

## • 工艺技术 Technology •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.08.008

## 球化包芯线熔爆特性研究

闫启栋<sup>1</sup>, 齐朋展<sup>2</sup>, 徐锦锋<sup>2</sup>, 李建锋<sup>1</sup>, 王迎战<sup>1</sup>

(1. 禹州市恒利来合金有限责任公司, 河南 禹州 461670; 2. 西安理工大学 材料学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**采用人工插入法研究了球化包芯线前端在铁液中的动态熔爆行为,探索了铁液温度和喂丝速度与熔爆深度之间的相关规律。结果表明,在包芯线熔爆过程中,熔爆前端始终存在高浓度镁的蒸发区域。在铁液温度一定的条件下,随着喂丝速度的增大,熔爆深度呈非线性增大。当喂丝速度一定时,随着铁液温度的升高,熔爆深度趋于减少。在实验研究的基础上,建立了铁液温度—喂丝速度—熔爆深度之间的理论预测模型。

**关键词:**球化包芯线;喂丝速度;铁液温度;熔爆深度

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)08-0742-04

## Research on Melting Explosion Characteristic of Nodularization Cored Wire

YAN Qidong<sup>1</sup>, QI Pengzhan<sup>2</sup>, XU Jinfeng<sup>2</sup>, LI Jianfeng<sup>1</sup>, WANG Yingzhan<sup>1</sup>

(1. Yuzhou Henglilai Alloy Co., Ltd., Yuzhou 461670, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The dynamic melting behavior of nodularization core wire front end in molten iron was studied by manual insertion method. The correlation between molten iron temperature and feeding speed and the depth of fusion burst was explored. The results show that there is always a high concentration of magnesium evaporating zone in the front-end of cladding wire. When the temperature of molten iron is fixed, the depth of melting explosion increases nonlinearly with the increase of feeding speed. When the feeding speed is constant, the melting depth tends to decrease with the increase of molten iron temperature. On the basis of experimental research, the theoretical prediction model of molten iron temperature-feeding speed-melting depth is established.

**Key words:** nodularization cored wire; wire feeding speed; molten iron temperature; melting explosion depth

铁液喂丝球化工艺于1975年美国开始研发,随后在日本、德国、美国等国家的铸造行业获得了蓬勃发展<sup>[1]</sup>。喂丝球化工艺在我国的应用相对较晚,始于20世纪90年代,至今已有近30年的发展历程。该工艺以其脱硫脱氧效果好、烟尘少、镁光外泄少、球化剂加入量少和便于智能化控制等优点<sup>[2]</sup>,在工业领域的应用范围日趋广泛,如在高硅钼球铁件、大型球墨铸铁件、大尺寸高铬铸铁件、低温球铁件、蠕墨铸铁件等铸铁件上已获得了应用<sup>[3-11]</sup>。截止2019年10月,全国采用喂丝工艺的企业数大约在3000家左右,约占我国铸铁企业数量的20%左右,而且还在呈不断增长的趋势<sup>[12]</sup>。然而,生产实践证明,与冲入法相比,在球化指标相近的情况下,处理小吨位的铁液,喂丝球化工艺Mg元素吸收率低,仅

30%~40%,材质塑韧性偏低,分析认为,其主要与包芯线前端熔爆点位置偏高,波动大有关。因此,欲获得良好的球化效果,提高和改善合金的力学性能及镁元素的吸收率,必须严格地控制包芯线前端的熔爆深度。很显然,在球化包芯线结构及组分一定的情况下,熔爆深度主要取决于铁液温度和喂丝速度。由于铁液不透明,无法直观地了解球化包芯线前端在铁液中的熔爆位置,在很大程度上制约了对喂丝球化过程及冶金质量的精确化控制。本文采用人工插入法实验,探索铁液温度和喂丝速度对熔爆深度的影响规律,建立熔爆深度 $H_m$ —喂丝速度 $V$ —铁液温度 $T$ 冶金特性曲线,为实际生产提供理论和技术支持。

## 1 喂丝球化物理过程

包芯线是将欲加入钢液或铁液中的各种添加剂(脱氧剂、脱硫剂、变质剂和合金等)破碎成一定的粒度,用冷轧低碳钢带将其包卷为一条具有任意长度的复合材料。对铁液喂丝球化过程而言,忽略球化处理完毕后的停止喂丝阶段,包芯线喂丝球化物理过

