

关于齿轮磨合运转工况的研究

杜鸿家 赵建平

(哈尔滨船舶工程学院)*

[摘要] 本文阐明舰船动力装置的优质磨合有利于充分发挥其动力性、经济性及使用寿命的潜力。目前磨合试车大纲大多采用分级磨合工况,这是否有利于实施快速优质磨合运转?对此,笔者以动力装置中的主传动齿轮为对象,分别对软硬齿面进行模拟试验研究,介绍了试验内容与方法,得出有关使用分级磨合工况局限性的结论。

关键词 齿轮 磨合 模拟试验

分类号 TH117

1 前言

机械摩擦副的工作表面与初始工艺表面性质有很大差异,这差异出现在磨合运转前后。优质磨合不仅可以修正制造与安装时的误差,而且可以发挥装置在动力性、经济性及使用寿命方面的最大潜力。不正确的磨合,有可能把人们在设计制造和安装过程中为提高机器性能所做的全部努力化为泡影。因此,磨合运转对于舰船动力装置是必要的。

摩擦表面性质从初始状态过渡到使用状态的过程叫做磨合。在该过程中不仅只有众所周知的宏观磨合作用(即用以改正摩擦副表面相对形状位置误差,从而提高接触精度的作用),而且还发生摩擦表面层微观结构(包括几何形貌、金属组织性能、各种表面摩擦化学膜)的变化。由微观磨合作用导致摩擦副工作状态变化:两表面微凸体之间的塑性接触转变成弹性接触;润滑状态改善;热平衡

温度降低^[1,2]。

目前在舰船动力装置的制造、修理及使用单位,动力机通常是与其齿轮减速器联在一起磨合运转。实践证明,实施迅速优质磨合运转的关键之一是磨合工况的合理安排问题。这也是国内外长期以来未获科学定论的问题。查阅国内许多磨合试车大纲(许多厂是把出厂前的磨合运转与‘试车’工序合二而一,称‘磨合试车’)时发现,虽然磨合规范各不相同,但却有从空车到负荷运转、从部分负荷分级增加至全负荷的共同规律。典型的负荷分级依次为额定负荷值的25%、50%、75%、100%。国外也多采用分级磨合规范^[3]。一律如此分级是否有利于获得快速、优质的磨合效果?这是本文着重研究的问题。各种机械摩擦副的磨合有许多共性,但因工作条件的差异而各有特性。由于国内极少研究实属重要的齿轮磨合技术,所以本文以齿轮磨合作为具体研究对象。

* 哈尔滨船舶工程学院改名为 哈尔滨工程大学

收稿日期 1994-01-25 修改定稿 1994-03-06

本文联系人 赵建平 女 54 副教授 150001 哈尔滨市南岗区文庙街

2 模拟试验

本试验分别以某舰的一对软齿面齿轮及某艇上一对硬齿面齿轮作为模拟对象。关于模拟准则与模拟条件,笔者另文专述^[4]。

2.1 试验装置与试件

通过 M-200 磨损试验机上的一对圆柱滚子试件,模拟滚滑接触的一对渐开线齿廓摩擦副,装置如图 1。上试件位于摆动机座上,受法向力 P 作用与固定机座上的下试件压紧接触。上、下试件轴的转速比 $\frac{n_{\text{下}}}{n_{\text{上}}} = \frac{10}{9}$ 。试件用 N46 机械油润滑。试验机专有机法测量并记录上下试件之间摩擦力矩 M_f 的装置。据 $f = \frac{2M_f}{Pd_{\text{下}}}$ (式中 $d_{\text{下}}$ 为下试件直径) 计算相应摩擦系数 f 。用滑环—电刷—热电偶测温系统测量下试件温度。2 个热电偶分别埋入摩擦表面之下位于 $\varnothing 50$ 圆周上、相隔 180° 的 2 个小孔内。

