

TA₅ 钛合金低循环疲劳特性试验研究

秦广义 魏武 谭泓

(哈尔滨七〇三研究所)

【摘要】 对特定规格 TA₅ 钛合金环件取样进行低循环疲劳试验研究,得到疲劳寿命曲线和应变寿命关系式。考虑适当的安全系数给出了 TA₅ 钛合金的设计疲劳曲线并分析了应力循环硬/软化特性。最后通过有限元应力分析,论述该深潜冷凝器主要承压部件采用单金属 TA₅ 钛合金代替以往双金属结构后将大大提高使用寿命。

关键词 钛合金 疲劳曲线 应力分析 冷凝器

分类号 O346.2 TB302.3

1 前言

某艇深潜冷凝器(以下简称冷凝器)的功用是接受主汽轮机排汽,同时又接受其它辅机的排汽和疏水热负荷,并将蒸汽全部冷凝成凝结水,建立和维持冷凝器的高度真空,保证主机正常工作。

该冷凝器结构复杂且工作载荷交变反复,极有可能由于不连续部位的应力和应力集中区的循环高应变引起疲劳破坏。所以应该采用高应变低循环疲劳性能数据进行疲劳寿命分析。冷凝器作为某艇的重要设备之一,其主要承压部件采用 TA₅ 钛合金材料,可靠性要求很高。本文针对 TA₅ 钛合金的低循环疲劳特性进行试验研究并据此对冷凝器主要承压部件的疲劳寿命进行分析。

2 试验材料及试验条件

冷凝器用 TA₅ 钛合金为 α 型钛合金,化

学成分见表1。根据这一化学成分,通过专门工艺试制出特种规格的钛合金轧环件。环件的试样在精加工前进行退火处理的温度—时间曲线见图1。

表1 钛合金环件的化学成分

C	Si	Al	Fe	N	O	B	Ti
0.03	0.03	4.0	0.1	0.026	0.08	≤0.005	基

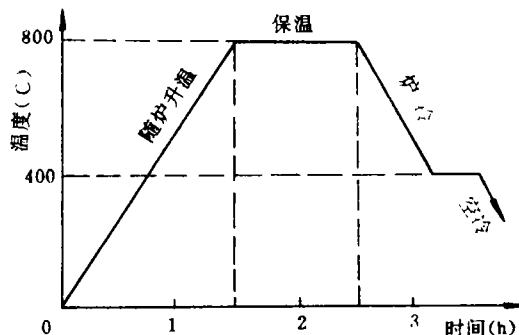


图1 温度—时间曲线

收稿日期 1994-07-08

TA₆ 钛合金的常规力学性能见表 2。其显微组织为单相 α 组织,沿弦向拉长,如图 2 所示。

试样取向为弦向,均位于环件内侧,试样采用 $\phi 6$ 标准轴向加载低循环疲劳试样,外形尺寸见图 3。

表 2 钛合金环件常规力学性能

σ_b (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_s (%)	δ (%)	E (GPa)	α_k (J/cm ²)	μ
680	585	16.7	49.7	125.4	> 58.85	0.34

低循环疲劳试验按 GB6399 - 86《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》进行,试验设备为 Mayes-50E 电液伺服疲劳试验

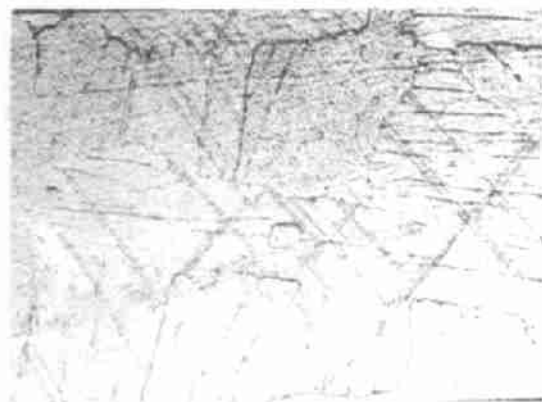


图 2 TA₆ 钛合金环件的显微组织(400 ×)

