

惰化设计方法及其在煤粉干燥工艺中的应用

钟圣俊¹, S. Radandt², 李刚¹, 史建业²

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 应用系统安全与劳动医学研究中心, 德国曼海姆 68165)

摘要: 介绍了可燃粉尘极限氧含量的测试方法和测试设备, 并给出了几种常见可燃粉尘的极限氧含量. 根据气体均匀混合假设, 导出了采用加压或抽真空惰化情况下惰化次数的计算方法和采用通流惰化情况下惰化时间的计算公式. 提出了估算惰化流量的经验公式. 给出了一个煤粉干燥工艺惰化设计的实例. 正常运行时, 惰化气体流量可通过循环风量和漏风率估算. 在短时间停产时, 应采用较小的惰化流量(每小时1~2个设备容积)维持惰化气氛.

关键词: 惰化; 粉尘爆炸; 爆炸防护; 极限氧含量; 煤粉; 干燥

中图分类号: X 932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3026(2007)01-0118-04

Inerting Design and Its Application in Pulverized Coal Drying Process

ZHONG Sheng-jun¹, Siegfried RADANDT², LI Gang¹, SHI Jian-ye²

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Research Center for Applied System Safety and Industrial Medicine, Mannheim 68165, Germany. Correspondent: ZHONG Sheng-jun, E-mail: zhongsj @ smm. neu. edu. cn)

Abstract: Reasonable inerting design can guarantee the safety of a process to treat combustible materials and save running cost. The measurement and test apparatus of limiting oxygen concentration (LOC) of combustible dusts were introduced with the LOC of some conventional combustible dusts given. Assuming that the gas is mixed homogeneously, the calculation methods of inerting times using pressure-swing inerting and vacuum-swing inerting, and the inerting time using flow-through inerting were deduced. An empirical formula was given for determining the minimum inert gas flow rate. An example of inerting design was given for a pulverized coal drying process, where the inert gas flow rate can be estimated by recycled air flow rate and air leaking rate. When shut down for a short time, a lower inert gas flow rate (1 or 2 equipment volumes per hour) can be used to maintain inert atmosphere.

Key words: inerting; dust explosion; explosion prevention; limiting oxygen concentration; pulverized coal; drying

惰化是通过向被保护的设备中引入惰性气体防止发生爆炸的方法. 惰化常用于煤粉、金属粉尘和塑料类粉尘等粉体的处理过程^[1-2]. 惰化方法早就用于煤粉制备系统的爆炸防护^[3], 并广泛应用于我国电力、水泥和钢铁行业的煤粉制备系统. 靖长财介绍了水蒸气惰化防止锅炉制粉系统煤粉爆炸的技术^[4], 梁树杰等介绍了用于电厂筒仓惰化的分布式应用系统^[5]. Eckhoff 阐述了部分惰化的原理^[6]. 但现有文献对惰化设计方法涉

及较少. 我国尚无情化设计标准, 欧盟标准化委员会起草了《惰化防爆导则》(草案)^[7], 但是对于通流惰化的最小惰化流量没有给出具体的计算方法.

1 惰化防爆基本原理

惰化介质有二氧化碳、氮气、热风炉尾气、水蒸气和惰性气体如氩气等. 水蒸气通常会影晌粉体制备工艺, 主要用于在紧急情况下灭火. 热风炉

收稿日期: 2006-01-16

基金项目: 教育部留学回国人员基金资助项目(L2004014508).

作者简介: 钟圣俊(1970-), 男, 湖北松滋人, 东北大学副教授; S. Radandt(1935-), 男, 德国斯图加特人, 东北大学兼职教授.

尾气主要用于需要大量惰化气体且对粉体的洁净程度要求不高的情况,如电厂、水泥厂和炼铁厂的煤粉制备系统。对于制药、化工行业的粉尘防爆,二氧化碳、氮气是常用的惰化介质。有些金属粉尘在氮气中也能燃烧,如镁粉必须用氩气或氦气进行保护。

当氧体积分数低于某一极限值时,无论粉尘浓度为多大,粉尘云均不能发生爆炸,该值称为该种粉尘的极限氧含量。在实际应用中,往往对极限氧含量取一定的安全系数,得到最大允许氧含量。极限氧含量的测试标准为欧盟标准 EN14034-4^[8],在 1 m³ 标准爆炸测试装置中测试,在实验室一般采用 20 L 球形爆炸装置(图 1)。

