

# “洁净煤技术”的烟气净化系统 最新概况及其工艺选择

胡国新 骆仲决 李绚天 岑可法

(浙江大学热能工程研究所)

**[摘要]** 燃煤烟气排放出大量的粉尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等污染物,给环境生态带来严重的破坏。为此,发展烟气净化技术势在必行。本文介绍了国内外燃煤锅炉烟气净化技术的现状与最新进展,分析了各种工艺过程的优缺点、影响因素与应用概况,给出了系统选择与工艺设计要点,并提出了几点建议。

**关键词** 燃煤锅炉 烟气净化 脱硫脱硝 工艺设计

**分类号** X511

## 0 前言

煤炭是我国主要的动力燃料,也是我国大气、水质、陆地等环境污染的主要根源之一。燃煤烟气中排放出大量的粉尘、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等污染物,给环境生态带来严重的破坏。据统计,我国大气污染物排放量的 70% 来自煤炭燃烧,其中燃煤排放的烟尘量占我国粉尘排放量的 60%,燃煤排放的  $\text{SO}_2$  占我国  $\text{SO}_2$  排放总量的 87%,燃煤排放的  $\text{NO}_x$  占我国  $\text{NO}_x$  排放总量的 67%,每年大气污染造成的经济损失达 185 亿元。预计到 2000 年,如不采取烟气净化等环境保护措施,届时将向大气排放 3700 万吨粉尘,2300 万吨  $\text{SO}_2$ ,1300 万吨  $\text{CO}$  和 1020 万吨  $\text{NO}_x$ 。可见,有效地控制烟气污染物的排放量,尤其是燃煤锅炉的排放量已到了刻不容缓的地步。

本文综述了国内外燃煤锅炉烟气脱硫脱硝的主要方法,分析了各种工艺过程的优缺点与影响因素,供烟气净化系统的选择与工艺设计参考。

## 1 排烟脱硫技术

煤中通常含有 0.3% ~ 2% 的硫,通过燃烧,与氧反应生成硫氧化物等有害物质。从烟气中除去

$\text{SO}_2$  的技术大致可分为干法和湿法两大类。本文仅就目前应用较多,或有研究和发展前景的技术方法作出简介。

### 2.1 湿式排烟脱硫

**石灰石-石膏法:** 该技术是目前最主要的烟气脱硫方法。其基本过程是:烟气中的  $\text{SO}_2$  在吸收塔内同含石灰石的料浆进行气液接触,生成硫酸钙,再用空气氧化产出石膏,石膏脱湿后作为副产品回收利用,如图 1 所示。

工程应用中常使用所谓的单塔方式:在单塔里完成吸收氧化全过程,设备投资和运行费用可以降低。图 2 是几种典型的单塔方式:(A)常用的方式;(B)填料方式,可以延长烟气停留时间以增加吸收、氧化作用;(C)鼓泡喷射方式,需要消耗动力通过多管将空气鼓入料浆中,但不必象其它方式把料浆泵到塔顶,因而操作方便;(D)料浆两级吸收方式。

对燃煤电厂湿法脱硫后的干净烟气 ( $50 \sim 60^\circ\text{C}$ ) 再热,通常是应用回转式气-气交换器 (GGH),大约有 1% ~ 3% 的未处理烟气泄漏并与净化过的烟气相混,因而发展了无泄漏的管式 GGH。用管式 GGH,干净烟气与未处理的烟气完全隔离,不会发生灰尘泄漏,因而系统设计中可以考虑蒸发部分与冷凝部分分离设置。

回转式 GGH 腐蚀不会给系统带来多大的后

收稿日期 1996-03-04 三修定稿 1997-04-29

本文联系人 胡国新 男 33 工程师 310027 杭州玉泉

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

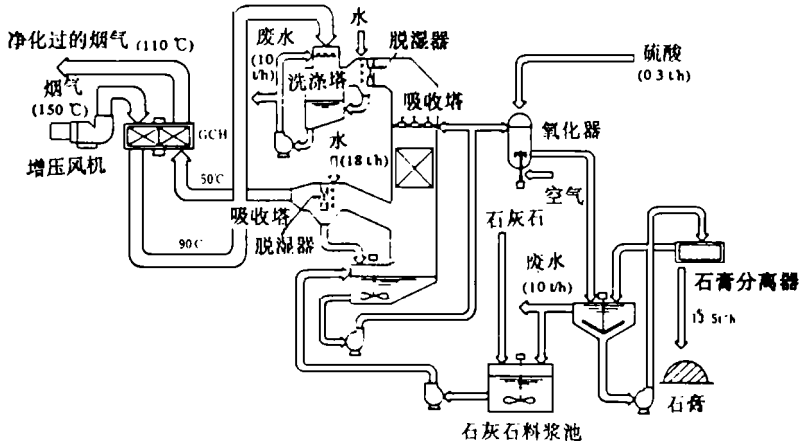


图 1 石灰石-石膏法烟气脱硫工艺流程 (500 MW 燃煤锅炉, SO<sub>2</sub> 出口浓度: 1000 ppm)