根据前述模拟对象、试件分为硬—硬及软—软两种材料配伍,且以不同试件尺寸模拟不同的滑滚比。试件设计参数如表 1 所示。

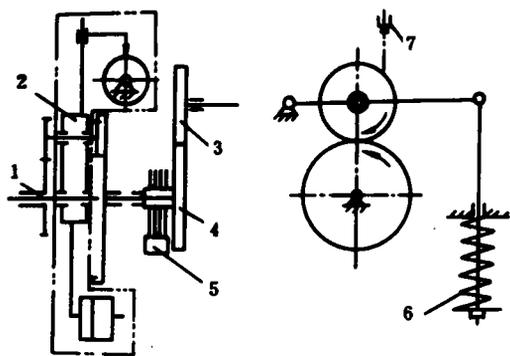


图 1 试验装置

- 1. 动力输出齿轮 2. 摩擦力矩测量装置 3. 上试件
- 4. 下试件 5. 测温装置 6. 加载弹簧 7. 滴油装置

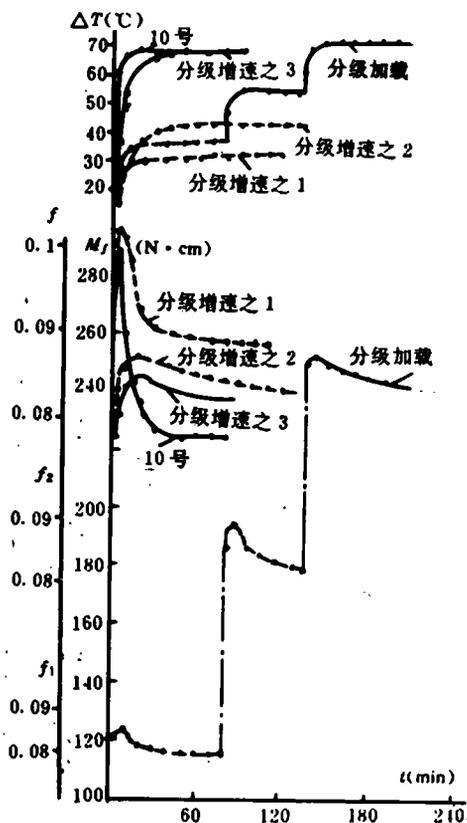


图 2 硬试件各试验的 $M_f(f)$ 及 ΔT 随时间变化曲线

2.2 试验内容与方法

用软、硬试件分别作三种磨合工况之间的对比试验。3 种工况是:

2.2.1 基本工况(不变工况): 试件磨合过程的载荷及转速始终不变。硬试件为 10 号试验 ($P = 1000 \text{ N}, n_{\text{下}} = 760 \text{ r/min}$)。软试件为 15 号试验 ($P = 500 \text{ N}, n_{\text{下}} = 760 \text{ r/min}$)。

2.2.2 分级增速: 无论软、硬试件, 下试件转速 $n_{\text{下}}$ 均以基本工况转速 n 值的 55%、83%、100% 依次分三级增速。各分级工况参数列入表 2。载荷不变, 与基本工况相同。

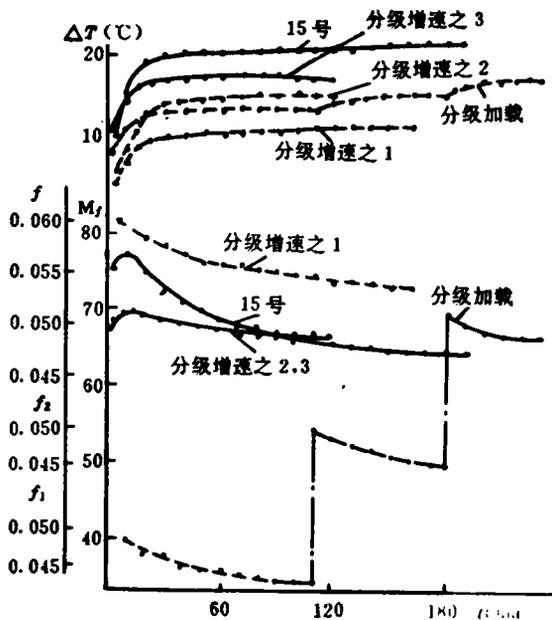


图 3 软试件各试验的 $M_f(f)$ 及 ΔT 随时间变化曲线

2.2.3 分级加载: 硬试件以基本工况载荷 P 的 50%、75%、100% 依次分级加载。软试件

以基本工况载荷 P 的 60%、80%、100% 依次加载。各分级工况参数列入表 3。转速与基本工况相同。

以试件之间稳定摩擦力矩 M_f 及相应摩擦系数 f 、摩擦表面粗糙度 R_a (由 BCJ-2 型电动轮廓仪测量)、试件温升稳定值 ΔT 及有效磨合时间 t_m 与 t_r (自磨合运转开始至 M_f 、 ΔT 分别达到稳定平衡为止的历时) 作为试验指标参数, 用以评价磨合效果。分级磨合均以 M_f 及 ΔT 达平衡之后才转入下一级工况。分级加载是在不停机的条件下改变工况; 分级增速则是停机之后, 冷机起动开始下一级工况。

