

高硅粉煤灰活性剂对 Q235 钢液态金属表面张力及 TIG 焊缝的影响

张 勇， 孙琳琳， 唐家成， 唐明远
(辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院,阜新 123000)

摘 要: 为了认识高硅粉煤灰对 Q235 钢液态金属表面张力的影响,以及表面张力变化后对 TIG 焊缝的形貌、组织和性能的影响规律. 测量了不同温度下有、无高硅粉煤灰的 Q235 钢液态金属铺展面积,建立了温度与铺展面积间的经验公式;基于同一焊接参数,研究了高硅粉煤灰作为添加的活性剂对焊缝形貌、焊缝组织及接头的硬度的影响. 结果表明,高硅粉煤灰能够显著地降低液态金属的表面张力,增加焊缝的深度,细化焊缝晶粒,提高接头的力学性能.

关键词: 高硅粉煤灰; 表面张力; 焊缝形貌; 活性焊接

中图分类号: TG 456 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.2018390130

0 序 言

粉煤灰是硅酸盐矿物(粘土、岩盐、长石等)和石英经高温熔融,在表面张力和外部压力作用下变成液滴,逸出锅炉后急骤降温凝固成硅酸盐玻璃态微珠. 这些微珠混合物夹杂着少量单体碳和石英,由烟囱排出形成粉煤灰^[1-3]. 粉煤灰作为燃煤过程中产生的一种固体废弃物会严重污染环境,也耗费了大量的土地资源.

粉煤灰的主要化学成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 ,属铝硅酸盐,还含有少量的 Fe_2O_3 , CaO , MgO ^[4-6]. Heiple 发现氧也是铁系合金的活性组元,并开始了相关研究^[7]. 董文超等发现熔池中微量氧直接影响熔池表面张力温度梯度系数,改变熔池表面 Marangoni 对流模式和熔池最终形貌^[8]. 樊丁等发现表面张力温度系数发生转变时的临界温度随氧含量的增加而增大,进而影响了熔池的 Marangoni 对流,造成了截然不同的熔池形貌^[9].

上述学者的研究表明 SiO_2 , Al_2O_3 和碱性金属氧化物的混合物能够影响液态金属的表面张力并改变焊缝的形貌. 焊接过程中,液态熔池不是纯物质,而是包含许多成分的混合溶液. 当溶液浓度发生变化时,界面张力也发生改变. 外加物质浓度对表面张力的影响,由于涉及分子作用力受浓度影响的问题,

难以给出一般的关系式. 通常在多元体系中,随着某一成分的加入,体系界面张力的变化可分为三类. 第一种是随某成分浓度的增加,表面张力缓慢增大;第二种为随浓度的增加,表面张力缓慢下降;第三种为随浓度增加,表面张力急剧下降. 第三种的物质具有特别的实用意义,在冶金及选矿等行业中可作为表面活性剂或变质剂^[10-13].

文中首先研究高硅粉煤灰对液态金属表面张力的影响规律,然后采用高硅粉煤灰作为活性剂涂覆在工件表面,阐述由于表面张力的变化对焊缝几何尺寸、微观组织及性能的影响规律.

1 试验方法

1.1 不同温度作用下铺展面积的测试

试验选用辽宁省阜新市发电厂提供的粉煤灰为主要活性剂原料. 试验前对粉煤灰进行预处理,利用陶瓷坩埚分别盛放适量的粉煤灰,然后放入 SX2-8-10 型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,为了保证粉煤灰活性剂粒度均匀,将室温下的粉煤灰经过 200 目的筛子进行过滤后待用. 表 1 为粉煤灰活性剂的化学成分含量.

在 5 mm×5 mm×2 mm 小钢片上涂敷相同质量的高硅粉煤灰,涂敷量为 0.3 mg/mm²,涂覆后的工件放置在石墨基体上,如图 1 所示. 将试样放入 GSL-1700X 型高温真空管式炉中,使涂敷粉煤灰的

小钢片分别在 1 580,1 600,1 620,1 640,1 660,1 680 ℃ 温度条件下熔化并铺展在高熔点的石墨基体表面。

表 1 粉煤灰成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of fly ash							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
59.82	17.32	8.23	3.64	2.75	2.61	1.37	0.79



