

高炉喷煤喷吹罐组与倒罐周期的设计

陈 亚, 刘海峰

(江苏大垲集团有限公司, 南京 211112)

摘 要 高炉喷煤装置中的喷吹罐组成和倒罐周期的设计对稳定喷吹和建设成本都有很重要的影响。本文针对一座 3200m³ 高炉喷煤的喷吹罐组不同选择进行分析, 并指出各自的优缺点, 同时对喷吹罐倒罐操作时间进行详细的分析计算, 来验证倒罐周期的设计选择。

关键词 喷吹罐; 倒罐周期; 高炉喷煤

Design for the Tank-Exchange Cycle and the Makeup of a Group of PCI Tanks

Chen Ya Liu Haifeng

(MounTop Group Co., Ltd, Nanjing 211112 China)

Abstract The design for the tank-exchange cycle and the makeup of a group of PCI tanks play an significant role in the stability of PCI and the construction cost. This essay makes an analysis of the different makeup of a group of PCI tanks regarding a 3200m³ blast furnace and points out their individual merits and demerits. Meanwhile, it calculates the period of the tank-exchange in order to find a feasible design of tank-exchange.

Key words PCI tank, tank-exchange cycle, PCI

引言

高炉喷煤喷吹装置目前以并列式为主, 本文主要讨论并列式喷吹装置喷吹罐组的选择, 而并列式喷吹装置有两台喷吹罐并列布置和三台喷吹罐并列布置两种方式。文章具体针对一座 3200m³ 高炉(出铁量 8000t/d, 最大喷煤量 250kg/t-Fe, 喷吹量 83.3t/h)的喷煤要求, 分析喷吹罐不同组成形式的优缺点和倒罐周期的计算。

1 喷吹罐组的选择

1.1 两罐并列式

两罐并列式喷吹形式就是 1# 罐与 2# 罐之间进行交替喷吹, 这就出现了一个倒罐周期 T 。倒罐周期是一个喷吹罐从开始投入喷吹到退出喷吹所持续的时间, 它的设定是喷吹罐容积选择的前提, 是喷吹装置设置的一个关键参数。

倒罐周期主要由倒罐操作时间 $t_{倒}$ 和等待时间组成。倒罐操作时间由泄压、装粉、充压和阀门操作时间组成, 根据对现有生产经验统计, 一般将倒罐操作时间控制在 20 分钟以内, 在本章后半部分将对此时间进行详细理论验证计算。等待时间主要是考虑喷吹装置出现故障处理时间, 煤粉喷吹装置中主要的操作、控制设备是阀门, 因此出现的故障基本与阀门有关, 如阀门限位故障、气缸故障、阀体故障等, 根据现有生产经验, 喷

吹装置中的阀门一般会出现阀门限位故障、气缸故障且无法预测,处理阀门限位故障、气缸故障通常需要 25 分钟左右,阀门故障出项频率低且有预兆,通常在出项征兆时就会提前利用检修时间进行更换,不影响喷吹。

因此初步设定倒罐周期为 45 分钟,这也符合部分学者提出的倒罐周期为倒罐操作时间的 1.1~3 倍。

据此,喷吹罐的几何容积 V 便可按下式求出:

$$V = \frac{T \times q}{\varphi \times \rho_{\text{粉}} \times k} \quad (1)$$

式中 T —— 倒罐周期, h;

φ —— 喷吹罐装载系数, %, 一般取 0.8~0.9;

q —— 喷吹能力, t/h;

$\rho_{\text{粉}}$ —— 煤粉堆密度, t/m³, 一般取 0.60~0.70;

k_r —— 有效喷吹比, %, 一般取 0.80~0.95;

有效喷吹比是装入罐中的煤粉实际喷吹的比例。喷吹倒罐操作时,一般在喷吹罐内保留一层“操作”煤粉量,以避免煤粉层被“击穿”,而造成向高炉空吹。保留煤粉量一般占到总装入罐内煤粉的 10% 左右,如果罐内煤粉剩余量过低会造成空吹,过高会造成喷吹罐设计体积偏大。

根据上述设计参数,取 $T=0.75$; $\varphi=0.85$ $q=83.3$ t/h $\rho_{\text{粉}}=0.65$ t/m³ $k_r=0.90$

代入公式(2.1)

$$V = \frac{T \times q}{\varphi \times \rho_{\text{粉}} \times k} = \frac{0.75 \times 83.3}{0.85 \times 0.65 \times 0.9} = 125.64 \text{ m}^3$$

计算发现喷吹罐的容积达到 125.64 m³,而喷吹罐采用的是防爆型压力容器,罐体能够承受罐内煤粉爆炸压力,所以喷吹罐罐体设计压力要大于喷吹煤粉的爆炸压力(一般在 3MPa 左右,详细按提供煤种计算)。如此大体积和高压力的防爆压力容器设计、制造、安装都十分困难,通常情况下制造厂家和安监部门都不建议使用。

