DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5101

中频无芯感应电炉线圈积碳检测与浅析

丛建臣[1,2],王海啸[3],迟　琳[2,4],韩柳娜[2]

(1. 山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255049;2. 天润工业技术股份有限公司,山东 威海 264400;3. 山东泰开精密铸造有限公司,山东 泰安 271000;4. 山东大学 机械工程学院,山东 济南 250061)

摘　要:感应线圈是中频感应电炉的重要部件,线圈的稳定性和可靠性是线圈设计制作及使用过程维护的重要任务,以某中频感应电炉击穿线圈为研究对象,通过扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)、红外光谱及显微共聚焦拉曼光谱等多尺度表征技术,系统分析了线圈表面附着物的理化特性。结果表明,线圈击穿位置的黑色沉积物以游离碳为主,拉曼光谱证实碳结构中存在少层石墨烯。熔炼过程中产生大量的 CO 气体外溢,烧结过程中水蒸气电解是造成一系列反应发生的主要原因;CO 氢还原反应和 CO 歧化反应是感应电炉运行过程中的主要积碳反应。混合气体(CO、CO_2、H_2、H_2O、O_2)携带游离碳向外扩散的过程中受到 Isoplan 绝缘板的阻碍,这是造成大量游离碳附着于线圈表面的原因。

关键词:中频无芯感应电炉;线圈积碳;附着物;检测

中图分类号: TG232　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)06-0596-07

Detection and Analysis of Carbon Deposition in the Coil of a Medium-Frequency Coreless Induction Furnace

CONG Jianchen[1,2], WANG Haixiao[3], CHI Lin[2,4], HAN Liuna[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Tianrun Industry Technology Co., Ltd., Weihai 264400, China; 3. Shandong Taikai Precision Casting Co., Ltd., Taian 271000, China; 4. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: An induction coil is an important part of a medium-frequency induction furnace. The stability and reliability of the coil are important tasks for the design, manufacture and maintenance of the coil. Taking the medium-frequency induction furnace breakdown coil as the research object, the physical and chemical properties of the attachments on the coil surface are systematically analysed via multiscale characterization techniques such as scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), infrared spectroscopy and confocal Raman spectroscopy. The results show that the black attachment on the surface of the coil is mainly free carbon, and Raman spectroscopy confirms the presence of few layers of graphene in the carbon structure. A large amount of CO gas spillover during the smelting process and water vapour electrolysis are the main causes of a series of reactions. The CO hydrogen reduction reaction and CO disproportionation reaction are the main carbon deposition reactions that occur during the operation of an induction furnace. The mixed gas (CO, CO_2, H_2, H_2O, O_2) is hindered by the Isoplan insulation plate during the outwards diffusion of free carbon, which is the reason why a large amount of free carbon is attached to the coil surface.

Key words: medium-frequency coreless induction furnace; coil carbon deposition; attachments; detection

中频感应电炉熔炼铁液,不仅能够精确控制铁液质量和化学成分, 还能够有效降低熔化能耗,符合国际和国内低碳排放量环境发展要求[1-3]。近年来,感应电炉发展迅速,基本取代了冲天炉,成为铸铁熔炼的主要设备。

某公司于 2014 年 3 月引进 4 台德国某品牌中频感应电炉设备,进行球墨铸铁熔炼,该感应电炉具有高功率、高效和节电的优势。但该设备投入使用以来,经常发生感应线圈击穿故障,线圈击穿轻则局部点状渗水,重则穿孔引起大量漏水。若发现不及时,对人员和设备存在重大安全隐患。另外,线圈击穿故障维修周期长,造成生产中断,严重影响公司效益。

近年来,张梅涛等[4]通过对进口中频电炉感应线圈修复,总结了一套线圈修复技术。刘玉芳等[5]通

收稿日期: 2025-06-05

作者简介: 丛建臣,1963 年生,教授. 研究方向为金属材料及金属零件的研究与应用. Email: jchcong@tianrun.com

引用格式: 丛建臣,王海啸,迟琳,韩柳娜. 中频无芯感应电炉线圈积碳检测与浅析[J]. 铸造技术,2025, 46(6): 596-602.
CONG J C, WANG H X, CHI L, HAN L N. Detection and analysis of carbon deposition in the coil of a medium-frequency coreless induction furnace[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 596-602.