2.3 试验结果

2.3.1 软、硬试件变工况磨合试验的各项指标参数分别列入表 2 与表 3。图 2 与图 3 分别绘出分级增速、分级加载磨合工况中三项指标参数随运转时间而变化的规律。须说明: 两图中的分级加载试验, 其 1、2 级载荷值与同坐标中其余曲线的载荷值不同, 故其 f 坐标不可通用, 另标以 f_1 、 f_2 ; 图 4 与图 5 分别绘出分级增速、分级加载磨合工况中三项指标参数随工况分级而变化的规律。

表 1 试件设计参数

试件种类	材料及热处理	表面硬度	强度极限 (MPa)		外圆直径 (mm)		接触宽度 B (mm)	滑滚比 S
			屈服 σ_s	接触 σ_{Hlim}	d_F	d_U		
硬—硬	20CrMnTi 渗碳淬火	HRC54 ~ 62	≥ 785	1200	58.2	41.8	8	0.43
软—软	45 钢 调质	HB195 ~ 210	380	540	54.4	45.6	8	0.28

注 1. 滑滚比 $S = \frac{\Delta u}{u} = \frac{u_F - u_U}{\frac{1}{2}(u_F + u_U)}$, u_F 、 u_U 分别为下、上试件的圆周速度

2. B 是上、下试件之间的有效接触宽度

2.3.2 硬试件三种磨合工况的试验结果一并列入表 4。

分析 10 号试验的载荷与速度条件:

$P = 1000 \text{ N}$ 时, 两试件之间的理论接触应力 $\sigma_H = 637 \text{ N/mm}^2$, 若乘以载荷系数 1.15 可得 $\sigma_H = 733 \text{ N/mm}^2$ 。由表 1 可知这是该表面被

限接触应力 σ_{Hlim} 的 61% (齿面最大工作应力小于 σ_{Hlim}), 是材料屈服极限下限值的 93%。试件圆周速度 $u_T = 2.316 \text{ m/s}$ (模拟齿面切向滚动速度), 相当于齿轮节线速度约 7 m/s。在此载荷与速度条件下, 试件达到热平衡的温升 $\Delta T = 67.5^\circ\text{C}$ 。

据表 4 可见: 两种分级磨合工况终了时的 f 与 R_s 基本相同; 分级加载比分级增速的有效磨合时间缩短约 40%, ΔT 略高 (约 5%)。10 号试验的各项试验指标都不次于两种分级磨合, 特别是有效磨合时间 $t_M = 50(\text{min})$ 只是分级增速磨合的 1/5、分级加载

磨合的 1/3, 具有明显优越性。这说明在本试验的载荷、速度条件下, 没有必要采用分级磨合。载荷与速度增加到何种程度就需要分级? 有待进一步试验研究。仅据本试验可以肯定: 即使磨合工况需要分级, 其初始级的载荷 (在相应的试件参数条件下) 不应该低于 10 号试验的载荷值。因为过低的初始载荷 (有相应过低的 f 及 ΔT) 产生了不利于磨合的条件, 由此推知, 空载磨合是没有根据的, 只具有 ‘空车试车’ 的效果。

2.3.3 软试件三种磨合工况的试验结果列入表 5。

表 2 分级增速磨合过程

试件		载荷 $P(\text{N})$	速 度					稳定摩擦参数		温度($^\circ\text{C}$)		磨合时间(min)			
种类	编号		$n_L(\frac{\text{r}}{\text{min}})$	$n_T(\frac{\text{r}}{\text{min}})$	$u_L(\frac{\text{m}}{\text{s}})$	$u_T(\frac{\text{m}}{\text{s}})$	$\Delta u(\frac{\text{m}}{\text{s}})$	$M_f(\text{N}\cdot\text{m})$	f	室温 T_0	ΔT	t_M	t_T		
硬	67/75	1000	378	420	0.827	1.28	0.453	2.57	0.0883	12°	32.2	80	85		
			567	630	1.24	1.92	0.68	2.4	0.0825		53	115		合计 245	125
			684	760	1.497	2.316	0.819	2.38	0.0818		68	50			
软	20/48	500	378	420	0.9	1.2	0.3	0.731	0.0537	11.8°	11	155	155		
			567	630	1.35	1.79	0.44	0.67	0.0492		15	65		合计 320	85
			684	760	1.63	2.16	0.53	0.662	0.0486		17.2	100			