果,而管式 GGH 的腐蚀会引起气液泄漏。设计中可以考虑将净化过的烟气温度通过蒸气加热器提高 5 ~ 10°C 后,再引入 GGH 另外,为避免管式 GGH 的腐蚀和灰尘堵结,可以联合半湿式静电除尘器除灰,这种系统的出口烟气灰尘浓度小于 10 mg /Nm<sup>3</sup>,等于燃油锅炉的排放标准

以及需要有相应的污水处理系统,因而该工艺设备投资大,运行费用高。日本由于天然石膏资源短缺,目前主要采用湿式石灰石-石膏法的烟气脱硫方法;我国天然石膏资源丰富,选择石灰石-石膏法的关键是要解决副产品石膏的回收利用问题。回收的方向之一是利用石膏生产硫酸和水泥,山东鲁北化工总厂在这方面取得了成功的经验并获得了可观的经济效益。

### 2.2 煤灰干法排烟脱硫技术

煤灰、石灰石或者消石灰以及使用过的脱硫剂(包括 CaSO<sub>4</sub>)按一定比例用水混和在挤压机内压成 3~ 10 mm 大小的球丸颗粒,经蒸汽蒸烘处理后再干燥,然后进行排烟脱硫。图 3 是该技术处理烟气量为 50 000 Nm<sup>3</sup>/h 的工艺系统示意图,吸收塔由前置吸收塔和主吸收塔两部分组成。锅炉排气先经前置吸收塔再导入主吸收塔,前置吸收塔主要除去烟气中的粉尘,SO<sub>2</sub> 大部分由主吸收塔吸收,脱硫剂从主吸收塔上部加入,在塔内一面往下移动,一面吸收 SO<sub>2</sub>,脱硫剂从主吸收塔下部排出转入前置吸收塔内,在前置吸收塔中脱硫的移动速度比在主吸收塔要快,目的是防止因粉尘堆积造成的通气阻力增大,采用双塔式吸收对提高脱硫剂的钙利用率很有效。前置吸收塔中的脱硫剂捕集了粉尘和吸收了 SO<sub>2</sub> 后,从该塔的下部排出。一部分脱硫剂原料回收利用主要的脱硫反应方程如下:

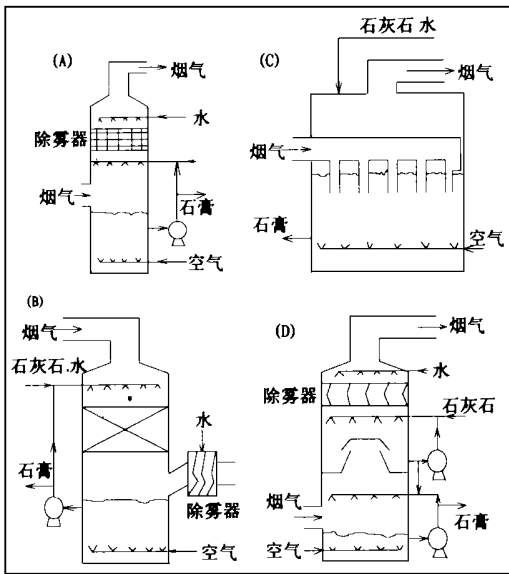


图 2 各种单塔式石灰石-石膏脱硫装置

工艺特点及应用前景: 廉价易得的脱硫剂,脱硫效率高达 92% ~ 96%,除灰效率 70% ~ 95%,系统运行稳定可靠。不足之处: 占地面积大,耗水量多

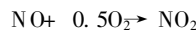


表 1 给出 50 000 N m<sup>3</sup> /h 烟气脱硫装置有关参数,图 4 是该装置的测试结果,可以看出脱硫率随 Ca/S 比值增加而提高,但钙利用率却会下降,当钙硫比为 1.1 时,脱硫率高达 90% 以上,钙利用率也在 85% 左右。