中国知网　https://www.cnki.net

过对炉体加固区、保温区进行有效改进，并结合生产采取相关操作措施，提高了炉衬使用寿命。邓朝军[6]通过采取洁净和干燥炉料，控制放料速度，严格筑炉工艺和提高筑炉质量等措施消除或减缓炉衬失效，并达到提高炉衬寿命的目的。曾向海[7]通过分析中频炉感应线圈变形形成原因，制定了相应的处置措施，解决了感应线圈变形问题。毛有武等[8]通过提高中频感应电炉功率质量比，使得熔化效率显著提高。程建龙[9]阐述了中频感应电炉在熔炼过程中的节能降耗及应采取的相应措施。国内研究主要聚焦于炉衬寿命、效率提升或节能降耗等方面，针对感应电炉线圈击穿机理研究较少。

本文在对中频感应电炉结构、组成和工作原理深入分析的基础上，通过 SEM、EDS、红外光谱检测和拉曼检测等手段，对线圈外层附着物进行理化分析，进一步探究线圈与炉体、炉内物质的相互作用机理，以期找到线圈击穿问题的根本原因，为提升中频感应电炉的可靠性提供理论依据和技术支持。

1　中频无芯感应电炉炉体结构和工作原理

无芯感应电炉的剖面结构如图 1 所示。电炉最内侧一层为炉衬，直接与炉内的熔炼金属接触，由石英砂、硼酐混合后烧结而成。其中，石英砂主要由 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等组成，硼酐主要由 B_2O_3 组成。由于热侵蚀和化学侵蚀的作用，炉衬材料需要每月更换 1 次。炉衬外侧为耐火浆料，具有保温、绝热作用，其主要成分为 Al_2O_3 和 CaO。感应线圈是炉体最核心部件，采用矩形铜管双管绕制而成，使用交变电流，同时内部不断地通水冷却，避免线圈温度过高。同电位线圈匝间距为 3 mm，跨电位相邻线圈匝间距为 6 mm，表面喷涂 H 级高强度绝缘漆，绝缘漆的主要成分是环氧树脂，其分子式为$(C_{11}H_{12}O_3)_n$。线圈匝间用云母片搭桥绝缘连接，云母片的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3。线圈外侧为 Isoplan 绝缘板和硅酸盐绝缘布，其作用是绝缘、防止生产中粉尘和细铁料被线圈吸附。Isoplan 绝缘板由 Al_2O_3、SiO_2、Fe_2O_3 和 ZrO_2 组成，硅酸盐绝缘布由 Na_2O、SiO_2、Al_2O_3 和 MgO 组成。各组件的化学成分如表 1 所示。

表 1 中频无芯感应电炉相关材料成分

Tab.1 Composition of related materials in the medium-frequency coreless induction furnace

Part	Chemical composition			
Liquid iron	Fe	C	Si	Mn
Lining	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
Refractory paint	Al_2O_3	CaO	-	-
Induction coil	Cu	-	-	-
Insulation varnishes	$(C_{11}H_{12}O_3)_n$	-	-	-
Mica sheets	SiO_2	Al_2O_3	-	-
Cooling water	H_2O	-	-	-
Isoplan insulation board	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	ZrO_2
Silicate insulation cloth	Na_2O	SiO_2	Al_2O_3	MgO

中频感应电炉主要通过感应线圈来实现炉料加热熔化，基本工作原理为电磁感应原理和电流热效应原理。当感应线圈通过交变电流时(感应电流的最大频率为 244 Hz，最大电流为 15 000 A)，线圈周围产生交变磁场，处于交变磁场中的金属炉料内部产生感应电动势，在感应电动势作用下，金属炉料产生感应电流，根据焦耳-楞次定律，流经炉料的电流转换为热能，使金属炉料加热熔化[10-11]。

2　线圈击穿现象及附着物检测

2.1　线圈击穿描述

在生产过程中，中频感应电炉线圈击穿故障多发生在炉衬烧结完成后第 3 炉以后的熔化阶段。击穿位置常发生在线圈底部 1~5 匝之间，以及线圈表面绝缘漆已被破坏处。线圈击穿位置往往有黑色物质附着，如图 2 所示。经现场观察发现，线圈表面黑色物质附着区域大小不同。另外，未击穿部位的线圈也有少量黑色物质附着。

