

含 SO₂ 气流对 20 号碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究

赵宪萍, 朱崇武, 叶桂林, 潘卫国

(上海电力学院 能源与机械工程学院, 上海 200090)

摘要: 主要研究燃煤锅炉中烟气中含有 SO₂ 腐蚀性气体对锅炉尾部烟道常用金属材料 20 号碳钢冲蚀磨损的影响。在试验台上进行了 250 ~ 450 °C 温度范围内, 含 SO₂ 的气流对 20 号碳钢的热态飞灰冲蚀磨损试验研究。试验结果表明: 20 号碳钢在含 SO₂ 腐蚀性气体中的相对冲蚀磨损量明显大于之前压缩空气流中的相对冲蚀磨损量, 显然由于磨损和腐蚀交互进行, 使得金属冲蚀磨损加剧。并且在试验温度范围内低温段的影响大于高温段的影响。20 号碳钢的热态磨损特性不变, 仍然是随温度升高, 磨损率先下降而后升高, 而临界温度有所提高, 为 375 °C。

关键词: 电厂锅炉; 飞灰磨损; 20 号碳钢; 腐蚀磨损; SO₂

中图分类号: TK224.9 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.009

引言

燃煤电厂锅炉尾部对流受热面的飞灰冲蚀磨损问题一直是行业亟待解决的问题之一, 由于其磨损是在高温和烟气的环境下发生, 温度的升高会带来材料表面特性的改变, 烟气中又含有多种腐蚀性气体, 这些气体对金属材料表面磨损也会产生一定的影响, 因此, 使得电厂的飞灰冲蚀磨损研究就更为复杂。国内外许多专家学者对磨损机理进行过大量的理论分析和试验研究, 但很多研究基于理论分析, 试验研究也大多基于压缩空气的冲刷磨损试验^[1~3], 对烟气中 CO₂、SO₂ 等气体对磨损的影响理论分析较多, 但试验研究较少。

一般认为这些腐蚀性气体会对低温受热面金属壁面产生腐蚀作用, 即使在 300 °C 及以上的壁温时, 烟气中 O₂、SO₂ 和壁面的氧化铁层及飞灰作用仍会产生 SO₃, 并逐渐腐蚀管壁^[4~7]。这些腐蚀产物较容易被灰粒冲刷掉, 露出新的金属表面, 又再进行腐蚀。同时, 灰粒子也以一定的速度冲刷壁面, 因此,

电厂锅炉对流受热面磨损和腐蚀是交互进行的, 管子冲蚀磨损速度大大加快。据有关方面统计, 燃煤电厂锅炉因省煤器被磨损而引起泄露的爆管事故占锅炉总事故的 50% 以上, 严重影响电厂运行的安全性与经济性。在不同温度时腐蚀性气体对金属冲蚀磨损性能的影响对于电厂锅炉的防磨研究, 延长省煤器的使用寿命, 提高锅炉运行的可靠性和经济性具有一定的实用意义和参考价值。

20 号碳钢是电厂低温段受热面省煤器的常用钢材, 在 530 °C 温度以下具有较好的抗氧化性能, 由于在高温下长期运行会发生珠光体球化和石墨化, 使其强度下降, 所以一般设计运行时间为几万小时。但往往实际运行时间少于设计值, 主要原因就是其正处于冲刷磨损和腐蚀较严重的位置。带腐蚀性气体的气流夹杂着飞灰颗粒以一定的速度冲刷管壁, 引起磨损和腐蚀, 使得管壁变薄, 机械强度下降。磨损腐蚀严重时, 甚至只有几千小时的寿命^[7~9]。硫和氧的同时出现会造成一定的腐蚀因素, 严重影响了金属的耐冲蚀性能。目前, 在这一领域的试验研究还较少。文中采用试验的方法, 在之前的研究基础之上^[1], 在试验气流中掺入了 SO₂ 气体对 20 号碳钢进行了温度在 250 ~ 450 °C 之间的试验研究与分析。

