

椭圆形封头大开孔结构强度分析

徐 岩¹, 郑洪涛², 梁海东¹, 张仲莲¹

(1. 哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036; 2. 哈尔滨工程大学 动力与能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 根据椭圆形封头的结构特点和工作条件, 运用有限元分析方法, 对大开孔椭圆形封头结构进行了应力分布计算与分析; 进行了缩比模拟试验件静态应力实测及实验验证分析。计算和实验结果表明, 该结构的危险部位为薄壁大接管与封头相贯顶部内侧, 可作为设计的主要控制点; 有限元计算外侧高应力区应力与实测结果相符, 误差仅为 0.7%, 焊缝及内表面计算值与实测值误差大一些, 但不超过 11.3%。表明了利用三维有限元分析方法解决大开孔封头的结构设计是可行、可靠的。误差较大的原因分析可以为实际产品的设计、加工及实验提供一定的参考。

关 键 词: 压力容器; 有限元; 大开孔; 封头; 应力分布; 应力评定

中图分类号: TQ051.3 文献标识码: A

引 言

带有多个接管的椭圆形封头结构是压力容器的一种典型结构, 使用安全性非常重要。由于接管多、开孔大, 加大了开孔边缘的应力集中, 从而削弱了封头结构的强度。应力集中不仅与开孔有关, 还与该部位的变形协调有很大关系。对于大尺寸封头的开孔接管, 由于变形协调所造成的边缘应力衰减范围较宽, 有效补强范围已超出 GB150-1998 的规定, 常规设计方法已不适用。针对这一情况, 本文拟采用有限元分析技术, 借助于 ANSYS 有限元强度分析软件对受压封头结构进行详细计算, 较真实、直观地反映封头整体和局部各点处的变形、应力强度大小及应力变化状况, 并对其计算结果进行了电测试验验证。

1 内压作用下有限元计算模型

1.1 计算模型

取带有两个接管的标准椭圆形封头结构为研究对象, 各部分材料均为 304, 接管为平齐式结构, 接管与封头的焊接为全焊透结构。

为了便于计算, 取实体作为分析对象并进行适当简化, 由于封头是关于中心平面对称的, 为减小计算规模, 取半边进行建模。由于大开孔封头出现强度问

题的危险部位常常集中在封头与接管相贯区域, 为了较真实地反映两个接管对水室强度的影响, 我们仅取上述两接管和封头壳体作为有限元分析对象, 视大接管远端对封头影响为零, 故取实际的计算模型为大接管距离封头外表面 120 mm 处为边界, 小接管及封头法兰对外联接部分作为边界条件来处理。

1.2 网格划分

利用 ANSYS 结构分析模块中的三维实体单元 Solid95 号单元将实体离散化, Solid95 号单元是 20 节点三维实体单元, 每个节点有 3 个自由度, 在计算不规则形状的变形时精度较高。考虑到循环水接管壁相对于封头壁厚较薄, 为了提高分析精度, 网格划分时宜采用映射网格, 由于封头形状不规则, 给映射网格的划分带来的难度, 故在接管部位采用映射网格, 进水接管沿壁厚划分 3 层, 人孔沿壁厚划分 6 层。在封头本体采用四面体网格, 在封头与接管相贯区域及焊缝进行网格细化, 整个计算模型共划分了 65 813 个单元, 163 174 个节点, 计算模型见图 1。