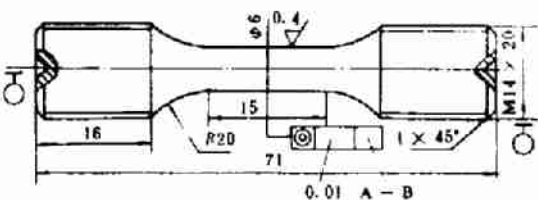


图 3 低循环疲劳试样图

机,试验环境为室温、大气条件。采用轴向拉—压恒定总应变闭环控制,应变比 $R_e = -1$,应变速率 $\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{-3}/s$,循环载荷为三角波形,应变由夹持在试样轴向上的引伸计测控。循环应力应变曲线采用单试样增级法测定。

3 试验结果及分析

3.1 循环加载应力应变曲线及循环硬/软化特性

金属材料在循环载荷作用下,一般都会发生不同程度的循环硬化或软化现象。对光滑试样进行的单试样增级循环加载和单调静拉伸试验结果表明,材料当应变幅小于 0.3% 时无明显的软化和硬化,当应变幅超过 0.3% 后则表现出循环软化特征,见图 4。这种循环特征在冷凝器的疲劳设计中应给予重视。

3.2 低循环疲劳应变寿命关系

虽然低循环疲劳的本质可归因于塑性应变循环累积损伤,但是控制塑性应变的疲劳试验较复杂,一般采用控制总应变幅的方法进行疲劳试验。测定不同总应变幅 $\Delta \epsilon_t/2$ 下的失效反向次数 $2N_f$,并作图得到 $\Delta \epsilon_t/2 \sim 2N_f$ 曲线,如图 5 所示。

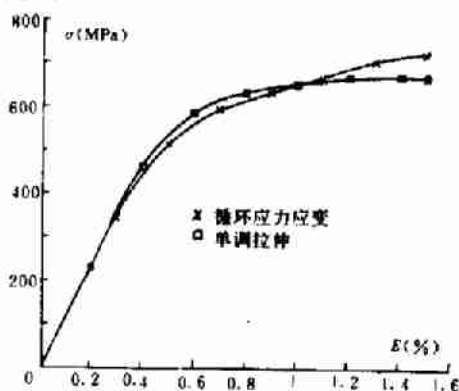


图 4 单调拉伸与循环应力应变曲线

由于总应变幅可以分成弹性应变幅和塑性应变幅两部分,即 $\Delta \epsilon_t/2 = \Delta \epsilon_e/2 + \Delta \epsilon_p/2$,所以在双对数坐标中, $\Delta \epsilon_t/2 \sim 2N_f$ 曲线可分解成两条直线,一条是弹性线,另一条是塑性线,它们的交点对应寿命 $2N_f$ 为转变寿命。在小于 $2N_f$ 的较短寿命区,塑性应变分量对疲劳损伤起主要作用,即此时的低循环疲劳性能主要取决于疲劳延性性能,用疲劳延性系数 ϵ'_t 和疲劳延性指数 C 来表征。

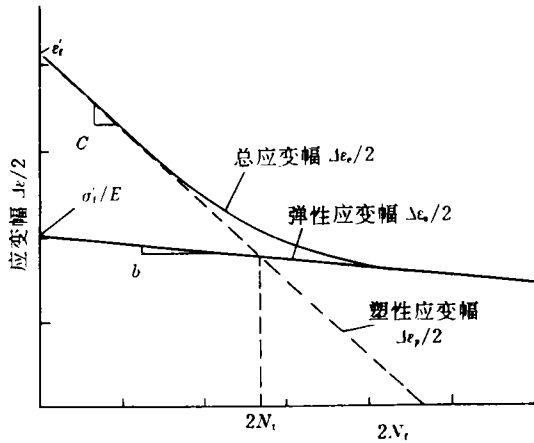


图 5 应变—寿命关系

Manson-Coffin 塑性应变幅与寿命关系为^[1]:

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_t (2N_f)^c \quad (1)$$

在寿命大于 $2N_f$ 的较长寿命区,弹性分量对疲劳损伤起主要作用,即此时的低循环疲劳性能主要取决于疲劳强度特性,用疲劳强度系数 σ'_t 和疲劳强度指数 b 来表征。

此时应变幅与寿命之间的关系为:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_t}{E} (2N_f)^b \quad (2)$$

总应变幅与寿命之间的关系为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \epsilon_t}{2} &= \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma'_t}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_t (2N_f)^c \end{aligned} \quad (3)$$