两罐并列式喷吹形式倒罐周期长,适合喷煤量低的中、小型高炉喷煤。

1.2 三罐并列式

三罐并列喷吹形式是 1# 罐、2# 罐和 3# 罐之间进行轮流交替喷吹,同两罐并列式一样,罐与罐切换之间存在一倒罐周期。但与两罐并列式不同的是,三罐并列式倒罐周期基本就是倒罐操作时间,一般不考虑等待时间或取很短的几分钟。由于三罐轮流喷吹,当某一罐出现故障需处理时,其立即退出喷吹,其余两罐仍可实现连续的更替喷吹,无需考虑退出罐的故障处理时间。由此可见,三罐并列式的比两罐式要短。倒罐操作时间为 20 分钟,在考虑 3 分钟的间隙,故设定倒罐周期为 23 分钟。

根据以上设计参数,取 $T=0.383$; $\varphi=0.85$; $q=83.3$; $\rho_{\text{粉}}=0.65$ t/m³; $k_r=0.90$

代入公式(1)

$$V = \frac{T \times q}{\varphi \times \rho_{\text{粉}} \times k} = \frac{0.383 \times 83.3}{0.85 \times 0.65 \times 0.9} = 64.16 \text{ m}^3$$

计算出喷吹罐的容积达 64.16 m³,这个容积的防爆型压力容器,比较容易制造、安装,且在实际生产中也有部分厂家在使用相当容积的喷吹罐,因此容易实现。为方便设计计算,可将喷吹罐容积圆整到 65 m³。

三罐并列式喷吹形式倒罐周期短,喷吹连续、稳定性能高,适合中、大型高炉喷煤。

2 倒罐操作时间

倒罐操作时间 $t_{\text{倒}}$,就是喷吹罐在完成一个喷吹过程后,经过泄压、装粉、充压以及阀门操作再次具备喷吹条件所需要的时间,因此倒罐操作时间的计算公式为:

$$t_{\text{倒}} = t_{\text{泄}} + t_{\text{装}} + t_{\text{充}} + t_{\text{阀}} \quad (2)$$

式中 $t_{\text{泄}}$ —— 泻压时间,分钟;

$t_{\text{装}}$ —— 装粉时间,分钟;

$t_{\text{充}}$ —— 喷吹罐充压至喷吹所需罐压时间,分钟;

$t_{\text{倒}}$ ——在整个倒罐操作过程中所操作阀门需要时间,分钟;一般取1~2

下面分别计算各个操作的时间。计算需要的部分参数如下:

喷吹罐容积 $V = 65\text{m}^3$; 充压气源压力 $P_s = 1.5\text{MPa}$; 喷吹罐压力 $P_{\text{罐}} = 1.1\text{MPa}$; 大气压力 $P_0 = 0.101\text{MPa}$; 充压管径 $d_{\text{充}} = 80\text{mm}$; 泄压管径 $d_{\text{泄}} = 65\text{mm}$ 。

2.1 泻压时间 $t_{\text{泄}}$

喷吹罐泄压就是将喷吹罐喷吹完毕后罐内的高压气体排空至常压的过程,可视作喷吹罐由罐压 $P_{\text{罐}}$ 放气至 P_0 的过程。根据气罐放气时间计算公式可计算出喷吹罐的泻压时间。

首先计算充放气时间常数 τ ,它表示以声速流量向容器 V 充气(或放气),使其从绝对真空充气至压力 P_s (或从压力 P_s 放气到绝对真空)所需要的时间。

$$\tau = 5.22 \times 10^3 \frac{V}{kS\sqrt{\frac{273}{T_s}}} \quad (3)$$

式中: V —— 气罐容积, m^3 ;

k —— 绝热指数, $k = 1.4$;

S —— 充气(放气)通道有效截面积;

T_s —— 充气(放气)气源绝对温度;

放气通道有效截面积

$$S_{\text{泄}} = \frac{\pi \times (d_{\text{泄}})^2}{4} = \frac{3.1415 \times 65^2 \times 10^{-6}}{4} = 3.318 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

由于喷吹罐喷吹后罐内剩余煤粉较少,因此取喷吹罐容积为气罐容积。喷吹罐喷吹后罐内温度约为 30°C 。

按式(3)计算泄压时间常数为:

$$\tau = 5.22 \times 10^3 \frac{V}{kS\sqrt{\frac{273}{T_s}}} = 5.22 \times 10^3 \times \frac{65}{1.4 \times 3.318 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{273}{273 + 30}}} = 69.33 \text{ s}$$