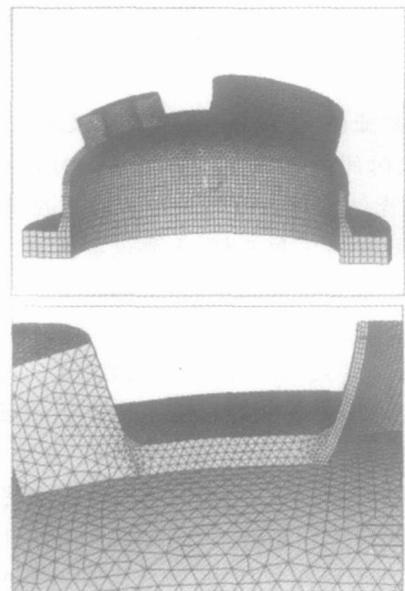


图 1 有限元计算模型

1.3 载荷及边界条件

位移边界条件:在封头和接管的对称面上,沿对称面的法线方向的自由度为零。为防止刚体位移,大法兰底面为刚性固定。

应力边界条件:在封头和两接管的内表面施加均布载荷,人孔的外端面上作用着小接管法兰盖施

加于端面上的拉应力,其值为 4.366 MPa。材料为线性各向同性材料,服从 Tresca 屈服准则。

2 计算结果与分析

有限元计算结果如图 2 所示。

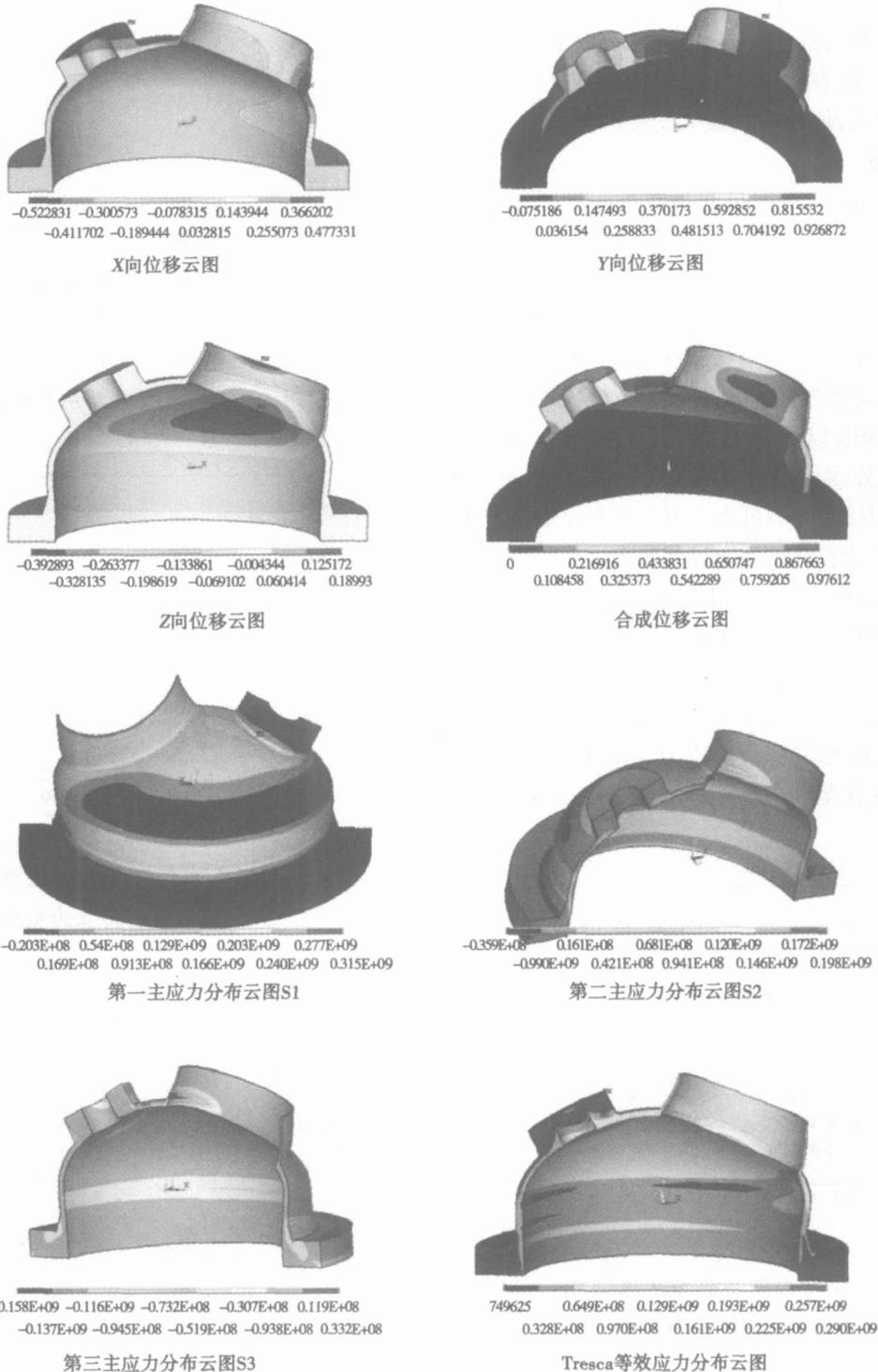


图 2 位移、应力分布云图

2.1 最大变形区域

由合成位移云图可以看出,在大接管与封头相贯部分靠近小接管侧的连接区域位移很大,最大位移在接管与封头连接焊缝处且在接管外边缘上,数值为 0.98 mm,远离此区域变形逐渐减小,距此相贯区域 90 mm 处,变形减小至 0.55 mm,在远离两接管区域的封头其它部分节点位移更小,数量级在 10^{-1} mm 以下;由于小接管壁较厚,小接管变形较小,小接管与封头相贯部位位移在 0.7 mm 以下,不属于大变形区。另外,在封头接管上端部内侧对称面附近区域变形较大,但也不是最大变形区域。

2.2 高应力区

计算结果显示,在大接管与封头相贯区域出现两个高应力区:

(1) 内侧高应力区: 在相贯区内侧与结构对称面的交点呈现最大应力,从最大应力点起沿接管周向相贯线方向应力逐渐递减,至接管周向 90° 时,应力从最大值 349 MPa 减至 227 MPa,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 区域,应力逐步降低至 130 MPa 以下;在相贯区内侧径向方向应力呈迅速衰减态势,距相贯线仅 20 mm,应力减少至 180 MPa 以下,说明接管内侧最大应力点是水室最高应力集中所在,可作为设计的主要控制参数。

(2) 外侧高应力区: 与相贯区内侧相对应,在接管与封头相贯线外侧也存在着一个高应力区,且该区域整体应力水平低于内侧高应力区,外侧最大应力点是内侧最大应力点沿接管壁厚的对应点,应力值为 319 MPa,沿相贯线周向应力衰减很快,以对称面上点为起始点至 30° 时应力为 270 MPa, 90° 时为 175 MPa。

