

# 二氧化硫风机不同负荷下硫酸厂系统阻力分析与探讨

张玉杰<sup>1</sup>, 王海波<sup>2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 河南豫光金铅股份有限公司, 河南 济源 454650)

**[摘要]** 本文介绍了某冶炼厂烟气制酸工艺流程、二氧化硫风机及其变频调速装置, 列举了主要设备及管道和塔填料、除雾器、转化催化层的阻力计算公式, 给出了二氧化硫风机不同负荷下硫酸厂系统阻力实测数据, 分析了风机不同负荷下硫酸厂主要系统的阻力变化, 提出有条件的硫酸厂采用变频调速二氧化硫风机的建议。

**[关键词]** 硫酸厂; 阻力; 二氧化硫; 风机; 负荷; 变频调速; 冶炼烟气

**[中图分类号]** TF307 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2022)01-0082-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.01.020

二氧化硫风机是冶炼烟气制酸系统的核心设备之一, 是制酸系统耗电量最大的设备。二氧化硫风机的压升与系统(设备、管道)阻力有关, 不同负荷下二氧化硫风机压升不同。采用变频调速方便风机启动, 节省电能。

## 1 冶炼烟气制酸工艺流程概述

某冶炼烟气制酸厂采用 2 级洗涤—气体冷却—2 级电除雾—二氧化硫风机—一转一吸—尾气脱硫工艺。冶炼烟气经废热锅炉回收热量、收尘系统收尘后进入制酸系统, 烟气经一级高效洗涤、气体冷却、2 级高效洗涤净化, 经 2 级电除雾器除雾、干燥塔干燥、二氧化硫风机增压, 经 III, II, I 换热器加热后进入转化器, 烟气经 3 段转化、3 次换热后进入吸收塔, 烟气中三氧化硫被浓硫酸吸收, 尾气经脱硫由烟囱排放。冶炼烟气制酸工艺流程如图 1 所示。

## 2 硫酸系统阻力计算公式示例

### 2.1 主要设备及管道阻力

#### 2.1.1 筒体设备主体及烟气管道直管阻力<sup>[1-2]</sup>

$$\Delta P = f \frac{L \rho u^2}{2d} \quad (1)$$

式中  $\Delta P$ —筒体设备主体及烟气管道直管阻力, Pa;

$f$ —阻力系数;

$L$ —设备或管道长度, m;

$\rho$ —气体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$u$ —气体流速, m/s;

$d$ —设备或管道内径, m。

#### 2.1.2 设备进出口或管道局部阻力<sup>[1-2]</sup>

$$\Delta P = \varphi \frac{W^2}{2g} \quad (2)$$

式中  $\Delta P$ —设备进出口或管道局部阻力, 毫米水柱;

$\varphi$ —阻力系数;

$W$ —气体流速, m/s;

$g$ —重力加速度, 9.81 m/s<sup>2</sup>。

#### 2.1.3 换热器壳程阻力<sup>[2]</sup>

$$\Delta P_s = (\Delta P_1 + \Delta P_2) F_s N_s \quad (3)$$

式中  $\Delta P_s$ —换热器壳程阻力, Pa;

$\Delta P_1$ —流体横向通过管束的阻力, Pa;

$\Delta P_2$ —流体通过折流板缺口的阻力, Pa;

$F_s$ —壳程结垢校正系数, 无量纲;

$N_s$ —壳程数, 无量纲。

$$\Delta P_1 = F f_0 n_c (N_B + 1) \frac{\rho_0 u_0^2}{2} \quad (4)$$

式中  $\Delta P_1$ —流体横向通过管束的阻力, Pa;

$F$ —换热管排列方式校正系数;