收稿日期: 2020-05-05

作者简介: 闫启栋(1972-),河南驻马店人,工程师。主要从事球化剂、孕育剂等铸造材料研究与应用方面的工作。

电话: 13939685503, E-mail: yanqidong163@163.com

通讯作者: 徐锦锋(1963-),陕西宝鸡人,教授。研究方向: 铸铁合金及熔炼方面的研究。E-mail: jinfengxu@xaut.edu.cn

程可以简化为两个阶段来描述:初始插入阶段和稳定熔爆阶段,如图1所示。当 $t_0$ 时刻包芯线刚接触铁液时,传热过程便已开始。从 $t_0$ 到 $t_c$ 时刻,随着包芯线连续均匀地浸入高温铁液,铁液与包芯线之间的热传输将持续进行,从而导致包芯线温度不断升高,并沿轴向和径向形成较大的温度梯度。至 $t_c$ 时刻,包芯线前端开始发生熔爆,此刻包芯线前端端面熔失推进速度 $V_m$ 和喂丝速度 $V_0$ 正好相等,喂丝球化过程随之进入稳定阶段。当 $t \geq t_c$ 时,熔爆深度 $H_m$ 基本保持不变。

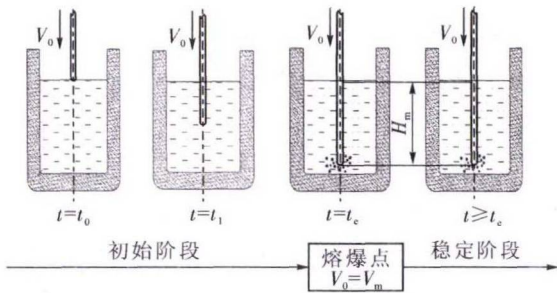


图1 喂丝球化动态过程物理模型

Fig.1 The physical model of the dynamic process of feeding nodularization

## 2 人工插入法实验

喂丝球化过程是通过智能喂丝机在恒定的速度下将球化包芯线连续地送入铁液而完成的。由于铁液温度高、不透明,无法有效地观测包芯线前端的熔爆细节,对球化过程的控制常常是靠经验而非科学依据。为了直观的了解包芯线前端的熔爆行为,安排了人工插入法实验,球化阶段喂丝球化工艺参数如图2所示。人工插入法实验步骤如下:

- (1)包芯线校直,并通过尝试法确定其长度 $L$ 。
- (2)确定原点,测定从原点到包芯线前端端面之间的初始距离。
- (3)测试熔体温度。
- (4)人工插入,尽可能匀速、垂直扦插,随之瞬时抽出熔池,并使用高精度跑表精确记录起插时刻至终止时刻之间的时差。

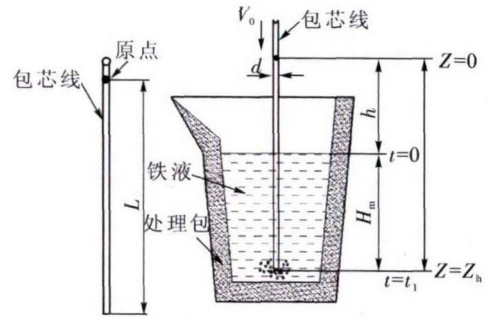


图2 稳态球化阶段喂丝球化工艺参数

Fig.2 Process parameters of steady-state spheroidization stage

- (5)测量原点至液面距离 $h$ 、熔爆深度 $H_m$ ,计算喂丝长度,插入速度。
- (6)对芯线前端宏观形貌进行截取并编号。
- (7)仔细观察包芯线前端结构及形貌特征,分析包芯线熔爆冶金学特性。
- (8)整理实验数据。