工艺特征及应用前景:用水量小,因而不需安装复杂的排水处理装置;脱硫后排气温度没有降低,不需要再加热装置;系统简单可靠,脱硫率 > 90%,除

尘率高达 90%。占地面积小,设备投资小。日本首创此项新技术,北海道电力公司与日立公司合作的配 35 000 kW 燃煤机组的首台大型煤灰干式烟气脱硫设备 (64 4000 N m<sup>3</sup> /h) 在 1991 年初投入运行。该技术解决了环境保护和资源利用方面的问题,我国应充分借鉴该技术来解决烟气净化装置投资不足的问题。该技术也适用于中小型锅炉排烟脱硫,应用前景广阔。

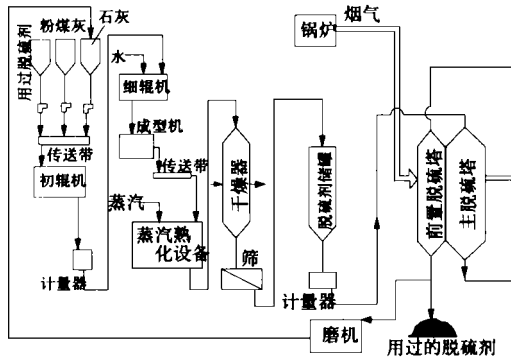


图 3 煤灰干法烟气脱硫设备工艺流程

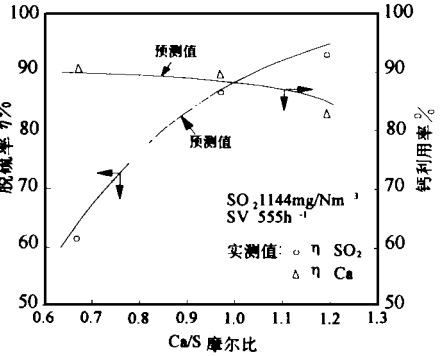


图 4 Ca/S 变化试验结果

### 2.3 半干式排烟脱硫

该技术方法的工艺流程是:选用能同 SO<sub>2</sub> 反应的吸收剂,将其在燃煤锅炉的适当部位喷入炉内,吸收剂与燃煤过程中产生的 SO<sub>2</sub> 反应以达到脱硫的效果。在空预器和除尘器之间设置喷雾冷却塔,烟气在其中脱除了大部分 SO<sub>2</sub>,并继续在其尾部的集尘器中进行脱硫,脱硫效率达到 70% ~ 80%。设计时要谨慎考虑以防水份凝结在集尘器中。

当向炉膛喷射吸收剂脱硫时,要在炉体壁上开设喷口,由于吸收剂的传送和喷射增加了进入炉膛的空气量,为避免锅炉燃烧效率的大幅度下降,吸收剂传送和喷射用空气量应维持最小,一般情况下,传送或喷射空气的用量保持在燃烧空气用量的 5% 以下。

工艺特点:系统造价低,工艺过程简单,适用于发展中国家燃煤锅炉排烟脱硫,但炉内喷枪会带来副作用,增加煤灰焦结性及飞灰颗粒硬度,使后部受热面及炉体易于磨损和结渣,这是该工艺设计必须十分注意的问题。

表 1 50 000 N m<sup>3</sup> /h 中试脱硫装置有关参数

处理气量	50 000 N m <sup>3</sup> /h
入口 SO <sub>2</sub> 浓度	1573 mg /N m <sup>3</sup> (550ppm)
入口粉尘浓度	200 mg /N m <sup>3</sup>
排气温度	140℃
排气的水分含量	9 V o f %
脱硫率	90% 以上
钙利用率	80% 以上
锅炉燃料	煤
脱硫剂制造能力	6.6t/d
吸收塔脱硫剂	
充填部有效尺寸 (m)	5.0 (0.4 × 1.4) × 15

### 2 排烟脱硝技术 (SCR 法)

对燃煤锅炉,燃烧产生的烟气中约含有: 10% ~ 15% 的 CO<sub>2</sub>, 7% ~ 10% 的 H<sub>2</sub>O, 4% ~ 6% 的 O<sub>2</sub>, 70% ~ 75% 的 N<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 的生成量与燃烧中的 N 含量有关,对炉温控制在 1500 ~ 1600℃ 的燃烧工况,约产生 300 ~ 800 ppm 的 NO<sub>x</sub>。燃煤锅炉烟气中的 NO<sub>x</sub> 主要是 NO 和 NO<sub>2</sub>, 其中 NO 约占 95%。