喷吹罐放气时间(从 $P_{\text{罐}} \rightarrow P_0$ 时)计算公式为:

$$t_{\text{泄}} = \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{\text{罐}}}{1.893P_0} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 1 \right] + 0.945 \left(\frac{P_0}{P_{\text{罐}}} \right) \right\} \times \tau \text{ s} \quad (4)$$

将数值带入公式(4),得出

$$t_{\text{泄}} = 238.99 \text{ s} \approx 4\text{min}$$

2.2 装粉时间 $t_{\text{装}}$

装粉时间就是将煤粉从煤粉仓装入喷吹罐所需要的时间。由于喷吹罐装料过程比较复杂,下料速度受到下料管径大小、煤粉仓下料方式、煤粉仓料位高度、煤粉水分、煤粉温度等诸多因数影响,因此很难准确计算具体的下料速度,目前设计中主要采取经验值,并通过实践进行验证。

煤粉仓出口下料形式主要有直接下料、点流化下料和流化床下料三种方式,见图1。

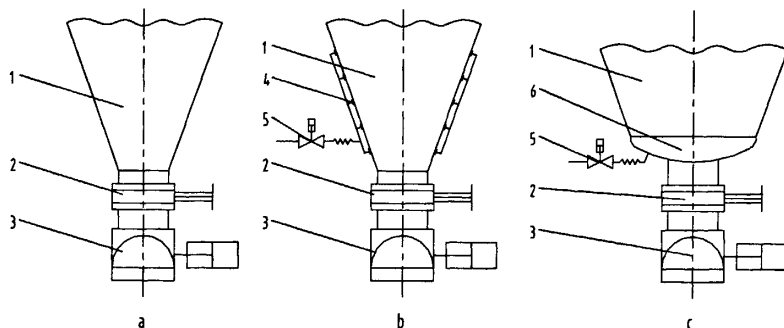


图1 煤粉仓出口下料形式

a—直接下料 b—点流化下料 c—流化床下料

1—煤粉仓;2—插板阀;3—上钟阀;4—点式流化器;5—仓流化阀;6—流化床

直接下料就是煤粉仓收口至下料管径,通过煤粉重力和料层压力下料,料流呈断断续续式,下料能很差,一般不采用。

点流化下料形式就是煤粉仓收口至下料管径,在出口上部设置多处流化点,使得煤粉仓底部区域煤粉在下料时形成一定流态化,再通过煤粉重力和料层压力快速下料,料流稳定,下料能很好,这种方式需要在煤粉仓下部设置上百个流化点,施工、维护复杂,若流化点数量少,煤粉仓底部区域不能形成流态化,料流呈脉冲式,那么下料速度也是很慢的。

流化床下料就是煤粉仓收口至流化床直径,流化床中心为下料口,煤粉在流化床上部被流态化,然后通过煤粉重力和料层压力下料,料流稳定,下料能很好,这种方式设备简单,便于使用。

三种不同下料流量经验值见表 1。

表 1 粉仓下料流量经验值 (t/min)

下料直径 下料方式	DN250	DN300	DN400
直接下料	1~2	1.5~4	2~5
点流化下料(多点)	2~4	3~8	5~10
流化床下料	2~5	4~8	6~11

本设计也采用流化床下料的方式。由于煤粉仓装粉量比较大,根据煤粉仓下料流量经验值(表 1),就可以初步确定流化床下料口径为 DN300,按表可取 5t/min 作为煤粉下料流量。

装粉时间 $t_{装}$ 为

$$t_{装} = T \times q / v_{流} = 0.383 \times 83.3 / 5 = 6.38 \text{ min}$$

式中 $v_{流}$ —— 为下料流量, t/min。

2.3 充压时间 $t_{充}$

喷吹罐充压就是在喷吹罐装满煤粉后,将罐压从常压罐充压至喷吹罐工作压力 $P_{罐}$ 的过程,可视为喷吹罐由罐 P_0 充气至压 $P_{罐}$ 的过程。根据气罐充气时间计算公式可计算出喷吹罐的充压时间。

由于喷吹罐充压是在装粉后,因此考虑煤粉所在体积的存在,将喷吹罐去煤粉体积计算出来作为充压气罐的容积。

喷吹罐装粉后的煤粉量为 $q_{罐}$

$$q_{罐} = T \times q / k_r = 0.383 \times 83.3 / 0.9 = 35.44 \text{ t}$$

充气气罐容积 $V_{充}$:

$$V_{充} = v - \frac{q_{罐}}{\rho_{煤}} \quad (5)$$

式中: $\rho_{煤}$ —— 煤粉真密度 t/m³,一般取 1.3~1.4;