对所得低循环疲劳试验结果用最小二乘法进行拟合,可得到 TA5 钛合金环件应变疲劳中值寿命表达式如下:

$$\text{弹性线} \quad \Delta \epsilon_e/2 = 0.01052(2N_f)^{-0.09717} \quad (4)$$

$$\text{塑性线} \quad \Delta \epsilon_p/2 = 1.395(2N_f)^{-0.888} \quad (5)$$

总应变疲劳寿命曲线表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_t/2 &= \Delta \epsilon_e/2 + \Delta \epsilon_p/2 \\ &= 0.01052(2N_f)^{-0.09717} \\ &\quad + 1.395(2N_f)^{-0.888} \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)、(5)、(6)所代表的曲线见图 6。

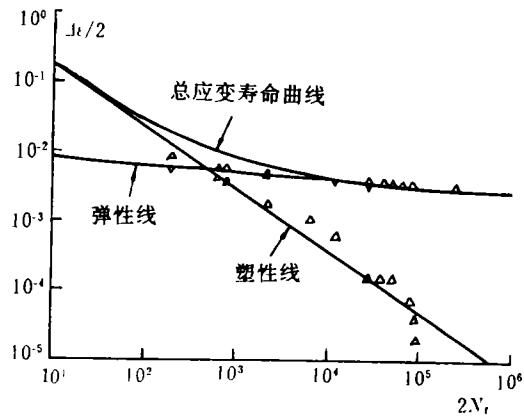


图 6 低循环疲劳试验结果及寿命曲线

本试验是在对称循环条件下进行的,在对实际压力容器结构进行疲劳设计时,由于平均应力常常不等于零,因此需要考虑平均应力对疲劳寿命的影响。在非对称循环交变应力下的高循环疲劳,平均应力的增加会使持久限下降,而对于低循环疲劳的压力容器引起破坏的应力水平往往高于屈服强度,此时平均应力将产生“滑移”^[2],即认为平均应力的影响主要是在弹性部分,对塑性部分则认为由于应力松弛,平均应力影响不大。现利用 Morrow 弹性线截距修正法^[3],并按 Goodman 直线关系等寿命图进行分析。当平均应力为 σ_m 时,当量弹性应力幅为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{\text{eq}}}{2} = \frac{\Delta \sigma_e}{2(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_t})}$$

式中 $\frac{\Delta \sigma_e}{2}$ —弹性应力幅,

$\frac{\Delta \sigma_{\text{eq}}}{2}$ —修正后的当量弹性应力幅。

经适当推导得出考虑了平均应力影响的应变寿命关系式为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \left(\frac{\sigma'_t - \sigma_m}{E}\right)(2N_f)^b + \varepsilon'_t(2N_f)^c \quad (7)$$

此时式(6)变为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \left(\frac{1319.21 - \sigma_m}{1.254 \times 10^5}\right)(2N_f)^{-0.09717} + 1.395(2N_f)^{-0.888} \quad (8)$$

当 $\sigma_m < 0$ 时, 令 $\sigma_m = 0$

3.3 低循环疲劳断口分析

低循环疲劳断口表现出韧性特征, 见图7。在源区可见小裂纹连接台阶和挤压痕迹。对于应变幅高($\Delta \varepsilon_e/2 = 1.47\%$)的试样在裂纹扩展区几乎看不见韧性条带, 但可见韧性撕裂及二次裂纹。对于应变幅较低($\Delta \varepsilon_e/2 = 0.35\%$)的试样, 在裂纹扩展区可见清晰韧性条带。

3.4 设计疲劳曲线

疲劳寿命曲线 S_e-N_f 是进行压力容器疲劳“安全寿命”设计的重要依据, 对于高循环疲劳, 应力值一般低于材料屈服强度, 故用应力作为控制变量, 按应力幅 S_e 与循环失效次数 N_f 作图, 得疲劳寿命曲线。但是在低循环疲劳时, 应力值往往高于材料的屈服强度, 这时出现的塑性流动造成了应力值不稳定, 因此试验数据相当分散, 得到的疲劳曲线不可靠, 所以在低循环区内通常用应变作为控制变量, 作出应变幅 $\Delta \varepsilon_e/2$ 与寿命 N_f 的关系曲线。本试验即采取应变控制。这样就提出了“虚拟应力”概念。所谓虚拟应力就是假定材料始终是符合弹性性质的, 因此它应由材料的弹性模量 E 乘以应变变量求得。对于