SCR法作为排烟脱硝装置的主流为目前采用得最多的方法,尤其是在大型电站锅炉上均用本方法。其基本特征是:用氨作还原剂,氨被喷射到烟气中,在通过 300~ 400℃ 的催化剂触煤层时 NO<sub>x</sub> 有选择地与氨进行反应,使之还原成 N<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,其脱硝反应方程如下:

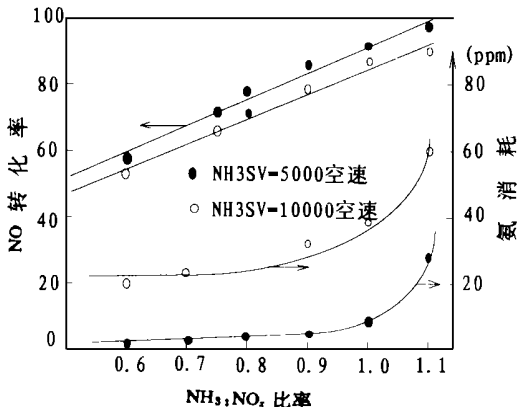
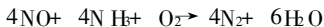


图 5 一氧化氮转化率和氨消耗率与 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 比率的关系

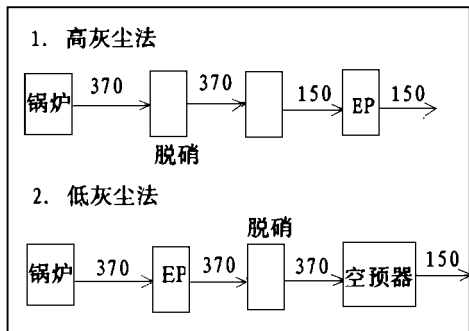


图 6 燃煤锅炉烟气脱硝工艺系统方案

图 5 表述了两种不同空速下以 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 比率为自变量的氮氧化物的转化率和氨的流失曲线。可以看出,随着 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> 比率的增加,氮氧化物的转化率也增加,一般氨的流失不允许大于 5 ppm,否则烟道气温度降低时,烟道气中的三氧化硫与未反应的氨可形成硫酸铵,从而引起空预器、除尘器后续设备的严重积垢,甚至未反应的氨沾染飞灰而限制它的工业应用。

SCR法脱硝装置可以直接设置在锅炉烟气出口(称之为高灰尘法),或设置在多级集尘器尾部(称

之为低灰尘法)。图 6 为高灰尘法和低灰尘法排烟脱硝系统工艺方案图。两种方案相比,选用高灰尘法的缺点是:(1)烟气进口表面上的催化剂触煤层会发生硬化,当烟速达到 5 m/s 左右时则可以避免其发生。高灰尘法烟气含尘浓度高,因而对触煤层磨损大。(2)当氨喷射到高灰尘烟气中,飞灰可能会结团,当氨的喷射浓度控制在 5 ppm 左右时,则能够避免。但高灰尘法由于硫酸氨和许多挥发冷凝物淤结在飞灰上并带出催化剂触煤层和静电除尘器,因而不会发生设备结尘现象。低灰尘法的不足是:通过高温静电除尘器的微尘颗粒(50~ 100 kg/Nm<sup>3</sup>)进入触煤层反应器后由于挥发冷凝物淤结在微尘上的量相对较大,有可能使触煤层反应器堵灰,因而这种微尘必须用灰尘吹扫器或其它方法清除。另外,硫酸氨可能淤结在空预器上,因而必须控制氨的喷射浓度。当处理的烟气量大时,必须选用设备造价和运行费用高的大型的高温静电除尘器。

SCR法排烟脱硝装置结构简单,无副产品,运行容易,可靠性高,无需排水处理,烟气中大约 80% 的 NO<sub>x</sub> 能够被脱除掉(NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 摩尔比为 0.81~ 0.82),可以用来处理大量烟气等。

SCR法系统中使用活性催化剂应具有以下特点:宽的温度范围,高的催化活性;低氨流失量,对 SO<sub>2</sub> 氧化有低的催化活性;低失活速度;无烟尘积累;机械强度高,抗磨损性强;催化剂床层压力降小。

