

# 铝对自保护药芯焊丝焊缝组织及力学性能的影响

喻 萍<sup>1</sup>, 潘 川<sup>2</sup>, 薛 锦<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安; 2. 钢铁研究总院, 100081, 北京)

**摘要:** 通过光谱分析、Luzex. F 图像分析、扫描电镜、能谱分析、力学性能试验等手段, 研究了高铝 BaF<sub>2</sub> 渣系自保护药芯焊丝焊缝中的 Al 含量对焊缝中夹杂物、微观组织和力学性能的影响。研究表明: 随焊缝中的 Al 含量增高, 焊缝夹杂物平均尺寸增大; 焊缝中的夹杂物以 AlN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主, 在低 Al 焊缝中以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物较多, 而在高 Al 焊缝中 AlN 夹杂较多; Al 含量的不同会引起焊缝微观组织的改变, 以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物能够诱导焊缝中针状铁素体形核, 而 AlN 夹杂会引起焊缝组织粗大; 焊缝中 Al 含量增加使焊缝的强度增高而韧性下降。

**关键词:** 自保护药芯焊丝; 夹杂物; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG422 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)09 - 0951 - 04

## Effect of Al on Microstructure and Mechanical Properties of Weld Metal of Self-Shielded Flux Cored Wire

Yu Ping<sup>1</sup>, Pan Chuan<sup>2</sup>, Xue Jin<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The effect of Al on inclusions, microstructure and mechanical properties of weld metal of self-shielded flux cored wire with high Al content BaF<sub>2</sub> slag was investigated. The experimental results reveal that the average size of the inclusions grows with the increase of Al component in the weld metal, and the inclusions in weld metal mainly consist of AlN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; the inclusions in the weld with low Al concentration are predominantly Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and the inclusions in the weld with high Al concentration are mostly AlN. Welds exhibit different microstructures owing to different Al contents in weld metal. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-predominated inclusions can induce acicular ferrite by acting as nucleating center. And AlN inclusions can lead a coarse microstructure of weld metal. The weld strength is enhanced and the weld toughness is weakened with the increase of Al in the weld metal.

**Key words:** self-shielded flux cored wire; inclusions; microstructure; mechanical property

自保护药芯焊丝的一个显著优点是能够在无外加气体保护下进行焊接<sup>[1]</sup>。自保护药芯焊丝的药芯中加入了易挥发元素和大量的脱氧脱氮元素, 能够在焊接过程中防止大气的侵入。但是, 大量的残留脱氧剂 (Al、Si 等) 会使焊缝的冲击韧性变差。一般来讲, 低碳钢、低合金钢焊缝的性能取决于焊缝冷却过程中微观组织的变化, 而焊缝中的夹杂物尺寸、分布对焊缝的微观组织影响很大。焊缝中的非金属夹杂

物不但影响合金元素的分布, 而且在冷却过程中可以作为凝固的核心和固态相变的核心。另外, 较大的夹杂物还能够作为裂纹源, 从而降低冲击功和提高脆性转变温度。对于焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊焊缝的微观结构对力学性能的影响, 已有较多研究<sup>[2]</sup>, 而对高 Al 自保护药芯焊丝焊缝中夹杂物及微观结构对焊缝力学性能的影响还很少见有报道。

本文主要研究自保护药芯焊丝焊缝中不同的

Al 含量对焊缝中夹杂物的分布和尺寸、焊缝的微观组织以及冲击韧性的影响.

### 1 试 验

为了研究自保护药芯焊丝焊缝中不同的 Al 含量对焊缝中的夹杂物和焊缝冲击韧性的影响,自制了 7 种不同的高铝 BaF<sub>2</sub> 渣系自保护药芯焊丝. 焊接所用设备是 PANA2AUTO KR500 焊机,焊接工艺参数是:焊接电流 240 A;电弧电压 22 V;焊丝伸出长度 20 mm;极性为直流正接. 焊接过程采用相同的焊接工艺参数,以保证在相同的热输入条件下进行焊接,避免由于热输入的不同而引起夹杂物形态、数量和分布的变化.