图 1 石墨基体上小钢片试样

Fig. 1 Thin steel specimen on the graphite base

待试样的温度降到常温后取出,表面清洁干净后,对不同粉煤灰活性剂作用下小钢片熔化后的铺展面积进行测量和记录,选取平均值作为最终的测试结果. 通过测量熔化金属的铺展面积,即可测定粉煤灰活性剂对表面张力的影响. 铺展面积越大,铺展性就越好,即该活性剂使得小钢片在此基体上的润湿性就越好,活性剂作用下的熔化金属的表面张力就越小。

1.2 高硅粉煤灰活性焊接试验

母材为 Q235A 钢,试验前首先通过剪板机将所选用的钢板切割成尺寸为 100 mm×30 mm×6 mm 的长方体试样板,然后通过角磨机对焊接母材表面进行除锈和除氧化皮,将打磨好的试样板通过丙酮的清洗后,自然阴干后待用。

按照 1 g:4 mL 的比例将处理好的粉煤灰活性剂分别倒入丙酮,搅拌至均匀混合状态,采用 5 mm 宽长柄毛刷蘸取悬浊液,将粉煤灰活性剂一次性涂刷于钢板表面,室温阴干 24 h 后进行活性钨极氩弧焊。焊接时采用的钨极氩弧焊焊接工艺参数见表 2。

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
φ/mm	I/A	v/(mm·s ⁻¹)	L/mm	q/(L·min ⁻¹)
2.0	160	110	3	7

焊接后截取了常规焊接和添加粉煤灰的焊缝,截取的焊缝截面通过金相砂纸的粗磨和细磨,抛光机的抛光后,采用 3% 的硝酸溶液进行腐蚀,然后通过 OLS40-SU 型激光共聚焦显微镜对焊缝的金相组织进行观察和图像的采集。

沿着焊缝横截面切取为 20 mm×30 mm×6 mm 的试样,对试样进行粗磨、细磨、抛光,然后采用 HVT-1000Z 型图像处理显微硬度计测量焊缝中心到基体的显微硬度值. 试验所用测量载荷为 9.807 N,加载时间为 10 s,每隔 0.5 mm 打一个硬度,直到打到母材,记录数据. 进行数据分析,得出硬度分布情况。

2 试验结果与分析

2.1 温度对铺展面积的影响

图 2 为有、无高硅粉煤灰的试件在 GSL-1700X 型高温真空管式炉加热不同温度条件下熔化金属在石墨基体上的铺展形貌. 铺展面积测试多次测量结果平均值如图 3 所示。

随着温度的升高,各熔化金属的铺展面积也都随之增大. 开始时各熔化金属铺展面积增长较平稳,当温度越高,在增大相同的温度梯度时,涂有高硅粉煤灰的试件,当温度达到 1 680 ℃ 时,其铺展面积为 110 mm²,而 1 580 ℃ 仅为 55 mm²,在 100 ℃ 的温度梯度内,熔化金属的铺展面积增大了 98.7%,效果十分显著. 而无活性剂的熔化金属,其铺展面积也较 1 580 ℃ 增大了 30.0%. 同时在 1 680 ℃ 时,涂有高硅粉煤灰的熔化金属的铺展面积较无活性剂时提高了 54 mm². 温度越高,粉煤灰对熔化金属铺展面积的增大效果越明显,且在相同高温条件下粉煤灰活性剂增大熔化金属的铺展面积效果更明显。

表面活性物质溶于金属中形成的熔体,可应用萨赫(Sahoo)模型来预测. 该模型考虑表面活性物质在金属液面的吸附平衡. 如果温度变化范围变化不大时,温度对表面张力 σ(N/m) 的关系为

σ=a-bT (1)

式中:a,b 为常数,一般 a>0,b>0. 即表面张力随着温度增加而降低. 当界面张力降低时,液体的铺展面积 S(mm²) 将增大,即两者之间存在反比关系,可表征为 S=A/σ,即 S=A/(a-bT). A 为 dσ/dt,即纯金属表面张力的温度系数. 无活性剂的经验公式如式(2)所示;有活性剂的经验公式如式(3)所示. 其中 y 为铺展面积(mm²),x 为温度(℃).

y=0.1×(x-1 175.9) (2)

