

CO₂ 气流对几种钢材的飞灰冲蚀磨损的试验研究

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: 参照燃煤电厂锅炉烟气中 CO₂ 气体的含量比例, 在试验气流中加入一定量的 CO₂ 气体, 利用热态飞灰磨损试验台进行温度在 250 ~ 500 °C 范围内电厂常用金属材料 20 碳钢、12Cr1MoV 合金钢及 15CrMo 合金钢的耐冲蚀磨损性能的试验研究。试验结果表明: 在试验温度范围内 3 种材料的相对磨损量保持了随温度的升高先减小后增大的热态磨损特性。同时, 加入 CO₂ 气流后 3 种金属材料的冲蚀磨损量均明显大于只含压缩空气环境下的相对磨损量, CO₂ 气体会加速金属的冲蚀磨损; 其中 12Cr1MoV 耐磨性能好于 15CrMo, 15CrMo 耐磨性能好于 20 碳钢。

关键词: 飞灰冲蚀磨损; CO₂; 金属材料; 燃煤锅炉

中图分类号: TK224.9 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.04.019

引言

飞灰冲蚀磨损是造成电厂锅炉“四管”爆漏的主要原因之一, 且这种冲蚀磨损是在具有一定腐蚀性的高温烟气流中进行的。锅炉受热面暴露于含各种气体的混合气氛中, 气流中各成分对材料冲蚀磨损性能会产生一定影响。燃煤在锅炉中燃烧后, 烟气中的主要成分有 CO₂、H₂O(g)、N₂、O₂ 和 SO₂ 等。其中 CO₂ 气体含量较大, 不可忽视其对锅炉金属材料冲蚀磨损的影响。文献 [1~3] 对电厂常用金属材料 20 碳钢、12Cr1MoV 合金钢及 15CrMo 合金钢的磨损性能在压缩空气流中进行了热态试验研究, 得到了一些有价值的热态磨损规律。然而, 烟气中大量的 CO₂ 气体到底对锅炉金属材料冲蚀磨损影响有多大, 业内还缺乏相关的研究。

对金属材料冲蚀性能的研究, 需要结合使用条件通过试验来确定。由于受冲蚀金属材料的工作环境往往是在一定高温下的腐蚀性氛围中, 人们逐渐开始关注金属材料的冲蚀腐蚀问题, 并认识到磨损

与氧化腐蚀的交互作用对金属材料的性能影响很大^[4-5]。金属材料冲蚀磨损的研究逐渐从“重磨损轻腐蚀”发展到重点研究材料磨损与氧化腐蚀的交互作用上来^[6-7]; 已知高温下金属表面产生的氧化膜对金属的磨损性能会产生很大的影响^[8-9], 因此混合气体中的高温氧化腐蚀是一个非常重要的问题。已有研究表明, 碳钢在 CO₂ 气氛下与空气下的抗氧化性能并不相同^[10-11]。其中温度对金属材料冲蚀磨损和氧化腐蚀均有重要影响, 这与高温下金属表面产生的多层氧化膜有关。

本研究参照一般燃煤电厂锅炉烟气中 CO₂ 气体的含量比例, 在试验气流中加入 CO₂ 气体, 使用热态飞灰磨损试验装置对 20 碳钢、12Cr1MoV 合金钢及 15CrMo 合金钢进行 250 ~ 500 °C 温度段的试验。通过与压缩空气流中的试验结果比较, 探究分析气流中 CO₂ 气体对电厂锅炉常用金属材料冲蚀磨损性能的影响。

1 试验系统及工况

1.1 试验系统

根据研究目的, 在只有压缩空气气源的试验台上增加了 CO₂ 气源管道及流量计, 以便试验时根据需要混入 CO₂ 气体。试验系统如图 1 所示。

该试验系统工作过程如下: 按设定的试验工况, 经计算后的 CO₂ 气体经转子流量测量后与压缩空气混合, 一起进入预热段加热后进入混合室。试验用的灰粒子经称量后装入灰斗, 灰斗下碟阀控制给灰量。灰落入混合室后与气流混合形成气固两相流体进入加速管段, 粒子则加速到最大可能的速度。加速管段用电炉加热使气固两相流体同时加热至所需