电炉生产厂家团队历时 6 年，先后多次采取不

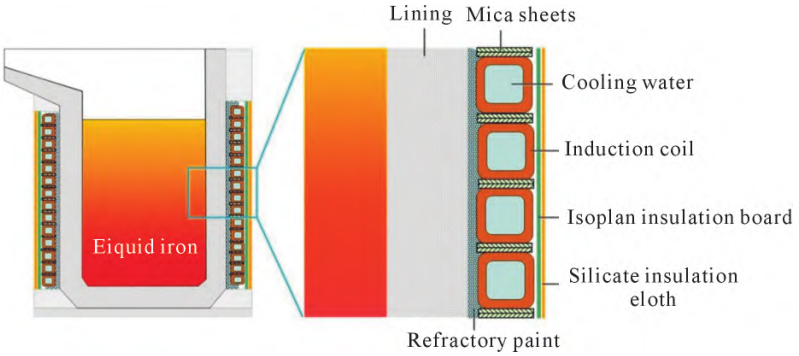

图 1 无芯感应电炉剖面结构示意

Fig.1 Section structure diagram of the coreless induction furnace

中国知网 https://www.cnki.net

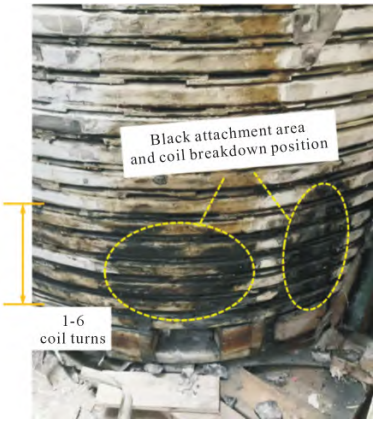

图 2 感应线圈击穿实物
Fig.2 Induction coil breakdown diagram

同措施，如在炉顶安装防尘装置、增大线圈匝间距(线圈匝间距由同相位 3 mm、异相位 6 mm，改为同相位 6 mm、异相位 9 mm)和线圈表面由原来的喷涂 H 级绝缘漆改为陶瓷绝缘漆等一系列措施，并进行技术攻关，问题仍未得到有效解决，线圈击穿故障仍持续发生。报修数据表明，感应线圈使用寿命为 1~6 个月，6 年内线圈击穿故障累计约为 90 余次，造成了极大经济负担。

2.2 取样及制样

对感应线圈的击穿部位进行取样，线圈表面喷涂乳白色绝缘漆，取样过程中，试样往往带有少量绝缘漆。黑色附着物试样呈薄片状，且极易碎。利用 ZXQ-5 自动镶嵌机对黑色附着物进行镶嵌处理，并制样，镶嵌材料为环氧树脂，镶嵌试样流程如图 3 所示。

2.3 SEM 及 EDS 测试分析

采用德国蔡司 Sigma300 场发射扫描电镜观察黑色附着物的微观形貌。黑色附着物表面分布着大量黑色凹坑和形状不规则的细小微裂纹，如图 4a 所示。高倍观察发现，表面分布着大量不规则状颗粒，相互镶嵌堆叠在一起，如图 4b 所示。

采用 EDS 分析黑色附着物的元素成分及含量，结果如图 5 所示。可以看出，黑色附着物的主要成分为 C 元素，质量分数为 62.2%，原子分数为 71%，C 元素的含量是 O 元素的 3 倍多。此外，黑色附着物中存在少量的 Si 元素和 Cu 元素，质量分数分别为 7.5%和 4.1%，Si 来源于耐火材料中的 SiO_2，Cu 来源于纯铜线圈。其他含量较低的 S、Ca、Cr、K 和 Mg 等元素，质量分数均小于 2%，其主要来自黑色附着物上黏着的少量绝缘漆(如图 3)。C 元素游离状物质为黑色，而 Si、Cu、S、Ca 等其他元素游离物的颜色均不是黑色，且含量较低。由此判定线圈表面黑色附着物是一种碳物质。

2.4 红外检测分析

为了验证绝缘漆是否对黑色附着物造成影响，在线圈表面取粉末状黑色附着物进行傅里叶红外检测，结果如图 6 所示。从图中可以看到，位于~3 783 cm^{-1} 波长处的红外特征峰归属于游离 -OH，来源于炉衬