虚拟应力幅则有 $S_e = \frac{1}{2}E\Delta \varepsilon_e^{[4]}$ 。将式(3)代入 $S_e = \frac{1}{2}E\Delta \varepsilon_e$ 得:

$$S_e = \sigma'_t(2N_f)^b + E\varepsilon'_t(2N_f)^c$$

根据试验结果, TA₅ 钛合金的疲劳曲线方程为:

$$S_e = 1319.21(2N_f)^{-0.09717} + 174933(2N_f)^{-0.888} \quad (9)$$

由方程(9)所表示的 S_e-N_f 曲线关系见图8, 同时给出了按美国 ASME 锅炉及压力容器规范的有关规则确定的设计疲劳曲线。利用该设计曲线可求得某虚拟交变应力幅 S_e 下的安全寿命 N_f 。

ASME 的疲劳设计规则是安全可靠的^[5], 只要结构的峰值应力的位置和大小计算正确, 规范具有足够的安全裕度。要说明的是, 曲线2未考虑平均应力的影响。对于实际的压力容器大多是在脉动载荷或波动拉伸载荷条件下工作。因此在应用 S_e-N_f 曲线进行疲劳设计时必须考虑平均应力影响。对于低循环疲劳, 在考虑平均应力影响时应用较多的是 Goodman 关系式。考虑到不同平均应力在一定范围内对 S_e-N_f 曲线的影响也各不相同, 从设计方便出发, 一般采用各种平均应力对 S_e-N_f 曲线可能造成的最大影响来进行 S_e-N_f 曲线的唯一修正。结合式(7)可得到经过平均应力修正后的设计疲劳曲线, 关于这方面的问题有待进一步试验研究。

4 冷凝器主要承压部件的有限元应力分析

本文利用有限元法计算出冷凝器主要承压部件危险部位的平均应力及峰值应力(或虚拟峰值应力), 再利用式(8)进行安全寿命分析, 同时还按 ASME 规范应力分析有



源区

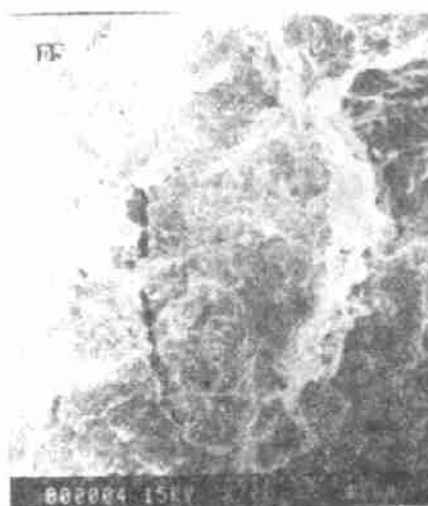


裂纹扩展区

• 试样编号, D24, $\Delta\epsilon/2 = 0.35\%$, $N_f = 25642$



源区



裂纹扩展区

• 试样编号, D5, $\Delta\epsilon/2 = 1.47\%$, $N_f = 97$

图 7 低循环疲劳断口分析结果

关章节^[6]对其它各类应力分别进行安全评定。

4.1 结构及计算模型

主要承压部件由一个长短轴之比为 2:1 的标准椭圆形封头和一个与之相焊的大法兰组成。封头中部开设一个用于传输介质的

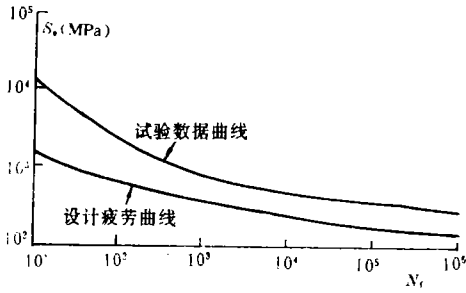


图 8 设计疲劳曲线

规格弯管接头及一个人孔和两个手孔。结构具有对称性,取一半作为计算模型,用 SAP5-C 程序中的第八类单元(8-21 节点三维等参元),共分 1313 个节点,357 个单元,计算在 IBM-4381 机上进行。