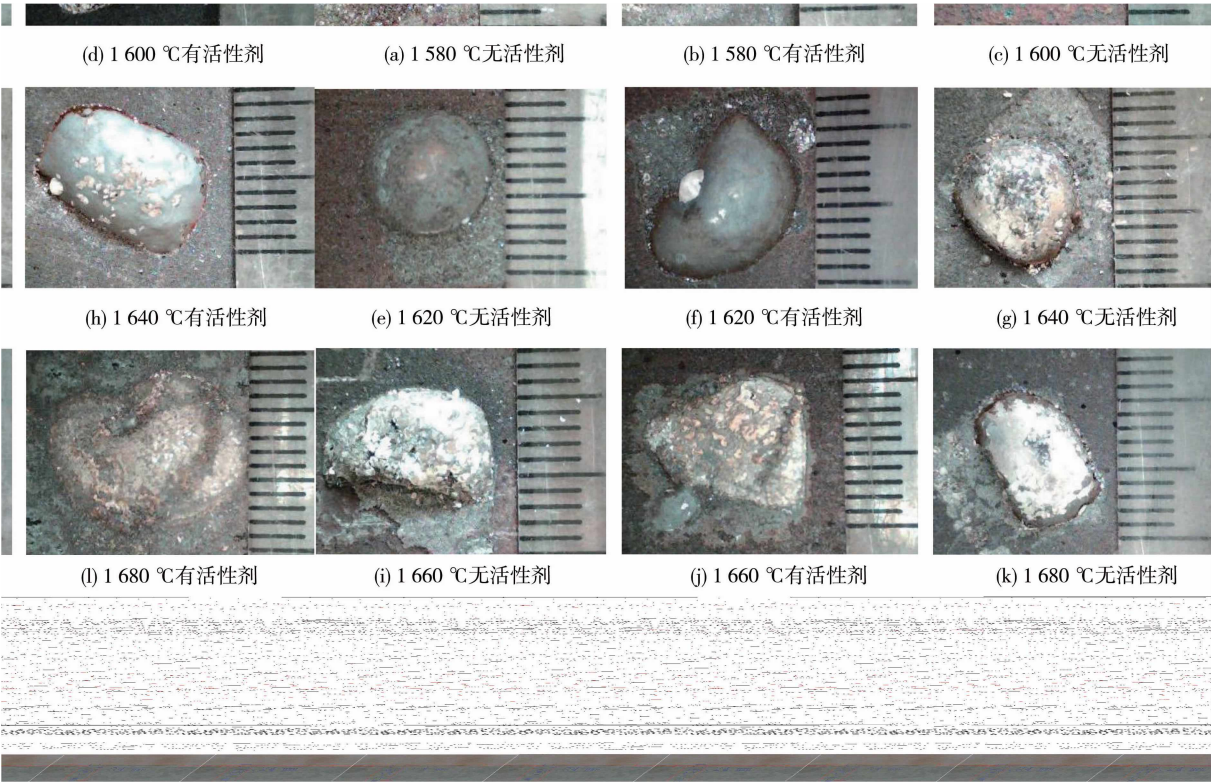


图 2 不同温度条件下有、无活性剂的熔化金属在石墨基体上的铺展形貌

Fig. 2 Spreading morphology of molten metal on the surface of graphite base under different temperatures

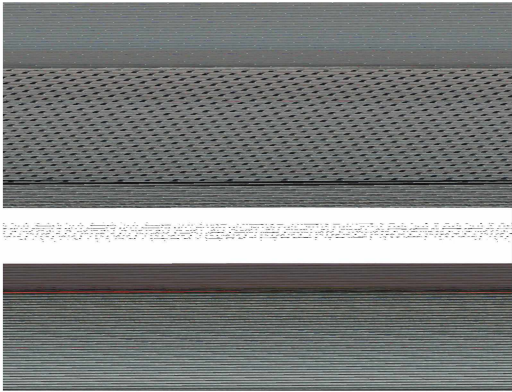


图 3 温度对熔化金属铺展面积的影响

Fig. 3 Relation schema between temperature and spreading area of molten metal

$$y = 59.4 + 4.7 \times 10^{-31} \exp((x - 642.2)/14.1) \tag{3}$$

温度的变化将影响液态金属与基体表面的表面张力,温度越高,熔化金属内部温度梯度越小,即液态金属对表层分子的吸引力越小,从而使液态熔化金属的润湿角减小,与固态基体表面的润湿性增加,铺展面积增大,进而起到降低表面张力的作用。

由式(2)、式(3)知当高硅粉煤灰加入到焊接熔

池时,液态金属的表面张力较无活性剂的情况产生了显著的降低,且随着温度的升高,添加活性剂的液态金属表面张力与温度间呈指数关系,而没添加活性剂的液态金属表面张力与温度间呈线性关系。

2.2 活性焊接结果分析

焊接试验操作结束后,截取活性焊缝及常规焊缝的横截面,经打磨腐蚀后对焊缝的熔深,熔宽进行测量。图 4 为焊缝的截面形貌,焊缝的截面均无裂纹、气孔和夹杂等缺陷产生。无活性剂焊接时,焊缝的截面形貌主要呈现的是浅而宽的基本特征。在相同的焊接工艺参数条件下,涂敷粉煤灰作为活性剂的焊缝熔深均较无活性剂时有所增加。这说明涂敷粉煤灰活性剂后焊接母材熔化的有效能量有所增加,能量的传输率增大。

在相同焊接条件下各焊缝的熔深、熔宽如表 3 所示。试验中涂敷高硅粉煤灰活性焊焊缝熔深分别较无活性剂时的焊缝熔深提高了 80%,深宽比提高了 71%。说明了试验选用粉煤灰作为活性剂进行活性钨极氩弧焊,可以增大焊缝的熔深,且效果很明显。

图 5 为焊缝的显微组织形貌。由图 5 知,常规焊缝的柱状晶尺寸比较粗大,涂敷粉煤灰后焊缝内

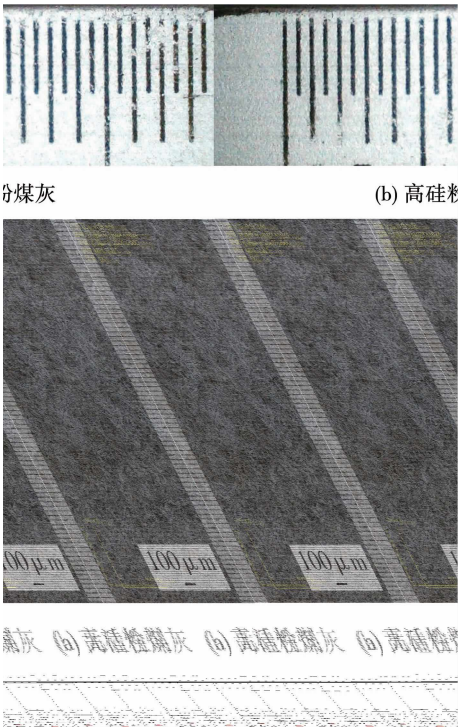


图 4 焊缝的截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of welding seam

表 3 焊缝的熔深熔宽

Table 3 Width and depth of welding seam

试样	熔深 H/mm	熔宽 B/mm	深宽比 R
无活性剂	1.50	7.24	0.207
高硅粉煤灰	2.70	7.61	0.355

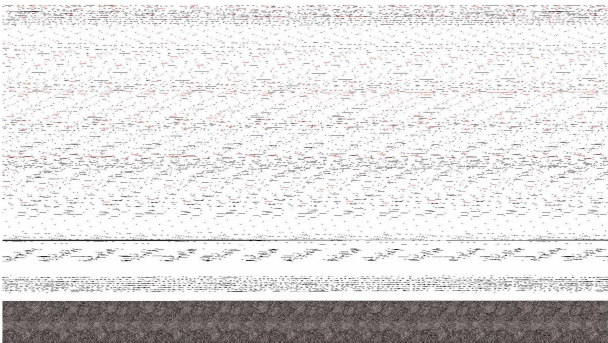


图 5 焊缝的显微组织

Fig. 5 Microstructure of welding seam

晶粒均较常规焊缝出现了细化. 焊缝组织皆由铁素体 + 珠光体构成. 添加活性剂后对焊缝显微硬度影响如图 6 所示.

由图 6 可知,焊接接头硬度由焊缝至焊趾处先升高,焊趾到母材处迅速降低. 高硅粉煤灰焊缝区

显微硬度比无活性剂焊缝中心显微硬度显著增加. 该现象是加入高硅粉煤灰活性剂对焊缝组织细化作用的结果.

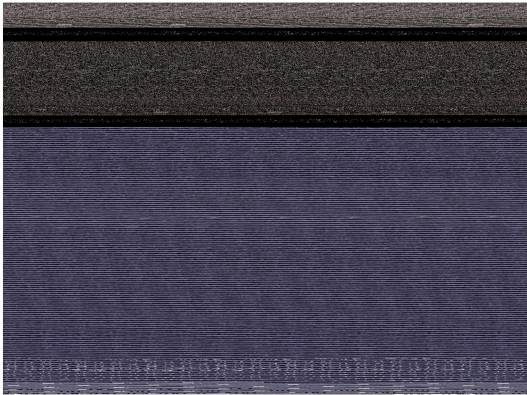


图 6 活性剂对接头硬度影响曲线

Fig. 6 Weld joint hardness with and without activating flux

3 结 论

- (1) 通过不同温度下无活性剂、涂敷高硅粉煤灰的液态金属在石墨基体上的铺展面积的测量,表明添加高硅粉煤灰后能显著地降低表面张力,证明高硅粉煤灰能够作为活性剂使用.
- (2) 建立了不同温度时的液态金属的表面张力演化规律. 无活性剂的液态金属的表面张力与温度间呈线性关系,添加高硅粉煤灰的液态金属的表面张力与温度间呈指数关系.
- (3) 在焊接参数不变的条件下,涂敷高硅粉煤灰活性剂焊缝熔深由无活性剂时的 1.5 mm 增加到 2.7 mm,熔宽基本不变.
- (4) 添加高硅粉煤灰的焊缝晶粒出现了细化,并且其焊缝处硬度较无活性剂焊缝增加了约 12%. 表明高硅粉煤灰可作为常见碳钢类钨极氩弧焊的活性剂.

参考文献:

[1] 沈旦申,张荫济. 粉煤灰效应的探讨[J]. 硅酸盐学报, 1981, 9(1): 57-63.
Shen Danshen, Zhang Yinji. A study of the effects of fly ash [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1981, 9(1): 57-63.

[2] 阎存仙. 粉煤灰的综合利用[J]. 上海环境科学, 1996, 15(2): 21-23.
Yan Cunxian. Comprehensive utilization of coal ash[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1996, 15(2): 21-23.

[3] 雷 瑞,付东升,李国法,等. 粉煤灰综合利用研究进展

- [J]. 洁净煤技术, 2013, 19(3): 106–109.
- Lei Rui, Fu Dongsheng, Li Guofa, *et al.* Research progress of fly ash comprehensive utilization[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(3): 106–109.
- [4] 刘关宇. 粉煤灰综合利用现状及前景[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(19): 167–169.
- Liu Guanyu. Discussion on the present situation and development perspective of comprehensive utilization of fly ash[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(19): 167–169.
- [5] 竹 蕾, 卢升高, 何黎平. 火电厂粉煤灰的矿物学、形态与物理性质[J]. 科技通报, 2004, 20(4): 359–362.
- Zhu Lei, Lu Shenggao, He Liping. Mineralogy, morphology and physical properties of fly ashes[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(4): 359–362.
- [6] 黄兆龙, 湛渊源. 粉煤灰的物理和化学性质[J]. 粉煤灰综合利用, 2003(4): 3–7.
- Huang Zhaolong, Zhan Yuanyuan. Physical and chemical properties of flyash[J]. Flyash Comprehensive Utilization, 2003(4): 3–7.
- [7] Heiple C R. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry[J]. welding Journal, 1982, 61(4): 97–101.
- [8] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 微量活性组元氧对焊接熔池 Marangoni 对流和熔池形貌影响的数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(2): 249–256.
- Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, *et al.* Numerical simulation of effect of the minor active-element oxygen on the Marangoni convection and the weld shape[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(2): 249–256.
- [9] 樊 丁, 郝珍妮, 黄 勇, 等. 氧含量对 TIG 焊瞬态熔池行为影响的数值分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(3): 18–21.
- Fan Ding, Hao Zhenni, Huang Yong, *et al.* Numerical analysis of effect of oxygen content on transient welding pool behavior of TIG welding[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(3): 18–21.
- [10] 方洪渊, 冯吉才. 材料连接过程中的界面行为[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [11] 江仁寿. 金属液体的表面张力[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1957(1): 99–104.
- Jiang Renshou. The surface tension of liquid metals at the melting point[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1957(1): 99–104.
- [12] Wales M. An approximate relation between surface tension and Concentration for Regular Solutions[J]. Journal of Chemical Physics, 1944, 12(4): 135–142.
- [13] Bestul A B. Variations of surface tension with body and surface concentrations[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1959, 42(5): 236–241.

作者简介: 张 勇,男,1977 年出生,博士,副教授. 主要从事焊接结构及工艺方面的科研和教学工作. 发表论文 20 余篇. Email: zhangyongdiyi@163.com