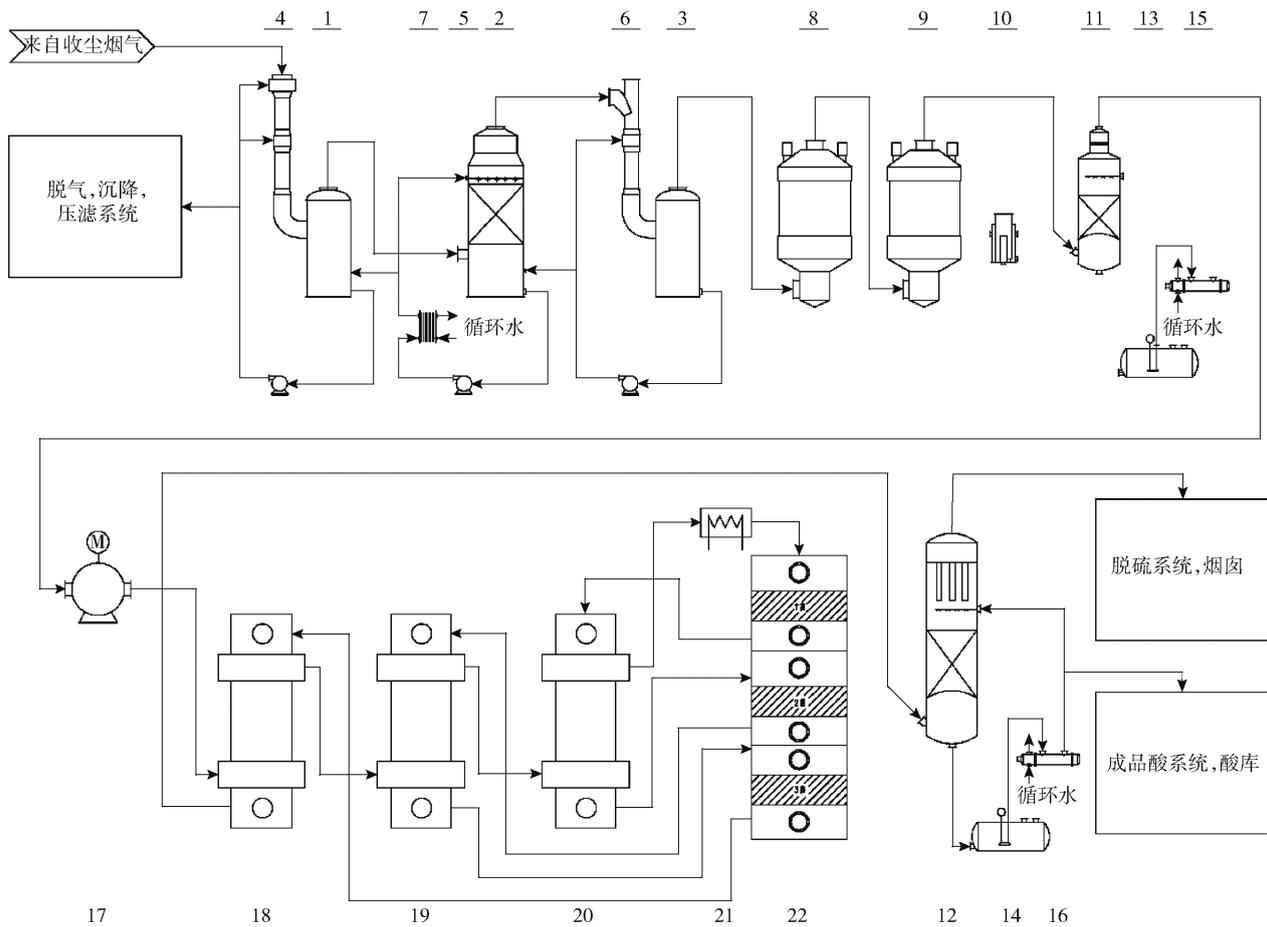
$f_0$ —壳程流体摩擦系数;

$n_c$ —管束中心线上的管数;