1 试验装置及试验工况

1.1 试验装置

热态飞灰磨损试验装置如图 1 所示。该系统性能稳定、操作方便、试验数据稳定和试验系统的复现性能良好, 再现性及重复性误差均小于 10%^[10]。试验台原先只是压缩空气一种气流进入系统, 后经过改造增加了 SO₂ 气流接入口和流量计, 可使两种

收稿日期: 2014-09-27; 修订日期: 2014-10-24

基金项目: 上海市地方能力建设基金资助项目(13160501000)

作者简介: 赵宪萍(1956-), 女, 山西襄垣人, 上海电力学院教授。

气体按一定比例同时进入试验系统,并在气流混合后,加热之前增加了混合气流成份含量的测点。

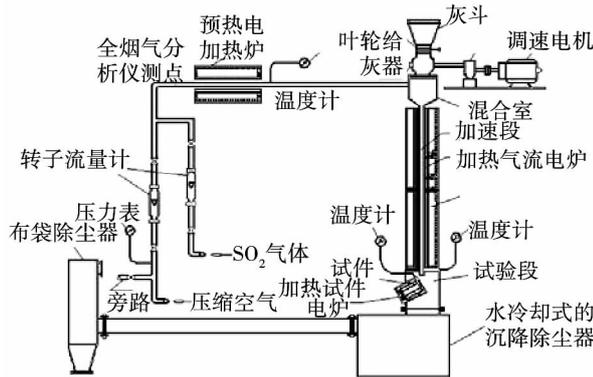


图 1 热态飞灰磨损试验台

Fig. 1 Diagram of the hot flying-ash erosion apparatus

试验系统工作过程如下: 由空气压缩机提供的压缩空气,经阀门控制和压力表及转子流量计的计量,进入试验系统,掺入的 SO₂ 气体也经转子流量计的计量进入试验系统。两种气流混合后在预热段预热后进入混合室; 试验用的灰粒子经称量后装入灰斗,灰斗下面的蝶阀控制灰的落入。给灰装置采用叶轮式给料,由调速电机和减速器控制叶轮转速,飞灰控制在稀相范围内均匀下落。灰落入混合室后与气流混合,并由气流携带进入加速管段,在加速管段用电炉加热使气固两相流体同时加热至试验所需温度(加速段出口处有测温点),粒子加速到一定速度在试验段以 30° 冲刷角冲刷试件,气固两相流体冲刷试件之后进入水冷却沉降式除尘器。在此,由于气体流动方向改变,在惯性力及重力的作用下,大部分的灰留在除尘器中,携带少部分灰的气流进入布袋式除尘器除尘后排向大气。试件加热采用专门设

计的小电炉进行加热,以保证试件达到试验工况要求的温度,试件中心设有温度测点。试验温度根据不同的试验工况确定,在对应的冲刷速度下完成试验。冲刷试验后的试件均放在干燥器皿中冷却至常温时才取出称重,以免空气中水分的凝结使重量改变。另外,还考虑了试验过程中试件在热态下被氧化而导致重量增加对称重的影响,使得数据的测取更为准确。

掺入的 SO₂ 气体含量除了由转子流量计计量之外,还在两种气体混合均匀后由全烟气分析仪测量,全烟气分析仪测量 SO₂ 气体限制在 6 000 mg/m³ 以内。试件的失重量用 1/10 000 g 精度的全自动天平称重,相对磨损量 ΔI 是相对每克灰材料的失重量。

1.2 试验工况

试验时,大气温度是 20 °C,大气压力是 0.101 2 MPa,气流压力是 0.30 MPa。

试件材料: 20 号碳钢,试件尺寸为 φ50 × 4 mm 的圆片。

气流中掺入的 SO₂ 气体的含量是采用可燃基含硫量在 1.9% 的电厂动力煤进行燃烧计算,算出其生成的 SO₂ 的含量,按照试验设定 5 个温度工况,经过温度修正,计算出每个试验工况下应掺入气流中的 SO₂ 流量和压缩空气按比例进入试验系统混合后进行冲刷磨损试验。