表 3 分级加载磨合过程

试件		转速 $n(\text{r}/\text{min})$	载 荷		稳定摩擦系数		温度($^\circ\text{C}$)		磨合时间(min)		
种类	编号		$P(\text{N})$	$\sigma_H(\text{MPa})$	$M_f(\text{N}\cdot\text{m})$	f	室温 T_0	ΔT	t_M	t_T	
硬	60/79	684(上) 760(下)	500	450	1.13	0.0776	14.2	37	55	70	
			750	552	1.79	0.082		54.9	30	25	合计 150
			1000	637	2.42	0.083		71.6	65	55	
软	6/42	684(上) 760(下)	300	346	0.34	0.0416	13.8	13.4	85	65	
			400	399	0.497	0.0456		15.5	55	50	合计 180
			500	446	0.665	0.0488		17.1	40	40	

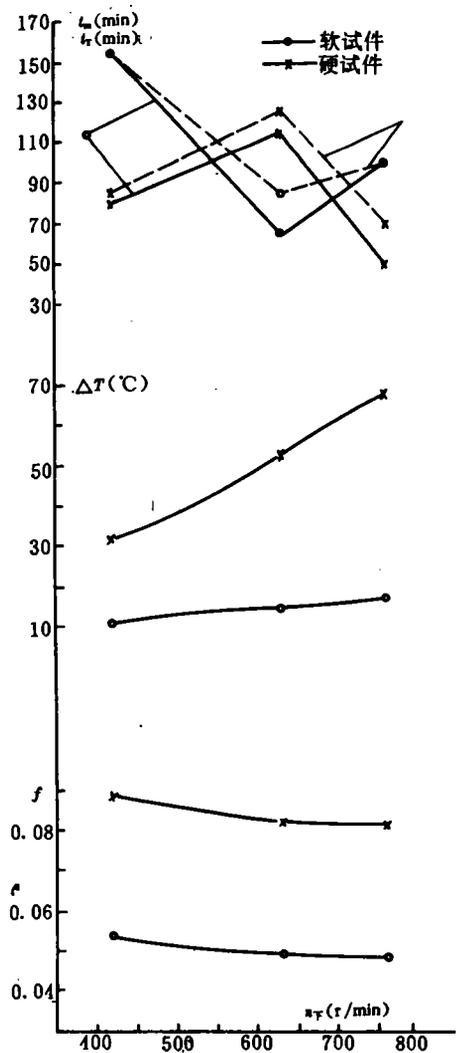


图 4 分级增速磨合指标参数

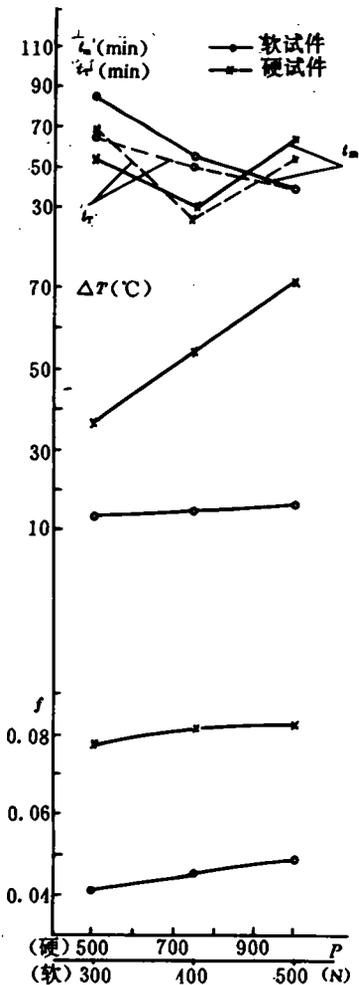


图 5 分级加载磨合指标参数

表 4 硬试件三种磨合工况的指标参数

指标参数 试验名称 (试件编号)	磨合时间(min)			稳定摩擦系数		温度(°C)		表面粗糙度 R_a (μm)	
	t_m	t_r	总运行时间	$M_f(N \cdot m)$	f	室温 T_0	ΔT	磨合前	磨合后
10号试验($\frac{56}{86}$)	50	30	90	2.24	0.077	15	67.5	$\frac{0.284}{0.384}$	$\frac{0.154}{0.239}$
分级增速($\frac{67}{75}$)	累积 245	累积 280	335	2.38	0.0818	15.3	68	$\frac{0.346}{0.425}$	$\frac{0.2}{0.28}$
分级加载($\frac{60}{79}$)	累积 150	累积 150	230	2.42	0.083	14.5	71.6	$\frac{0.321}{0.367}$	$\frac{0.2}{0.275}$