## 3 结果与讨论

### 3.1 球化包芯线熔爆前端的形貌特征

通过观察包芯线熔爆前端的宏观形貌,有助于了解球化包芯线在铁液中的冶金反应特性。图3为不同喂丝球化工艺参数下所获得的球化包芯线前端样品。可以看出,每根样品头部均带有一根长短不一的“胡须”,反映了包芯线前端熔爆过程的不对称性。并且熔爆样品通体泛白,表面覆盖有一层厚厚的“白霜”。显然,“白霜”是高浓度的镁原子附着于包芯线前端,在拔出铁液瞬间于原位发生氧化而形成 $MgO$ 粉末。这说明,包芯线前端在高温铁液中起爆时,芯料中的固态镁原子经历了快速液化、气化的过程,并在快速气化的同时,伴有大量镁气泡的形成。由于熔爆尖端区域集中,镁原子浓度较大,不易扩散迁移至周围的铁液中,所以镁的吸收率不如冲入法或盖包法高。当包芯线从高温铁液中快速拔出时,镁与空气中的氧结合成氧化镁,从而形成白色物质—“白霜”。

图4为图3的局部放大。从图4(a)中可以看出,包芯线前端熔爆样品中已没有芯料,仅是一个破损的钢皮残壳,表明包芯线里面的芯料已经被高温铁

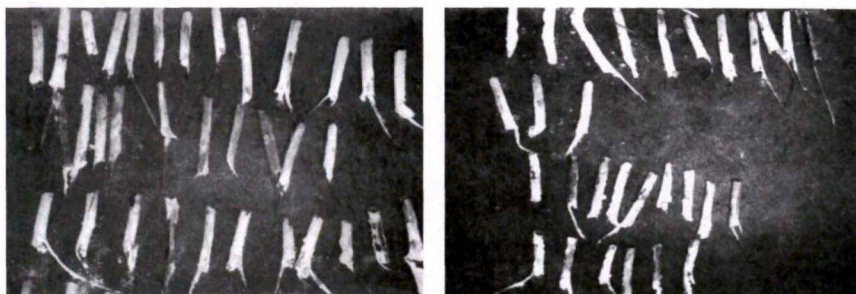


图3 包芯线前端熔爆样品宏观形貌

Fig.3 The macro morphology of the melt-blown sample at the front end of the cored wire

液所熔失。其原因是,当包芯线进入铁液后,高温铁液会将热量通过钢皮传导给芯料,热量在传递过程中,由于芯料熔点低,镁的气化温度更低,芯料先于钢皮熔化而形成残壳。可见,钢皮具有延迟芯料升温 and 延长熔爆时间的作用。从图 4(b)和(c)还可以看出,包芯线前端样品表面存有许多小孔,这是钢皮熔化不充分,内部芯料未发生熔化造成的。另外,在包芯线前端往往存在一根类似“胡须”的残留物,如图 4(d)和(e),有的较长,有的较短。经仔细观察发现,“胡须”实为没有充分熔化的包芯线外层钢皮的咬边,因其厚度较厚,熔化速度相对较慢,在插入实验中被保留了下来。铁液温度较高时,“胡须”长度变短;铁液温度越低,“胡须”越长,熔爆区域越长,越有利于镁原子在铁液中的扩散迁移及铁液对镁元素的吸收。

### 3.2 喂丝速度对包芯线熔爆深度的影响

通过人工插入法实验,可以获得插入速度  $V$ 、熔爆深度  $H_m$  和液池深度等物理参量。图 5 为实验获得的包芯线前端熔爆深度随喂丝速度的变化。可以看出,随着喂丝速度  $V$  的增加,熔爆深度  $H_m$  呈非线性增大。在实验过程中,铁液温度在  $1410\sim 1520\text{ }^\circ\text{C}$ ,液池深度为  $0.65\text{ m}$ ,因此,实验获得的熔爆深度值均小于  $0.65\text{ m}$ 。