收稿日期: 2015-06-17; 修订日期: 2015-07-17

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。

温度后由加速管喷射出来进入试验段并以 30° 的冲刷角冲刷试件,造成磨损效果。之后,气固两相流体进入水冷式沉降式除尘器,在此,由于气流流动方向改变,在惯性力及重力的作用下,大部分的灰留在该除尘器中,气流携带少部分灰经布袋式除尘器除尘后排向大气。

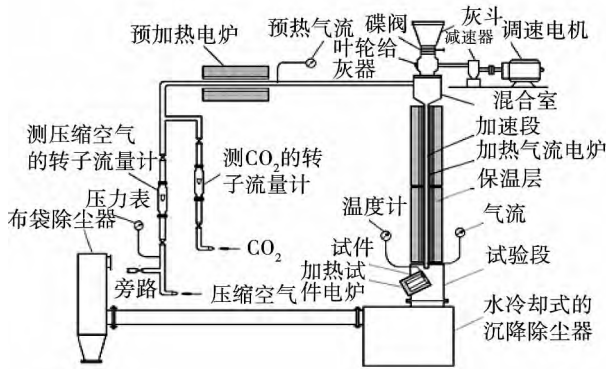


图 1 热态飞灰冲刷磨损试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the hot flying-ash erosion apparatus

试验试件用专门的加热电炉维持试验所要求的温度,试件中心设有温度测点。冲刷试验后的试件放入干燥器皿中冷却至常温时才取出称重,试件称重使用 1/10 000 g 精度的天平。试件的磨损量采用相对磨损量 $\Delta I = \Delta g / G$ mg/g, G 为用掉的灰的质量,即相对于每克灰冲蚀掉的金属量 (mg)。

1.2 试验工况

试件材料为 20 号碳钢、12Cr1MoV 合金钢及 15CrMo 合金钢,将其加工成尺寸为 $\phi 50 \times 4$ mm 的圆片。

试验用灰样取自某电厂实际运行中产生的煤灰,经粒度筛分分析试验,并计算求得其平均粒径为 112.8 μm 。每个试验工况用灰量为 2 000 g。

试验前,根据电厂几种常用煤种的含碳量,计算出烟气中 CO₂ 的含量比例,气流中混入 CO₂ 气体的量为 0.77 ~ 1.11 m³/h。在同一气流速度 100 m/s 下,20 号碳钢试件及气流温度分别控制在 250 ~ 450 °C 范围,每隔 50 °C 为一个试验点,共做 5 个试验工况点;12Cr1MoV 和 15CrMo 试件及气流温度控制在 250 ~ 500 °C 范围,每 50 °C 一个试验点,分别做 6 个试验工况点。

2 试验数据处理及试验结果

整理 20 号碳钢、12Cr1MoV 合金钢及 15CrMo 合金钢在含 CO₂ 气流环境下的试验结果数据,并与相同试验工况下压缩空气环境下的试验结果相比较^[1-3],如图 2、图 3、图 4 所示。在含 CO₂ 气流环境下 3 种材料的相对磨损量均随着试件温度的升高先减小后增大,中间存在一个临界温度点,这种磨损规律与它们在压缩空气流中热态规律相同。

根据数据点分布情况及其规律,对试验数据相对磨损量与试件温度 t 的关系进行非线性拟合,3 种材料对应的拟合方程分别为:

(1) 20 碳钢

$$\Delta I_{\text{CO}_2}^c = 0.1443 - 0.0006t + 4.8 \times 10^{-7}t^2 + 4.8 \times 10^{-10}t^3 \quad (1)$$

式中: $\Delta I_{\text{CO}_2}^c$ —20 碳钢在含 CO₂ 气流下的相对磨损量,mg/g。拟合公式(1)的相关系数 $R^2 = 0.9749$,拟合曲线如图 2 中曲线所示。根据公式(1)求得含 CO₂ 气流环境下 20 碳钢临界温度点在 370 °C 左右,比不含 CO₂ 气流的临界点温度 336 °C 提高了 34 °C。

