

# 矿热炉变压器检修触电事故分析及预防

武荣强

新疆西部合盛硅材料有限公司 新疆 石河子 832000

**摘要:** 文章以一起典型的矿热炉变压器有载调压分接开关检修过程中发生的触电事故为例,从电气原理、事故经过、技术原因、管理漏洞等多个方面,进行了深入、系统的分析。揭示了此次事故的根本原因在于对“电气连接部分上的交叉作业”风险认知不足、安全措施不完善、以及个人安全防护缺失等多重因素的叠加。系统地提出了一套涵盖“技术隔离、管理流程、人员培训、安全文化”四个层面的综合性预防策略,旨在为同类企业提供一套科学、严谨、可操作的检修安全标准与规范,从根本上杜绝类似触电事故的重演,提升整个行业的本质安全水平。

**关键词:** 矿热炉变压器;有载调压分接开关;触电事故;交叉作业;接地措施;预防策略

## 引言

矿热炉变压器(以下简称“炉变”)是矿热炉系统的“心脏”。它承担着将电网的高电压(如35kV、110kV)转换为冶炼所需的低电压、大电流的核心任务。炉变通常被设计为特种变压器,其最显著的特点是配备有载调压分接开关<sup>[1]</sup>。它能够在不断开负载电流的情况下,改变变压器的绕组匝数比,从而实现二次侧电压的平滑、分级调节<sup>[2]</sup>。

然而,有载调压分接开关作为电炉变压器的核心组件,集成了高压电气通路、机械传动机构及绝缘油介质系统,结构比较复杂<sup>[3]</sup>。若检修人员对其潜在电气、机械危害的风险辨识不到位,或安全技术措施未严格按照《电力安全工作规程》的要求执行,极易引发恶性触电事故,导致人员伤亡或设备损毁<sup>[4]</sup>。

本文以某锰硅合金厂于2020年1月4日发生的一起炉变有载调压分接开关检修触电事故为具体案例,展开深入研究分析。

## 1 事故案例还原

### 1.1 事故基本情况

时间:2020年1月4日

地点:某锰硅合金厂冶炼车间

设备:2#矿热炉A相变压器有载调压分接开关

作业内容:有载调压分接开关定期检修,包括吊芯检查、触头维护及油室清洁。

事故后果:检修人员刘××在擦拭调压开关油室内壁时,触及中压调压接触头,发生触电,导致大拇指和食指严重损伤。

检修事故现场实物,如图1。



图1:矿热炉变压器检修现场实物图

### 1.2 作业流程与安全措施执行情况

根据事故报告分析,本次检修作业在流程上看似履行了部分规定程序:

工作组织:工作负责人叶××,带领工作班成员刘××、李××进行作业。

工作票办理:车间主任签发了“2#矿热炉A相变压器有载调压分接开关检修第一种工作票”。

安全措施交接:工作负责人叶××与工作许可人张××共同确认了现场安全措施,并双方签字。工作班成员也履行了签字手续。

检修操作:作业人员按计划将调压开关芯子吊出,抽空油室内的绝缘油,随后开始对油室进行清洁。

表面合规假象下的致命失误:

安全措施不完整:工作票上所列的安全措施包括“断开35kV2#矿热炉高压断路器;将断路器手车摇至检修位置;将三相变压器高压侧瓷瓶接线端子进行接地”。但是,低压侧(二次短网)未装设接地线。这是一个重大疏漏<sup>[1]</sup>。

个人防护不足:进行油室内部清洁作业的刘××,未佩戴绝缘手套。

交叉作业失控:在电气专业进行A相变压器有载调

压分接开关检修的同时,机修车间在未通知电气工作负责人的情况下,对同一台矿热炉的1#电极(对应A、C相变压器)导电铜瓦进行焊补作业。两个专业在同一电气连接系统上工作,形成了事实上的电气和机械两个专业的交叉作业,这种作业带来的危害因素,以前从未被有效识别和有效管理。