**[收稿日期]** 2021-11-01

**[作者简介]** 张玉杰(1984—), 男, 山东滨州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事硫磺制酸、冶炼烟气制酸、蒸汽余热发电等的工程技术及建设管理工作。

**[引用格式]** 张玉杰, 王海波. 二氧化硫风机不同负荷下硫酸厂系统阻力分析与探讨[J]. 有色设备, 2022, 36(1): 82-86.



1. 一级高效洗涤器 2. 气体冷却塔 3. 二级高效洗涤器 4. 一级洗涤器循环泵 5. 气体冷却塔循环泵 6. 二级洗涤器循环泵 7. 稀酸板式换热器 8. 一级电除雾器 9. 二级电除雾器 10. 安全水封 11. 干燥塔 12. 吸收塔 13. 干燥酸循环槽 14. 吸收酸循环槽 15. 干燥酸冷却器 16. 吸收酸冷却器 17. 二氧化硫风机 18. 三号换热器 19. 二号换热器 20. 一号换热器 21. 电炉 22. 转化器

图1 冶炼烟气制酸工艺流程

$N_B$ —折流挡板数;

$\rho_0$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$u_0$ —气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

$$\Delta P_2 = N_B \left( 3.5 - \frac{2h}{D} \right) \frac{\rho_0 u_0^2}{2} \quad (5)$$

式中  $\Delta P_2$ —流体通过折流板缺口的阻力, Pa;

$N_B$ —折流挡板数;

$h$ —折流板间距, m;

$D$ —壳内径, m;

$\rho_0$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$u_0$ —气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

## 2.2 设备附件阻力

塔填料阻力, 计算较为准确、应用较为广泛的填料层阻力是埃克特 (Eekert) 改进的通用关联图<sup>[3]</sup>, 丝网捕沫器、纤维除雾器、转化催化层的阻力采用相

应经验公式计算<sup>[1]</sup>。

### 2.2.1 塔填料阻力<sup>[3]</sup>

计算较为准确、应用较为广泛的填料层阻力是埃克特 (Eekert) 改进的通用关联图, 如图 2 所示, 横坐标为流动参数, 见公式 (6), 纵坐标为泛点  $Y$  值, 见公式 (7)。

$$FP = \frac{G_L}{G_C} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中  $FP$ —流动参数, 无量纲;

$G_L$ —液体质量流速,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

$G_C$ —气体质量流速,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

$\rho_G$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_L$ —液体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$Y = \frac{G_C^2 \varphi \Phi}{g \rho_C \rho_L} \mu_L^{0.2} \quad (7)$$

式中  $Y$ —泛点  $Y$  值;

$G_c$ —气体质量流速,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;

$\psi$ —水的密度与液体密度之比;

$\Phi$ —填料因子,  $\text{m}^{-1}$ ;

$g$ —重力加速度,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$\rho_c$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_L$ —液体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$\mu L$ —液体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

$A$ —纤维床层面积,  $\text{m}^2$ ;

$d$ —每根纤维的直径,  $\text{m}$ 。

### 2.2.4 转化触媒层阻力<sup>[1]</sup>

$$\Delta P = f\rho^{0.7}W^{1.7}H \quad (10)$$

式中  $\Delta P$ —转化触媒层阻力, 毫米水柱;

$f$ —阻力系数, 无量纲;

$\rho$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$W$ —气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$H$ —触媒层高度,  $\text{m}$ 。

## 3 二氧化硫风机及变频调速

### 3.1 二氧化硫风机简介

二氧化硫风机为国产设备, 风机的设计、材质选择、制造、检验及试验采用企业标准, 同时满足国家标准、中国机械行业标准。风机为单吸双支撑结构, 主要由机壳、主轴、叶轮、隔板、密封、轴承箱及配套辅助系统组成。机壳材质为铸铁, 主轴材质为碳钢, 叶轮材质为 316L 不锈钢。

由于冶炼烟气气量呈周期性波动, 为满足气量波动要求, 节能降耗, 同时为降低风机电机启动电流、增加启动转矩、加快启动过程, 避免风机启动时电路压降过大而影响其他用电设备的运行, 二氧化硫风机采用变频调节, 配置变频器柜及 YFP-2 异步变频调速电动机。电动机转矩公式见公式(11)。

$$M = \frac{3PU_1^2 r_1' / S}{2\pi f_1 [(r_1 + r_1' / s)^2 + (X_1 + X_2)^2]} \quad (11)$$