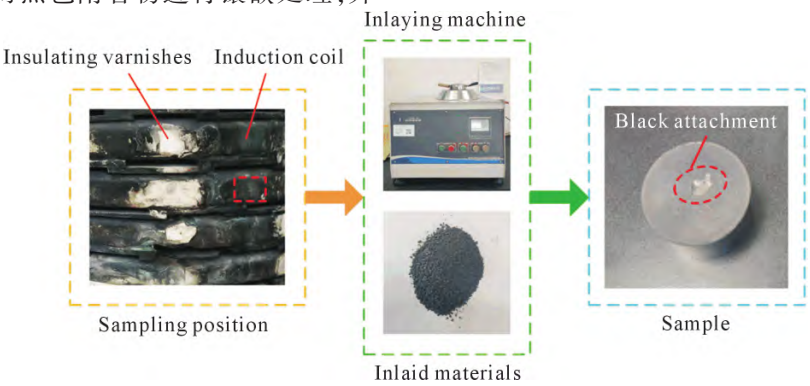

图 3 镶嵌流程
Fig.3 Inlay process

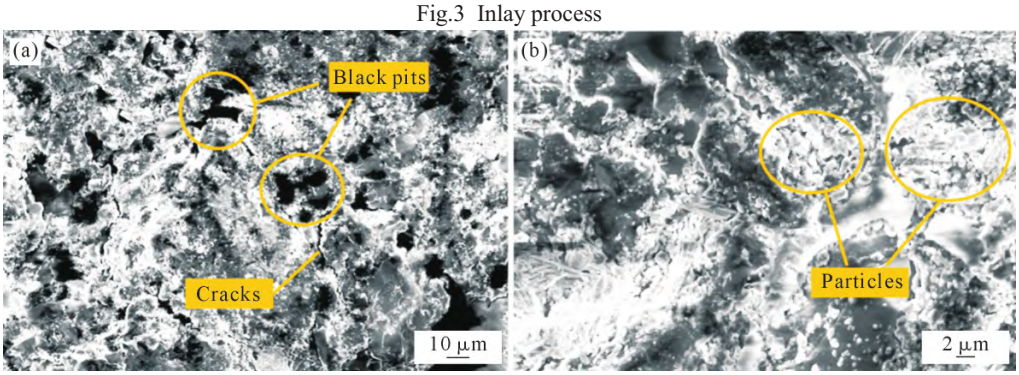

图 4 黑色附着物的 SEM 像：(a) 低倍；(b) 高倍
Fig.4 SEM images of black attachment: (a) low magnification; (b) high magnification

中国知网 https://www.cnki.net

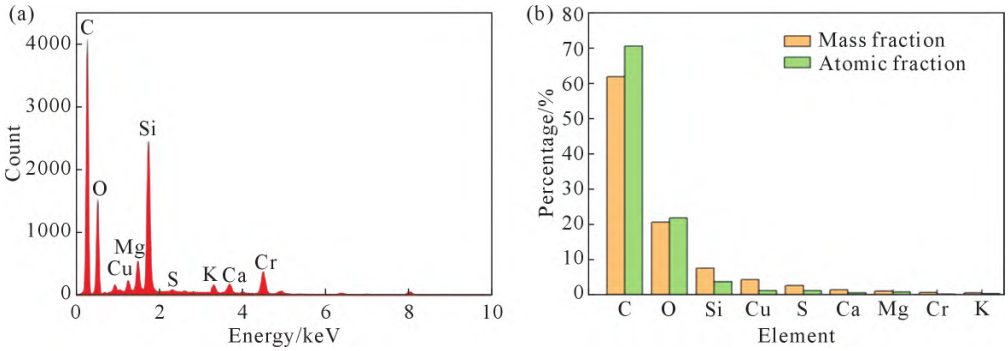

图 5 附着物 EDS 结果：(a) 附着物 EDS 谱；(b) 附着物所含元素质量分数和原子分数

Fig.5 EDS results of black attachment: (a) EDS spectra; (b) mass and atomic proportions of all the elements

中的水分影响，而位于 ~3 571 和 3 480 cm^{-1} 处的红外特征峰归属于 -N-H 键及分子内氢键等。此外，位于 2 356 cm^{-1} 波长位置的红外特征峰归属于O=C=O 键，同时，在双键振动区内位于 ~1 590 cm^{-1} 波长的特征峰对应于 -N=N=。值得注意的是，在碳氢伸缩振动区(3 000~2 700 cm^{-1})内，样品中未出现 $-CH_3$(2 960 和 2 870 cm^{-1})和 $-CH_2$(2 930 和 2 850 cm^{-1})的相关特征峰，表明样品中未出现 C-H 键，说明绝缘漆对黑色附着物的产生没有影响。

