

小型常压煤粉仓惰性气体保护系统设计及应用

徐尧^{1,2}, 王乃继^{1,2}, 肖翠微^{1,2}

(1. 煤炭科学研究院 节能工程技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室, 北京 100013)

摘要: 为解决煤粉仓 CO 浓度或温度增高导致的自然问题, 根据煤粉工业锅炉系统燃料安全储存需求, 参照相关国家标准和国外设计手册, 提出了小型常压煤粉仓惰性气体保护系统设计计算方法和系统控制方案。针对 2 台容积 40 m³ 的煤粉仓设计了小型常压煤粉仓惰性气体保护系统, 当检测到煤粉仓内 CO 体积分数达 1200×10^{-6} 或任意一处温度高于 70 ℃ 时, 系统可通过自动启动、手动启动、机械应急启动 3 种方式对煤粉仓保护, 结合工程实例对该系统予以验证。结果表明: 采用低压 CO₂ 惰化系统对煤粉仓实施保护, 当保护气体 CO₂ 的储存量为 355 kg, 可明显降低煤粉自燃的风险。

关键词: 煤粉仓; 煤粉自燃; 惰化保护; 低压 CO₂; 灭火系统

中图分类号: TD751 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)08-0115-03

Design and Application of Inert Gas Protection System to Small-Scale Atmospheric Pressure Pulverized Coal Bunker

XU Yao^{1,2}, WANG Nai-ji^{1,2}, XIAO Cui-wei^{1,2}

(1. Energy Conservation Engineering and Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. National Key Lab of Coal Resources Mining and Environment Protection, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the fuel safety storage requirements of the pulverized coal-fired industrial boiler, in order to solve the coal spontaneous combustion problems caused by CO content and the temperature increased in the coal bunker, with the related national standards and overseas design handbook, the design calculation method and system control plan of the inert gas protection system was provided for the small-scale atmospheric pressure pulverized coal bunker. According to the two coal bunkers with volume of 40 m³, an inert gas protection system of the small-scale atmospheric pressure pulverized coal bunker was designed. When the CO content in the pulverized coal bunker reached at 1200×10^{-6} or the temperature at the any location of the bunker was over 70 ℃, the inert gas protection system would have a protection to the coal bunker with the automatic start, manual start or mechanical emergency start. The project cases were applied to verify the inert gas protection system. The result showed that when the storage value of the protective gas CO₂ would be 355 kg, the low pressure CO₂ inerting system applied to the protection of the pulverized coal bunker could remarkably reduce the risks of the pulverized coal spontaneous combustion.

Key words: pulverized coal bunker; spontaneous combustion of pulverized coal; inerting protection; low pressure carbon dioxide; fire extinguishing system

高效工业煤粉锅炉系统是传统燃煤工业锅炉的替代产品, 可以有效解决中国燃煤工业锅炉现存的低效高污染等问题, 其作为国家发改委“十一五”十大节能工程的第一项, 在节能减排力度不断加大的背景下得到迅速推广。目前在全国已经完成 50 余套、245 MW 的建设规模, 取得了明显的环保成

效^[1]。煤粉仓作为煤粉工业锅炉系统的燃料贮存设备, 所储存的煤粉具有粒度细、挥发分高的特点, 在空气中易氧化, 系统运行时煤粉在仓内下滑过程中的相互摩擦碰撞以及在煤粉仓中长时间储存均会导致热量无法及时散发, 易产生自燃。此时的煤粉颗粒极不稳定, 任何环境变化都可能引起爆

收稿日期: 2012-04-19; 责任编辑: 代艳玲

基金项目: 国际科技合作计划资助项目(2011DFA60390)

作者简介: 徐尧(1986—), 男, 山东济南人, 助理工程师。Tel: 010-84264927, E-mail: xyyyzero@gmail.com

网络出版时间: 2012-08-13 05:17:57; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120813.1717.201208.115_031.html

引用格式: 徐尧, 王乃继, 肖翠微. 小型常压煤粉仓惰性气体保护系统设计及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(8): 115-117, 63.