4.2 计算结果及应力分析

有限元应力计算结果表明,在设计载荷下一次总体薄膜应力 $P_m < [\sigma]$ (式中 $[\sigma]$ 为许用应力),一次局部薄膜应力 $P_L < 1.5[\sigma]$,一次弯曲应力 $P_b < 1.5[\sigma]$, $P_L + P_b < 1.5[\sigma]$;在操作载荷下, $P_L + P_b + Q < 3[\sigma]$ (式中 Q 为二次应力),均满足 ASME 规范第 VIII 卷第 I 册中“以应力分析方法为基础的设计”一节的静强度要求。下面以峰值应力进行疲劳寿命分析。

在操作载荷下峰值应力位于大弯管和封头相贯线靠近椭圆形封头一侧及法兰与封头相焊部位的法兰一侧,取其最大值为 407.1 MPa,因载荷脉动循环,所以交变应力幅为:

$$S_a = \frac{407.1}{2} = 203.6 \text{ MPa}$$

相应的应变幅为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{S_a}{E} = 0.162\%$$

平均应力为:

$$\sigma_m = 203.6 \text{ MPa}$$

将 σ_m 和 $\Delta \varepsilon_t/2$ 代入式(8)并利用迭代法即可求得安全寿命 N_f ,其值大于 10^6 次。再由 $\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = 2 \times 0.162\% = 0.324\%$,可求得安全寿命 $N_f = 22800$ 次。即该结构对寿命安全系数取 20 和对总应变幅安全系数取 2 时的许用寿命为 22800 次。

按文献[2]的方法,经平均应力修正后的当量应力幅为

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= \frac{S_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b}} = \frac{203.6}{1 - \frac{203.6}{680}} \\ &= 290.6 \text{ MPa}, \text{ 相应的应变幅为 } \frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma_{eq}}{E} \\ &= 0.232\%。 \end{aligned}$$

再利用式(6)可求得许用寿命为 7350 次。

可以看出文献[2]的方法过于保守,而本文的平均应力修正采用弹性线截距修正方法,更趋于合理。

5 结论

本文对特定规格 TA₅ 钛合金环件,采用标准光滑试样进行了控制应变幅、在室温及大气条件下的疲劳试验,获得了疲劳性能参数和疲劳曲线,为该冷凝器及其它钛制压力容器的结构疲劳设计提供了依据。

TA₅ 钛合金当应变幅小于 0.3% 时无明显硬/软化特性,当应变幅大于 0.3% 时则表现为循环软化特征。属于循环软化材料。

断口分析表明本钛合金表现出韧性特征。

建立了 TA₅ 钛合金低循环疲劳曲线方程,并考虑适当的安全系数得到设计疲劳曲线。

鉴于本冷凝器可靠性的需要,有待开展以下试验研究内容:平均应力、内部缺陷、过

载、表面状况及尺寸等因素对疲劳寿命的影响;焊接接头性能及结构残余应力等因素对疲劳寿命的影响。

参 考 文 献

- 1 Manson S S. J. of Experiment Mechanics. 1965(5)
- 2 邵国华主编. 超高压容器设计. 上海科学技术出版社.
- 3 Morrow J D. et al. Low cycle fatigue evaluation of inconel 713C and waspalory. J. of Basic Engineering. 1965. (87);275
- 4 张康达. 锅炉压力容器的疲劳失效. 劳动人事出版社. 1988. 8
- 5 李培宁. 锅炉压力容器疲劳设计规范评述. 压力容器. 1989. 4
- 6 [美]ASME 锅炉及压力容器规范第Ⅷ卷第Ⅰ册. 1983版

作者简介:秦广义,男,1961年生,工程师,硕士。1980年9月考入哈尔滨船舶工程学院,核动力装置专业。毕业后分配到哈尔滨七〇三研究所工作至今。1994年7月在哈尔滨工业大学获硕士学位。

通讯处:150030 哈尔滨 77—3 信箱

弹性金属塑料瓦推力轴承研制成功

旋转机械的推力轴承是直接影晌机组运行可靠性的重要部件之一,其轴瓦历来是采用巴氏合金制造的,但随着机组单机容量的增大,推力轴承的负荷、瓦块的比压和PV值也不断增大,由此造成轴瓦变形,影响推力轴承运行的可靠性。近十年来,国外已开始采用弹性金属塑料瓦替代巴氏合金,我国从90年代起开始陆续引进前苏联制造的塑料瓦推力轴承,用于龙羊峡等大型电站的水轮发电机组上,运行情况良好。