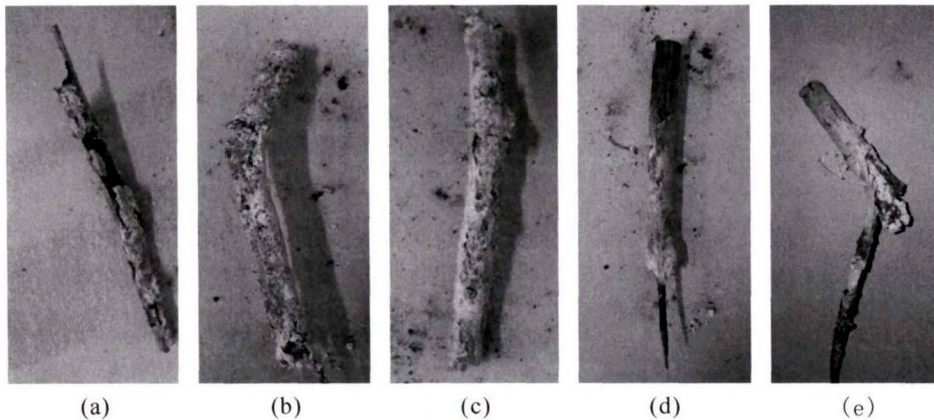


图 4 包芯线熔爆前端的形貌

Fig.4 The melting morphology of the front end of the core wire

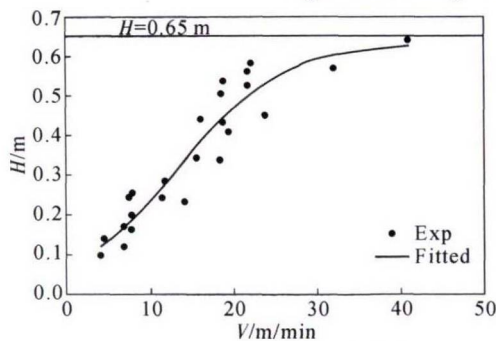


图 5 包芯线熔爆深度随喂丝速度的变化

Fig.5 Variation of melting explosion depth of cored wire with wire feeding speed

喂丝速度是影响球化质量的重要物理参量。当喂丝速度较小时,熔爆深度较小,球化包芯线将在液池上部发生熔爆,必然导致镁元素烧损量大,夹杂物含量多,液池下部球化不充分等问题;当喂丝速度过大时,包芯线前端会戳至球化包包底,造成包芯线打弯甚至折断及包底损坏等现象。因此,喂丝速度确定应该与液池深度和铁液温度相匹配。基于插入法实验,得到的  $H_m-V$  理论特性曲线如图 6。图中,熔爆深度工艺范围在  $H_{m\text{min}}\sim H_{m\text{max}}$ 。通过  $H_m-V$  熔爆特性曲线,依据预定的熔爆深度(熔爆点距离包底约  $10\text{ cm}$ )可以确定出合理的喂丝速度值(如同中虚线所示)。

### 3.3 熔爆深度 $H_m$ 、铁液温度 $T$ 、喂丝速度 $V$ 特性曲线

通过对人工插入法实验数据的整理和分析,得出了不同温度区间对应的熔爆深度和喂丝速度的关系。温度区间分别为: $1410\sim 1450\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1460\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1480\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  和  $1490\sim 1520\text{ }^\circ\text{C}$ 。实验获得的熔爆深度  $H_m$ —铁液温度  $T$ —喂丝速度  $V$  特性曲线如图 7。可以看出,4 条不同温度区间对应的特性曲线具有相同的变化趋势:随着喂丝速度的增加,熔爆深度呈非线性增大;当喂丝速度增加到一定值时,熔爆深度的增速趋于减缓。同时,随着铁液温度的增大,特性

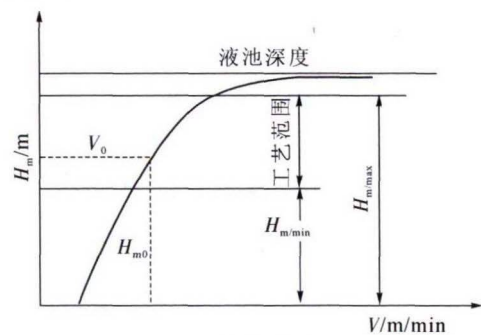


图 6  $H_m-V$  包芯线熔爆理论特性曲线

Fig.6 The theoretical characteristic curve of melting explosion of cored wire  $H_m-V$

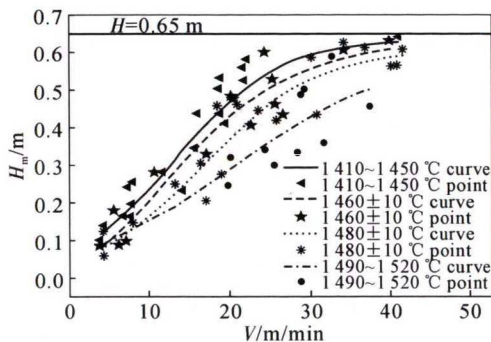


图7  $H_m$ - $T$ - $V$  包芯线熔爆特性曲线

Fig.7 The melting explosion characteristic curve of cored wire  $H_m$ - $T$ - $V$

