,马鸿文,等. 中国铝资源与高铝粉煤灰提取氧化铝研究进展[J]. 地学前缘, 2014(5): 313–324.
Yang Jing, Jiang Zhouqing, Ma Hongwen, *et al.* Research progress of extracting alumina from China aluminum resources and high-aluminum fly ash[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014(5): 313–324.
- [2] 王观鹏,晋腾超. 粉煤灰的综合利用现状[J]. 环境保护与循环经济, 2014(12): 25–29.
Wang Guanpeng, Jin Tengchao. Comprehensive utilization status [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2014 (12): 25–29.
- [3] 冉进财,李国胜,曹亦俊,等. 无机盐阳离子对粉煤灰浮选泡沫稳定性的影响研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 646–651.
Ran Jincai, Li Guosheng, Cao Yijun, *et al.* Study on the effect of inorganic salt on the stability of foam flotation of fly ash [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(3): 646–651.
- [4] 陈胜华,胡振琪. 粉煤灰掺量对土壤混合材料空气阻隔性影响的试验[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 749–755.
Chen Shenghua, Hu Zhenqi. Experiment on the influence of fly-ash to the air isolation effectiveness of soil mixture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(4): 749–755.
- [5] 陈江峰,邵龙义. 高铝粉煤灰特性及其在合成莫来石和堇青石中的应用[M]. 北京: 地址出版社, 2009.
- [6] 代世峰,任德贻,周义平,等. 煤型稀有金属矿床:成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014(8): 1707–1715.

- Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhou Yiping, *et al.* Coal type rare metal deposits: evaluation of genetic types, occurrence and utilization [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014(8): 1707–1715.
- [7] 王 斌. 我国绿色矿山评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [8] 朱 熹. 新型复合助焊剂对 AZ31 镁合金 A-TIG 焊焊接接头组织与性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [9] 邢淑清,郝 飞,闫 波,等. DP590 钢两道次焊接温度场数值模拟与实验验证[J]. 焊接学报, 2012, 33(12): 81–84.
Xing Shuqing, Hao fei, Yan Bo, *et al.* Simulation and experimental verification of double-pass welding temperature field for DP590 steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(12): 81–84.
- [10] 杨春利. TIG 电弧活性化焊接现象和机理研究(3)[J]. 焊接, 2000(6): 11–15.
Yang Chunli. Phenomenon and Mechanism of activated arc in-TIG(3)[J]. *Welding*, 2000(6): 11–15.
- [11] 林三宝,杨春利,刘凤尧,等. 不锈钢 TIG 焊活性剂对焊缝性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 308–311.
Lin Sanbao, Yang Chunli, Liu Fengyao, *et al.* Effect of activating fluxes on weld properties during TIG welding of stainless steel [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 308–311.
- [12] 张瑞华,樊 丁. 低碳钢 A-TIG 焊活性剂的焊接性[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 85–87.
Zhang Ruihua, Fan Ding. Weldability of activating flux in A-TIG welding for mild steel[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 85–87.
- [13] 张赋升,马铁军,李京龙,等. A-TIG 焊电弧的动态研究[J]. 电焊机, 2003, 33(12): 17–19.
Zhang Fusheng, Ma Tiejun, Li Jinglong, *et al.* Study of dynamic state of A-TIG arc [J]. *Electric Welding Machine*, 2003, 33 (12): 17–19.
- [14] Liu Fengyao, Yang Chunli, Lin Sanbao, *et al.* Effect of weld microstructure on weld properties in A-TIG welding of titanium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, 13(8): 876–880.
- [15] Lueas W, Howes D S. Activating flux increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes[J]. *Welding and Metal Fabrication*, 1996(1): 11–17.
- [16] 袁政伟. 不锈钢 A-TIG 焊应用工艺试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [17] 黄 勇,李 涛,王艳磊. 铝合金气体输送活性钨极氩弧焊方法[J]. 焊接学报, 2014, 35(1): 101–104.
Huang Yong, Li Tao, Wang Yanlei. Gas transfer flux activating TIG welding process for aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(1): 101–104.

作者简介: 马 壮,男,1963 年出生,博士,教授,博士研究生导师。主要从事材料加工及表面改性技术等方面的研究。发表论文 60 余篇。Email: mazh123@263.net