最近,国内由东方电机股份有限公司和上海材料研究所联合研制的“弹性金属塑料复合材料及推力轴承”项目已获得成功,并通过电力部和机械部联合主持的鉴定。

该产品在东方电机股份有限公司的具有国内先进水平的推力轴承试验台上进行了模拟电厂真机试验,经过5869小时的运行及50次开停机、惰性停机、热起动、满负荷断水运行等恶劣工况的考验,该瓦块情况稳定,性能优良,设计合理,完全能替代国外产品,达到同类产品的国际先进水平。

用弹性金属塑料瓦代替巴氏合金瓦,其优越性在于:1. 塑料瓦弹性能均衡瓦面负荷,降低局部压强,减少轴瓦变形,提高机组运行可靠性;2. 瓦块在制造厂内一次成型,现场不需要刮瓦,减轻了劳动强度和节省了装配时间;3. 瓦块本身具有一定的自润滑性,摩擦系数小,承载能力强,绝缘性能优良。因此,该产品可推广应用于各类水轮发电机和类似的其它旋转机械,是一种适合我国国情,行之有效的实用技术。

(汪家铭)

TA₅ 钛合金低循环疲劳特性试验研究 = An Experimental Study on the High-strain Low-cycle Fatigue Characteristics of a TA₅ Titanium Alloy [刊, 中] / Qin Guangyi, Wei Wu, Tan Hong (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5)-310-316

Samples were taken from a ring-shaped special-type TA₅ titanium alloy to perform an experimental study on its high-strain low-cycle fatigue characteristics, and fatigue life characteristic curves and strain-life relation were obtained. After selecting a proper safety factor the authors provide fatigue design curves for the TA₅ titanium alloy and analyse stress cycle hardening/softening characteristics. Finally, by way of a finite element stress analysis it has been proved that the service life of the deep-diving condenser can be significantly enhanced if the main pressure-carrying components are made of single-metal TA₅ titanium alloy instead of the former bi-metallic construction. Key words: titanium alloy, fatigue characteristic curves, stress analysis, condenser

某舰主汽轮机正倒车阀位检测装置的研制及应用 = The Development and Application of an Ahead and Astern Valve Position Monitoring Device for a Naval Vessel Main Steam Turbine [刊, 中] / Sun Shifeng, Li Hui (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 1995, 10(5). -317-321

The authors describe the composition of an ahead and astern valve position monitoring device for the main steam turbine of a guided missile destroyer, the selection of its monitoring elements, the working principle of electric circuits, the use of the monitoring device after its installation on a naval vessel. Key words: marine steam turbine, actuator, monitoring device, development and manufacture

新型除氧设备——除氧装置、水箱一体化除氧器 = A New Type of Deaeration Equipment Featuring The Integration of Deaerating Unit and Water Tank [刊, 中] / Xiao Futian, Mei Taikang (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power -1995, 10(5). -322-326

Deaerators featuring the integration of deaerating unit and water tank pertain to world-class advanced deaeration equipment. With the elimination of deaerating heads widely employed in conventional deaerators they have the merits of small size, low metal consumption and good deaerating efficiency. Described in this paper are the structural design features and working principles of this type of deaerators as well as their comparison with conventional deaerators. In addition, some key technical issues concerning their design and development are also dealt with. Key words: integrated deaerators, feed-water atomizing device

径向销钉式隔板找中方法 = A Method for the Alignment of Radial Pin Type Turbine Diaphragms [刊, 中] / Guo Qingwen, Li Jianzhao, Dai Zhenyong, Lan Ruji, Song Chunsheng (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 1995, 10(5). -327-329

The proposed method for aligning radial pin type turbine diaphragms has the merit of significantly enhancing alignment efficiency and alleviating labor intensity. Key words: turbine diaphragm, alignment, method

重载齿轮的最佳轮齿修形 = Optimum Tooth Profile Correction of Heavy-Duty Gears [刊, 中] / Chang Shan, Xu Zhenzhong (Harbin 703 Research Institute) Li Wei, Chen Chenwen (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -330-333

Described in this paper is a method for the accurate calculation of load distribution along the contact line of the simultaneously engaged teeth of heavy-duty gears. On the basis of the gear tooth mesh condition the optimum tooth profile correction parameters can be determined. By use of a computer program developed by the authors a study has been conducted of the influence of the optimum tooth profile correction parameter on the load distribution coefficient. Key words: tooth profile