

# 热法制磷电炉变压器工艺参数异常案例的研究与分析

牛仁杰<sup>1</sup>, 潘江<sup>2</sup>, 李渴<sup>3</sup>, 申修堂<sup>2</sup>, 孙志立<sup>1,4</sup>

(1. 中国无机盐工业协会, 北京 100013; 2. 中核钛白贵州磷化工基地, 贵州 贵阳 550000; 3. 中国建筑材料工业技术情报研究所, 北京 100024; 4. 贵州黔南化学化工学会, 贵州 都匀 558000)

**[摘要]** 针对两家黄磷厂发生的典型磷炉变压器工艺参数异常案例, 深入分析故障现象、排查过程及最终根源。研究发现, 电极电流、电压等参数的异常表现严重误导了初期故障排查方向, 导致处理过程耗时长达17 d, 造成重大产量损失。根本原因均指向短网系统, 但异常的电气参数和炉内恶劣工况相互耦合, 掩盖了真实的故障点。案例表明, 黄磷生产中存在诸多复杂影响因素(如炉料电阻率、熔池状态、电流分布动态转移), 难以实时在线监测, 高度依赖对基础电学原理、设备结构及工艺操作的综合理解。工程技术人员须理论联系实践, 重视关键参数的深度解读, 强化主控岗位的核心作用, 并将工艺操作参数与电气参数紧密结合分析, 方能突破传统思维局限, 高效定位并解决此类复杂生产故障, 推动热法制磷技术向新质生产力迈进。

**[关键词]** 黄磷; 电炉变压器; 参数异常; 短网故障; 功率因数; 熔池状态; 故障诊断

**[中图分类号]** TQ126.3<sup>1</sup> **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 10-0053-04

## Research and analysis of abnormal process parameters of thermal phosphorus furnace transformer

NIU Renjie<sup>1</sup>, PAN Jiang<sup>2</sup>, LI Ke<sup>3</sup>, SHEN Xiutang<sup>2</sup>, SUN Zhili<sup>1,4</sup>

(1. China Inorganic Salt Industry Association, Beijing 100013, China; 2. CNNC Titanium Dioxide Guizhou Phosphorus Chemical Industry Base, Guiyang 550000, China; 3. China Building Materials Industry Technology Information Research Institute, Beijing 100024, China; 4. Guizhou Qiannan Chemical Industry Society, Duyun 558000, China)

**Abstract:** Based on typical cases of abnormal process parameters of phosphorus furnace transformers that occurred in two yellow phosphorus factories, the fault phenomena, troubleshooting process, and final root causes are analyzed. The abnormal performance of parameters such as electrode current and voltage seriously misleads the direction of initial fault diagnosis, resulting in a processing time of up to 17 days and significant production losses. The root cause is all pointed to the short network system, but the abnormal electrical parameters and the harsh working conditions inside the furnace are coupled with each other, masking the real fault point. The case shows that there are many complex influencing factors in the production of yellow phosphorus, such as furnace material resistivity, molten pool state, and dynamic current distribution transfer, which are difficult to monitor in real time online and highly rely on comprehensive understanding of basic electrical principles, equipment structure, and process operation. Engineering and technical personnel need to go deep into the production line, connect theory with practice, attach importance to the in-depth interpretation of key parameters, strengthen the core role of the main control position, and closely integrate process operation parameters with electrical parameters for analysis, in order to break through the limitations of traditional thinking, efficiently locate and solve such complex production faults, and promote the development of thermal phosphorus technology towards new quality productivity.

**Key words:** yellow phosphorus; furnace transformer; parameter abnormality; short network malfunction; power factor; state of molten pool; fault diagnosis

## 0 引言

热法制磷电炉的核心电气系统由变压器、短网及磷炉本体构成有机整体。其中, 短网指变压器低压出线端至电极(含电极)的全部载流导体, 通常分为补偿母线、水冷铜管、水冷电缆及铜瓦-电极段<sup>[1]</sup>。短网虽短, 其电阻与电抗在装置总阻抗中占