### 2 试验结果

#### 2.1 焊缝的 Al 含量

在钢板上用上述 7 种焊丝分别堆焊 40 mm ×25 mm ×20 mm 的焊缝,用 Spectro M8 光谱分析仪分析焊缝中的 Al 含量,结果见表 1.

表 1 焊缝中 Al 的质量分数

焊缝号	1	2	3	4	5	6	7
w(Al) / %	0151	0152	0155	0178	1103	1128	1160

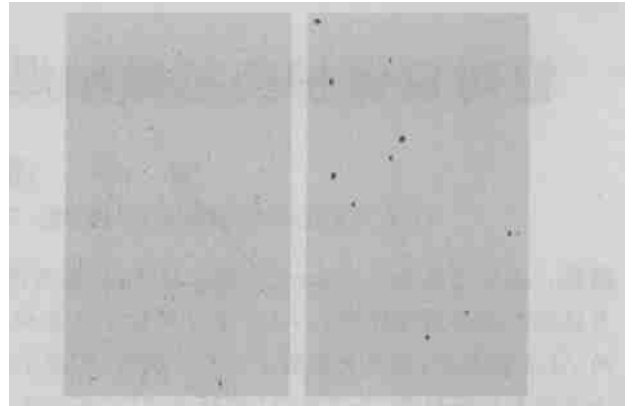
#### 2.1.2 焊缝的夹杂物分布及种类

选取 1 号、4 号焊缝的横向截面制作金相试样,不进行侵蚀,用光学显微镜配合 Luzex. F 图像分析仪观察夹杂物的数量和分布. 对每个试样,任意选取 30 个视场,共 21606 50 mm<sup>2</sup>,进行夹杂物统计. 夹杂物的光学显微照片如图 1 所示,可以看出 Al 含量较高的焊缝中夹杂物颗粒较大,大多为多边形外观;Al 含量较少的焊缝中夹杂物颗粒较小,呈圆点状弥散分布. 夹杂物的尺寸分布及尺寸累积分布如图 2 所示,可见 1 号焊缝中小于 1 μm 的夹杂物数量比 4 号的多,而大于 1 μm 的夹杂物数量较少.

用 LEO - 1450 扫描电镜对夹杂物形态和成分进行分析,结果表明:自保护药芯焊丝焊缝中的夹杂物主要由 AlN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成(见图 3、图 4). AlN 夹杂物的形状是多边形的深色夹杂,而以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物形状比较复杂,其中圆形夹杂物居多,少量为长条形或者多边形. 对夹杂物的观察发现,在 Al 含量低的焊缝中,圆形的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物较多,而在 Al 含量高的焊缝中,以多边形的 AlN 为主.

#### 2.1.3 焊缝的组织特点

取 1 号、7 号焊缝制作金相试样,用 3 % (体积分



(a) 1 号焊缝 (b) 4 号焊缝  
图 1 不同 Al 含量焊缝的夹杂物分布 ×200

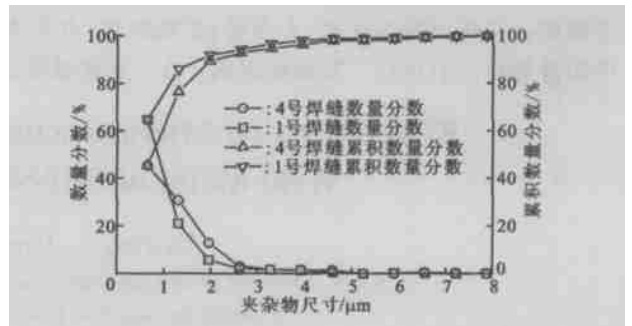
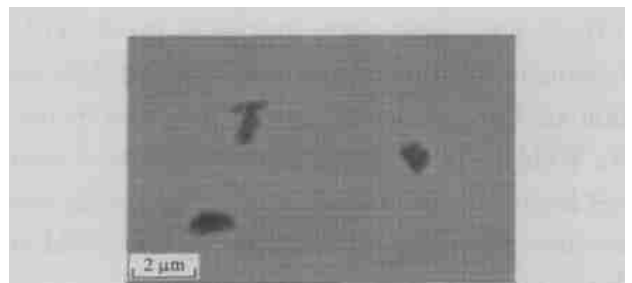
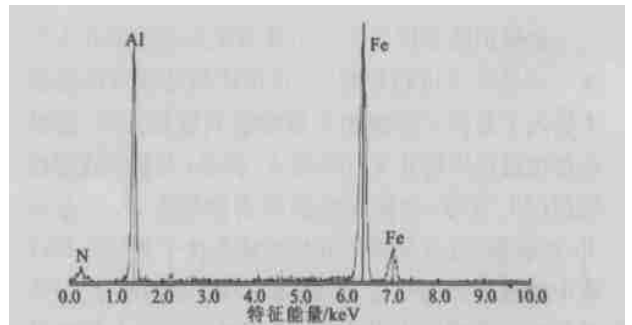