取 $\rho_{煤} = 1.35 \text{ t/m}^3$, 带入公式(5):

$$V_{充} = 38.75 \text{ m}^3$$

充压气源为中压氮气,因此取充气气源温度为一般环境温度,即取 20℃。

按式(3)计算充压时间常数为:

$$\tau = 5.22 \times 10^3 \frac{V_{充}}{kS} \sqrt{\frac{273}{T_i}} = 5.22 \times 10^3 \times \frac{38.75 \times 4}{1.4 \times 3.14 \times 80^2 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{273}{273+20}} = 27.282s$$

在充气过程中,气罐的压力逐渐上升,但只要气罐的压力 $P \leq 0.528 P_s$,则充气气流流速为声速,气体流量也保持常数,其充气压力随时间呈线性变化;当气罐内的压力大于临界压力后,则充气压力随时间呈非线性变化。因此,充气时间分段考虑。

由于喷吹罐充压压力 $P_{罐} = 1.1 \text{ MPa}$,大于 $0.528 P_s$,故计算充气时间 $t_{充} = t_{充1} + t_{充2}$ 。其中 $t_{充1}$ 是从初始 P_0 充到 $0.528 P_s$ 的时间, $t_{充2}$ 是从 $0.528 P_s$ 充到 $P_{罐}$ 的时间。即:

$$t_{充1} = (0.528 - \frac{P_0}{0.528 \times P_s}) \times \tau \quad (6)$$

$$t_{充2} = (1 - 0.528) \times \tau \times \left(\arcsin \frac{p_0/p_i - 0.528}{1 - 0.528} \right) \quad (7)$$

将数值带入公式(6)、(7),计算出喷吹罐充压时间:

$$t_{充1} = (0.528 - \frac{0.101}{0.528 \times 1.5}) \times 27.282 = 12.68 \text{ s}$$

$$t_{充2} = (1 - 0.528) \times 27.282 \times \left(\arcsin \frac{0.101/1.5 - 0.528}{1 - 0.528} \right) = 361.29 \text{ s}$$

$$t_{充} = t_{充1} + t_{充2} = 12.68 + 361.29 = 373.97 \text{ s} = 6.232 \text{ min}$$

2.4 阀门操作时间 $t_{阀}$

阀门操作时间主要是在倒罐操作过程中所需要操作上钟阀、下钟阀、充压阀、泄压阀、喷煤阀等阀门的时间,根据现场经验,一个倒罐操作过程阀门的操作时间约 1~2 分钟,本设计取 $t_{阀} = 2$ 分钟。

将上述结果代入公式(2),

$$t_{倒} = 4 + 6.38 + 6.232 + 2 = 18.612 \text{ min}$$

$t_{倒} \leq 20$ 分钟,满足前面喷吹罐容积计算时预设的倒罐操作时间。

在这就喷吹罐泄压、充压管径的选择作一点补充说明。通过上述计算可见,喷吹罐采用的是 DN65 泄压管道,泄压时间为 4 分钟。设计为什么要取 DN65,而不选择更大的泄压管道直径,得到更短的泄压时间,这里主要考虑仓顶布袋除尘器的处理能力,DN65 的管径也是通过试算得出的。喷吹罐泄压气体主要通过煤粉仓上部的仓顶布袋向外排气,一般设置的仓顶布袋处理风量在 $10000 \text{ Nm}^3/\text{h}$,而喷吹罐泄压气体总流量在 600 Nm^3 左右,要求在 4 分钟内完成泄压,那么泄压的平均流量在 $9000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 左右,因此如果选择更大的泄压管径,意味着必须加大仓顶布袋除尘器的设备能力,从经济等综合角度考虑不可取,所以选择合适的泄压管径也是十分重要的。对于充压管径的选择同样是采用了试算的方法确定的,充压管径选择主要考虑到充压时间不能太长,以免延长倒罐时间,同时也要考虑充压对气网的冲击。由上述计算可以看出,总充压气量在 400 Nm^3 左右,6.232 分钟持续时间,平均流量也达到 $64 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 。如果选择更大的充压管径,会导致充压瞬时流量过大,使得整个气网压力在充压期间出现下降,这将导致在喷吹罐的喷吹流量出现波动,不利于稳定喷吹。选择充压管径需综合考虑气网的补气能力,不能一味的增大管径和缩短充压时间。

3 结束语

在喷煤量达到 40 t/h 以上的大型中、大型高炉喷煤喷吹装置设计时,建议采用三罐并列喷吹形式,这样有利于稳定喷吹。对于倒罐周期的设计,要综合考虑仓顶布袋除尘器和氮气管网的能力,不能一味的缩短倒罐周期。

参考文献

- [1] 姜继海 宋锦春 高常识. 液压与气压传动. 北京:高等教育出版社 2002
- [2] 汤清华,马树涵等编著. 高炉喷吹煤粉知识问答. 北京:冶金工业出版社 1997
- [3] 黄标. 气力输送. 上海科技技术出版社. 1984. 11