当无催化剂时(SNCR法),为获得适宜的化学反应速度,反应温度应保持在 980℃ 左右。在稍高于此温度的情况下,不可避免地会导致副反应发生,例如氨被氧化成氮,甚至形成氨氧化物,从而引起自身消耗。若温度低于 900℃,则还原速度将迅速下降。因此,用氨进行 NO<sub>x</sub> 非催化还原,需严格控制温度。

SNCR法消耗氨量大,难以达到高的脱硝率,通常 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 摩尔比为 1.2~ 1.5 时,脱硝率只有 35%~ 45%,脱硝后烟气中仍有约 10~ 15 ppm 的未反应氨。与 SCR法相比,设备费用低,适用于不需要快速高效脱硝的工业炉和城市垃圾焚烧炉。

### 3 活性炭同时脱硫脱硝技术

该法是在利用活性炭干法脱硫技术的基础上,转向利用脱 NO<sub>x</sub> 性能高的活性炭,达到同时脱硫脱硝的目的。如图 7 所示,在脱硫塔中 SO<sub>2</sub> 被烟气中的

游离氧氧化生成  $\text{SO}_3$  并溶于水分之中,产生出稀  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,最后由活性炭将  $\text{H}_2\text{SO}_4$  吸附。解吸塔使用移动床,来自脱硫塔中的活性炭被加热到  $390^\circ\text{C}$  左右,在惰性气体保护下脱出  $\text{SO}_2$ 。再生后的活性炭经冷却,过筛后由输送机送回脱硝塔使用。脱吸出来的  $\text{SO}_2$  在烟气中的浓度约 15% 左右,让其通过一个装有焦炭的移动床还原器,在  $850\sim 900^\circ\text{C}$  下被还原为元素硫或其它硫产品。还原反应为吸热反应,反应所需的热量由部分焦炭的燃烧提供。还原后生成的硫蒸汽由烟气中分离后进入冷凝器冷凝,其它气态硫化物经水解后可生成  $\text{H}_2\text{S}$  将还原过程中得到的  $\text{H}_2\text{S}$  与再生过程中脱吸出的  $\text{SO}_2$  一起送到克劳斯硫回收装置中回收。

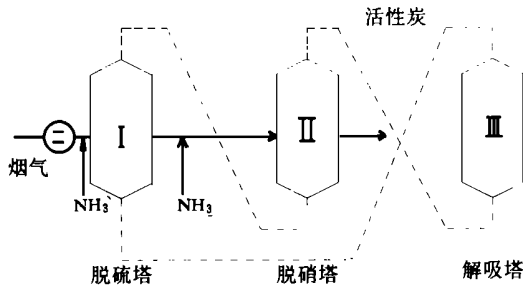


图 7 活性炭干法脱硫脱硝系统

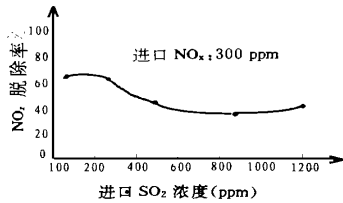


图 8 烟气中  $\text{SO}_2$  浓度对  $\text{NO}_x$  脱除率的影响

反应进行脱硝,当烟气中有  $\text{SO}_2$  时脱硝率不高,图 8 是烟气中  $\text{SO}_2$  浓度对  $\text{NO}_x$  脱除率的影响,应用中可在烟气进入脱硝塔之前喷射  $\text{NH}_3$  以达到高效脱硝。脱硝器中使用的活性炭对  $\text{SO}_2$  的吸附能力在脱硝中不会受到多少影响,可移到脱硫塔中使用。由于该法能有效地回收烟气中的硫,避免了硫资源的浪费和二次污染,而且同时脱硫脱硝能降低烟气净化费用,因而可望成为取代传统湿法烟气脱硫的工艺技术。

## 4 结束语

目前国内的烟气净化技术状况并不理想,多数净化设施效率低下,同时在排除了大气污染之后却造成了水质陆地排放废物的二次污染。因此,我们认为未来我国烟气净化技术的选择应该从经济、技术、环境等角度综合考虑,采用 (1) 能回收价值高的产品,以补偿净化设施全部或大部分费用; (2) 工艺流程简单、专用设备少,能同时脱硫脱硝; (3) 脱硫剂价廉易得; (4) 无二次污染; (5) 运行和维护费用低。本文介绍的煤灰干法烟气脱硫技术,半干法脱硫脱硝,以及活性炭同时脱硫脱硝技术等就是符合上述原则的最具竞争能力的烟气净化技术,应该成为我国未来烟气净化技术的主流。