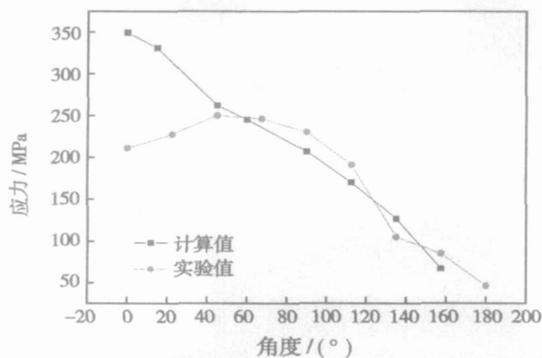


图 3 接管内侧高应力区域沿相贯线周向应力分布曲线

离接管的其它部位应力水平在 150 MPa 以下,系统中法兰的整体应力水平较低,一般在 100 MPa 以下,不影响构件的整体安全性能。

由于内外侧高应力区对容器的总体静强度失效作用很大,因此需详细分析该区域的应力分布情况,图 3 ~ 图 6 分别为接管内外侧应力分布情况。

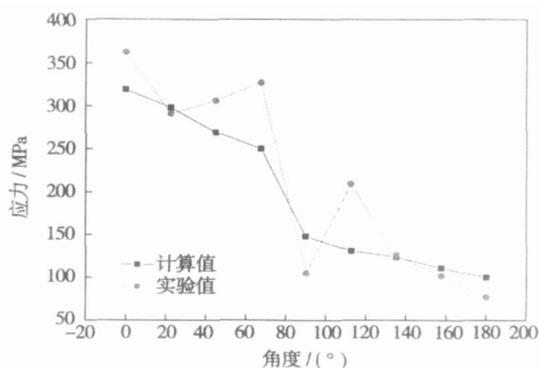


图 4 接管外侧高应力区域沿相贯线周向应力分布曲线

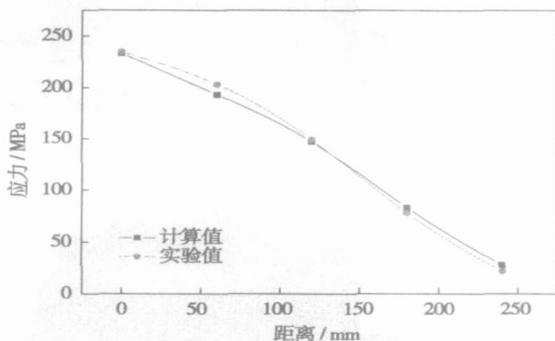


图 5 封头外表面沿母线应力分布曲线 (以外表面最高点为起始点)

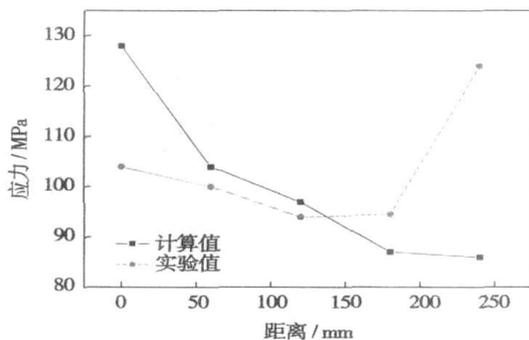


图 6 封头内表面沿母线应力分布曲线 (以内表面最高点为起始点)

其它部位的应力分布状况: 在与两接管相贯部位,封头应力相对较高,应力值在 200 MPa 左右,远

3 模拟体静态应力测试

3.1 模拟准则

按几何相似准则构建的缩比模拟试验件,其应力分布状态应与实际产品相同。按照这一原则采用 1/3 缩比模拟试验件进行静态应力测试,以验证有限元计算结果趋势的正确性。

3.2 测点布置方案

内外部测点布置见图 7 和图 8。

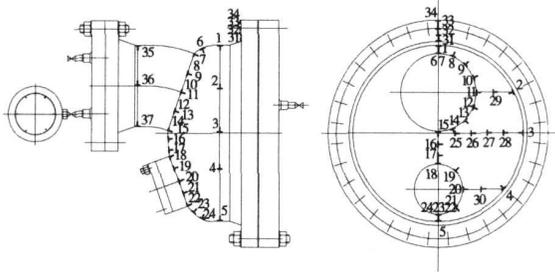


图 7 模拟体试验件外表面测点布置

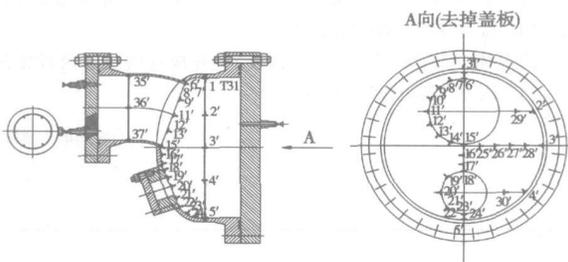


图 8 模拟体试验件内表面测点

外表面布置 37 个测点,内表布置 34 个测点,内、外表面测点基本对应。对主应力方向已知测点,贴 2 个垂直方向应变片;对主应力方向未知测点,贴 3 片 90°应变花。