比显著, 其设计合理性与运行状态直接影响电炉效

**[收稿日期]** 2024-08-15; **[修回日期]** 2025-08-01

**[作者简介]** 牛仁杰(1987-), 男, 北京人, 工程师, 中国无机盐工业协会磷化工分会副秘书长。

**[通信作者]** 孙志立(1953-), 男, 云南石屏人, 研究员、教授级高级工程师。

率、功率因数及稳定性。短网与配电设备在运行中承受机械力、电磁力、热应力、化学腐蚀、绝缘老化及过流/压/载等作用，易发故障<sup>[2]</sup>。

近年来，国内黄磷厂频发磷炉变压器工艺参数异常案例，其表征复杂且极具迷惑性<sup>[3]</sup>。笔者以2018年四川某厂及2023年云南某厂2起典型案例为研究对象，深入剖析其异常现象、曲折的排查过程及最终揭示的故障根源，旨在总结教训，提炼诊断方法，为行业应对类似复杂故障提供参考。

## 1 异常案例描述与分析

### 1.1 案例1 四川某厂2#磷炉变压器局部过热

现象：2018年8月22日，A<sub>1</sub>电极突失电流；同日发生C<sub>1</sub>短网水管爆裂、变压器异响及紧急分闸；晚间，变压器壳体局部温度急剧升高（80~100℃）并伴随异响，再次停炉。后续多次试投运发现，一旦投入A<sub>1</sub>电极，变压器特定部位即出现局部过热（>80℃），而仅使用A<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>-C<sub>2</sub>回路运行则正常。

排查过程：历经多轮专家诊断，排除了变压器本体（软连接、水冷电缆等）及常规工艺问题，一度计划进行耗时费力的变压器抽芯检查。处理过程持续至9月初。

解决：2018年9月初接手后，通过系统分析原始操作记录、仪表数据（尤其关注 $\cos\phi$ 异常超前现象）及炉况（炉壁与炉底温差超标、熔池倾斜），运用“排除法”锁定问题核心在短网系统。最终于9月3日确认，C<sub>1</sub>电极软连接接头断裂。修复后，系统于9月7日恢复正常运行。整个故障历时约17d，损失显著。

### 1.2 案例2 云南某厂4#磷炉变压器油温高与电极异常

现象：2023年6月19日，变压器因油温高（>80℃）跳闸。合闸后，A<sub>2</sub>电极电压、电流极低（5~10V，30~80A），与档位及工艺参数严重不匹配，而B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>电极参数基本正常。此状态持续十余日，期间A<sub>2</sub>电极多次压放无效。

排查难点：症状表现集中于A<sub>2</sub>电极，故而误导排查方向指向该电极本身及其控制系统。B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>参数在出渣后下降较快，但可通过升档或提夹头恢复，负荷可维持；A<sub>2</sub>则持续异常。

解决：借鉴案例1经验及分析思路（关注回路关联性、 $\cos\phi$ 变化），最终同样定位为短网系统故障。处理过程同样历时约17d。

### 1.3 案例共性分析

异常参数误导性强：两案例均表现为特定电极

(A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>)电流消失或极低，伴随 $\cos\phi$ 超前（容性负载），这与通常的“电流低则电压高”的认知相悖，且仪表显示出的参数（如C<sub>1</sub>断裂时仍有“正常”显示）极具“欺骗性”，导致初期排查聚焦于变压器本体或显示异常的其他电极<sup>[4]</sup>。

根源一致：最终故障点均为短网系统关键连接点（软连接接头）的断裂。

炉况恶化加剧：故障导致炉内电流回路中断或畸变，引发电极熔池崩溃（倾斜、分割）、料层结构遭受破坏、电极做功不均，进一步恶化电气参数，形成恶性循环<sup>[5-6]</sup>。处理中需大量压放电极（单根>2000mm，远超正常消耗）以重建料层结构和修复熔池<sup>[4]</sup>。