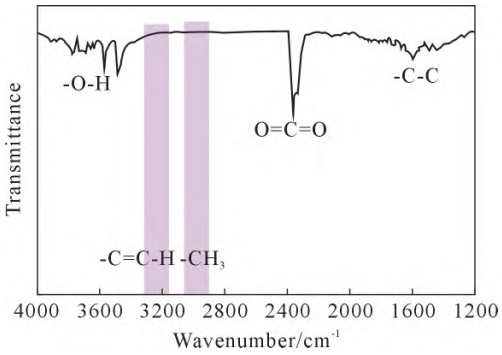

图 6 附着物红外检测结果

Fig.6 Infrared detection results of attachment

2.5 拉曼光谱分析

采用 Renishaw inVia Reflex 显微共聚焦拉曼光谱仪，所选拉曼激光参数为：激光波长 532 nm，功率 0.8 mW，物镜 100×，光斑尺寸约 1 μm。通过对光谱数据进行基线处理和平滑滤波，得到的拉曼光谱如图 7 所示。黑色附着物在 1 348 和 1 582 cm^{-1} 处呈现显著特征峰，分别对应碳材料的 D 峰与 G 峰，且 D 峰与 G 峰强度比：$I_D/I_G<1$。值得注意的是，在 2 700 $^{-1}$ 处同样检测到 2D 峰，由此可以证实碳结构中存在少层石墨烯。

3 线圈击穿原因及机理分析

3.1 线圈积碳原因及机理

在熔炼铸铁过程中，炉内铁液存在一系列的化学反应，如铁液中 Si 元素与铁渣中 FeO 发生反应，

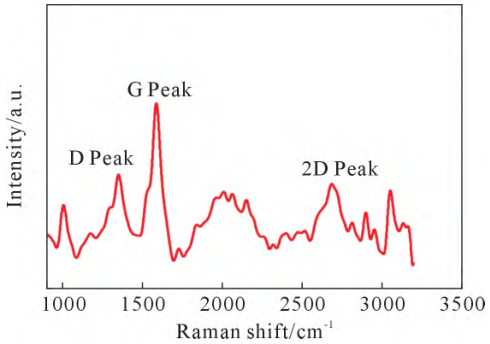

图 7 附着物的拉曼检测结果

Fig.7 Raman detection result of attachment

生成 SiO_2 和 Fe[12-13]，如下式所示：

$$Si+2FeO=SiO_2+2Fe \quad (1)$$

铁液中的 C 元素与 SiO_2 发生化学反应，如式(2)所示，SiO_2 的来源主要为炉衬，少量由反应式(1)提供[14]。

$$SiO_2+2C=Si+2CO(g),\ \Delta G=131\ 400-73.94T \quad (2)$$

炉内铁液的温度分布并不均匀，由上至下温度逐渐升高，炉体底部相较于其他部位温度最高。因此，炉体底部产生的 CO 气体含量相较于上部更多。炉衬中上层反应产生的较少 CO 气体向上扩散。然而，炉衬底部反应产生的大量 CO 气体在铁液压力作用下，较难向上扩散。同时，由于熔炼前期烧结层较薄，炉衬底部反应的 CO 气体能够穿过炉衬近距离向外扩散(图 8)，铁液中的 C 元素以 CO 的形式转移至炉衬中。

在炉衬使用初期，炉衬内含水量较多，烧结过程中，随着炉衬温度的升高，炉衬中的水分受热变成水蒸气，向炉体外部扩散。新炉衬的水分占比约为 0.5%，一台 8 t 熔炼炉所需石英砂 2.8 t，经计算炉衬中的含水量约为 14 kg。