炸，引发安全事故。因此必须采取有效措施保障煤粉仓的安全。

1 煤粉仓保护现行标准及现状

自2007年4月1日实施的GB 50229—2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》中规定原煤仓应采用惰性气体保护。该国标实施后国内普遍采用低压CO₂系统为保护装置，即把CO₂灭火剂以液态形式贮存在温度-18~-20℃、压力1.9~2.1 MPa的贮罐中。当煤粉仓中需惰化保护时，启动惰化系统并释放出CO₂。CO₂沿管道通过煤粉仓顶部的喷嘴喷射到煤粉仓内部，在煤粉内部和煤粉仓上方的空间内形成充满CO₂气体的惰性环境。该环境可有效阻断原煤粉与氧气的接触，防止自燃的发生和继续，因此可有效保护煤粉仓的安全运行。该国标中虽然要求原煤仓、粉煤仓设置惰性气体灭火系统，但未提及系统设计思路和要求。目前国内大型煤仓的设计均参考美国消防协会标准NFPA850—2005《Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations》(以下简称NFPA850)。

2 低压CO₂惰化保护系统设计

2.1 系统原理

低压CO₂惰化保护系统设置的目的是在煤粉仓中产生一个惰性空间，通过维持一定浓度的CO₂降低煤粉仓内氧气的浓度，抑制煤粉氧化，减缓煤粉升温，从而防止煤粉过热产生自燃。

2.2 CO₂储存量计算

根据GB 50193—1993《二氧化碳灭火系统设计规范》：

$$M = K_b(0.2A + 0.7V)(1 + K_0) \quad (1)$$

$$A = A_v + 30A_0$$

$$V = V_v - V_r$$

式中：M为CO₂设计用量，kg；K_b为物质系数，煤粉取2.25；A为折算面积，m²；A_v为防护区内侧面、顶面、底面的总内表面积，m²；A₀为开口区总面积，m²；V为防护区净容积，m³；V_v为防护区总容积，m³；V_r为防护区内不可燃物体积，m³；K₀为温度补偿系数。

根据式(1)得出的CO₂储存量只能保证短时

间喷发的用量，还不足以满足惰化的要求，对于惰化系统，GB 50193—1993中并没有给出相应的计算公式。根据NFPA850建议在一个煤筒仓内，使用量约等于煤筒仓总容量3倍的CO₂气体，则CO₂设计用量可按式(2)计算：

$$M = (1 + K)V/S \quad (2)$$

其中：K为损失系数，取2；S为常温常压下CO₂的比容，取0.5 m³/kg。由于管路长度很短，喷放后管道中残留的CO₂很少，因此可忽略不计，储存装置的储存量大于惰化系统设计用量即可。

2.3 喷放时间

在煤粉仓内长时间存储条件下，煤粉颗粒极不稳定^[2]，在临界状态下任何激烈的环境改变都可能引起爆炸，因此不能使用市场上常见的灭火系统进行快速大流量的覆盖，应该保证CO₂低速、长时的释放。实际工程中，喷放时间一般取7~9 h^[3]。

2.4 管道内径选取

输送CO₂管网的管道内径D应根据管道设计流量Q计算：

$$D = K_d \sqrt{Q} \quad (3)$$

式中：K_d为管径系数，取1.14~3.78。

2.5 探测方式

GB 50229—2006中规定原煤仓、粉煤仓的火灾探测器类型为缆式线型感温，NFPA850中提到对原煤仓、粉煤仓应装设CO监测装置用以探测自身发热和危险情况，也可利用感温探测器探测自燃期间温度的升高情况^[4~6]。一般情况下，过热燃烧现象可观察到，但这种危险在发生之前就应能探测发现，所以应同时在煤粉仓中设置CO监测装置和感温探测器。当CO浓度或仓内温度超过设定值时，表明保护区已发生氧化作用，探测系统将报警信号输送至控制系统，自动启动惰化保护系统，或在收到报警信号后手动启动惰化保护系统。

