

# 电石炉电极入炉深度与电气参数的相关性研究

康文斌

(中国石化长城能源化工(宁夏)有限公司, 宁夏 银川 751400)

**摘要** 在电石生产过程中, 电能通过碳素电极传输至炉料内, 电极插入炉料的深度决定了电石炉内热量和电能的分布情况, 同时影响炉内各料层的分布状态。理想的入炉深度能使电石炉生产时具有较高的电效率和热效率, 而电极入炉深度不合理不仅会使电石炉电气参数发生改变、生产效率降低, 还会导致电石炉炉盖设备出现超温失效、烧损等异常现象。本文以 81 000 kV·A 大型密闭电石炉实际生产运行过程工艺参数为依据, 分析电石炉电极入炉深度对电气参数的影响, 推算理想的电石炉电极入炉深度, 提出控制电极入炉深度的方法, 以期为提高电石炉生产效率提供借鉴。

**关键词** 电石炉; 入炉深度; 电效率; 热效率

中图分类号: TM924

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)06-0010-03

## 1 电石炉电极入炉深度与电气参数概述

### 1.1 电极入炉深度

电石炉是生产电石的主要设备, 它通过碳素电极导电产生的电弧发出的高热使炉料融化而生成电石。电极入炉深度指电极与炉内料面结合处到电极端头的有效长度, 而电极与炉料料面的接合面处常因炉料粒度、料管长度、料面硬壳等因素发生变化, 因此, 电石炉通常以电极端头到电石炉炉底的距离作为电极入炉深度的衡量依据, 电极入炉深度、炉膛深度和电极端头到炉底的距离之间的关系如公式(1)所示。

电极入炉深度( $h$ ) = 炉膛深度 - 电极端头到炉底的距离 (1)

电极入炉深度直接决定电石炉热量的分布, 影响电石炉的主要电气参数的变化。根据炉内热量的分布情况, 电石炉内的料层反应程度不同, 炉料受高温电弧作用, 会形成反应程度不同的料层, 并在电石炉底部形成液态的反应熔池, 炉料反应层自上而下是: 预热层、相互扩散层、反应层和熔融层, 在远离电极的熔池内壁形成硬壳带, 反应料层的最底部为积渣层<sup>[1]</sup>。电石炉内料层的分布与电极入炉深度密切相关。随着电极端头位置的升降, 各个料层的温区随着发生变动, 单一料层的位置也随之上下移动或消失。

电石炉持续运行过程中, 无法准确测量电极长度, 根据电石冶炼要求, 81 000 kV·A 电石炉电极长度最低要求大于 1.65 m (约等于电极直径), 满负荷或超负荷状态下 (负荷大于或等于 46.5 MW), 电极端头距离熔炉底部约 1.1 m, 即电极入炉深度达到 2.65 m, 按

照电极把持器位置的最低调节范围为 50 mm 计算, 其入炉深度范围为 1.65 ~ 2.65 m。

要实现电石炉的稳定运行, 三个电极端头到炉底需要保持近似相同的距离, 在理想状态下, 该距离等于直径的 60% ~ 70%, 而电极的位置与所设置的电流(电阻)以及反应熔池特性有关, 熔池的导电性能从上到下不断增强。

### 1.2 电石炉电气参数

电石炉中的电能通过插入炉料中的电极引入, 而生成电石的理论温度约为 1 918 °C, 电能由流过导体的电荷组成, 在电极末端产生电弧热, 其热量与电极电流成正比, 热量的分布影响电石炉的其他电气参数。电石炉的主要电气参数包括: 电极电流( $I_1$ )、电极电压( $U_1$ )、熔池电阻( $R$ )、功率( $P$ )和功率因数( $\cos \phi$ )。

电极电流( $I_1$ ): 电石炉的电流主要包括变压器侧的一次电流和电极侧的二次电流, 本文主要讨论电极侧的二次电流, 即电极电流, 该电流为变压器短网到电极端头的电流, 包含电抗和电流损失等。

电极电压( $U_1$ ): 本文主要指电极端头到炉底中心点的电压。

熔池电阻( $R$ ): 电石炉熔池内的星形电流负载区电阻和角形电流负载区炉料的电阻的等效并联电阻。

功率( $P$ ): 电能通过炉料电阻传送, 电石炉消耗的电能成为功率。

功率因数( $\cos \phi$ ): 炉内转变为热能的电能为有功功率, 功率因数为有功功率的余弦值, 炉内无需转变为热能的电能为无功功率。

## 2 电石炉入炉深度与电气参数的关系

电石炉生产过程中两个需要控制的对象为反应物料和热量，当反应物料条件一定时，主要通过炉内电气参数进行生产操作，操作变量包括电极长度、电气参数、出炉时间等。

要实现反应过程的热量平衡必须对电石炉的电气参数进行监控，电石炉的电极长度变化后，意味着电极端头在炉内移动，熔池及各料层的温度分别发生改变，电石炉的功率因数、电阻、电流、电压随之变化。反之，电极的入炉深度的变化也受到电石炉的电阻、电流、熔池特性的制约。电石炉可以通过电流、电压、电阻、有功功率等参数进行控制，最常见的为电流控制方式，电极电流的变化与电极入炉深度密切相关，其他的电气参数随电流调整而发生变化。