## 2 事故技术原理剖析

为了深度理解本次事故原因,我们将逐步分析危险电压是如何“意外”出现在已停电的调压开关触头上的。

### 2.1 矿热炉变压器供电系统原理

参考矿热炉变压器供电系统原理,一台三相矿热炉通常由三台单相变压器组成。其接线方式:D/D接线方式,如图2。

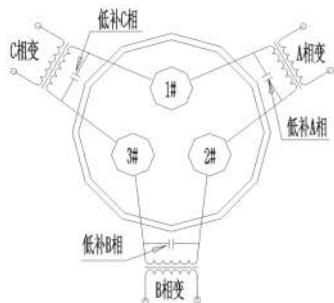


图2：矿热炉变压器供电系统原理图

一次侧（高压侧）：三台单相变压器的一次绕组通常采用“Δ”连接，接入电网高压。

二次侧（低压侧）：二次绕组输出很低的电压和很大的电流。二次出线通过被称为“短网”的大截面水冷铜管或铜排，连接到电炉的三根电极上，通过电炉的三根电极进行首尾相连接，上构成了另一个“Δ”连接。三根电极在炉内通过熔融的炉料形成电气连接，又构成了一个“Y”连接系统。

有载调压分接开关：每相变压器的调压绕组上设有多个抽头，有载调压分接开关通过切换这些抽头，改变有效匝数，从而改变输出电压<sup>[3]</sup>。

矿热炉变压器关键点在于，三台单相变压器的一次侧、二次侧以及通过电极和炉料形成的回路，在电气上是一个完整的、相互耦合的闭合系统<sup>[6]</sup>。

### 2.2 危险电压的产生与传递路径分析

本次事故的关键之处在于，A相变压器高压侧明明已经停电，其调压开关触头上为何会出现“上千伏的开路电压”？分析其路径如下：

电压源——电焊机：机修工在1#电极上进行铜瓦焊补作业。电焊机二次侧的输出电压通常在50V至80V之间。

传递路径——二次短网：1#电极是矿热炉二次短网

的一部分。这个50V的电压施加在了整个“Δ”连接的二次短网系统上。

电磁感应与直接传导——升至一次侧：这是最关键的一步。当在二次绕组上施加一个电压时，它会通过电磁感应，在一次绕组上产生一个感应高电压。

模拟计算：炉变额定变比为 $35000\text{V} / 200\text{V} = 175$ 。施加在二次侧的50V电压，在一次侧感应出的电压理论上可达 $50\text{V} \times 175 = 8750\text{V}$ 。这是一个足以致命的危险高压！

直接传导路径：对于有载调压分接开关的抽头，由于其与一次绕组直接相连，电焊机的电压也可能通过绕组间的电容耦合或直接的电气连接直接传递到调压开关的裸露触头上。

开路状态形成高电压：此时，A相变压器的高压侧已断开并接地，但其调压开关的抽头触头正处于“开路”状态（因为调压开关的开关芯子已被吊出）。在开路点，这个由感应或传导而来的8750V电压无法被释放，完全呈现在触头与地（变压器本体）之间。

构成放电回路：电工刘××徒手擦拭筒壁，当其手指触碰到带电的调压触头时，他的身体（手臂）就成为高电位点。由于他身体伏在接地的变压器本体上（变压器本体是接地的），电流瞬间找到了通路：高压触头 → 手臂 → 身体躯干 → 变压器本体 → 大地。强大的电流穿过他的身体，造成电击伤害<sup>[4]</sup>。

## 3 事故关键原因技术总结

### 3.1 直接技术原因：

低压侧未接地：这是最致命的技术错误。如果变压器二次短网和本体被可靠接地，那么从电焊机传来的50V电压会通过接地线迅速泄放至大地，其电位将被钳制在接近地电位，无法在一次侧感应出高电压。这是《电业安全工作规程》中“断电、验电、接地”基本要求的核心目的——防止反送电和感应电<sup>[5]</sup>。

个人绝缘防护缺失：作业人员未佩戴绝缘手套，失去了最后一道物理屏障。

### 3.2 间接技术原因：

电气交叉作业未被识别：电气检修与机修电焊在同一个电气连接系统上工作，形成了危险的“电气通路”。管理人员和作业人员对“交叉作业”的理解仅停留在空间物理层面，未认识到电气回路的连通性才是风险的本质<sup>[4]</sup>。