气流冲刷速度设定为 100 m/s,试验温度控制在 250 ~ 450 °C 之间,每 50 °C 1 个试验工况点,共做了 5 个试验工况点。

试验所用灰样均取自某电厂电除尘器,每个试验工况用灰量为 2 000 g。

试验中使用的测量仪表及测量精度如表 1 所示。

表 1 测量仪表及测量精度

Tab. 1 List of measurement devices with measurement accuracies

仪表名称	型号	测量范围	测量精度等级
温控仪表	WZK - II 型可控硅电压调整器	A: 0 ~ 30 V; 0 ~ 250	1
玻璃转子流量计	LZB - 25	2.5 ~ 25 m ³ / h	1.5
玻璃转子流量计	LZB - 4	0.016 ~ 0.16 m ³ / h	4
弹簧压力表		0 ~ 1 MPa	0.4
大气压力表	YM3 型空盒气压表	800 ~ 1 050 hPa	测量误差: ±3 hPa
全自动电子天平	FA2104 电子天平	100 d ~ 210 g (d = 1/10 000 g)	1/10 000 g
热电偶	WRNK - 392 型铠装热电偶	0 ~ 900 °C	允许偏差: Δt ± 2.5 °C
全烟气分析仪	EUROTRON GreenLine MK2	O ₂ : 0 ~ -25% (0 ~ 357 140 mg/m ³)	(X (mg/m ³) = M* C (10 ⁻⁶) / 22.4
		SO ₂ : 10 ⁻⁶ ~ 2 × 10 ⁻³ (0 ~ 5 714 mg/m ³)	M 为污染物的分子质量)

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

含有 SO₂ 气体的气流冲蚀试验数据采用非线性数据拟合,拟合方程如下:

$$\Delta I_{SO_2} = -0.0192 + 0.0005t - 1.9 \times 10^{-6}t^2 + 2.2 \times 10^{-9}t^3$$

其拟合的相关系数: $R^2 = 0.9526$,求导后,得其临界温度为 375 °C;拟合试验曲线如图 2 所示。可见为一开口向上的抛物线,在试验温度范围内随着试件表面温度的升高,相对磨损量开始时呈下降趋势,在 375 °C 左右时相对磨损量最小,之后随着试件表面温度的升高,相对磨损量增大。其规律与单纯压缩空气气流冲刷的热态磨损试验一样^[1]。

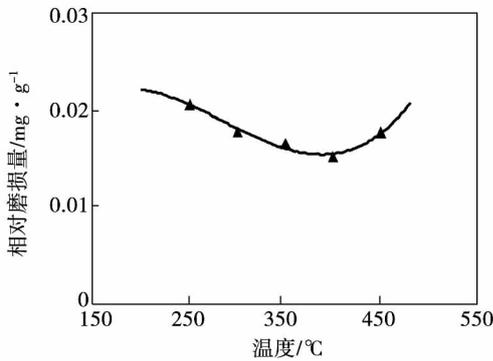


图 2 20 号碳钢在含 SO₂ 气流环境中相对磨损量与温度关系

Fig. 2 Relation between ΔI and T of 20 carbon steel in air-flow containing SO₂

2.2 分析与讨论

将 20 号碳钢在含 SO₂ 气体中的相对磨损量 ΔI_{SO_2} 与不含 SO₂ 气体的相对磨损量 ΔI 相比较如表 2 所示^[1]。

表 2 气流中含 SO₂ 与不含 SO₂ 情况下 20 号碳钢的相对磨损量比值

Tab. 2 Comparison of 20 carbon steel relative erosion rates in the air-flow with and without SO₂