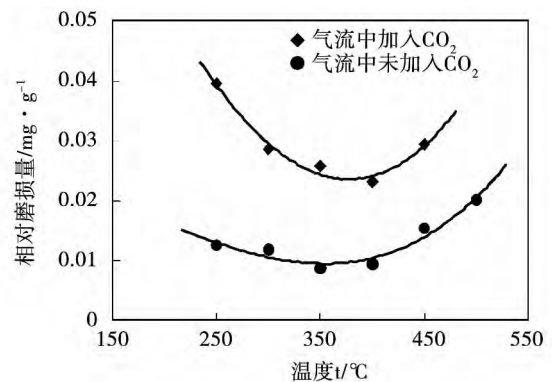


图 2 20 碳钢在两种不同气流环境中相对磨损量比较

Fig. 2 Comparison for the relative erosion rates of 20 carbon steel under two different air-flow environments

(2) 12Cr1MoV 合金钢

$$\Delta I_{\text{CO}_2}^r = 0.1831 - 0.0012t + 2.8 \times 10^{-6}t^2 - 2.1 \times 10^{-9}t^3 \quad (2)$$

式中: $\Delta I_{\text{CO}_2}^r$ —12Cr1MoV 在含 CO₂ 气流下的相对质量磨损量。拟合公式(2)的相关系数 $R^2 = 0.9926$,

拟合曲线如图 3 中曲线所示。根据公式 (2) 含 CO₂ 气流环境下 12Cr1MoV 临界温度点在 355 °C 左右, 与不含 CO₂ 气流的临界点温度 354 °C 仅差 1 °C。

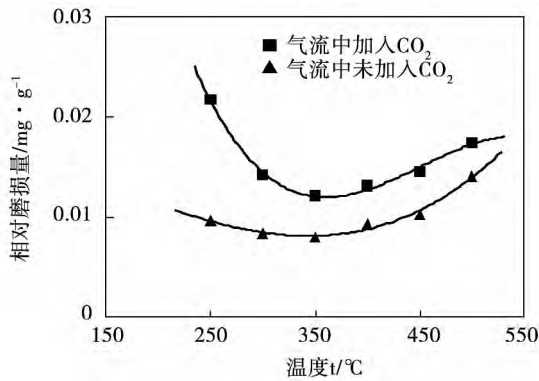


图 3 12Cr1MoV 在两种不同气流环境中相对磨损量比较

Fig. 3 Comparison for the relative erosion rates of 12Cr1MoV under two different air-flow environments

(3) 15CrMo 合金钢

$$\Delta I_{CO_2}^n = 0.1302 - 0.0008t + 1.9 \times 10^{-6}t^2 - 1.4 \times 10^{-9}t^3 \quad (3)$$

式中: $\Delta I_{CO_2}^n$ —15CrMo 在含 CO₂ 气流下的相对质量磨损量, mg/g。拟合公式 (3) 的相关系数 $R^2 = 0.8838$ 拟合曲线如图 4 中曲线所示。根据公式 (3) 求得含 CO₂ 气流环境下 15CrMo 临界温度点在 335 °C, 比不含 CO₂ 气流的临界点温度 427 °C 降低了 92 °C。

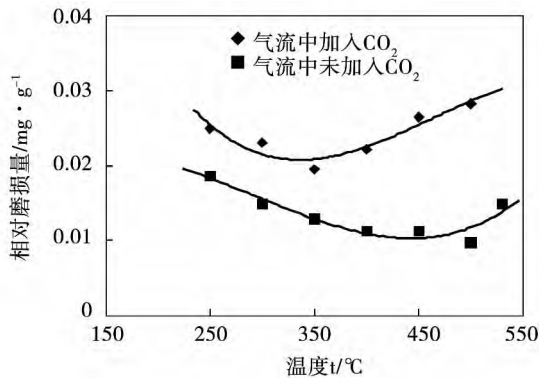


图 4 15CrMo 在两种不同气流环境中相对磨损量比较

Fig. 4 Comparison for the relative erosion rates of 15CrMo under two different air-flow environments