相邻线圈电动势通过下式[15]计算获得：

$$U=\frac{U_{总}}{n}=\frac{2\ 900}{16}=181.3\text{V} \quad (3)$$

式中，U 为相邻线圈电动势；$U_{总}$为线圈两端电压；n

中国知网 https://www.cnki.net

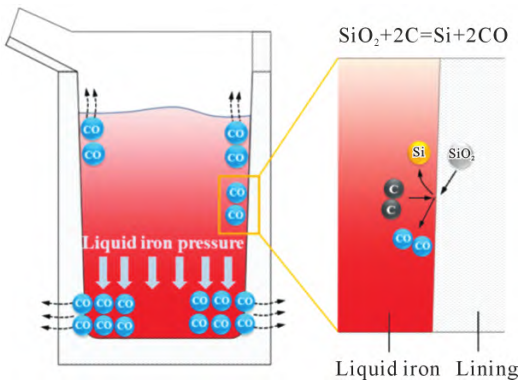

图 8 CO 气体生成及扩散方向示意图
Fig.8 Generation and diffusion direction diagram of CO

为线圈匝数。

相关文献表明，在一定电动势及高温下水蒸气发生电解反应，生成氢气和氧气，表达式[16-17]为：

$$2H_2O(g)=2H_2(g)+O_2(g) \quad (4)$$

因此，在强电动势和高温条件下，炉衬中的水蒸气能够发生电解，生成 H_2 和 O_2，而且高温高电动势可以提高水蒸气的电解速率。

当 CO 和水蒸气共存于炉衬中并能够克服化学反应能垒时，即会发生水煤气变换反应，如式(5)所示。该反应是一个放热反应，低温下具有接近 100% 的 CO 平衡转换率，当石英砂中存在微量金属氧化物催化剂(Fe_2O_3、Al_2O_3)时，能够降低反应活化能并促进水煤气反应向右进行[18-20]。

$$CO(g)+H_2O(g)=CO_2(g)+H_2(g),\ \Delta H=-41.16\ kJ/mol \quad (5)$$

炉衬中 CO 和 H_2 会反应生成 C 和 H_2O，如式(6)所示，该反应是放热反应，H_2 的来源由水蒸气电解反应和水煤气变换反应提供。另外，CO 自身也会发生歧化反应，如式(7)所示，在较低温度易进行。由反应式(6)和(7)可知，CO 氢还原反应和 CO 歧化反应都会生成游离态的碳[21-22]。

$$CO(g)+H_2(g)=C+H_2O(g),\ \Delta H=-131.3\ kJ/mol \quad (6)$$

$$2CO(g)=C+CO_2(g),\ \Delta H=-172.4\ kJ/mol \quad (7)$$

3.2 线圈击穿原因分析

根据上述分析，由于炉衬底部温度较高、铁液压力等原因，造成底部 CO 和 H_2 浓度更高，因此，在炉衬底部游离碳的生成量更多。特别是打结电炉炉衬时，主要利用电动振锤捣打的方式把石英砂捣实，该过程容易造成石英砂密实性不均匀。当炉衬局部松散时，炉衬与铁液反应产生的 CO 气体容易从炉衬松散的位置向外部扩散，形成气体通道。由于炉衬内表面直接与高温铁液接触，外表面受到线圈的冷却作用，造成炉衬的温度在垂直切面方向存在很大的温度梯度。因此，在炉衬的松散层位置 CO 氢还原反应和 CO 歧化反应开始反应生成游离态的碳。由于低温有利于反应的进行，混合气体(CO、H_2O、CO_2、O_2、H_2)一边向外扩散，一边发生反应产生更多游离态的碳，游离碳被气体携带着向炉体外部迁移。炉衬松散层的孔隙率高有利于碳和混合气体的扩散。

由于线圈匝间的云母片采用搭桥连接方式，从而使混合气体易向外扩散。感应线圈温度为50~60 ℃。一部分混合气体和游离的碳遇到低温感应线圈，容易凝结、沉积在线圈表面。另一部分混合气体和碳穿过线圈向外扩散的过程中，由于受到线圈外部的 Isoplan 绝缘板阻碍，只能聚集在线圈和绝缘板之间狭小空间内，造成大量游离碳附着线圈表面，如图 9 示。线圈表面积碳的不均匀性与炉衬密实性相关，当炉衬局部位置密实性差时，混合气体容易从该位置向外部扩散，造成炉衬密实性差位置处对应的外部线圈表面积碳量较多。碳的产生和沉积在任何时间都会发生，但在烧结期间特别迅速，由于新炉衬的烧结层较薄(透气性高)，尤其在电炉下半部炉衬局部密实性差的位置提供了足够的 CO 和水蒸气。