2.6 惰化保护系统主要部件设置

1) 储存装置。用来储存CO₂灭火剂，通过制冷机的制冷和隔热层的保温，使CO₂长期处于低温低压状态，储存装置应配备液位报警功能。

2) 总控阀。用于封存储存容器中的CO₂灭火剂，并控制CO₂释放的可自动启闭的电磁阀，平时处于关闭状态，当发生火灾时控制系统按程序指

令, 打开总控阀喷放 CO₂灭火剂, 喷放完毕根据程序指令自动关闭。总控阀下端装有机械应急手动装置, 当自动、手动控制方式均失效时, 可向上旋开机械应急手动装置, 打开总控阀实施灭火。

3) 汽化器。低压 CO₂系统的灭火剂以液体形式储存, 喷放过程中容易结干冰, 在流量小时容易造成管路堵塞, 因此系统中必须采用汽化器。

4) 惰化控制器。用来控制汽化器加热部件的工作状态及喷放量的大小。

5) 节流装置。节流装置用于保证惰化保护系统小流量、长时间的喷放, 以完成对 CO₂流量的控制。由流量监测部件、流量调节部件和惰化控制器共同实现这一功能^[7]。

6) 探测装置。采用热电偶及 CO 检测装置, 对煤粉自燃状况进行检测。

7) 喷头。安装在仓顶位置, 并设置单向阀防止煤粉进入管路。

3 工程应用

3.1 惰化保护系统参数计算

桂林国际电线电缆集团有限责任公司 2009 年建设了 2 台 2.8 MW 煤粉锅炉系统, 该项目包括 2 台容积 40 m³ 的煤粉仓, 直径 3.8 m。根据 NFPA850 中建议, 组合分配系统各保护区或保护对象同时着火的概率很小, 不需考虑同时向各个保护区或保护对象释放 CO₂灭火剂。但应考虑满足任何 CO₂用量的保护区或保护对象灭火需要, 组合分配系统的 CO₂储存量, 不应小于所需储存量最大的一个保护区或保护对象的储存量。所以 CO₂储存量按 1 台 40 m³ 煤仓保护选取。参照式(1) 和式(2), 得出设计参数如下: 保护区体积 40 m³, 灭火和惰化保护所需 CO₂储量分别为 104.1 和 240 kg, 实际 CO₂储量 355 kg。根据计算结果, 选用 1 台 355 kg 储罐作为惰化保护系统的储存装置。

3.2 管网设计

为使喷入的 CO₂快速均匀地形成惰化环境, 系统采用了 2 只喷嘴对称布置保护一个煤粉仓^[8], 系统管道管径参照式(3) 和试验结果, 选用 DN15 的 T2 紫铜管。

3.3 测点分布

低压 CO₂惰化保护系统采用温度检测和 CO 检测 2 种方式, 在仓顶封头设置了 1 处 CO 测点, 侧

面筒体设置了上、中、下 3 处热电偶。当检测到 CO 体积分数达到 1200×10^{-6} 或任意一处温度高于 70 ℃ 时^[9], 则判定煤粉仓内有自燃的危险。

3.4 控制系统

低压 CO₂惰化保护系统采取与测点信号连锁的自动启动方式, 并可以进行手动启动和机械应急启动, 控制原理如图 1 所示。

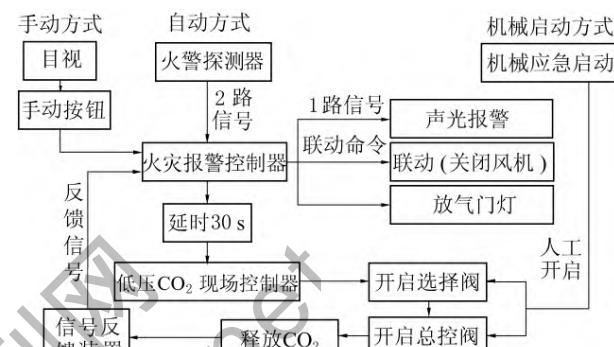


图 1 低压 CO₂惰化保护系统控制原理

自动启动是系统中的测点检测到 CO、温度达到设置的值后, 控制系统发送启动信号, 自动打开相应阀门释放 CO₂进行保护, 储罐中 CO₂储量达到系统设定值或者储罐低液位后自动关闭。手动启动是指当火灾报警控制系统发出报警或人员发现当前工况可能会导致自燃后, 操作人员通过计算机或控制柜上的按钮使系统启动。机械应急启动是在紧急情况下或前 2 种方法不能启动系统时使用, 由操作人员打开应急机械启动装置开启保护。

3.5 应用效果

桂林国际电线电缆集团有限责任公司 2 台 2.8 MW 煤粉锅炉系统中首次采用了低压 CO₂惰性保护系统, 在实际使用中成功排除了一次自燃险情。运行 3 年来, 煤粉锅炉系统在广西高温高湿的环境下从未发生过自燃事故, 切实保障了企业的安全、正常生产。40 m³ 煤粉仓惰化保护系统在工程上的应用, 基本消除了由于可燃气体浓度过高或煤粉氧化升温引起的自燃、爆炸现象, 控制系统有效完成了对煤粉仓的实时监控, 保证了系统安全稳定运行。

4 结语

小型常压煤粉仓惰性气体保护系统, 通过探测煤粉内部温度或 CO 浓度感知煤粉早期阴燃火灾, 保证系统在设定温度或 CO 浓度之内能够自动启动

(下转第 63 页)

特点，并逐一剖析了风速、孔隙率、高度和角度对煤堆自燃的影响，以期对煤堆自燃的防治具有一定的指导意义。

参考文献：

- [1] Salinger A G , Aris R , Derby J J. Modelling of Spontaneous Ignition of Coal Stockpiles [J]. AIChE Journal , 1994 , 40 (6) : 991 - 1004.
- [2] 徐精彩. 煤自燃危险区域判定理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社 , 2001: 6.
- [3] Hull Ashley , Lanthier Jennifer L , Agarwal Pradeep K. The Role of the Diffusion of Oxygen in the Ignition of a Coal Stockpile in Confined Storage [J]. Fuel , 1997 , 76 (10) : 975 - 983.
- [4] Hull Ashley S , Lanthier Jennifer L , Chen Zumao , et al. The Role of the Diffusion of Oxygen and Radiation on the Spontaneous Combustibility of a Coal Pile in Confined Storage [J]. Combustion and Flame , 1997 , 110 (4) : 479 - 493.
- [5] Nordon P. A Model for Self - heating Reaction of Coal and Char [J]. Fuel , 1979 , 58 (6) : 456 - 464.
- [6] Yong B C , Willians D F , Bryson A W. Two Dimensional Natural Convection and Conduction in a Packed Bed Containing a Hot Spot and Its Relevance to Transport of Air in a Coal Dump [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 1986 , 29 (2) : 331.
- [7] Krishnaswamy Srinivasan , Agarwal Pradeep K , Gunn Robert D. Low - temperature Oxidation of Coal 3. Modelling Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles [J]. Fuel , 1996 , 75 (3) : 353 - 362.
- [8] Chen X D. On the Mathematical Modeling of the Transient Process of Spontaneous Heating in a Moist Coal Stockpile [J]. Combustion and Flame , 1992 , 90 (2) : 114 - 120.
- [9] Carras John N , Young Brian C. Self - heating of Coal and Related Materials: Models , Application and Test Methods [J]. Progress in Energy and Combustion Science , 1994 , 20(1) : 1 - 15.
- [10] Akgun F , Essenhain R H. Self - ignition Characteristics of Coal Stockpiles: Theoretical Prediction from a Two - dimension-
- [11] Moghtaderi B , Dlugogorski B Z , Kennedy E M. Effects of Wind Flow on Self - Heating Characteristics of Coal Stockpiles [J]. Process Safety and Environmental Protection , 2000 , 78 (6) : 445 - 453.
- [12] 刘向军 , 张 健 , 邵 敏. 煤堆自燃过程的数值模拟 [J]. 矿冶 , 2008 , 17 (1) : 30 - 33.
- [13] 孟献梁 , 褚睿智 , 吴国光 , 等. 基于煤粉覆盖技术对预防煤堆自燃的数值模拟 [J]. 煤炭技术 , 2010 , 29 (9) : 87 - 89.
- [14] 谢之康 , 张瑞新 , 蒋曙光 , 等. 露天煤矿煤炭自燃进程的数学模型 [J]. 中国矿业大学学报 , 1996 , 25 (3) : 7 - 10.
- [15] 李树刚 , 徐精彩. 地面储煤堆自燃规律及测试方法 [J]. 西安矿业学院学报 , 1994 , 14 (4) : 299 - 303.
- [16] 张瑞新 , 谢和平. 煤堆自然发火的试验研究 [J]. 煤炭学报 , 2001 , 26 (2) : 168 - 171.
- [17] 徐精彩. 空气在煤堆中的渗流规律探讨 [J]. 西安矿业学院学报 , 1995 , 15 (4) : 289 - 293.
- [18] Fierro V , Miranda J L , Romero C , et al. Model Predictions and Experimental Results on Self - heating Prevention of Stockpiled Coals [J]. Fuel , 2001 , 80 (1) : 125 - 134.
- [19] Fierro V , Miranda J L , Romero C , et al. Prevention of Spontaneous Combustion in Coal Stockpiles: Experimental Results in Coal Storage Yard [J]. Fuel , 1999 , 59 (1) : 23 - 34.
- [20] Ejilali A , Aminossadati S M , Hooman K , et al. A New Criterion to Design Reactive Coal Stockpiles [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer , 2009 , 36 (7) : 669 - 673.
- [21] Arisoy Ahmet and Akgun Fehmi. Effect of Pile Height on Spontaneous Heating of Coal Stockpiles [J]. Combustion Science and Technology , 2000 , 153 (1) : 157 - 168.
- [22] Ejilali A , Mee D J , Hooman K , et al. Numerical Modelling of the Self - heating Process of a Wet Porous Medium [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer , 2011 , 54: 5201 - 5206.

(上接第 117 页)

惰化系统，并设置了手动启动和机械应急启动模式确保惰化系统正常工作。针对多台煤粉仓的组合分配系统 CO₂ 储存量，只需考虑满足所需储存量最大的一个防护区的储存量即可。实践应用表明：采用低压 CO₂ 惰化系统对煤粉仓实施保护，可以明显降低煤粉自燃的风险，保障锅炉运行安全。

参考文献：

- [1] 冯现河. 高效煤粉工业锅炉技术开发及示范推广 [J]. 清净煤技术 , 2011 , 17 (4) : 62 - 66.
- [2] MT/T 714—1997 , 煤粉生产防爆安全技术规范 [S].
- [3] NFPA69—2008 , Standard on Explosion Prevention Systems [S].

- [4] 郭 岩. 火力发电厂原煤仓惰化设计及案例分析 [J]. 消防技术与产品信息 , 2009 (8) : 3 - 7.
- [5] 杨南武. 低压二氧化碳灭火系统在火力发电厂的应用 [J]. 给水排水 , 2008 (11) : 86 - 87.
- [6] 王彩屏 , 王伟峰 , 屈丽娜 , 等. 煤自燃火灾预警技术的研究现状和发展 [J]. 陕西煤炭 , 2009 (3) : 1 - 4.
- [7] 高云生 , 刘连喜 , 王健强 , 等. 低压二氧化碳灭火系统与惰化保护系统 [J]. 消防科学与技术 , 2009 (9) : 653 - 655.
- [8] 裴丽萍. 燃煤处理系统煤仓/煤斗的消防保护设计 [J]. 消防科学与技术 , 2009 (7) : 508 - 510.
- [9] 王海福 , 冯顺山. 防爆学原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社 , 2004.
- [10] GB 19572—2004 , 低压二氧化碳灭火系统及部件 [S].