## 参 考 文 献

- 1 Japan's Coal Technology, center for coal utilization, Japan March, 1994
  - 2 卢巨祥. 煤灰颗粒的干法排烟脱硫技术. 上海环境科学, 1993, 12(1): 37- 39
  - 3 周玉昆. 取代湿法烟气脱硫的干法烟气脱硫系统. 环境工程, 1989, 7(6): 28- 31
  - 4 汪洋. 日本燃煤火电机组的环保技术. 锅炉技术, 1994, 10 24- 29
- (复编辑)

## 新技术

## 新的逆流软化技术

据“Power Engineering”1996年9月号报道,水处理技术近年来得到了迅速的进展,现在应用着许多方法来生产电站锅炉的补充给水。

一些较新的方法包括二通路反渗透法、混合床软化法以及包括超滤、电渗析和反渗透的三膜渗处理法。所有这些方法在各种应用中均效果良好。

积层床逆流再生软化方法正得到人们的重视。这种过程使离子交换和先进的再生方法相结合,产生的水的质量显著好于常规的处理方法。在欧洲和美国电站锅炉的应用中,已证实这种水处理方法是十分成功的。

(思娟 供稿)

旋流煤粉燃烧技术的发展 = **Evolution of Swirling-Flow Pulverized-Coal Combustion Technologies** [刊,中] / Qin Yukun, Li Zhengqi, Wu Shaohua (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 241~ 244

A review is conducted of the evolution of the swirling-flow pulverized-coal combustion technologies both at home and abroad. On the basis of the difference in the feeding mode of the secondary air and the pulverized-coal concentrations of primary air-coal mixture the above-cited technologies may be classified into three types, i. e. common type, staged combustion type and fuel-rich type. The latter can in its turn be divided into the high pulverized-coal concentration type and the fuel bias type. Summarized are the features of various types of burners in terms of flame stability, combustion efficiency, NO<sub>x</sub> emissions, slagging, high-temperature corrosion and control characteristics, etc. It is pointed out that the fuel-bias swirl burners are to be preferred for further development in the area of swirling-flow pulverized-coal combustion technology. **Key words** swirl burner, classification, bias combustion, staged combustion.

“洁净煤技术”的烟气净化系统最新概况及工艺选择 = **The Latest Survey of the Gas Purification System of “Clean Coal Technology” and its Technological Selection** [刊,中] / Hu Guoxin, Luo Zhongyan, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 245~ 249

Flue gases of coal-burning emit a huge amount of pollutants, such as powder/dust, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>, etc, causing serious consequences to environment ecology. In view of this it is essential to develop coal-fired boiler flue gas purification technology. The authors give a brief description of the present status and latest developments in the above-cited technology, analysing the merits and defects of various technological processes, some influencing factors and the results of thier applications. In addition, proposed are the method of system selection and key points to be taken into account during technological design, etc. **Key words** coal-fired boiler, gas purification, desulfurization and denitration, technological design

关于离心压缩机防喘振控制系统的研究及应用 = **The Study and Application of Anti-surge Control System for Parallel-connected Centrifugal Compressors** [刊,中] / Zhang Zhijun, Xu Xiangdong (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 250~ 252

This paper mainly describes the algorithm of anti-surge control method used in an anti-surge control system for four parallel-connected centrifugal gas compressors. The use of this algorithm can lead to an effective prevention of surge phenomena. With respect to different parallel-connected centrifugal compressor units the surge margin and design parameters can be conveniently revised and it is only necessary to make some proper changes so that the algorithm can be applicable to a variety of cases, including a single compressor. A detailed description is given of the anti-surge control of the parallel-connected centrifugal compressor units, presenting the control system structural drawing, its configuration principles and functions. A total distributed control system has been adopted for the anti-surge control system, which consists of one upper computer and four lower computers. The latter can independently perform the real-time acquisition of on-site signals and implement the control algorithm, realizing the control of the four centrifugal compressors. The upper computer by way of a bitbus is connected with the lower computers, carrying out the management and coordination with respect to the lower computers. The upper computer has the following functions: real-time data display, operating condition point graphic display, real-time data storage, alarms display and storage, print-out of data sheets, etc. Also described in this paper is the result of practical use of the said control system in a gas compressor station. The control system has been successfully applied to the centrifugal compressor unit of Beijing Shijingshan coal gas storage and distribution plant, playing a significant role in ensuring the safe operation of the production process. It has also passed an expert appraisal organized by the State Ministry of Electro-me-