式中  $P$ —极对数;

$U_1$ —定子电压,  $\text{V}$ ;

$r_1$ —定子电阻,  $\Omega$ ;

$r_1'$ —转子电阻,  $\Omega$ ;

$s$ —转差率, 无量纲  $s = f_1 / f_2$ ;

$\pi$ —圆周率, 3.141 592 654;

$X_1$ —定子电抗,  $\Omega$ ;

$X_2$ —转子电抗,  $\Omega$ 。

### 3.2 二氧化硫风机变频调速<sup>[4-5]</sup>

对二氧化硫风机不同负荷下的风机压升实测数据进行拟合, 趋势线为多项式时的决定系数(判定系数) $R^2$ 为 0.997。实测数据表明: 采用变频调速方式调节二氧化硫风机负荷(转速), 风机升压与风机转速的平方成正比, 与式(12)一致。

$$H = RQ^2 \quad (12)$$

式中  $H$ —风压,  $\text{Pa}$ ;

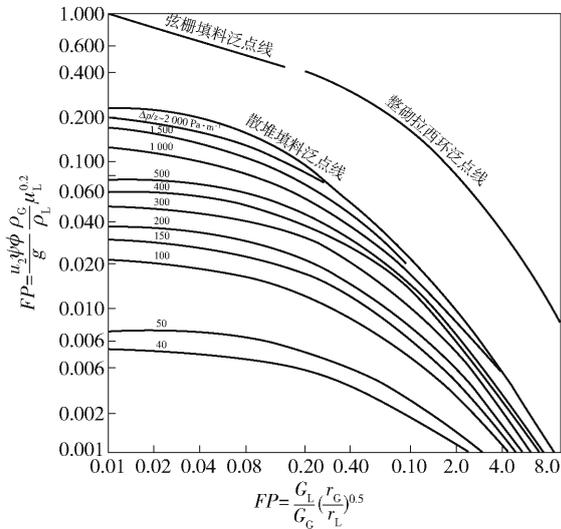


图 2 埃克特泛点和压降通用关联图<sup>[3]</sup>

### 2.2.2 丝网捕沫器阻力<sup>[1]</sup>

$$\Delta P = \frac{f\omega^2 xP(1 - \varepsilon)}{gd} \quad (8)$$

式中  $\Delta P$ —丝网捕沫器阻力, 毫米水柱;

$\omega$ —气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$x$ —丝网层厚,  $\text{m}$ ;

$P$ —气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\varepsilon$ —孔隙率, 无因次;

$g$ —重力加速度,  $9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$d$ —丝网直径,  $\text{m}$ ;

$f$ —摩擦系数。

### 2.2.3 纤维除雾器阻力<sup>[1]</sup>

$$\Delta P = \frac{KLQ\mu}{Ad^2} \quad (9)$$

式中  $\Delta P$ —纤维除雾器阻力,  $\text{Pa}$ ;

$K$ —透过系数, 无因次;

$L$ —纤维床层厚度,  $\text{m}$ ;

$Q$ —容积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\mu$ —气体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$R$ —风阻,  $\text{Pa} \cdot \text{min}^2 / \text{m}^6$ ;

$Q$ —风机风量,  $\text{m}^3 / \text{min}$ 。

电机功率与风机转速的三次方成正比, 见式

(13)。

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta} \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中  $P$ —电机轴功率,  $\text{kW}$ ;

$\gamma$ —裕量系数;

$Q$ —风机风量,  $\text{m}^3 / \text{min}$ ;

$H$ —风压,  $\text{Pa}$ ;

$\eta$ —效率。

与其他流量控制方式相比, 变频方式调节风机转速/流量节能效果显著, 如图 3 所示。由于风机转速较低时风压较低, 不一定满足系统阻力要求, 另外风机转速较低时风机电机效率降低, 故风机转速调节范围不宜过大, 通常不低于额定转速的 50%。