表5 软试件三种磨合工况的指标参数

指标参数 试验名称 (试件编号)	磨合时间(min)			稳定摩擦系数		温度(°C)		表面粗糙度 $R_a(\mu\text{m})$	
	t_m	t_r	总运行时间	$M_f(N \cdot m)$	f	室温 T_0	ΔT	磨合前	磨合后
15号试验($\frac{14}{45}$)	160	135	195	0.64	0.047	14	22	$\frac{0.41}{0.51}$	$\frac{0.16}{0.26}$
分级增速($\frac{20}{48}$)	累积 320	累积 340	415	0.662	0.0486	13	17.2	$\frac{0.41}{0.39}$	$\frac{0.28}{0.281}$
分级加载($\frac{6}{42}$)	累积 180	累积 150	230	0.665	0.0488	14	17.1	$\frac{0.634}{0.38}$	$\frac{0.154}{0.228}$

分析 15 号试验的载荷、速度条件： $P = 500 \text{ N}$ 时，两试件间的接触应力 $\sigma_H = 440 \text{ N/mm}^2$ ，若乘以载荷系数 1.1，则 $\sigma_H = 484 \text{ N/mm}^2$ ，由表 1 可知这是极限应力 σ_{Hlim} 的 90%，是 σ_s 的 127%，与下试件圆周速度 2.16 m/s 相应的齿轮节线速度约 6.5 m/s。在此载荷、速度条件下，试件热平衡时温升 $\Delta T = 22^\circ\text{C}$ 。

由表 5 可见：① 两种分级磨合工况相比，终了时的 f 、 ΔT 值相同，磨合后 R_a 及有效磨合时间均以分级加载过程更佳，磨合时间缩短 44%。② 15 号试验除 ΔT 明显高于另两种磨合工况之外，其余三项指标均不差。 ΔT 是影响表面胶合失效的重要因素；磨合过程

中过高的 ΔT 值将造成表面的早期失效，但是在本模拟试验条件下，软试件试验的 ΔT 值较低，不构成胶合失效的威胁。

2.3.4 为了进一步考核磨合之后工作表面的承载能力，又进行一组超载对比试验。其一，使用 15 号试验之后的 14/45 号软试件；其二，使用未经磨合的 13/49 号软试件。两试验工况相同，如表 6 所示。在此 1000 N 载荷下，乘 1.1 载荷系数之后的工作应力已经达到极限接触应力的 128%，远超过设计承载能力。试验结果表明：14/45 号试件表面无任何异常；13/49 号试件表面材料发生明显塑性流动。其余各项试验指标参数列入表 6

表6 软试件超载对比试验

试件编号	转速	载 荷		稳定摩擦系数		温度(°C)		粗糙度 $R_a(\mu\text{m})$	
	$n_T(r/min)$	$P(N)$	理论 $\sigma_H(MPa)$	$M_f(N \cdot m)$	f	T_0	ΔT	试验前	试验后
$\frac{14}{45}$	760	1000	631	1.4	0.051	14	23.8	$\frac{0.18}{0.26}$	$\frac{0.19}{0.27}$
$\frac{13}{49}$	760	1000	631	1.42	0.052	13	25.5	$\frac{0.454}{0.557}$	明显塑性变形

3 结论

1 在本系列模拟试验中，工作接触应力

不超过极限应力 60% 的中速硬齿面，采用前述不变磨合工况的磨合效果优于分级工况的效果。尤其磨合时间一项，不变工况更为优

越。对高速重载条件时采用分级磨合的必要性,有待进一步试验。但是可以肯定:即使需要分级磨合时,初始级载荷低于 60% 额定载荷将不利于实现快速优质磨合;空载磨合更无益。