20 号碳钢、12Cr1MoV 及 15CrMo 合金钢呈现相同的热态磨损规律, 这与热态环境下试件表面的氧化膜有着密切关系。随着试验温度的升高, 试件表面首先会形成致密的氧化膜层, 氧化膜层会起到保护试件防止其磨损的作用, 但是当温度升高到一定值后氧化膜出现剥落将增加磨损量。与未加入 CO₂ 气流的压缩空气环境下的试验结果相比较, 加入 CO₂ 气流后 20 号碳钢、12Cr1MoV 及 15CrMo 的相对磨损量均有明显增加, 如表 1 所示。其中, 在含 CO₂ 气流环境下, 20 号碳钢的相对磨损量 $\Delta I_{CO_2}^c$ 是不含 CO₂ 气流环境下相对磨损量 ΔI^c 的平均约 2.59 倍; 12Cr1MoV 的相对磨损量 $\Delta I_{CO_2}^n$ 是不含 CO₂ 气流环境下相对磨损量的 ΔI^n 平均约 1.58 倍; 15CrMo 的相对磨损量 $\Delta I_{CO_2}^n$ 是不含 CO₂ 气流环境下相对磨损量 ΔI^n 的平均约 1.94 倍。CO₂ 气体产生影响的原因主要在于其会造成更强的氧化性氛围, 在含有 CO₂ 气体的氧化性气氛中金属的氧化速率远远高于在纯空气中的氧化速率。冲刷磨损会除去材料的表面, 使氧化形成的表面膜耗损或减薄, 抑制氧化膜的保护作用, 当反应产物被持续去除时, 氧化物又会迅速生成, 这样的交互作用导致了材料的快速流失^[12]。

表 1 3 种材料在加入和未加入 CO₂ 气流环境下的相对磨损量比较

Tab. 1 Comparison for relative erosion rates of three kinds of material in the air-flow with and without CO₂

温度 / °C	$\Delta I_{CO_2}^c / \Delta I^c$	$\Delta I_{CO_2}^n / \Delta I^n$	$\Delta I_{CO_2}^n / \Delta I^n$
250	3.16	2.26	1.34
300	2.42	1.70	1.55
350	2.96	1.53	1.52
400	2.47	1.32	1.96
450	1.92	1.42	2.34
500	—	1.24	2.91

3 材料的对比分析与讨论

将 20 号碳钢、12Cr1MoV 及 15CrMo 合金钢 3 种材料在含 CO₂ 气流环境下的磨损性能相比较, 如图 5 所示。

由图5可看出,在加入CO₂气流环境下3种试件的耐磨性能回归曲线在试验温度段的走势基本相同,在小于临界温度的温度段相对磨损量随温度升高而下降,在大于临界温度的温度段相对磨损量随温度升高而增大。整个温度段内3种金属材料的磨损量依次为20碳钢 > 15CrMo > 12Cr1MoV,即12Cr1MoV耐磨性能好于15CrMo,15CrMo耐磨性能好于20碳钢。在含CO₂气流环境下,15CrMo合金钢与12Cr1MoV合金钢的磨损曲线变化相对平缓,耐磨性能比较稳定。综合表1和图5可知,加入CO₂气流对20碳钢耐磨性能影响最大,15CrMo次之,对12Cr1MoV影响最小。

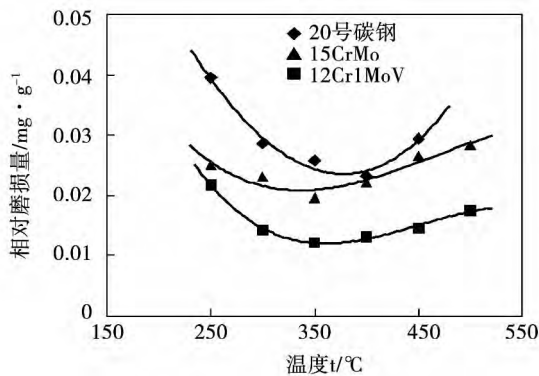


图5 3种金属材料在含CO₂气流环境下的相对磨损量比较

Fig. 5 Comparison for the relative erosion rates of three kinds of material in the air-flow with CO₂