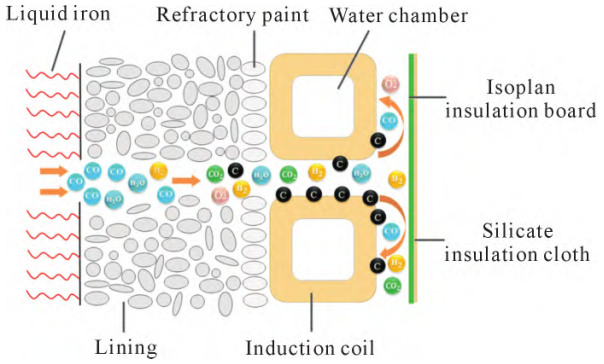

图 9 线圈表面积碳过程
Fig.9 Carbon deposition process on the coil surface area

在感应电炉使用过程中，线圈长期处于水汽和碳沉积的环境中，使得线圈匝间绝缘程度下降。线圈匝间上下表面的碳不断沉积，当线圈上下表面的附着碳积累到一定程度后，由于碳具有良好的导电性，相邻线圈之间会产生高压放电形成短路，造成打火击穿故障。

4 结论

(1)线圈击穿位置的黑色沉积物以游离碳为主，拉曼光谱证实碳结构中存在少层石墨烯。

(2)CO 氢还原反应和 CO 歧化反应产生游离碳，混合气体携带着碳向外扩散的过程中受到 Isoplan 绝缘板的阻碍，造成大量游离碳附着于线圈表面。

(3)线圈长期处于水汽和碳沉积的环境中，使得

中国知网 https://www.cnki.net

线圈匝间绝缘程度下降，导致相邻线圈之间产生高压放电，进而造成线圈击穿。

参考文献：

[1] 肖连华，曹瑞荣，刘宇. 铸造行业中频感应电炉的工艺与管理节能的应用实践[J]. 中国铸造装备与技术，2023, 58(1): 56-59.
XIAO L H, CAO R R, LIU Y. Application practice of energy-saving in process and management of medium frequency induction furnace in casting industry[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(1): 56-59.

[2] 赵健. 中频感应熔炼炉节能技术的研究现状[J]. 工业加热，2016, 45(1): 52-54.
ZHAO J. Research status quo fo energy saving technology for medium frequency induction melting furnace[J]. Industrial Heating, 2016, 45(1): 52-54.

[3] 李琨，张乐乐，童斌斌，庞河临，陈彤，张攀辉. 中频感应炉结构选择及节电途径探讨[J]. 工业加热，2022, 51(6): 7-9, 19.
LI K, ZHANG L L, TONG B B, PANG H L, CHEN T, ZHANG P H. Discussion on structure selection of intermediate frequency induction furnace and ways to save electricity[J]. Industrial Heating, 2022, 51(6): 7-9, 19.

[4] 张梅涛，张智明，胡德，张文会，王海. 中频感应电炉线圈修复技术及应用[J]. 铸造设备与工艺，2023(4): 5-6, 9.
ZHANG H T, ZHANG M Z, HU D, ZHANG W H, WANG H. Coil repair technology and application of medium frequency induction furnace[J]. Foundry Equipment & Technology, 2023(4): 5-6, 9.

[5] 刘玉芳，张明哲，刘玉弟. 工频无芯感应电炉在锌合金中的生产实践[J]. 有色设备，2022, 36(4): 45-47, 63.
LIU Y F, ZHANG M Z, LIU Y D. An application of the power-frequency coreless electric induction furnace in the production of zinc alloy[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2022, 36(4): 45-47, 63.

[6] 邓朝军. 浅谈影响中频炉炉衬寿命的主要因素及改进措施[J]. 铸造工程，2021, 45(6): 67-70.
DENG C J. Main factors affecting lining life of medium frequency furnace and improvement measures[J]. Foundry Engineering, 2021, 45(6): 67-70.

[7] 曾向海. 中频炉感应线圈变形原因分析和预防处置[J]. 铸造设备与工艺，2020(3): 5-7.
ZENG X H. Analysis and prevention for deformation of induction coil in medium frequeney furnace[J]. Foundry Equipment & Technology, 2020(3): 5-7.

[8] 毛有武，修吉平，魏华胜，吴广忠. 提高中频无芯感应电炉熔化速度的实践[J]. 特种铸造及有色合金，2000(S1): 46-48.
MAO Y W, XIU J P, WEI H S, WU G Z. Practice of raising melting rate of medium frequency coreless induction furnace[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2000(S1): 46-48.

[9] 程建龙. 中频感应电炉熔炼过程中的节能问题[J]. 铸造设备与工艺，2019(3): 11-12, 30.
CHENG J L. Energy saving in melting process of intermediate frequency induction furnace[J]. Foundry Equipment & Technolog, 2019(3): 11-12, 30.