图 2 不同 Al 含量焊缝中夹杂物的尺寸分布及尺寸累积分布



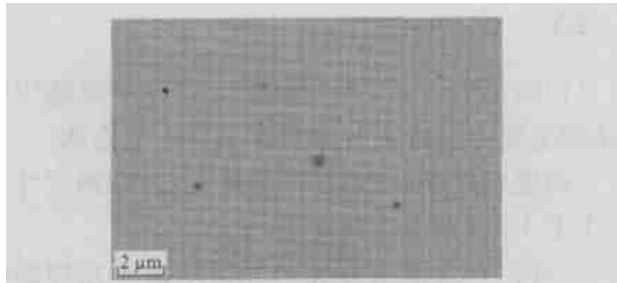
(a) 夹杂物形态



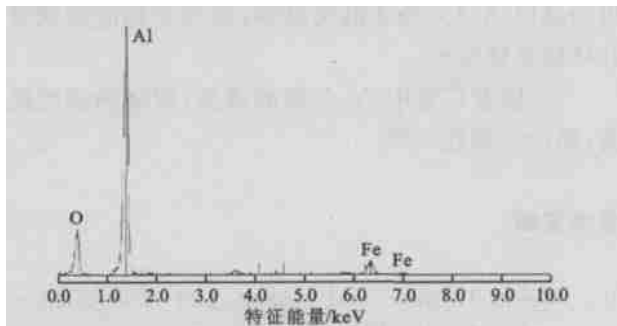
(b) 能谱

图 3 AlN 夹杂物的形态及其能谱图

数)的硝酸酒精进行侵蚀,用光学显微镜观察其微观组织,结果见图5,可看出7号焊缝的柱状晶较粗大,而1号焊缝的柱状晶较为细小.图6是低Al焊缝中的针状铁素体组织.

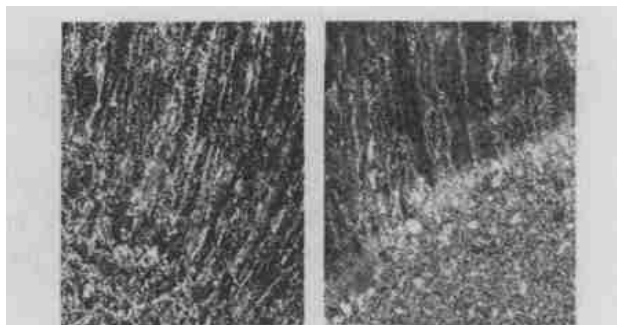


(a) 夹杂物形态



(b) 能谱

图4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物的形态及其能谱图



(a) 1号焊缝 (b) 7号焊缝

图5 不同Al含量焊缝的柱状晶形态 ×50

### 2.1.4 力学性能

焊缝的力学性能试样是按照美国标准 AWS A5129 的规定进行焊接的. 试板材料为低碳钢,试板尺寸为 300 mm × 250 mm × 20 mm,两试板对接面开坡口,焊缝的层间温度为 (150 ± 10) . 在 WAW - 500C 拉伸试验机和 JB - 300B 冲击试验机上对试棒进行力学性能试验,结果如图7、图8所示:焊缝的抗拉强度随着焊缝中Al含量的增加而增高,而冲击韧性的变化则正好相反.