2 工作接触应力接近极限应力值的调质 45 钢软齿面,采用分级磨合工况时,试件温升较之不变工况明显降低,其余指标未显优越性。在本试验中,即使以接近极限接触应力的载荷进行不变工况磨合之后,仍可提高承载能力。

3 本系列试验是以齿轮摩擦副为模拟对象的模拟磨合试验。虽然通过合理模拟准则和模拟条件,仍无法克服模拟试验的局限

性;尤其是热状态模拟。所以本试验结论仍有待齿轮减速器实机试验的验证。

参 考 文 献

- 1 赵建平,杜鸿家.论我国机械工业中的磨合技术.机械工程,1987,(5),23~24
- 2 杜鸿家,赵建平.机械磨合过程的机理及控制技术研究.机械工程,1988,(4),23~25
- 3 Baglin L P, Finnis M P, Kelly D A. Mixed and micro-elasto-hydrodynamic lubrication and the dependence on operating conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, International Conference, 1987(5)
- 4 杜鸿家,赵建平.渐开线齿面摩擦学模拟试验方法探讨.热能动力工程,1990,(5),32~35

封面说明

一 体 化 除 氧 器

哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所引进、消化国外先进技术,先后于 1992 年和 1993 年研制出力为 100 t/h、175 t/h 和 420 t/h 一体化高、低压除氧器。一体化除氧器是目前世界上先进的除氧设备,它已在欧洲发达国家广泛应用。这种除氧器是把全部除氧机构设置在存水箱内,取消了常规除氧器中的除氧头,从而大大减少除氧器的空间尺寸(特别是高度尺寸)和金属耗量,具有结构紧凑、重量轻、除氧效果好等优点。

一体化除氧器是利用特殊自调式喷水装置将进入除氧器的给水雾化并喷入水箱内进行一次除氧,然后给水在水箱内用蒸汽加热和鼓泡的方法进行二次除氧,系统中各种高参数的汽水进口管系可接入存水箱不同的温度区间内进行混合加热利用。这种除氧器可保证各种不同负荷下给水出口含氧量均不超过规定的要求。

该研究所可设计或承包供货出力从 50 t/h 至 100 t/h 各种规格系列化除氧器产品(含特殊自调式喷水装置)。

一体化除氧器用户统计表

时间	用 户	台 数	出 力 (t/h)	设计压力 (MPa)	除氧水含氧量 (mg/l)
1992 年	巴基斯坦费萨拉巴德联合循环电站	1	175	0.7	≤0.005
1992 年	巴基斯坦柯特里联合循环电站	1	175	0.7	≤0.005
1993 年	大庆石化总厂自备热电厂	1	420	0.05	≤0.007

服务方式:产品设计、制造、供货、现场调试

联系地址:哈尔滨市香坊区公滨路 452 号

通讯处:150036 哈尔滨 77 信箱 3 分箱 肖福田 电 话:(0451)5662882 转三室

电 传:87157 HMBTR CN 电 挂:6511 传 真:5662885

Based on the measured data of a circulating fluidized bed combustion boiler of various capacity and previous study results, the authors propose an equation for calculating the distribution of pressure drop along the furnace height, thus making it possible to calculate the distribution of solid concentration along the bed height, which can serve as a direct basis for the furnace design. Key words: circulating fluidized bed boiler, pressure drop distribution, axial solid concentration

煤热解的反应动力学研究 = A Study on Coal Pyrolysis Reaction Dynamics [刊, 中] / Xu Yuenian (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -154-157

A great deal of experimental research work on coal pyrolysis was performed by using a TGA92 thermoanalyser of French make. The factors affecting coal pyrolysis were discussed. On the basis of the thermal analysis results the equation of coal pyrolysis dynamics and its relevant parameters were determined. finally, an in-depth exploratory study was conducted of the pyrolysis reaction rate, a key factor for the pyrolysis furnace productivity. Key words: thermogravimetry, derivative thermogravimetry, differential thermal analysis

CFBC 锅炉内多重内循环燃烧技术研究与应用 = The Research and Application of Multiple In-furnace Circulating Combustion Technology for a CFBC Boiler [刊, 中] / Jiang Xiumin, et al (Northeastern Institute of Electric Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -158-161, 185