冲蚀磨损直接造成金属退化的作用不显著,大多数冲蚀-腐蚀引起的金属材料高温退化是由于表面氧化膜的形成和去除^[11]。高温下工作的合金,其性能决定于显微组织的稳定性和表面氧化膜致密度以及它与基体母材间的结合情况。与氧化膜形成及生长速率高的合金相比,可形成长速率慢、具有保护性氧化膜的合金在冲蚀-腐蚀作用下能有较强的抗腐蚀冲蚀磨损的性能。已有研究发现,Cr合金体系中可发生碳通过保护性氧化膜渗入的现象。含Cr合金有更高抗碳渗透的能力,说明与含Fe氧化膜相比,Fe~Cr合金表面的Cr₂O₃膜是基体抗氧化更好的阻挡层。

4 结 论

(1) 在试验温度区域内,20号碳钢、12Cr1MoV及15CrMo合金钢3种材料在含CO₂气流环境下仍然符合热态磨损规律,即相对磨损率先随着温度的升高而减小,达到临界点温度后,随温度升高而增大。但是临界点温度点有变化,20号碳钢临界点温度点提高了34℃,15CrMo临界点温度点降低了92℃,12Cr1MoV临界点温度点仅相差1℃。

(2) 20号碳钢、12Cr1MoV及15CrMo合金钢在加入CO₂气流环境下的相对磨损量均明显高于它们在压缩空气气流环境下的相对磨损量,表明电站锅炉烟气流中的CO₂气体能够加速金属的冲蚀磨损。

(3) 12Cr1MoV耐磨性能好于15CrMo,15CrMo耐磨性能好于20碳钢。加入CO₂气体对20碳钢的耐磨性能影响最大,15CrMo次之,对12Cr1MoV影响最小。

参考文献:

- [1] 赵宪萍,孙坚荣,邹荣辉. 20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合金钢热态飞灰冲蚀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. 15CrMo合金钢热态飞灰冲刷磨损性能的试验研究[J]. 动力工程. 2000, 20(2): 645-649.
ZHAO Xian-ping, SUN Jian-rong. An experimental study of the hot flying-ash erosion of 15CrMo alloy [J]. Power Engineering, 2000, 20(2): 645-649.
- [4] Watson SW, Madsen BW, Cramer SD. Wear-corrosion study of white cast irons [J]. Wear, 1995, 181-183(2): 469-475.
- [5] Antonov M, Veinthal R, Huttunen-Saarivirta E, et al. Effect of oxidation on erosive wear behavior of boiler steels [J]. Tribology International 2013, 68: 35-44.
- [6] Sundararajan G. An analysis of the erosion-oxidation interaction mechanisms [J]. Wear, 1991, 145(2): 251-282.

[7] 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.

[8] 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.

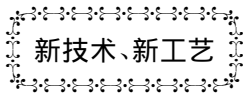
[9] 赵宪萍,徐开义,蒋伟元,等. 不同温度下金属氧化膜对灰磨损性能的影响 [J]. 华东工业大学学报. 1996 18(1): 73 - 79.
ZHAO Xian-ping, XU Kai-yi, JIANG Wei-yuan, et al. Effect of metal oxide film at different temperature on fly ash erosion [J]. Journal of East China University of Technology 1996 18(1): 73 - 79.

[10] 刘秀成,安成强,等. 金属腐蚀学 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2002.
LIU xiu-cheng, AN cheng-qiang et al. Corrosion science of metal [M]. Beijing: National Defense Industry Press 2002.

[11] 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 GH, Pettit FS. Introduction to the high-temperature oxidation of metals [M]. XIN Li, WANG Wen, Translation. Beijing: Higher Education Press 2010.