温度/°C	250	300	350	400	450
$\Delta I_{SO_2} / \Delta I$	1.67	1.53	2.03	1.72	1.30

由表 2 可知,含 SO₂ 气体的冲蚀磨损率均大于压缩空气中的磨损率,350 °C 时最大,冲蚀磨损率增大了约一倍。

将二者的试验数据在同一坐标系下拟合曲线如图 3 所示,可明显看出,含有 SO₂ 的气流相对冲蚀磨损率相比不含 SO₂ 气体的压缩空气气流对试件的相对磨损率有了明显的增大,表明 SO₂ 在气流中对金属材料冲蚀磨损的影响是显著的。同时,可以看出在试验温度范围内的低温段相对磨损量的平均增加量高于高温段相对磨损量的增加量,显然,试验低温段 SO₂ 产生的影响更大。此外,曲线的临界温度也升高了。压缩空气试验中的临界温度是 339 °C^[1],而含 SO₂ 气体试验中的临界温度是 375 °C,临界温度提高了 36 °C。

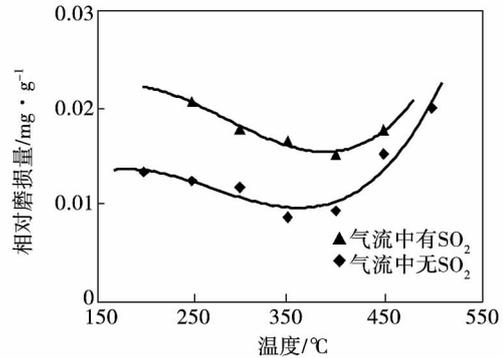


图 3 20 号碳钢在含 SO₂ 和不含 SO₂ 两种气流中的磨损性能比较

Fig. 3 Comparison of 20 carbon steel erosion resistance performance in the air-flow with and without SO₂

人们普遍认为烟气中的硫主要对低温受热面腐蚀严重,因为硫酸蒸汽会结露形成液体造成对金属的腐蚀,而高温区的硫酸蒸汽不会对金属腐蚀影响很大。但事实上,高温再热器和水冷壁中都有硫高温腐蚀的特征^[11-12],其腐蚀产物中都有硫化物存在。

烟气中的 SO₂ 在烟气中的 V₂O₅ 和 Fe₂O₃ 催化作用下极易与富裕 O₂ 转化为 SO₃,而 SO₃ 含量的增大可以提高酸露点温度。SO₃ 是一种极易吸湿的物质,研究表明:当温度超过 200 °C 时,只要烟气中存在 8% 左右的水分,99% 的 SO₃ 都会转化为硫酸蒸

汽^[13]。硫酸蒸汽在低于露点温度的金属表面上形成硫酸溶液,与碱性灰反应,也与金属反应,因而导致沾污和腐蚀。烟气中水蒸气分压约为10%,此时纯水蒸气的凝结露点为46.65℃。由于硫酸沸点比水高得多(如纯硫酸沸点比水高210℃),因此,尽管烟气中H₂SO₄蒸汽含量不多,一般体积分数仅为0~5×10⁻⁶,但已使烟气露点温度显著提高,引起尾部受热面的腐蚀。且露点越高,产生的腐蚀会越大。所以,在低温段受热面容易引起酸性腐蚀^[7,9]。

在高温区域的受热面,虽然H₂SO₄蒸汽不会凝结,但是烟气中O₂、SO₂和金属壁面的氧化铁层仍会产生SO₃,对壁面产生硫酸盐性腐蚀^[5]。此外已有研究表明SO₂作为一种氧化性气体,能够显著加速碳钢的氧化^[14]。硫渗入保护性氧化膜能引发反应加速并最终导致氧化膜的失效。硫化物的形成需要满足一定条件。当局部的硫活度(或化学势)大于形成金属硫化物所需的活度,就可以在该处形成硫化物。在一定SO₂分压下,金属-腐蚀膜界面处的金属活度最大,最容易形成硫化物。在一定高温下,氧化物和硫化物可连续交互生长,形成FeS+Fe₃O₄的双相膜。已有研究表明:在实际体系中既可以观察到双相腐蚀膜,也可以得到主要是氧化物的腐蚀产物膜。