曲线向右下方移动。这主要与较高的铁液温度下包芯线前端熔爆时间变短,熔爆速度加快有关。因此,在实际生产中,应依据铁液温度和液池(熔爆)深度来确定喂丝速度。

对人工插入法实验数据进行拟合,可以得出不同铁液温度下,熔爆深度  $H_m$ —喂丝速度  $V$  之间的函数关系:

当铁液温度在 1 410~1 450 °C 时,  $H_m$ - $V$  函数表达式为:

$$H_m = \frac{0.634\ 75}{1 + e^{[-0.157\ 46 \times (V - 13.369\ 06)]}} \quad (1)$$

当铁液温度在 1 460±10 °C 时,  $H_m$ - $V$  函数表达式为:

$$H_m = \frac{0.600\ 25}{1 + e^{[-0.164\ 8 \times (V - 14.384\ 22)]}} \quad (2)$$

当铁液温度在 1 480±10 °C 时,  $H_m$ - $V$  函数表达式为:

$$H_m = \frac{0.605\ 77}{1 + e^{[-0.146\ 34 \times (V - 16.922\ 39)]}} \quad (3)$$

当铁液温度在 1 490~1 520 °C 时,  $H_m$ - $V$  函数表达式为:

$$H_m = \frac{0.585\ 46}{1 + e^{[-0.104\ 09 \times (V - 20.235\ 39)]}} \quad (4)$$

使用式(1)~(4),可以对不同温度下的熔爆深度和喂丝速度进行理论预测。

## 4 结论

(1)在包芯线熔爆前端存在高浓度镁蒸气区域,随着铁液温度的降低,熔爆区域变长,有利于铁液对镁元素的吸收。

(2)在铁液温度一定的条件下,随着喂丝速度的增加,熔爆深度增大,但其增速趋于减缓;在喂丝速度一定的条件下,随着铁液温度的增大,熔爆深度显著减少,  $H_m$ - $V$  熔爆特性曲线向右下方移动。

(3)在实际生产中,可以依据  $H_m$ - $T$ - $V$  熔爆特性曲线对喂丝速度进行理论预测。

## 参考文献:

- [1] 张铁军,刘亮,王明光,等.喂线球化的主要影响因素与评价[J].铸造技术,2014,35(6):1246-1250.
- [2] 殷作虎,王长坤,李锡葵.喂丝法处理球墨铸铁技术的开发与应用[J].现代铸铁,2005,25(5):37-41.
- [3] 吴荷生,吴玉彬.喂线技术的基本理论及在球铁和蠕铁的应用实践[J].黑龙江冶金,2014,34(5):14-21.
- [4] 朱正宇,徐政,殷作虎.喂丝法生产蠕墨铸铁的研究[J].现代铸铁,2003(3):24-27.
- [5] 张军,解戈奇,权国英,等.喂线球化工艺在球墨铸铁生产线上的应用[J].铸造,2019,68(2):128-131.
- [6] Guzik E, Wierzchowski D. Using Cored Wires Injection 2PE-9 Method in the Production of Ferritic Si-Mo Ductile Iron Castings. ARCHIVES OF FOUNDRY ENGINEERING. 2012.12 (4):53-56.
- [7] 张敏之,于化顺,张晓蕾,等.喂线蠕化工艺在博杜安 6M26 气缸体上的应用[J].铸造设备与工艺,2011(5):18-20.
- [8] 刘燕平,杨宇鹏,钟伟昌,等.喂线法球化处理及变质处理工艺的应用[J].现代铸铁,2014,34(1):19-23.
- [9] 张寿涛.喂线球化生产薄壁球铁排气管研究与应用[J].黑龙江冶金,2014,34(5):50-58.
- [10] 金伟,马传伟,郑翠华,等.喂线球化处理工艺在消失模生产中的应用[J].铸造装备与技术,2019,54(5):32-35.
- [11] E. Guzik, D WIERZCHOWSKI. Using cored wire injection method in the production of austenitic high Ni-alloyed ductile iron [J]. Archives of metallurgy and materials, 2013,58(3): 969-972.
- [12] 莫俊超,李帅,吕鉴,等.喂线球化工艺相关问题及对策[J].铸造技术,2020,41(2):135-139.

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628