处理周期长、损失大：均经历了约17d的艰难排查，产量损失严重（案例1损失500~800t黄磷产量）。

## 2 原因分析与讨论

### 2.1 故障本质与参数异常机制

根本原因：短网（水冷电缆）接头断裂，导致短网电流物理通路中断。

异常参数成因：（1）电流转移与虚假显示。断裂点导致该相正常回路中断。炉内熔融层（熔池）电阻相对生料层低得多（相差 $10^4\sim 10^5$ 倍）。当断裂点形成间隙时，电流可能通过打弧或在炉内寻找其他路径（如经熔池转移至同回路其他电极），造成断裂点上游仪表仍能检测到部分电流（但非设计回路），而设计目标电极（如A<sub>1</sub>因C<sub>1</sub>断裂导致回路不通）则无电流或电流极低。（2） $\cos\phi$ 超前（容性负载）。电流回路中断或严重畸变导致炉内等效电阻异常增大。在变压器二次侧电压作用下，系统呈现高阻抗特性。此时，变压器的励磁支路（感性）作用相对凸显，而负载支路（阻性）功率传输受阻，导致无功功率相对有功功率占比增大且性质表现为容性（从电网吸收无功的相位关系），故 $\cos\phi$ 超前<sup>[1]</sup>。这与正常运行时的感性负载（ $\cos\phi$ 滞后）截然不同。（3）局部过热与异响。 $\cos\phi$ 超前意味着存在容性无功倒灌，伴随谐波、负序电流增加<sup>[7]</sup>。这些异常电流成分导致变压器铁芯涡流损耗、绕组附加铜耗剧增，并在铁芯磁路饱和时引发振动异响，最终表现为局部温度急剧升高。断裂点持续打弧也是热源之一。（4）炉况影响。故障引发的电流回路异常直接破坏了炉内正常的7条电流回路（通常指三相电极间及电极对炉壁形成的通路），导致熔池无法均匀形成和维持，出现各自为

阵的“死渣”、熔池分割、温度不均<sup>[7-8]</sup>。恶劣的炉况进一步增大了有效电阻，加剧了工艺参数异常，并掩盖了真实的短网故障点<sup>[9]</sup>。

## 2.2 关键影响因素与技术瓶颈

**电流分布动态转移：**热法制磷电炉本质为电阻炉。炉内同回路（如A<sub>1</sub>-B<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>）的三根电极电流存在相互转移的现象<sup>[7]</sup>。当某点电阻异常（如断裂导致阻抗无限大），电流会重新分布至同回路其他路径或通过熔池耦合影响其他回路，导致仪表显示与真实故障点偏离<sup>[10]</sup>。

**cos φ 的核心指示作用：**cos φ 是反映变压器负载性质和系统无功状况的核心电气参数。案例表明，其异常变化（尤其超前）是诊断严重回路故障（如开路或高阻）的关键信号，但在实际操作中常被忽视或误读<sup>[2]</sup>。

**料层结构与电阻特性<sup>[6]</sup>：**炉料电阻率随温度升高急剧降低（1 100 °C时约10<sup>6</sup> Ω·cm，常温约10<sup>10</sup> Ω·cm）。低于1 200 °C的生料层和半熔融层（厚3.0~4.5 m）电阻极大，基本不导电（除非水分异常增加），确保了炉膛的电气绝缘性<sup>[1]</sup>。这使得电流主要依赖设计好的电极-熔池通路。一旦此通路因短网故障或炉内熔池崩溃而中断，即引发前述复杂现象。

**在线监测局限<sup>[10]</sup>：**炉内熔池状态、电流回路完整性、物料组分实时变化等关键影响因素，在当前技术条件下难以实现在线精确监测和直接控制，主要依赖仪表间接测量（电压、电流、cos φ、温度）和操作经验判断，这是故障诊断的主要瓶颈。

## 2.3 诊断方法总结

**超越表象：**不能仅依据某个异常参数（如某电极无电流）或局部现象（如变压器发热）片面判断。案例表明，故障根源（短网断裂）与最显著的表象（A<sub>1</sub>无电流、变压器发热）在物理位置上并不直接对应。

**“排除法”应用：**有效缩小范围。案例中，首先排除变压器本体重大故障（通过其他回路运行正常初步判断）和常规工艺操作失误；再结合电气原理（cos φ 超前的容性负载特性不符合单纯电极断或炉况差的预期）和炉况参数（磷壁、炉底温差超标、熔池形态）<sup>[2]</sup>，从中筛选、分析研究出最合理的部分，将焦点锁定在短网系统。