与氧化物相比硫化物(主要是FeS)的特性主要有:(1)热力学稳定性差,生成自由能比氧化物高;(2)硫化物体积较大,内应力较大使得腐蚀膜易破裂;(3)晶格缺陷较多,有利于物质的迁移。在一定温度下,若在烟气中形成硫化物时,硫腐蚀与金属氧化相互作用会使得腐蚀更加严重。金属的腐蚀硫化过程比氧化更快,腐蚀产生的硫化膜具有较好的塑性但粘附力较差,这是因为多数硫化膜通过阳离子外扩散生长,因此在硫化膜-金属界面容易形成空洞。与金属氧化物相比,硫化物体积较大,金属硫化物腐蚀层相对基体金属的体积比一般在2.5~4.0之间。因此,生成硫化物的内应力较大,使得腐蚀层易破裂,导致金属腐蚀磨损加速^[12~16]。

因此,在燃煤电厂锅炉中,由于烟气中存在SO₂气体及一些其它气体,对20号碳钢能造成一定的腐蚀并加速其氧化,破坏金属表面保护膜。腐蚀产物空隙较大、疏松和表面附着性差,较容易被灰粒冲刷

掉,露出新的金属表面,又再进行腐蚀。因此,电厂受热面的冲蚀是磨损和腐蚀交互进行的过程,其共同作用使金属材料的冲蚀磨损速度加快。

3 结 论

(1) 在250~450℃试验温度范围内,加入SO₂气体后,20号碳钢的相对冲蚀磨损量明显增大。显然,在含腐蚀性气体环境中,磨损和腐蚀是交互进行的,使得金属冲蚀磨损加速;

(2) 含SO₂气流对20号碳钢磨损性能的影响在低温段时要比在高温段时的影响大;

(3) 在含SO₂气流环境的冲蚀磨损试验中,20号碳钢的热态特性不变,在某临界温度之前相对冲蚀率随温度上升而下降;达最低临界温度375℃之后,相对冲蚀率随温度上升而上升。其临界温度相对提高了36℃。

参考文献:

- [1] 赵宪萍,孙坚荣,邹荣辉. 20号碳钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 90-93.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong, ZOU Hui-rong. An experimental study on the hot flying-ash erosion of 20 carbon steel[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 90-93.
- [2] 赵宪萍,孙坚荣. 12Cr1MoV合金钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 热能动力工程, 2000, 15(5): 502-505.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. Experimental study of the wear and erosion of 12Cr1MoV alloy steel caused by hot flying-ash sweep[J]. Journal of Engineering and Power, 2000, 15(5): 502-505.
- [3] 赵宪萍,孙坚荣. 电厂锅炉常用钢材热态飞灰磨损性能的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 117-120.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. An experimental study on the hot flying-ash erosion of steel used in boilers of power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 117-120.
- [4] Rikard Norling, Anna Nafari, Anders Nylund. Erosion-corrosion of Fe-and-Ni-based tubes and coatings in a fluidized bed test rig during exposure to HCl and SO₂ containing atmospheres [J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1379-1383.
- [5] 容奎恩,袁镇福,刘志敏,等. 电站锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
RONG Luan-en, YUAN Zhen-fu, LIU Zhi-min, et al. Theory of power plant boiler[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