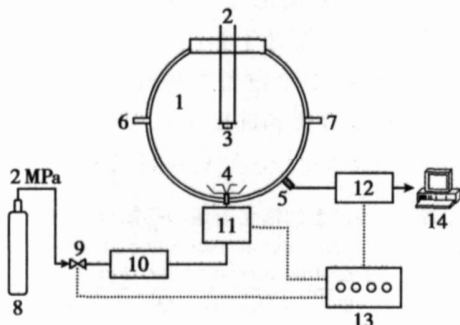


图 1 用于测试极限氧含量的 20 L 球形爆炸测试装置

Fig. 1 The 20 L spherical explosion test apparatus for oxygen concentration limit measurement

- 1—球形容器;2—点火电极;3—化学点火头;
- 4—分散喷嘴;5—压力传感器;6—气体进口;
- 7—抽真空口;8—压缩气源;9—电磁阀;
- 10—储粉储气室;11—两相阀;12—数据采集卡;
- 13—控制器;14—计算机。

不同粉体采用氮气和二氧化碳作为惰化介质时的极限氧含量见 NFPA 69(表 1)^[9]。

表 1 常见可燃粉尘的极限氧含量
Table 1 Oxygen concentration limits of conventional dusts

粉尘名称	中位径 μm	极限氧含量 LOC/ %	
		氮气	二氧化碳
玉米淀粉 1			11
玉米淀粉 2	17	9	
大豆粉			15
麦芽粉尘	25	11	
小麦粉	60	11	
烟煤 1			17
烟煤 2	17	14	
铝			2
树脂	< 63	10	
尼龙			15
聚乙烯 1			12
聚乙烯 2	26	10	
纸			13
木粉 1			16
木粉 2	27	10	

控制气氛含量在极限氧含量以下的惰化称为绝对惰化。通过往气氛中加入惰性气体,但氧含量仍在极限氧含量之上的方法称为部分惰化。氧含量降低会使粉尘的最大爆炸压力 P_{max} 和最大爆炸压力上升速率(用爆炸指数 K_{max} 表示)下降,也就是减少了爆炸的猛烈程度,从而在进行抗爆容器设计、爆炸泄压设计或爆炸抑制设计中降低对爆炸防护系统的要求。氧含量降低同时会增大粉尘云的着火温度、点燃能量和爆炸下限,使粉尘云发生点燃的能力降低。氧含量对粉尘爆炸性的影响见文献[6]。

2 惰化设计方法

2.1 初始惰化的设计方法

初始惰化可以采用 3 种方式:反复加压惰化、反复抽真空惰化和常压通流惰化。

(1) 反复加压惰化

加压惰化不适用于系统不完全密闭或系统装有开启压力较低的泄压装置的情况。

如果加压的压力较高,且泄压速度很快,则应将其考虑为绝热过程, C_n 的计算方法如式(1):

$$C_n = C_i + (C_0 - C_i) \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\omega} \quad (1)$$

式中, ω 为等压比热和等容比热的比值。

对于低速加压泄放的等温惰化过程,公式(1)中的 ω 等于 1。对于高压、高速加压泄放的绝热过程惰化, ω 的取值为氮气 1.404,二氧化碳 1.304,水蒸气 1.324,氩气 1.66。

为达到给定氧含量所需要的加压惰化次数为

$$n = \frac{\lg \left(\frac{C_n - C_i}{C_0 - C_i} \right)}{\lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right)} \quad (2)$$

(2) 反复抽真空惰化

抽真空惰化特别适用于有多分支的复杂的系统、一端封闭的长管和其他易于存在死角的系统。该方法要求系统在负压下基本无泄漏,如存在一定量的泄漏,则要根据具体情况考虑一定的安全系数。同时,对于安装泄压装置的系统,泄压装置应能承受负压(如使用反拱泄爆片或安装负压托架)式(1),(2)也适用于抽真空惰化的计算。

(3) 常压通流惰化

加压惰化和真空惰化不能达到良好的混合效果或者当容器不能承受真空和正压时,只能采用常压通流惰化。该方法要求惰化气体和空气的分子量接近。

假定气体充入后迅速混合,系统内氧浓度处处相等,常压通流惰化的时间为

$$t = F \frac{V}{Q} \ln \left(\frac{C_i - C_f}{C_i - C_0} \right) \quad (3)$$

式中, F 为均匀混合难度系数; V 为容器容积, m^3 ; Q 为气体流量, m^3/h ; C_f 为惰化后的氧含量, %.

确定均匀混合难度系数 F 是计算的关键. 对于无分支的管道,一端为惰化气体入口一端为出口的情况,可以假定流动为活塞流,取 $F=1$; 对于没有分支的容器,如果惰化气体入口和出口在容器两端相距最远的位置,取 $F=2$; 如果惰化入口和出口相距比较近,可取 F 的值在 3~5 之间.