### 2.1 入炉深度与电极电流

电石炉运行通过调节电极入炉进行控制，以确保炉内的电气平衡，这种平衡通过二次电流和电极电压调整进行维持，三相电极上的电压均相同且电极在混合物中的熔池深度相同时，电石炉将保持电气平衡。电石炉入炉深度改变后，电极端头和电极侧面通过的电流电荷分布比例也发生变化。在电极入炉深度较浅（电极与炉料接触侧表面积较小）的条件下，电流电荷基本在电极端部，随着入炉深度的增加，电极侧表面的电流电荷占比逐渐增加，端头的电流占比相应减少。

以 81 000 kV.A 电石炉单相电极为研究对象，当电石炉负荷达到设计额定负荷 46.5 MW 时，电极电流会随着入炉深度增加呈现先增后降的变化趋势，主要原因是通过电极端的电流占总电流大小的比值随着电极插入深度的增大而减小，说明电流的分布与插入熔池的电极面积成比例关系。当电极插入很浅时，通过电极端的电流与总电流大小逐渐接近。

根据相关模型研究<sup>[2]</sup>，电流是从被埋入导电介质的电极圆柱体端面和侧面全方位地流出；等位面在电极端下部是与电极呈垂直且相互平行的分布，在地面周边向上完全，离开外侧电极走向炉壁，在两电极之间垂直向上。由电极侧表面流出的电流为 I 侧，电极端头流出的电流为 I 端，H 为电石炉料面总高度，随着电极插入深度 h 的增加，h/H 的减少，通过电极侧表面的电流不断增大，h/H ≈ 0.25 时，I 侧增加到占总电流大小的 75%，

某 81 000 kVA 电石炉电极电流的改变后，其电气参数变化见表 1。

从表 1 中可以得出，据公式（1）在其他两项效率因数不变的情况下，额定电极电流为 133.6 KA，电流改变后，电石炉有功功率的变化如公式（2）所示：

$$\mu = K_1 * (I_{实} - |I_{实} - I_{额}|) / I_{额} \quad (2)$$

其中：μ 为总效率；K<sub>1</sub> 为权重系数，通常取平均值 0.15；I<sub>实</sub> 为实际电流；I<sub>额</sub> 为额定电流；

将表 1 中数据代入公式（2）可得 μ<sub>降</sub> = 0.0067，W<sub>有功降</sub> = 0.3132 MW，从计算结果可知，电极电流的偏离使额定负荷 46.5 MW 降低到 46.155 MW。

因此，随着电极入炉深度的增加或减少，电极电流大小存在明显的变化，这种变化会影响有功功率。当电极电流过大，且炉内电阻低时，表明电极插入过深，而电极插入过深，电极电感增加，功率因数降低，进而在功率 S 不变的条件下，入炉有功功率 P 降低，进而使电石产量降低。当电极电流过小，且炉内电阻高时，表明电极插入深度不足，电极缩短，电感减少，功率因数升高，在电压 U<sub>2</sub> 不改变时电流减小，入炉有功功率降低，电石炉产量降低，电极电流小炉池内温度低，质量降低。

### 2.2 入炉深度与电极电压

电石炉两相电极之间、电极与炉壁、电极与炉底之间的电压在决定炉膛内部的电流分布，对电极位置和炉膛内部的功率分布影响很大。电石炉的三相电极上的相间电压通常相同，并随变压球接头位置和一次电压的变化而变化，相对熔池电压为实际电极电压，用以表示电石炉的稳定性，该电压主要受电石炉炉料的阻力或结壳的影响。在稳定的条件下，三相电极电压也相同<sup>[3]</sup>。

电石炉的一次电压同二次电压、电极电压成正比例关系，一次电压的波动直接影响一次电压和二次电压的变化，电石炉外线电压的变化对电石炉电压和有功功率有直接影响，一次电压、二次电压和电极电压间的关系可以用公式（3）描述。

$$\mu = K_1 * (U_N - |U_2 - U_N|) \div U_N \quad (3)$$

以 81 000 kVA 电石炉为例，有功功率 46.5 MW 为满负荷，额定电压 328.6 V，对地电压 200 V，其中变压器本身的一次电压为 115 kV。从公式（2）中可以得出，合理的电极电压 U<sub>2</sub> 可以提高设备效率。一次电压在

表 1 81 000 kV.A 电石炉电极电流

档位	负荷 (MW)	一次额定电流 (KA)	一次实际电流 (A)	二次额定电流 (KA)	二次实际电流 (KA)
29	45.6	231.4	418	133.6	139.6