- [6] 李太江,李 巍,李 勇,等. 超音速火焰喷涂制备 NiCr 金属陶瓷涂层的抗高温硫腐蚀与冲刷磨损性能[J]. 中国电机工程学报. 2012, 32(20): 120-124.
LI Tai-jiang, LI Wei, LI Yong, et al. Performance of HVOF NiCr cermets coating against high temperature sulfur corrosion and erosion[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 120-124.
- [7] 岑可法,樊建人,池作和,等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
CEN Ke-fa, FAN Jian-ren, CHI Zuo-he, et al. Prevention theory and calculation of ash accumulation, slagging, erosion and corrosion of boiler and heat exchanger[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [8] 姜晓霞,李诗卓,李 曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosive wear of metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [9] 张 磊,廉根宽. 电站锅炉四管泄漏分析与治理[M]. 中国水利水电出版社, 2009.
ZHANG Lei, LIAN Gen-kuan. Analysis and management of power plant boiler four pipe leak[M]. China WaterPower Press, 2009.
- [10] 赵宪萍,孙坚荣,杨平等. 热态飞灰磨损试验台的研制(II)——试验系统误差分析与稳定性试验[J]. 上海电力学院学报, 2000, 16(1): 1-7.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong, YANG Ping, et al. Development of test installation for hot-state flying-ash erosion(II)——the measurement and computation error for the test system and the tests of system stability and repeatability, 2000, 16(1): 1-7.
- [11] 杨厚军,李正刚,李朝志,等. DG1025 锅炉高温再热器高温腐蚀原因分析与防治措施[J]. 中国电机工程学报. 2003, 23(11): 211-214.
YANG Hou-jun, LI Zheng-gang, LI Chao-zhi, et al. Analysis on causes of high-temperature corrosion and the measures for its protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 211-214.
- [12] 高 全,张军营,丘纪华,等. 燃煤电站锅炉高温腐蚀特征的研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(3): 292-296.
GAO Quan, ZHANG Jun-yin, QIU Ji-hua, et al. A study of high-temperature corrosion characteristics of coal-fired utility boilers[J]. Journal of Engineering and Power, 2007, 22(3): 292-296.
- [13] 肖雨亭,贾 曼,徐 莉,等. 烟气中三氧化硫及硫酸雾滴的分析方法[J]. 环境科技, 2012, 25(5): 43-48.
XIAO Yu-ting, JIA Man, XU Li, et al. The analytic method of sulfur trioxide and sulfuric acid mist in flue gas[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 25(5): 43-48.
- [14] 杨 波,田松柏,赵杉林. 不同形态硫化物腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 385-387.
YANG Bo, TIAN Song-bai, ZHAO Shan-lin. Study of corrosivity of different sulfur compounds of crude oil[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(6): 385-387.
- [15] 刘秀成,安成强. 金属腐蚀学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
LIU Xiu-cheng, AN Cheng-qiang. Corrosion science of metal[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [16] Neil Birks, Gerald H. Meier, Frederick S. Pettit. 金属高温氧化导论[M]. 辛丽, 王文, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010.
Birks N, Meier G H, Pettit F S. Introduction to the high-temperature oxidation of metals[M]. Xin Li, Wang Wen, Translation. Beijing: Higher Education Press, 2010.

(单丽华 编辑)

chanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,CHEN Chao-jie ,WEI Jia-jia (School of Aircraft Engineering ,Nanchang Hangkong University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -42 ~47

The vortex controlled diffuser (VCD) has been expected to be widely used in the engine combustion chamber in the future ,due to its high pressure recovery and low pressure loss. To obtain satisfactory vortex controlled diffuser performance ,numerical simulations of flow in different structures were performed with finite rate model and suction slot bleed condition. Comparison was made between VCD and normal expansion structure without suction slot. It is revealed that this structure with suction slot can reduce the length of the recirculation zone in combustion chamber ,expand the combustion area ,make the distribution of the outlet temperature along the radial direction more uniform , and improve the combustion efficiency greatly. **Key words:** vortex controlled diffuser ,numerical simulation ,combustion performance

基于局部搜索增强策略的微分进化算法应用于换热网络优化 = **A Differential Evolution Algorithm with Enhanced Local Search for Heat Exchanger Network Synthesis** [刊 ,汉] DUAN Huan-huan ,CUI Guo-min ,PENG Fu-yu ,CHEN-Shang (Research Institute of New Energy Science and Technology ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -48 ~53