对于小的容器和没有分支的管道,如果惰化流量为每小时一个系统容积,常压通流惰化一般能满足要求.

2.2 惰化流量的确定

要维持系统惰化气氛,所有损失的惰化气体必须得到补充,并维持系统处于微正压.

惰化气体的流量应满足以下要求:

惰化气体至少为物料净流出体积.

当温度和大气压力发生变化时,设备内的压力可能小于大气压力,这时必须用惰化气体补充.

如果粉料在工艺过程产生可燃气体,应采用充入惰化气体的方法控制气体的浓度在可燃气体的爆炸极限以下.

当系统向外漏气或与大气有排气管道相通时,惰化流量应足以补充漏气或排气的体积.

运行时惰化气体最小流量与系统的风量和换气率有关,按式(4)确定惰化气体最小流量:

$$Q_{N_2} = k Q_r \quad (4)$$

式中, Q_{N_2} 为氮气流量, m^3/h ; k 为安全系数; Q_r 为系统漏气率(或换气率); Q_r 为循环风量, m^3/h .

3 应用实例

某煤粉制备系统(图 2)生产用于热法冶炼铝的煤粉,该工艺使用旋转干燥机进行干燥.

3.1 氧浓度控制阈值的确定

选用氮气作为惰化介质. 爆炸测试采用 2 kJ 的点火头, 判别爆炸的标准是压力超过 0.15 MPa. 经 20 L 球形爆炸容器实验测试, 常温常压下本工艺所使用的神府烟煤粉的极限氧含量为 11%.

极限氧含量是在室温下测试的, 而干燥机中

的最高温度为 135℃, 因此应该考虑温度对极限氧含量的影响. 研究表明, 极限氧含量 LOC 和温度的关系为^[10]

$$\text{LOC}_T = \text{LOC}_{T_0} - 0.013(T - T_0) \quad (5)$$

式中, T 为实际的气氛温度, ℃; T_0 为参考温度 20℃.

根据式(5)计算 135℃ 下的极限氧含量为 9.5%. 考虑安全裕量, 设定最大允许氧体积分数 8% 为报警上上限, 取 5% 为报警上限.

3.2 惰化设计

惰化气体的充入位置尽量选取负压位置, 氧含量取样点的位置尽量选取正压位置(图 2).

(1) 非运行时惰化流量 Q_1

短期停产, 系统处于非运性状态时, 对密闭设备用每小时置换 1 个设备容积确定氮气用量, 对柱磨机、煤粉提升机和选粉机取 2 个设备容积(见表 2).

表 2 各设备的惰化流量和初始惰化时间

Table 2 Volumes and air flow rates in sub-systems for coal pulverization and drying

设备	V m^3	Q_r $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Q_1 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Q_2 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	t h
柱磨机	3	0	6	6	0.45
煤粉提升机	6	0	12	12	0.45
选粉机	15	10 000	30	50	0.27
干燥机、除尘器 和管道	80	4 300	80	430	0.17
冷却机	17	0	20	20	0.77
料仓	50	60	50	60	0.76

(2) 运行时惰化流量 Q_2

选粉机的空气流量大, 系统的密闭性不好(漏风率为 10% 以上), 运行时只进行部分惰化, 流量设计为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

为了置换系统中可能产生的可燃挥发分, 对干燥子系统和料仓的换气率取 5%, 取 $k=2$, 按式(4)计算出干燥子系统所需的氮气流量为 $430 \text{ m}^3/\text{h}$, 料仓所需的氮气流量为 $6 \text{ m}^3/\text{h}$. 由于氮气是气力输送的介质, 料仓运行时的氮气流量设计为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (见表 2).

(3) 形成惰化环境

在系统停止运行很长时间时, 系统中的煤粉被清空, 系统无需进行惰化. 在系统重新启用时, 需要将系统中的大气环境置换为惰性环境. 取均匀混合难度系数 $F=5$, 根据式(3)计算形成惰性环境需要的时间(见表 2).