[10] 陈跃峰，朱振明，杜宏亮. 中频感应炉感应器绝缘设计[J]. 工业加热，2020, 49(11): 24-26.
CHEN Y F, ZHU Z M, DU H L. Insulation design of inductor for medium frequency induction furnace[J]. Industrial Heating, 2020, 49(11): 24-26.

[11] 李韵豪. 铸造工业的感应加热第十二讲感应熔炼电炉的安全与生态环境保护[J]. 金属加工(热加工)，2020(12): 85-97.
LI Y H. Induction heating of foundry industry lecture 12 safety and ecological environment protection of induction melting furnace[J]. MW Metal Forming, 2020(12): 85-97.

[12] WANG J R, HSUEH P Y, ZENG P Y, CHU P H. Applying ANN to analyze the influence on the recovery of chrome after silicon and aluminums' melting of 15-5PH (V) in EAF [A]. 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration(SII)[C]. Newyork: IEEE, 2011: 846-850.

[13] 童军. 铸铁感应电炉熔炼及应用实例[M]. 北京：化学工业出版社，2008.
TONG J. Cast iron induction furnace melting and application examples[M]. Beijing: Chemical Industry Press Co., Ltd., 2008.

[14] 谭维来，王彦文，高希虎. 熔池铁水温度对合金成分的影响及分析[J]. 铁合金，2020, 51(4): 12-18.
TAN W L, WANG Y W, GAO X H. Influence and analysis about temperature of molten iron in melting bath on alloy composition [J]. Ferro-Alloys, 2020, 51(4): 12-18.

[15] 李韵豪. 铸造工业的感应加热第四讲感应熔炼电炉设计和感应器参数计算(中)[J]. 金属加工(热加工)，2020(4): 71-82.
LI Y H. Induction heating for foundry industry lecture 4 induction melting furnace design and inductor parameter calculation (II)[J]. MW Metal Forming, 2020(4): 71-82.

[16] EBBESEN S D, JENSEN S H, HAUCH A, MONGENSEN M B. High temperature electrolysis in alkaline cells, solid proton conducting cells, and solid oxide cells[J]. Chemical Reviews, 2014, 114(21): 10697-10734.

[17] SHIN Y, PARK W, CHANG J, PARK J. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10-11): 1486-1491.

[18] 胡元冲，秦康，田旺，张乐，丁石，李明丰. 水煤气变换反应耦合加氢过程的影响因素[J]. 石油炼制与化工，2021, 52(7): 107-112.
HU Y C, QIN K, TIAN W, ZHANG L, DING S, LI M F. The influencing factors of water-gas shift reaction coupled hydrogenation process[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2021, 52(7): 107-112.

[19] 卢立金，王锋，王海风，邱健，平晓东. 熔融态铁氧化物碳氢还原热力学与动力学研究现状[J]. 钢铁研究学报，2024, 36(2): 150-162.
LU L J, WANG F, WANG H F, QIU J, PING X D. Research status on thermodynamics and kinetics of carbon and hydrogen reduction of molten iron oxides[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(2): 150-162.

[20] KATO Y, DIPU L A, UJISAWA Y, 袁兵. 炼铁系统碳循环的可行性研究[J]. 世界钢铁，2014, 14(5): 1-6.
KATO Y, DIPU L A, UJISAWA Y, YUAN B. Feasibility study on carbon recycling iron-making system[J]. World Iron & Steel, 2014, 14(5): 1-6.

[21] 丰义航，刘国齐，李红霞，秦红彬，杨文刚. CO 歧化反应的控制

中国知网 https://www.cnki.net

因素及对耐火材料的影响[J]. 耐火材料，2023, 57(5): 452-456.
FENG Y H, LIU G Q, LI H X, QIN H B, YANG W G. Control factors of CO disproportionation reaction and its effect on refractories [J]. Refractories, 2023, 57(5): 452-456.

[22] 伏义路，李锡青，徐小云. CO 的吸附和歧化反应及其在变换–甲烷化反应中的作用[J]. 燃料化学学报，1984(4): 316-323.
FU Y L, LI X Q, XU X Y, Adsorption and disproportionation of CO and its role in shift-methanation reaction [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1984(4): 316-323.

(责任编辑：李亚敏)

中国知网 https://www.cnki.net