An improvement strategy for differential evolution algorithm considering capabilities of local and global searches for heat exchanger network synthesis was proposed to avoid the problems of weak search ability and premature convergence. The mechanism of premature convergence for differential evolution algorithm was analyzed ,and a local enhancement factor based on dynamic updating was introduced into the numerical model to improve local search precision. Furthermore ,global search capability was also enhanced by the break mechanism. For the non-linear and non-convex characteristics of the heat exchanger networks ,this improved model now has the capabilities of local and global searches with great accuracy. Simulation cases indicate that the precision ,efficiency and diversity of the differential evolution algorithm have been improved ,and better solutions can be obtained compared to literature. **Key words:** differential evolution algorithm ,local search ,dynamic updating ,heat exchanger network

含 SO₂ 气流对 20 碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究 = **Experimental Study on the Effect of Air-flow Containing SO₂ on Fly-ash Erosion of 20 Carbon Steel** [刊 ,汉] ZHAO Xian-ping ,ZHU Chong-wu ,YE Gui-lin ,PAN Wei-guo (College of Energy and Mechanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China , Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -54 ~58

This study investigated the effect of the corrosive SO_2 in gas flue on erosion wear of 20 carbon steel which is widely used in rear heat recovery surfaces in coal-fired boilers. The hot-state experimental study of fly-ash erosion of 20 carbon steel was carried out in the atmosphere containing corrosive gas SO_2 at a temperature range of $250\text{ }^\circ\text{C} \sim 450\text{ }^\circ\text{C}$. The results show the relative erosion wear of 20 carbon steel in the atmosphere containing corrosive gas SO_2 is more serious than in the compressed air flow atmosphere, as a result of the interrelation between wear and corrosion. The influence is more significant at the low-temperature section than at the high-temperature section in the tested temperature range. The hot-state erosion characteristic of 20 carbon steel is no change; the erosion rate increases first and decreases afterwards as the temperature goes up, but the critical temperature is higher, up to $375\text{ }^\circ\text{C}$. **Key words:** power station boiler, fly-ash erosion, 20 carbon steel, corrosive wear, SO_2

基于热力学第二定律的热电厂低真空供热能耗分析 = **Energy Consumption Analysis of Thermal Power Plant Using Low Vacuum Heating based on the Second Law of Thermodynamics** [刊, 汉] GAO Xin-yong, SUN Shi-en, HE Xiao-hong, ZHENG Li-jun (Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou, Zhejiang, China, Post Code: 310029) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . - 2016, 31(6). - 59 ~ 65

Based on the thermodynamics law and “unit consumption analysis” theory, the energy consumption analysis method of thermal power plant using low vacuum heating is deduced. Using the method, the energy consumption of a power plant is evaluated. The results show that the total energy consumption of thermal power plant could be ranked from good to bad as pure condensing condition, extraction steam heating condition and extraction steam and low vacuum heating condition. The values of exergy efficiency and additional unit consumption could be ranked from good to bad as low vacuum heating subsystem, extraction steam heating subsystem and electricity production subsystem. When thermal power plant uses low vacuum heating, back pressure and terminal temperature difference of condenser have optimum values. In the power plant example, back pressure reaches the optimum when exhaust steam temperature is $65\text{ }^\circ\text{C}$, and the optimum value of terminal temperature difference is $3\text{ }^\circ\text{C}$. When power plant uses low vacuum to replace extraction steam heating, the amount of extraction steam has an optimum value, which is 283.96 t/h in the power plant example. So, using extraction steam heating and low vacuum heating to reform power plant is very necessary under the premise that the power plant has heat users. **Key words:** thermodynamics law, unit consumption analysis, cascade utilization of thermal energy, exergy efficiency, low vacuum heating

流化床流动和燃烧特性对 SNCR 脱硝的影响研究 = **Effects of the Flow and the Combustion Characteristics of Circulating Fluidized Bed on SNCR Denitrification** [刊, 汉] WANG Wei, JIN Bao-sheng, WANG Xiao-jia, ZHANG Yong (Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, School of Energy and Environment (Southeast University), Nanjing, Jiangsu, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering