循环流化床锅炉脱硫工艺经济性研究

田 剑 (潞安化工集团有限公司化工事业部, 山西 太原 030000)

摘要: 循环流化床锅炉在电厂发电中能够体现出一定的应用优势, 基于新时期对促进电厂转型升级的发展要求, 本文以电厂应用的循环流化床锅炉为主要研究对象, 着重从锅炉应用经济性的角度, 以节能和控制成本为主要目的, 对改造后的循环流化床锅炉脱硫工艺应用经济效益进行研究分析, 旨在为提升循环流化床锅炉脱硫效果, 促进电厂经营发展提供借鉴的思路和经验。

关键词: 循环流化床; 锅炉脱硫; 脱硫工艺

燃煤锅炉燃烧过程中会受到煤炭自身成分的影响, 产生对大气环境污染的有害物质。基于新时期对推动电厂节能改造和升级发展的要求, 现阶段电厂已经能够针对锅炉设备进行了一定的改造和优化。循环流化床锅炉是现阶段具有较高的燃烧效率和较强燃料适应性特点的锅炉, 能够有效满足电厂发电的需要。对循环流化床锅炉脱硫工艺的经济性进行分析, 对提升电厂锅炉运行的经济效益具有积极的意义。

1 循环流化床锅炉脱硫工艺成本的计算

1.1 循环流化床锅炉运行情况

某电厂应用的锅炉为典型的循环流化床锅炉, 锅炉结构为单锅筒、全膜式壁型式、半露天布置。锅炉机组容量为 350MW, 年运行时间为 5000h, 设计炉内脱硫效率为 70%。基于新时期提升电厂运行经济效益和社会效益的要求, 该电厂在扩大自身运营规模的同时, 考虑对现有的锅炉发电机组进行优化和调整, 重点针对锅炉运行中存在的燃料燃烧以及空气污染等问题, 实现对机组的改造^[1]。

在锅炉脱硫方面, 该电厂主要应用炉内脱硫的方法, 基于气力输送的原理, 将石灰石粉直接送入到循环流化床锅炉的炉膛中, 伴随锅炉炉膛内的燃烧过程来同步达到脱硫的目的。

1.2 脱硫工艺运行计算费用

在对实际的脱硫工艺运行费用进行计算时, 通常需要包括脱硫剂成本、脱硫装置设备运行耗电、耗水成本、脱硫工艺应用中排放的废物处理成本四方面内容。

基于该电厂应用的循环流化床锅炉脱硫工艺方法, 在脱硫工艺应用本身无其他废物排放的情况下, 主要围绕炉内燃烧应用的石灰石粉成本、运行耗电费用以及运输费用三方面进行。考虑费用计算的便利性, 在实际计算中, 将运输费用直接纳入到石灰石粉的单

价中。

具体而言, 对石灰石粉成本费用进行计算, 主要依据燃煤过程中产生的二氧化硫量以及炉内钙硫摩尔比, 基于以下公式来实现:

$$V = \frac{1}{32a} KB_j \frac{w(S_{ar})}{100} K_{gb} u_1 H$$

在该式中, a 代表石灰石纯度, 计算中取 0.9; K 代表煤中的硫分燃烧后氧化为二氧化硫的比例, 计算中取值 0.9; B_j 代表机组耗煤量, 单位为 t/h; $w(S_{ar})$ 代表给煤收到基硫分, 单位为 %; K_{gb} 代表钙硫摩尔比, 实际计算中需要依据工业运行的数据来进行拟合; u_1 代表石灰石单价, 单位为元/t; H 代表机组年运行时间, 单位为 h。

对循环流化床锅炉运行的锅炉进行脱硫处理, 实际涉及到的各类设备消耗的电量成本, 也会对脱硫工艺的成本产生直接影响。针对电量成本的计算, 应能够建立在明确脱硫设备设施运行相关的电压、电流、功率等参数后, 可以依据以下公式来对脱硫工艺的运行耗电费用进行计算:

$$V_1 = 10^{-4} \left(\frac{500}{40} + \frac{373\alpha}{71.4} \right) B_s u_2 H C_d$$

在以上公式中, α 代表压缩空气系数, 计算中取值 1.92; B_s 代表炉内石灰石粉消耗量, 单位为 t/h; u_2 代表上网电价, 单位为元/kWh; C_d 代表石灰石粒度不同引起的电耗变化修正系数。

1.3 综合费用计算

在考虑电厂循环流化床锅炉脱硫工艺运行中消耗的成本费用基础上, 还应围绕装置设备折旧成本、维修成本、人工成本以及财务成本等进行脱硫工艺应用的综合费用计算。

其中, 对折旧成本的计算, 主要涉及到脱硫装置静态总投资费用、设备使用年数以及固定资产形成率

等参数；维修成本按照脱硫装置静态投资的 3% 进行计算；人工成本需要以运行人员人数和年平均工资相乘；财务成本则主要按照静态投资的 5% 进行计算。

2 影响脱硫运行成本的因素

在基于当前电厂循环流化床锅炉脱硫工艺应用情况的前提下，考虑可能影响脱硫运行成本的主要因素，以硫含量、脱硫工艺方法、脱硫剂类型与性能为主。

硫含量主要是指单位煤燃料中的含硫量。在含硫量越大的情况下，应用脱硫工艺所需的设备运转能力越高，实际消耗的电量成本也就越大。例如，在以石灰石为主要脱硫剂的工艺运行中，由于石灰石成本的占比较大，在硫含量增大的情况下，污染物脱除量增大，石灰石耗量也会增加，进而增大脱硫运行所需的成本费用。

不同脱硫工艺方法在实际应用的脱硫设备装置运行参数、运行耗电耗水量、脱硫效果方面的差异，都会对实际的脱硫运行成本产生影响。以循环流化床锅炉半干法和石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺的应用为例，首先考虑不同工艺装置的使用寿命对其运行电量成本的影响。随着工艺装置使用时间的不断增加，两种工艺装置设备的敏感度逐渐趋近于 0，但石灰石—石膏湿法烟气脱硫工艺对年运行时间有着更高的敏感度。在受到年运行时间影响的情况下，脱硫工艺应用的总电量成本提升。在这一过程中，由于折旧成本降低，实际的脱硫成本也会增加。

从脱硫剂应用种类的角度进行考虑，以石灰石这一较为常见的脱硫剂为例，常见的用于锅炉脱硫的石灰石粒度在 0-1000 μm 之间，中位粒径在 300 μm 左右。这样得到的钙硫摩尔比较高。基于现阶段科学技术的不断发展，脱硫工艺中应用的石灰石粒径大小也在不断细化。超细石灰石炉内脱硫技术的应用，以粒径不超过 15 μm 的石灰石粉为主要脱硫剂，能够在钙硫摩尔比一定的情况下，获得更高的脱硫效率。但这种石灰石粉对技术应用的要求较高，因而单价也更高。在石灰石成本占比较大的情况下，会导致应用该方法的运行成本也明显增加。

3 改进循环流化床锅炉脱硫工艺的经济性分析

从控制循环流化床锅炉脱硫工艺应用成本和提升效率的角度，基于各种可能影响脱硫工艺成本的因素，需要对实际用于锅炉脱硫的工艺进行改造。依据这一目的，主要从经济性的角度来验证改造方案应用的实际效果和价值，让其能够为电厂运营节省更高的成本，

提升电厂运营的经济效益。基于此，在对改进循环流化床锅炉脱硫工艺的经济性进行分析时，主要可以从以下几方面来入手：

3.1 循环流化床锅炉脱硫工艺应用存在问题

从脱硫工艺运行成本的角度，在脱硫工艺运行中发现，设计的钙硫摩尔比值为 2.2，但实际的脱硫工艺运行中钙硫摩尔比达到 3.5，使得整个脱硫系统的运行成本呈现出大幅度偏高的状况。在针对这一问题对脱硫系统的运行情况进行分析后，现在可能是由于炉内燃煤燃烧过程中受到燃煤质量的影响，导致产生的二氧化硫分布不均匀，就需要增加石灰石来提升处理效果，进而引起二氧化硫浓度变化以及钙硫摩尔比增加的问题。

3.2 脱硫工艺改造方案应用

考虑电厂实际应用炉内脱硫的工艺方法，基于对脱硫剂用量控制的目标和要求，以石灰石这一脱硫剂为例，考虑在循环流化床锅炉的连接处，增加一个用于控制石灰石传送给料量的系统装置。发挥仓泵的作用，让控制装置通过下料管与仓泵连接。同时，为实现对锅炉燃烧过程中烟气的控制，也可以通过设计缓冲仓的方式，让燃烧过程产生的烟气在汇聚后能够实现初步的除尘分离处理。

以这一系统装置为前提，在锅炉燃烧的过程中，石灰石从仓中被运输至仓泵，然后借助控制装置和缓冲仓，对实际传送的石灰石给料量进行计量。基于提升锅炉运行效率的目的，应能够结合锅炉燃烧产生的烟气含硫量多少，作为对石灰石的配送比例进行设置和调整的依据。在燃煤机组运行过程中，都需要依据二氧化硫的排放浓度来对石灰石粉给料机的给粉量进行调整，从而将排放的二氧化硫浓度控制在合理的范围之内。

从脱硫工艺应用效果的角度，也可以将自动化控制的技术与脱硫工艺装置应用结合起来。在借助烟气在线检测系统对烟气中的二氧化硫排放浓度进行实时检测的基础上，将检测得到的浓度数值反馈给事先设定好的控制系统。这一过程中，为实现对变频电机转速的自动化调整和控制，应以 DCS 控制系统为主，实现对石灰石输送量的控制。

与以往应用的脱硫控制系统相比，应用 DCS 控制系统，可以实现依据主 PID 控制器控制二氧化硫实时浓度的目的，而副 PID 则主要实现对石灰石瞬时给料量的控制。这些功能主要依据串级控制系统来实现。