## 4 暴露出的系统性管理问题分析

### 4.1 安全理念与风险认知的不足

对“交叉作业”的定义理解深度不够：企业安全管理制度可能只规定了物理空间上的交叉作业风险，完全

没有将“电气连接部分上的交叉作业”纳入管理和风险辨识的范畴<sup>[5]</sup>。

对“停电设备”的动态风险辨识不足：普遍存在“停了电就安全”的静态思维，未能认识到停电设备仍可能通过电磁感应、电容耦合、其他并行回路等方式引入危险能量。

#### 4.2 安全管理制度与流程的漏洞

工作票制度执行不到位：虽然办理了第一种工作票，但安全措施不完整、不彻底。工作许可人和负责人对“所有可能来电侧”接地这一核心要求的理解和执行不到位。

缺乏交叉作业的专项管理规定：制度中没有明确规定，当不同专业在同一电气系统上工作时，必须进行统一指挥、统一协调，办理联合工作票或设立总负责人<sup>[5]</sup>。

沟通机制失效：机修部门进行电焊作业前，未通知电气检修负责人，部门间信息沟通不畅。

#### 4.3 技术培训与安全教育的缺失

培训内容不深入：对员工的培训可能停留在《安规》字面意思上，而没有结合本厂真实的电气设备结构，深入讲解危险电压的产生原理、接地线的作用<sup>[1]</sup>。

风险辨识能力培训不足：员工未被培训如何动态地识别作业环境中变化的危险源，特别是这种隐性的、来自其他作业活动的电气危险。

### 5 建立系统性的事故预防体系

#### 5.1 技术隔离层面——强化“本质安全”措施

严格执行“电气设备全方位接地”原则：规范修订，要在《炉变检修安全规程》中明确规定：检修矿热炉变压器时，必须在高压侧、低压侧、变压器外壳以及有载开关本体等所有可能引入危险电能的部位，装设足够截面、符合要求的接地线。

#### 5.2 管理流程层面——筑牢“过程控制”防线

##### 5.2.1 完善并严格执行工作票制度：

引入“总工作票”或“联合工作票”制度：当确定有多个专业在同一个系统（如一台矿热炉）上作业时，必须设立一名总工作负责人，统一办理一张总工作票，全面负责安全措施的实施和各专业间的协调。

##### 5.2.2 建立严格的交叉作业管理制度：

明确“交叉作业”定义：在安全制度中，将“交叉作业”明确定义为包括“空间/物理交叉”和“系统/能量交叉”两大类。

#### 5.3 人员培训层面——提升“人的可靠性”

开展模拟事故现场的有针对性培训：

以本次事故为典型案例，制作成三维动画或虚拟现实培训课件，让员工身临其境地理解危险电压的产生和传递路径。

常态化开展风险辨识能力训练：定期组织“作业前安全分析”演练，鼓励员工自己识别作业步骤中的潜在危险。

#### 5.4 安全文化层面——培育“主动安全”氛围

管理层示范与承诺：企业管理者必须亲自参与安全观察、事故分析会，传达“安全是第一优先级”的明确信息，并在安全资源上保障安全投入<sup>[6]</sup>。

严格执行“停止作业权”：危险时刻，任何人发现任何不安全状况，都有权立即要求停止作业，并立即上报管理者。

建立透明的学习机制：鼓励分享经验和教训，将每一次事件都视为改进安全管理体系的宝贵机会。

### 6 结束语

本文以某锰硅合金厂炉变检修触电事故为案例，剖析发生触电事故核心原因：低压侧未接地、作业人员无绝缘防护，且电气检修工作与机修电焊工作形成作业之前未被识别的电气交叉作业，电焊机低压经电磁感应在一次侧形成致命高压。同时，本次事故也暴露企业对电气交叉作业风险认知不足、工作票制度执行不彻底、跨部门沟通失效、人员风险辨识能力薄弱等管理问题。对此，从技术上要求设备全方位接地，管理上完善联合工作票、规范交叉作业管理，人员上开展场景化培训，文化上培育主动安全氛围，构建四重预防体系。为同行业炉变检修安全管理提供管理经验借鉴。从根源上杜绝同类事故，提升行业本质安全水平。

### 参考文献

- [1]国家能源局. DL/T 408-2023《电业安全工作规程(发电厂和变电所电气部分)》[S]. 北京：中国电力出版社，2023.
- [2]国家能源局. DL/T 574-2021《电力变压器分接开关运行维修导则》[S]. 北京：中国电力出版社，2021.
- [3]王兆义. 有载分接开关的原理与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
- [4]张金成，郭刘洋. 冶金企业电气事故案例分析及防范[M]. 北京：冶金工业出版社，2015.
- [5]国家能源局. 防止电力生产事故的二十五项重点要求[M]. 北京：中国电力出版社，2014.
- [6]德国MR公司. 变压器有载分接开关使用说明书[Z].