**系统关联分析：**深刻理解变压器-短网-磷炉（含熔池、料层）的整体性。电气参数（U、I、cos φ、P、Q）与工艺参数（炉温、熔池形态、电极位

置、出渣状态）必须综合分析<sup>[7]</sup>。例如，炉壁、炉底温差是判断熔池均匀性的重要指标；电极压放量异常增大是熔池崩溃和重建的反映。

## 3 经验总结与建议

### 3.1 强化理论基础与参数解读能力

**深化电学原理：**工程技术人员必须了解熟悉、精通交流电路、变压器、电热过程（尤其电阻炉特性）等基础理论，深刻理解cos φ、阻抗、有功/无功功率等电气参数的内涵及相互关系。

**重视cos φ 监控<sup>[2]</sup>：**将cos φ 作为核心监控和诊断指标。明确认识其超前（容性）对诊断回路开路及高阻故障的独特价值，加强对其变化规律的培训和分析。

**掌握“排除法”：**系统培训故障诊断的逻辑思维方法，提升运用“排除法”结合理论原理缩小问题范围的能力。

### 3.2 提升主控岗位核心能力

**定位与要求：**磷炉主控岗位是装置运行的“大脑”，责任重大。需精通全流程工艺、电气特性、炉况诊断与调控策略<sup>[11]</sup>。

**核心技能：**超越简单的电极升降操作，应能通过分析电气参数（U、I、cos φ、功率）和工艺参数（温度、压放量、渣况）的变化趋势，预判炉况发展，运用调压、调电极、控料层等工艺操作手段主动干预，维持或恢复最优的电流回路和良好的熔池状态，实现装置的“安、稳、长、满、优”运行<sup>[12]</sup>。

**严格选拔与培训：**选拔具备扎实理论基础和实践经验的人员担任主控，并持续进行深度培训，提升其对复杂工况和异常参数的综合分析判断能力<sup>[12]</sup>。

### 3.3 优化故障诊断流程与规范

**全面采集信息：**事故发生时，务必系统、完整记录所有相关电气参数、工艺参数及操作事件<sup>[11]</sup>。

**历史数据分析：**详细查阅故障发生前后的原始操作记录、运行参数，寻找异常起始点和关联变化<sup>[10、12]</sup>。

**理论联系实际：**以电学原理和工艺理论为指导，结合仪表数据和现场现象（声音、温度、气味等），进行关联分析，避免经验主义或聚焦单一“可疑点”。

**重视炉况恢复：**认识到良好炉况（均匀熔池、完整电流回路）是准确诊断电气故障的基础。在处理中，适时采取措施（如针对性压放电极、调整配比、控制出渣等）恢复炉况才是必要前提。

#### 4 结论

2起热法制磷电炉变压器工艺参数异常案例,揭示了由短网连接点断裂引发复杂故障的典型模式。其核心教训在于:异常电气参数(特别是特定电极失流伴随 $\cos\phi$ 超前)具有极强的误导性,往往将排查方向引离真实的故障点(短网断裂),而恶劣的炉况(熔池崩溃)则进一步掩盖真相并延长处理周期。突破这一困境的关键在于:

(1) 深化基础理论。工程技术人员必须牢固掌握电热过程、交流电路及设备原理,深刻理解工艺参数(尤其是 $\cos\phi$ )的物理意义<sup>[2]</sup>。

(2) 坚持系统思维。运用“排除法”严谨推理,将电气参数与工艺参数紧密结合分析,全面考察变压器-短网-磷炉系统的整体关联性,避免被单一表象迷惑<sup>[2]</sup>。

(3) 提升主控专业素质能力。强化主控岗位的核心作用,培养其基于多参数综合分析的预判和调控能力,使其成为维持炉况稳定和快速识别异常的第一道防线<sup>[11]</sup>。

(4) 规范诊断流程。建立基于数据收集、理论分析、系统排查和炉况恢复相结合的标准化故障诊断流程<sup>[11,13]</sup>。

唯有将扎实的理论功底、科学的分析方法、精细的操作管理和对关键参数(如 $\cos\phi$ )的深刻解读融为一体,才能有效减少“认识、认识、再认识”的漫长摸索<sup>[2]</sup>,实现对热法制磷电炉复杂故障的高效精准诊断与处置,保障装置安全、稳定、高效、经济运行,为热法制磷工艺技术的完善创新提出更好的思路,推动行业技术向新质生产力迈进<sup>[14]</sup>。