110 kV 时,电石炉达到满负荷 46.5 MW,电极电压为 296 V,低于变压器额定值约 32 V。在其他两项效率因数不变的情况下,则  $\mu_{\text{降}}=0.0322$ ,  $W_{\text{有功降}}=1.499$  MW。

从计算结果得知:电石炉变压器一次电压降低后,导致电极电压降低,在其他条件未发生变化时,电石炉额定负荷 46.5 MW 降低 1.499 MW,实际额定负荷约为 45.0 MW。

根据欧姆定律,在输入功率一定的情况下,电极电压的大小与炉内电阻成反比,电极入炉深度变化后,电极电压随之波动。据统计,电极入炉深度与炉料高度之比由 0.2 增加到 0.8 时,离电极周边 2 mm 处的相对电压降由 31.8% 降低到 17.2%,电极截面上的功率密度最大区域同步下移,以上情况说明电极入炉长度由浅向深过程中,电极电压下降,达到理想位置后,电压逐步上升。

### 2.3 入炉深度与电石炉生产效率

电石炉主要生产参数以总效率体现,包括热效率和电效率,其中热效率主要与入炉深度和电极总长度的比值有关,电石炉的电效率与电极电压、电极电流相关,通过功率因数表现,其中电极电流的变化与电极入炉深度密切相关。因此,电石炉电极入炉深度决定着电石炉的生产效率。

电石炉内物料反应所需总热能主要是由输入电炉的有功功率转化而来,电石炉的生产能力可以用变压器的视在功率与功率因子,电效率及热效率的乘积来表示,它反映了电石炉的实际生产能力。

在电石炉运行稳定的基础上,热效率和电效率之和就是电石炉的效率。电效率与电石炉电极电压和电极电流的偏差相关,在实际应用中,当电石炉额定功率、短网规格型号确定以后,变压器感抗是一个确定的数值,对电石炉电效率变化影响较小。

对于热效率而言,随着电极入炉深度增加,炉气的部分热量用于预热反应炉料层,料层吸收热量增加,炉气温度降低,热效率升高。另外,同样的电极长度,电极裸露长度越短,周围炉料受到热辐射越少,电极无功功率越低<sup>[4]</sup>,反之亦然。

电极控制合理的电极插入深度不足,小于电极直径时,炉料电阻减小,电极间横向电流大,使电极不能深入,炉料层厚度小,烟气温度高,热损失大,热效率低,电耗高,入炉深度接近电极直径时,电石炉总效率提高。

降低生产过程中的热损失可以提高热效率,其中主要是运行操作损失热能,炉面热损失是操作损失热

中的主要部分,炉面温度越高,热损失越大,炉面温度越低,热损失就越小<sup>[5]</sup>。因此,提高电石炉的电效率和热效率是控制好电石炉的入炉深度。

### 3 结论

合理的电极插入深度对电石炉的电流、电极电压、功率等参数有着重要的影响,电石炉入炉深度逐渐增加后,电极电流升高,炉内压力增大。因此,降低电极电流和增加炉料透气性可使电石炉电极的入料深度增加,进而使电石炉电气参数达到理想值。

1. 实现大型密闭电石炉稳定运行,使电石炉的三相电极入炉深度保持近似相同,即使三个电极头与熔炉底部保持近乎相同的距离达到电极直径的 60%~70%,即 1~1.15 m。根据欧姆定律  $I=U/R$ ,增大炉料电阻可降低电极电流。另外,减少炉内过剩的导电物料和改善炉料透气性,为减小炉料导电性,增加电极插入深度创造条件。

2. 电极端头处于较高的位置,电石炉拥有较高的功率系数,但电极位置过高,使用过高的功率系数进行操作或负荷增加过快都将造成炉料中的碳化物热量不足,进而导致出炉困难。若功率系数过低,电极至熔炉的熔透将过大,从而导致电石过热,易造成分解、喷发及结皮形成。因此,在电石炉长期关闭后提高负荷时,必须保证电极入炉深度与功率系数相匹配。

3. 电石炉电阻、电流、炉内温度等参数随着出炉操作的变化而波动,入炉深度随之波动,可利用炉内条件的变化逐步增加或降低入炉深度,尤其是在电极长度偏短时,可以通过增加出炉时间和出炉量来下插电极。如果电极位置持续偏高,无论熔池高低,表明电极过长;如果电极位置持续偏低,无论熔池高低,表明电极过短。

### 参考文献:

- [1] 熊谟远.电石生产加工与产品开发利用及污染防治整改[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 杨树明,石富,李峰,等.矿热炉设计与应用[M].北京:冶金工业出版社,2014.
- [3] 徐永斌.密闭式电石炉冶炼工艺机理分析[J].盐业与化工,2016,45(10):30-33.
- [4] 王增军.密闭式电石炉冶炼工艺机理分析与运行探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(15):153-154.
- [5] 沈昆,赵山,罗磊,等.电石炉能耗优化控制策略研究[J].中国工程科学,2020(07):59-60.