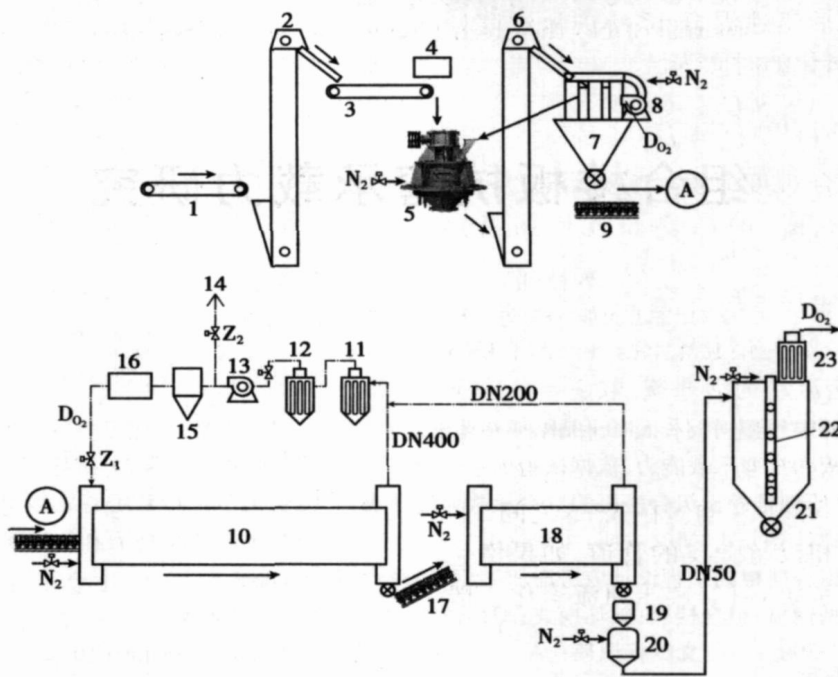


图 2 煤粉粉碎、干燥系统工艺流程图

Fig. 2 Flowchart of a coal pulverization and drying system

- 1—原煤输送带;2—原煤提升机;3—水平输送带;4—电磁除铁器;5—柱磨机;6—煤粉提升机;7—选粉机;
 8—选粉机循环风机;9—螺旋输送机;10—旋围干燥机;11—一级除尘器;12—二级除尘器;13—主循环风机;
 14—排气管道;15—冷凝器;16—加热器;17—螺旋输送机;18—旋转冷却机;19—缓冲器;20—发送罐;21—煤粉仓;
 22—氮气引入管;23—仓顶除尘器;D_{O2}—氧浓度探测器。

4 结 论

(1) 惰化是防止形成可爆粉尘云的重要措施。完全惰化可以防止爆炸发生,部分惰化虽不能完全防止爆炸的发生,但可增加粉尘的小点火能量(从而减小了点燃频率),并降低爆炸的猛烈程度。

(2) 进行可燃粉尘的惰化设计应了解粉体生产工艺和粉体的极限氧含量。根据工艺流程选择惰化气体的引入位置和氧含量探测器的安装位置。

(3) 正常运行时,惰化气体流量可通过循环风量和漏风率估算。在短时间停产时,应采用较小的惰化流量(每小时 1 ~ 2 个设备容积)维持惰化气氛。

参考文献:

[1] Eckhoff R K. Current status and expected future trends in dust explosion research[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005,18:225 - 237.
 [2] Eckhoff R K. Dust explosion prevention in process industries [M]. 4th ed. Boston: Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2005.
 [3] Zalosh R G. Review of coal pulverizer fire and explosion incidents[J]. *ASTM STP*, 1986(958):191 - 201.
 [4] 靖长财. 采用惰化介质防止锅炉制粉系统煤粉爆炸 [J].

电站辅机, 2004,90(3):15 - 16.

(Jing Chang-cai. Explosion protection technology in boiler pulverizing system with inert gas [J]. *Power Station Auxiliary Equipment*, 2004,90(3):15 - 16.)

[5] 梁树杰,李郁峰,李元宗. 电厂筒仓安全防爆控制系统的研制[J]. *太原理工大学学报*, 2005,36(2):197 - 199,206.
 (Liang Shurjie, Li Yur-feng, Li Yuan-zong. The design of the safety and explosion control system of the power plant silo [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2005, 36(2):197 - 199,206.)
 [6] Eckhoff R K. Partial inerting—an additional degree of freedom in dust explosion protection[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004,17:187 - 193.
 [7] CEN/ TC 305/ WG 3 N 0085-2004. Guidance on inerting for the prevention of explosions (3rd draft) [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
 [8] EN 14034-4-2004. Determination of explosion characteristics of dust clouds [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
 [9] NFPA 69-2002. Standard on explosion prevention systems [S]. Quincy, USA: National Fire Prevention Associations, 2002.
 [10] Siwek R. Latest development in explosion protection technology[C] Deng Xurfan, Wolanski P. Proceedings of the 6th International Colloquium on Dust Explosions. Shenyang: Northeastern University Press, 1994:35 - 60.