#### 【参考文献】

- [1] 孙志立,杜建学.热法制磷[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [2] 孙志立.功率因数在电热法制磷中的作用[J].磷肥与复肥,2011,26(3):42-43,47.  
SUN Z L. Effect of power factor in phosphorus production by electric furnace [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2011, 26(3):42-43,47.
- [3] 尹魁星,孙志立.大型制磷电炉自焙电极硬断原因分析及处理[J].硫磷设计与粉体工程,2014(5):40-43.  
YIN K X, SUN Z L. Cause Analysis and Handling of Hard Breakage of Self Baking Electrode of Large Phosphorus Furnace [J]. S P & BMH Related Engineering, 2014(5):40-43.
- [4] 孙志立,杜建学.多电极制磷电炉生产运行故障分析[J].硫磷设计与粉体工程,2009(5):29-32.  
SUN Z L, DU J X. Production operation failure analysis for multi-electrode electric phosphorus furnace [J]. S P & BMH Related Engineering, 2009(5):9-32.
- [5] 孙志立.多电极制磷电炉工艺操作管理的优化与创新[J].磷肥与复肥,2012,27(1):41-44.  
SUN Z L. Optimization and innovation of process operation of multi electrode phosphorus furnace [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27(1):41-44.
- [6] 武智斌,孙志立.制磷电炉料层结构与工艺操作相关性研究[J].磷肥与复肥,2013,28(5):43-45.  
WU Z B, SUN Z L. Study on correlation between bed structure of phosphorus furnace and process operation [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(5):43-45.
- [7] 孙志立.制磷电炉内电流、热量分布对制磷电炉运行的影响分析[J].磷肥与复肥,2009,24(5):50-54.  
SUN Z L. Study on the distributions of electric current and heat in phosphorus furnace and its effect on the operation of the furnace [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2009, 24(5):50-54.
- [8] 孙志立,王敏忠.浅析多电极制磷电炉设计运行的现状[J].硫磷设计与粉体工程,2008(5):23-29.  
SUN Z L, WANG M Z. Analysis of Design, Operation and Current Status of Multi-electrode Electric Phosphorus Furnace [J]. S P & BMH Related Engineering, 2008(5):23-29.
- [9] 孙志立,李江滔,问立宁.热法制磷装置无需二次补偿原因分析[J].磷肥与复肥,2020,35(10):25-27.  
SUN Z L, LI J T, WEN L N. Reason analysis of no secondary compensation in thermal phosphorus plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(10):25-27.
- [10] 武智斌,牛仁杰,孙志立.“双碳”背景下热法制磷人工智能自动化控制探讨[J].肥料与健康,2024(6):153-158.  
WU Z B, NIU R J, SUN Z L. Exploration of Artificial Intelligence Automation Control for Thermal Phosphorus Production Under the Background of Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutrality [J]. Fertilizer & Health, 2024(6):153-158.
- [11] 张东梅,孙志立.解决热法制磷电极反复折断难题的对策[J].硫磷设计与粉体工程,2018(3):1-4.  
ZHANG D M, SUN Z L. Countermeasure to solve the problem of repeated fracture of thermal-made phosphorus electrode [J]. S P & BMH Related Engineering, 2018(3):1-4.
- [12] 孙志立.80 MW 制磷电炉的运行总结[J].硫磷设计与粉体工程,2002(4):19-26.  
SUN Z L. The Operation Summary of 80 MW Electric Furnace for Phosphorus Production [J]. S P & BMH Related Engineering, 2002(4):19-26.
- [13] 孙志立,徐子平.制磷电炉内电流与热量分布对黄磷生产的影响[J].硫磷设计与粉体工程,2012(4):6-10.  
SUN Z L, XU Z P. Influence by Electric Current and Heat Distribution in Phosphorus Furnace on Yellow Phosphorus Production [J]. S P & BMH Related Engineering, 2012(4):6-10.
- [14] 孙志立,问立宁,黄平.引进国外热法制磷装置技术研究 with 问题探讨[J].磷肥与复肥,2019,34(9):25-27,47.  
SUN Z L, WEN L N, HUANG P. Technical research and problem discussion on imported yellow phosphorus plant with thermal process [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(9):25-27,47.