在实际应用中,需要在主PID中输入事先设定好的二氧化硫排放要求,然后由系统主机依据设定好的程序,对实际检测得到的数值和设定的数值进行对比,计算二者之间的误差。将相关参数作为对石灰石给料量进行传输的主要依据。在这一过程中,系统的功能模块需要以主机计算得到的结果作为依据,进一步依据需要的给料量与实际给料量之间的偏差结果,应用PID运算,得到变频器的总指令。在将这些指令平均分给给料机后,就可以实现对给料机输送量和速度的有效控制。将以上改造方案用于循环硫化床锅炉的脱硫工艺运行中,能够通过控制输送至炉内的石灰石粉量的控制,减少以往锅炉脱硫工艺应用中的大量石灰石粉浪费情况,在一定程度上节约循环流化床锅炉脱硫工艺的运行成本。

3.3 脱硫工艺改进效益分析

基于以上改造方案来对改进后的脱硫工艺经济效益进行分析,在结合案例电厂循环流化床锅炉的基本参数信息后,明确脱硫装置入口二氧化硫浓度为 $1000\text{mg}/\text{m}^3$,出口二氧化硫浓度为 $35\text{mg}/\text{m}^3$,入口烟气体量为 1300000m^3 ,石灰石单价为150元/t,生石灰单价为450元/t,电价为0.3元/kWh,脱硫工艺方法投资为300元/kW。

3.3.1 成本费用

结合前文提到的针对脱硫工艺应用成本进行计算的主要内容和公式,在考虑影响脱硫工艺应用效果和成本的各项因素基础上,以设置硫含量为1.2%为前提,而不改变原有工脱硫工艺原理及脱硫剂种类的前提下,可以得到表1中的计算结果。

结合表1中数据可以发现,在对循环硫化床锅炉的脱硫工艺进行改造后,尽管实际应用的电费以及维修成本有所增加,但在对石灰石粉量加以控制的情况下,由于石灰石成本在综合费用中的占比较高,减少的石灰石购置成本超过电费以及维修方面增加的成本,因而能够让实际的脱硫工艺应用成本下降。由此可以证实,本文提出的针对脱硫工艺进行改造的方法,能够有效节省脱硫工艺的应用成本,对提高电厂的经济效益也具有积极的作用。

3.3.2 脱硫工艺改造应注意的问题

基于新时期对促进电厂优化升级与发展提出的要

求,电厂在对现有的工艺进行改造优化的过程中,不仅需要加强对于工艺应用和运行成本的控制,也应强调各类工艺方法在实际应用中可能对环境造成的影响。而由于脱硫工艺本身是电厂锅炉运行中能够对污染进行处理的重要工艺,基于成本影响因素来对脱硫工艺进行改进优化,还应考虑改进后的脱硫工艺是否存在安全隐患和问题,是否会对环境造成二次污染。

例如,以加强对石灰石粉进料量进行控制的方法,虽然能够通过降低炉内脱硫比例的方式,达到提升脱硫工艺整体经济性的目的,但如果未能结合电厂锅炉的实际运行情况,考虑尾部烟道可能存在的硫含量增加情况,对空压机等脱硫工艺装置和设备造成腐蚀,不仅会增加用于设施设备维护的成本,同时也会增加环境二次污染的隐患,影响电厂脱硫工艺的实际应用效果。

针对这一问题,要求电厂能够在结合循环流化床锅炉运行实际情况的基础上,在对脱硫工艺进行改造优化的过程中,基于对石灰石粉进料量的控制,同时也兼顾设备运行耗电量以及维修维护成本等方面的消耗,争取以全方面来实现对脱硫工艺应用成本的控制。这样不仅能够节省脱硫工艺的应用成本和提升工艺效率,也能够推动电厂循环硫化床锅炉脱硫工艺朝着更精细化和高效化的方向发展。基于新时期对促进电厂转型升级提出的要求,应能够加强对脱硫工艺等与环境治理相关工艺的重视。

综上所述,为实现对循环硫化床锅炉脱硫工艺成本控制以及节能的要求,需要对循环硫化床锅炉脱硫工艺进行适当优化和改造。在考虑各种可能影响脱硫工艺成本因素的前提下,应能够明确对脱硫工艺运行计费进行计算的具体内容和方法。将其作为对流循环流化床锅炉脱硫工艺进行改造的依据,从而有效提升脱硫工艺的应用效果。

参考文献:

[1] 史希泉.循环流化床锅炉脱硫技术改造实践[J].山西化工,2022,43(05):64-67.

作者简介:

田剑(1984-),男,山西晋中人,2008年7月毕业于山西大学,电子信息工程专业,本科,现为助理工程师。

表1 改进脱硫工艺应用的成本计算结果(单位:元/t)

脱硫工艺	石灰石成本	电费	折旧成本	维修成本	人工成本	财务成本	综合费用
改进前	1645714	4525714	6212571	980571	600000	4899428	34285714
改进后	8571428	4668367	5932653	2810203	600000	4683673	30612244