The principle and structure of multiple in-furnace circulating combustion technology of a CFBC boiler comprising inner circulating combustion technology of furnace lower portion dense-phase region and circulating combustion technology of furnace upper portion rare-phase region are discussed in the present paper. The circulating fluidized bed boiler, based on the above-cited technology, has the following advantages: high efficiency, small space, low cost, light wear, low power consumption, stable and simple operation and a wide range of load adjustment capability as well as a high adaptability to the burning of various coals. In view of the foregoing it pertains to an ideal type of industrial circulating fluidized bed boiler. Its long-term operation has proved that the multiple in-furnace circulating combustion technology is ideally suited for industrial circulating fluidized bed boilers of small and low-height combustion space. Key words: CFBC boiler, combustion technology, circulating combustion, structural optimization

加旋流化床颗粒扬析规律的试验研究 = An Experimental Study of the Elutriation Mechanism of Vortexing Fluidized Bed Particles [刊, 中] / Liu Kunlei, Jin Baosheng, Zhao Changsui, et al (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -162-167

With the fly-ash falling off from a fluidized bed serving as test material a systematic study of the elutriation mechanism of fluidized bed particles was conducted on a vortexing fluidized bed test stand with a cross-section area of $0.285\text{m} \times 0.285\text{m}$, a height of 6 m and heat input of 0.3 MW. The test results have shown that the elutriation rate constant of the particles in the vortexing fluidized bed is considerably lower than that of a conventional bubble bed. However, there exists a great difference between the elutriation behavior of fly-ash in the vortexing fluidized bed of rectangular section and that of glass balls in a vortexing bed of circular section. Under the same particle size and operating conditions the former has a significantly greater elutriation constant than the latter. The separation characteristics of the secondary air in the vortexing fluidized bed suspension space is also somehow different from that in a cyclone separator. Key words: fluidized bed boiler, coal, particle, elutriation rate

关于齿轮磨合运转工况的研究 = A Study on the Running-in Operating Mode of Gears [刊, 中] / Zhao Jianping, Du Hongjia (Harbin Shipbuilding University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -168-174

The authors hold that the high-quality running-in of a naval propulsion plant can be conducive to fully tapping its potential in respect of performance, economics and service life. Currently, a classified running-in is generally adopted in all running-in trial-run programs. Is this beneficial to the realization of a rapid and high-quality running-in? In this regard, the authors with the main transmission gear taken as an object of investigation have conducted separately simulation tests of the soft and hard tooth flanks. This paper presents the test method and other details along with the conclusion that the use of the classified running-in operating mode has its limitations. Key words; gear, running-in, simulation test

用单片机实现水蒸气性质图表的电子化=Electronic Data Processing of Steam Tables Through the Use of a Single Chip Processor[刊,中]/Hu Niansu et al(Wuhan University of Electric Power & Water Resources)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -175-178

By the use of a single chip processor an electronic device for making available steam property data has been developed, which features ease of use and high precision and can fully replace conventional steam property diagrams. The paper also describes its specific features, functions, hardware and software design, etc. Key words; single chip processor, steam properties, diagram, electronic computerization

水煤浆管内流动流量测量的研究=A Study on the Flow Rate Measurement of Coal Water, Mixture Flowing in Circular Pipes[刊,中]/Meng Lingjie, Qin Xiameyan, Zhang Mingyao(Shandong Polytechnical University, Southeastern University)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -179-182

Proceeding from the investigation of a rheological model of coal water mixture(CWM), the authors have studied the Venturi tube-based CWM flow rate measuring technique through the use of a method combining theoretical analyses with experimental investigation. On the basis of the analysis of CWM flow characteristics in the Venturi test tube a criteria equation for the Venturi tube flow rate correction factor has been derived by using the method of dimensional analysis. Through experiments an empiric formula for measuring CWM flow rate by the Venturi tube is also obtained. It has been shown that the accuracy of the formula is satisfactory in the experimental range. Key words; coal water mixture, rheological model, Venturi tube, flow rate measurement

圆柱型磁电式转速传感器的压力特性及试制=On the Voltage Characteristics of a Cylindrical Electromagnetic Type Speed Sensor[刊,中]/Chen Yanfen(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -183-185

Key words; sensor, electromotive force, amplitude characteristics, fabrication, commissioning test

Edited and Published by Harbin Marine
Boiler & Turbine Research
Institute and Editorial Staff
of this Journal

Printer: Printing House of Harbin Institute
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin China

Post Code Number 150036

Periodical Registration: ISSN1001-2060
CN23-1176/TK

Distributed by China International

Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China