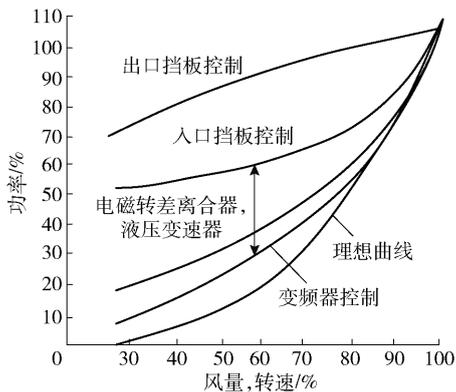


图 3 不同流量控制效率/功率对比<sup>[4]</sup>

同一负荷时风机电机电流有波动, 加之较低负荷时电机效率有降低, 且缺乏电机效率参数, 本文未分析风机电机电流/消耗功率数据。

## 4 风机不同负荷下硫酸系统阻力实测与分析

### 4.1 二氧化硫风机不同负荷下硫酸系统阻力实测

试车投产期间, 为试验主风机及变频装置性能, 对不同二氧化硫风机负荷进行测试, 并记录硫酸装置主要系统与设备的阻力, 其中风机负荷-风机压升曲线如图 4 所示, 风机负荷-转化层阻力曲线如图 5 所示, 风机负荷-转化系统阻力曲线如图 6 所示, 风机负荷-干燥系统阻力曲线如图 7 所示, 风机负荷-吸收系统阻力曲线如图 8 所示。

### 4.2 硫酸系统阻力分析

二氧化硫风机不同负荷(烟气流量)下, 系统阻

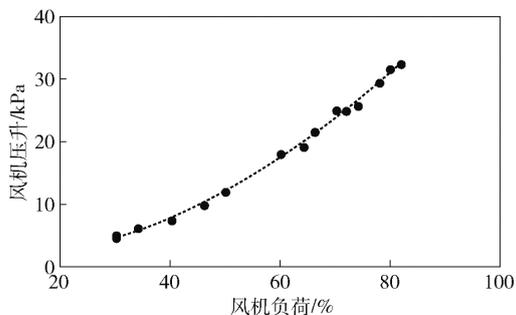


图 4 风机负荷-风机压升曲线

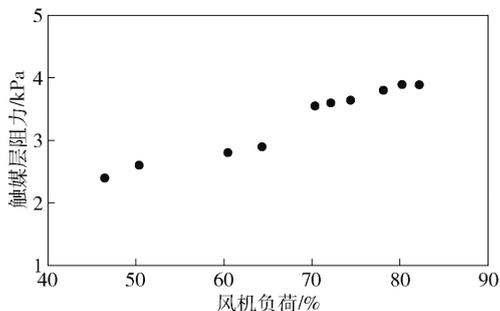


图 5 风机负荷-转化层阻力曲线

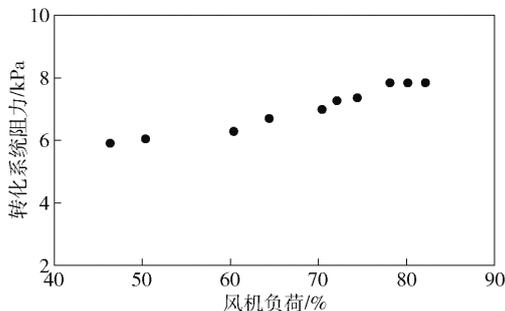


图 6 风机负荷-转化系统阻力曲线

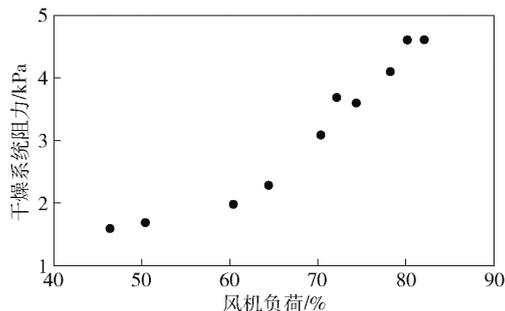


图 7 风机负荷-干燥系统阻力曲线

力不同。随着风机负荷/烟气流量的增加, 所有工序/系统的阻力均增加, 其原因如下:

(1) 干吸系统阻力增加最大, 最大值接近 3  $\text{kPa}$ 。主要原因是干吸塔内有一定高度的填料, 自塔

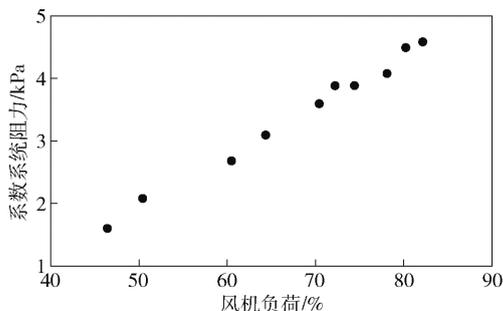


图8 风机负荷-吸收系统阻力曲线

顶喷淋的浓硫酸在填料表面分散成液膜,并经填料间隙向下流动;烟气和浓硫酸逆流接触,在填料润湿表面进行传质、传热与反应。

(2) 转化系统阻力增加相对较小,最大值接近2 kPa。转化系统绝大多数增加的阻力是在转化层,转化层增加阻力最大超过1.5 kPa。

(3) 由于净化系统前的收尘系统设置了高温风机,二氧化硫风机负荷降低时,系统风量降低,此时高温风机出口压头后移。净化系统的一部分阻力由高温风机克服,净化系统阻力变化会受高温风机影响,故本文未单独分析二氧化硫风机不同负荷下净化系统阻力数据,但从干吸系统阻力变化分析可知气体冷却塔(填料塔)处阻力增加较大。

## 5 结语

二氧化硫风机不同负荷(烟气流量)下,硫酸系

统的阻力不同。随着风机负荷/气量的增加,填料塔(如干燥塔、吸收塔、气体冷却塔等)阻力增加最大,转化层阻力增加次之,其他设备壳体与管道阻力增加最小。

冶炼烟气制酸厂的烟气气量呈周期性波动,二氧化硫风机经常进行负荷调整,由于设计考虑系统的高阻力,且设计一般留有一定裕量,在寿命期内二氧化硫风机很少在接近满负荷工况下运行。故建议有条件的硫酸厂二氧化硫风机采用变频调速,以节省电能。

采用变频调速能降低风机电机启动电流、增加启动转矩,避免风机启动时电路压降过大而影响其他用电设备的运行。二氧化硫风机变频调速也适用于电网容量相对不大、电网相对不稳定的国家或地区。

### [参考文献]

- [1] 刘少武,齐焉,赵树起,等. 硫酸生产技术[M]. 南京:东南大学出版社,1993:326-751.
- [2] 谭天恩,窦梅. 化工原理(上册)[M]. 北京:化学工业出版社,2013:22-210.
- [3] 谭天恩,窦梅. 化工原理(下册)[M]. 北京:化学工业出版社,2013:150-152.
- [4] 曾允文. 变频调速技术基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2011:69-81.
- [5] 黎冰,黄海燕,何衍庆. 变频器实用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011:348-350.

## Analysis and Discussions on System Resistance of Sulfuric Acid Plant under Different Loads of Sulfur Dioxide Compressor

ZHANG Yu-jie, WANG Hai-bo

**Abstract:** This paper introduces the off-gas-based acid making process, the sulfur dioxide compressor and its VSD device of a smelter. It provides a list of resistance calculation formula for the main equipment, pipelines, tower packing, demister and conversion catalyst bed, and gives a statistics of actually measured data on the system resistance of the sulfuric acid plant under different loads of the sulfur dioxide compressor, analyzes the resistance variations of the main systems of the sulfuric acid plant under different loads of the compressor, and puts forward its suggestion that the sulfuric acid plant may use sulfur dioxide compressor complete with VSD when conditions permit.

**Key words:** sulfuric acid plant; resistance; sulfur dioxide; compressor; load; VSD; smelting off-gas