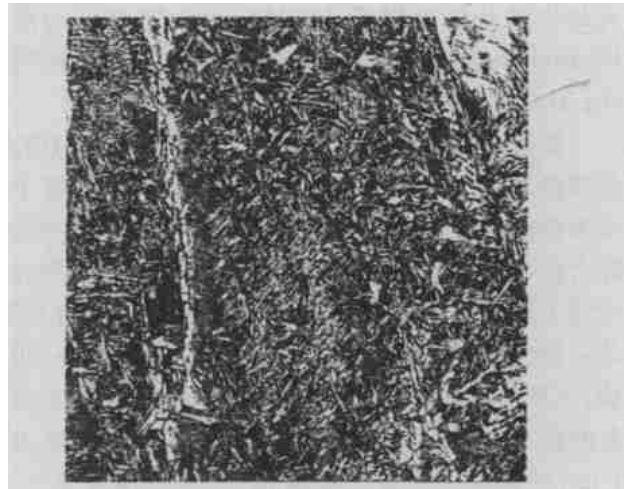


图6 低Al焊缝中的针状铁素体 ×200

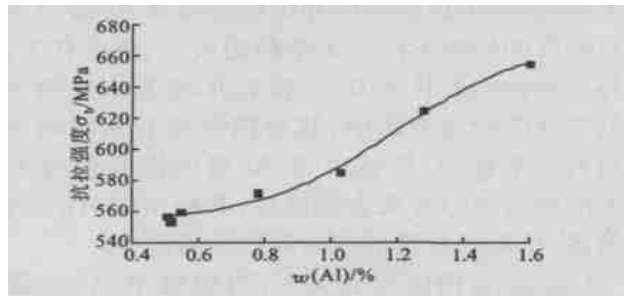


图7 焊缝的抗拉强度随焊缝中Al含量的变化趋势

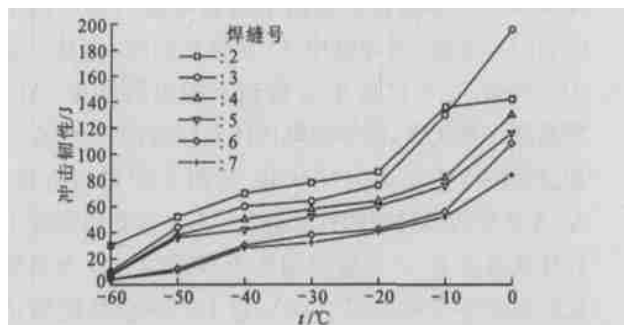
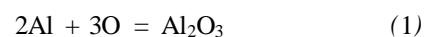


图8 不同Al含量焊缝的冲击韧性随温度的变化规律

## 3 讨论

在焊接过程中,自保护药芯焊丝中的Al通过以下反应进行脱氧和脱氮



$$G^\circ = -1685627 + 326t \text{ (J)}$$



$$G^\circ = -326751 + 115t \text{ (J)}$$

式中:  $G$  是反应的标准自由能变化. 这些氧化物和氮化物一部分进入熔渣,另一部分进入焊缝. 进入焊缝的氧化物和氮化物在熔池冷却过程中有一部分来

不及上浮,就残留在焊缝中形成夹杂.从对焊缝中的夹杂物的分析可以看出:AIN 夹杂物为多边形结构,说明该夹杂物的三维形状为具有较多平面的块状;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物以圆形为主.