[12] 赵宪萍,朱崇武,孙坚荣,等. 含 CO₂ 气流对 20 号碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究 [J]. 热能动力工程. 2015 30(1): 78 - 80.
ZHAO Xian-ping, ZHU Chong-wu, SUN Jian-rong, et al. Experimental study on the influence of air-flow containing CO₂ on flying-ash erosion of 20 carbon steel [J]. Journal of Engineering and Power 2015 30(1): 78 - 80.

(姜雪梅 编辑)



Siemens 给潘达电力基金提供 SGT6 - 5000F 燃气轮机和 相关的联合循环设备

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2015 年 1 ~ 2 月刊报道, Siemens 将供应 2 台 SGT6 - 5000F 燃气轮机、具有 SCon - 4000 冷凝器的 1 台 SST6 - 5000 汽轮机、2 台 SGen6 - 1000A 发电机、1 台 SGen6 - 2000H 发电机和 2 台 NEM 管道外燃的余热锅炉, 用于在美国弗吉尼亚州利斯堡的潘达电力基金公司 778 MW 斯通沃尔能源项目。

SGT6 - 5000F 简单循环的技术规范和额定性能:

推出年份	ISO 基本负荷额 定功率/kW	热耗率 kJ/kWh	效率 %	压比	流量 kg/s	涡轮转速 r/min	排气温度 °C	大约的重 量/kg	大约的尺寸 L × W × H(长 × 宽 × 高) /m	说明
1989	208 000	8 998	38.1	17.2	507.1	3 600	578	192 780	10.1 × 4.0 × 4.0	用于 60 Hz 电力生产

基于 SGT6 - 5000F 组成的 SCC6 - 5000F1 × 1 联合循环的技术规范和额定性能:

推出年份	装置净输出 功率/kW	热耗率 kJ/kWh	装置净 效率/%	燃气轮机 功率/kW	汽轮机 功率/kW	燃气轮机 数量和型号	说明
1989	307 000	6 320	57.0	206 000	101 000	1 台 SGT6 - 5000F	三压 再热

(吉桂明 摘译)

at the end of structural model and formulas of spring constant were put forward. The matrix displacement method was adopted to solve beam-strip structural model and appropriate software was developed based on the model establishing and problem solving and used to analyze the effects of tubesheet thickness and structural bar. It indicates that tubesheet thickness and structural bar have significant effect on the results. Enlarging tubesheet thickness can dramatically lower the maximum stress of tubesheet, while enlarging spring constant can dramatically lower the maximum deformation of tubesheet and structural bar. **Key words:** condenser, tubesheet, stiffness-strength, mechanical model

CO₂ 气流对几种钢材的飞灰冲蚀磨损的试验研究 = **Experimental Study on Flying-ash Erosion of Steels in Air-flow Containing CO₂** [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(4). -112 ~ 116

The hot-state erosion-wear experiments of 20 carbon steel, 12Cr1MoV and 15CrMo alloy steel, which are commonly used in power boilers, were conducted at a temperature range of 250 °C ~ 500 °C and with the air-flow mixed with CO₂. The experimental results of all three kinds of materials under study show that the relative erosion rate decreases first and then increases as the temperature rises. Under the interaction between the oxidation corrosion and erosion, the injection of air-flow containing CO₂ gas significantly accelerates the erosion wear in 20 carbon steel, 12Cr1MoV and 15CrMo alloy steel. The erosion resistant performance of 12Cr1MoV is better than 15CrMo, and 15CrMo is better than 20 carbon steel. **Key words:** Flying-ash erosion, CO₂, Metals, coal-fired boiler

平板式太阳能集热器稳态热性能数值模拟研究 = **Numerical Simulation of Steady-state Thermal Performance for Flat Plate Solar Energy Collector** [刊 汉] SUN Ke-liang, ZHU Yue-zhao, YANG Mou-cun (The College of Energy, Nanjing Tech University, Nanjing, China, Post Code: 211816) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4). -117 ~ 126