随着焊缝中夹杂物的增多,固溶强化作用增大,使焊缝的强度增高.但是,AIN 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 都属于变形率低的脆性夹杂物,由于夹杂物与焊缝之间变形能力的显著差异,势必造成夹杂物与焊缝交界处产生应力集中,导致产生微裂纹或使夹杂物本身开裂.非金属夹杂物对微孔聚集型断裂机制的影响已很明确,大颗粒夹杂物趋于首先形成微孔,由于启裂所需要的应力与  $d^{-1/2}$  成比例( $d$  是颗粒尺寸),因此大于 1 μm 的颗粒更容易形成微孔中心,从而降低 V 型缺口试样的冲击功. Al 含量高的焊缝中大于 1 μm 的夹杂物多,所以焊缝的冲击韧性降低.焊缝中夹杂物对韧性的影响不但与夹杂物的尺寸、密度有关,而且与夹杂物的形状有关.一般来讲,圆形夹杂物不易引起钢基体的应力集中,其对韧性的不利影响比有棱角的夹杂物小.焊缝中含 Al 量的提高使得夹杂物中的圆形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物减少,有棱角的 AIN 夹杂物增多,从而对焊缝的冲击韧性造成危害.

Quintana 的研究表明<sup>[3]</sup>:当焊缝中 Al 含量较低时,Al 更容易与 O 结合(这一点能够从 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 AIN 形成的标准自由能值上得到证实),形成圆形的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂;当焊缝中 Al 含量较高时,容易形成 AIN 夹杂.在本试验中也得到了相似的结果. AIN 质点溶入奥氏体,能够使奥氏体晶粒急剧长大,在冷却过程中产生粗大的柱状晶.从图 5 中可以看出,Al 含量高的焊缝中的柱状晶比 Al 含量低的焊缝中的柱状晶粗大,对焊缝的韧性不利,而在 Al 含量较低的焊缝中形成的以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物能够诱导针状铁素体形核,从而提高焊缝的韧性.以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物诱导针状铁素体形核的机理主要有以下 3 种观点:夹杂物与针状铁素体之间存在小的晶格错排度,从而降低了界面能<sup>[4]</sup>;夹杂物作为一种高能惰性界面,降低了形核势垒,可促使针状铁素体在其上形核<sup>[5]</sup>;夹杂物与基体的膨胀系数不同,所形成的高应变区可促使针状铁素体形核<sup>[6]</sup>.在 Al 含量

较低的焊缝中能够看到较多的针状铁素体.

在自保护药芯焊丝的焊缝中,由于残留在焊缝中的 Al 含量不同,从而导致形成不同形式的夹杂物及分布,进而影响焊缝的微观组织和力学性能.所以,在自保护药芯焊丝中控制 Al 的含量是非常重要的.

## 4 结 论

(1)高铝 BaF<sub>2</sub> 渣系自保护药芯焊丝焊缝中的夹杂物主要为多面 AIN 和圆形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物.

(2)随着焊缝中 Al 含量的降低,夹杂物尺寸减小,小于 1 μm 的夹杂物增多.

(3)高 Al 焊缝韧性差的原因是由于在焊缝凝固过程中析出了 AIN 夹杂物.低 Al 焊缝中主要析出的是以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主的夹杂物,该夹杂物能够诱导针状铁素体形核.

(4)随着焊缝中 Al 含量的增高,焊缝的强度提高,而冲击韧性下降.

## 参考文献:

- [1] Keeler T. Innershield welding, part 1: development and applications[J]. Metal Construction, 1981, 13 (11): 667 - 673.
- [2] Gong O, Matlock D K. Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals [J]. International Metals Review, 1986, 31(1): 27 - 48.
- [3] Quintana M A, McLane J, Babu S S, et al. Inclusion formation in self-shielded flux cored arc welds[J]. Welding Journal, 2001, 80 (4): 98 - 104.
- [4] Naomichi M, Hiroyuki H. Mechanism of notch toughness improvement in Ti2B bearing weld metals[J]. International Institution of Welding, 1981, 9(3): 196 - 201.
- [5] Ricks R A, Howell P R, Barritte G S. The nature of acicular ferrite in HSLA steel weld metals[J]. Journal of Materials Science, 1982, 17(3): 732 - 740.
- [6] Court S A. Weld metal microstructure in carbon manganese deposits [A]. Proc of the International Conference on Quality and Reliability in Welding [C]. Beijing: Welding Institute, China Mechanical Engineering Society, 1984. 45 - 51.

(编辑 葛赵青)