3.3 静态应力测试装置

静态应力测试装置如图 9 所示。其中电阻应变仪最高分辨率为 1 με。

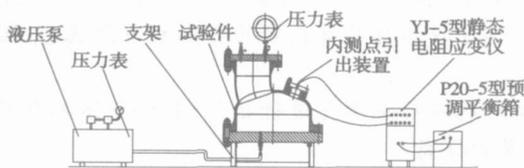


图 9 静态应力测试装置

3.4 测量结果分析

(1) 高应力区应力:实测结果发现,在额定工作压力下,接管外表面最大应力发生在接管与封头连接处对称面上的 12 点,其切向应力为 187.9 MPa,径向应力为 268 MPa。有限元计算所得最大应力点 15,其切向应力为 291 MPa,径向应力为 130 MPa;接管内表面最大应力发生在 15' 点,其切向应力为 270 MPa,径向应力为 221 MPa,有限元计算所得最大应力 15' 点,因该点 Y 向无法预调平衡,无法测量到该点的应力值,而只能测量到最大应力点附近点 13'、14'、A 的应力场的平均值。将内外表面最大应力点周围的三点有限元计算结果与试验应力测试结果进行对比见表 1。

表 1 内外表面最大应力点附近有限元计算平均值与电测平均值对比

	13~15(或 13'~15') 点计算平均值/MPa	13~A(或 13'~A) 点电测平均值/MPa	误差 /%
接管外表面	(234+275+319)/3=276	278	0.7
接管内表面	(216+255+349)/3=273	242	11.3

从表 1 可以看出,接管外表面最大应力值附近三点计算平均值与电测平均值吻合得很好,误差仅为 0.7%;内表面测量平均值略低于计算平均值,误差为 11.3%。考虑到内表面特定的工作条件有可能引起测量误差以外,分析内外表面测量数据后发现,测量应力值较大的点均落在有限元计算的高应力区内,同一点的测量值与计算值数据基本上处于同一数量级上,不同点测量值变化趋势与计算值相同,这就验证了有限元计算高应力区应力的正确性。

(2) 封头外表面焊缝应力有限元计算值与电测实验值对比见表 2。

表 2 封头外表面焊缝应力计算值与电测实验值对比

	1	2	3	4	5
计算值/MPa	76	101	100	94	84.5
实验值/MPa	81	109	106	94	89
误差/%	6.5	7.9	6.0	0	5.3

焊缝实测应力值与计算值基本相符,实测应力值略高于计算值,说明焊缝处除了存在应力集中、局部结构不连续应力外,还有少量的焊接残余应力影响。

从上述各图表中看出,试验件外表面相贯线及焊缝上试验数据与计算数据相互比较吻合,而内表面上有些点上吻合得较好,有些则误差较大,但是总

趋势和数量级与计算值相同,进一步验证了有限元计算结果正确性。

误差的产生有以下几方面的因素:(1)系统误差和偶然误差;(2)应变片所测量的是长度范围内应变的平均值,而有限元计算值为各个单点数值,两相结果应有所差异;(3)内部应变片由于内表面打磨困难应变片贴合不紧密导致测量结果误差过大;(4)试验件仍有残余应力。

4 结 论

(1)运用有限元分析软件对带有两个大接管的椭圆封头结构进行了应力分布计算,得到该结构的两个高应力区,即薄壁大接管与封头相贯区靠近对称面内、外两侧。两个高应力区均表现出高度的局部性,远离高应力部位应力值迅速衰减。厚壁小接管与封头相贯部位应力水平较低,不会影响构件的整体安全性能。

(2)采用电测法对模拟体进行应力实测和有限元计算结果表明,高应力区与危险部位相符。外侧高应力区实测数据与有限元计算结果吻合得很好,内表面上有些点吻合得较好,有些则误差较大,但是总趋势和应力水平数量级与计算值相同,进一步验证了有限元计算结果的正确性。内侧少数点产生误差的原因主要是因为内表面个别点打磨困难使应变

片与之贴合不紧密而造成的。

(3)从分析设计的角度,该结构最大应力点的一次薄膜加一次弯曲应力强度已经十分接近于1.5 $[\sigma]$ 值;从安全性考虑,如果条件允许,可采用略增接管壁厚的补强措施。如不采用补强措施,也应严格保证接管与封头的焊接质量,尽可能减少缺陷产生,并应加强无损探伤检查。

参考文献:

- [1] XUE M D, DENG Y, HWANG K C. Some results on analysis of cylindrical shells with large opening[J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1991, 113: 297-307.
- [2] 郭崇志, 钱颂文. 带平齐接管的大开孔球壳应力分析及强度设计[J]. 化工设备设计, 1994, 5: 14-18.
- [3] 何志. 高温高压工艺管道应力分析计算[J]. 压力容器, 2004, 21(6): 18-26.
- [4] 景国泉. 冷凝器大直径接管的应力计算与强度分析[J]. 压力容器 2002, 19(5): 12-21.
- [5] XUE M D. Some results on the analytical solution of cylindrical shells with large openings[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1991, 113: 297-307.
- [6] JB4732-95 钢制压力容器分析设计标准[S].
- [7] 杨翀. 医用高压氧舱矩形大开孔三维有限元计算和强度评定[J]. 压力容器, 2004, 21(1): 30-33.
- [8] 薛明德, 田丽珊. 大开孔球壳径向平齐接管的补强设计方法[J]. 压力容器, 1985, 2(5): 42-52.

(编辑 辉)

新技术

先进的烟塔合一新技术

目前,随着华能北京热电厂4号脱硫系统完成168h试运,4台机组脱硫系统和烟塔合一工程全部投入运行。

烟塔合一工程率先引进具有国际先进水平的烟塔合一技术,处理后的烟气经过新建烟塔排放,与常规带气气再加热装置的脱硫系统相比(30万kW机组),能有效抬升烟气排放高度,提高环境质量,同时节电、节水和回收余热,每年可节省约4.5万t原煤,约合1560万元。目前,烟气中多项排放指标在国内处于领先地位,其中SO₂排放浓度小于50mg/m³,已达到国际先进水平。由于该工程具有良好的环保和节能优势,国内越来越多的电厂开始采用这一先进技术。

烟塔合一技术的原理是利用冷却塔巨大热量和热空气量对脱硫后湿烟气进行抬升,混合气体抬升高度高于比冷却塔高几十米到百米的烟囱,从而促进地方环境质量的提高。

(山西电力科学研究院 李建新)

increase of inlet temperature ratio α . The increase of preheat temperature ratio β to a value greater than a critical one can decrease the value N_s . The number of heat transfer units NTU should be greater than 1. On account of cost-effectiveness, this value should not be excessively large. The non-equilibrium flow representing water equivalent ratio W being less than 1 is a major cause leading to a loss of effective energy, therefore efforts shall be made to enable W tend to be 1. The value ϵ should be greater than 0.5 and tend to be 1, thus reducing the irreversibility and enhancing the heat exchange rate. Through an analysis of the entropy production, the cause of energy consumption in a heat exchanger can be revealed and an optimized matching of thermodynamic parameters identified, thereby attaining the energy-saving objective. **Key words:** heat exchanger, thermodynamic parameters, entropy production analysis, thermodynamic performance evaluation

椭圆形封头大开孔结构强度分析 = **Structural Strength Analysis of an Elliptic Head with a Large Opening** [刊, 汉] / XU Yan, LIANG Hai-dong, ZHANG Zhong-lian (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), ZHENG Hong-tao (College of Power and Energy Source under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 404 ~ 408

In the light of the structural features and operating conditions of elliptic heads, by employing a finite-element analysis method, a calculation and analysis has been performed of the stress distribution on an elliptic head structure with a large opening. Measurements of static stress and experimental verification analyses have also been undertaken on a reduced-scale simulation test piece. The calculation and test results show that the dangerous part of the structure is located at the inner top side of the connected portion between the thin-walled large nozzle and the head, which can be taken as the design main control point. The stresses in the external-side high stress zone calculated by using the finite element method correspond with the actually measured stress results with an error of only 0.7% being recorded. A slightly bigger error exists between the calculated and actually measured values in the welding seams and the inner surface but it does not exceed 11.3%. This shows that the use of the three-dimensional finite-element analytic method to resolve the structural design of heads with a large opening is feasible and reliable. The analysis of causes leading to a relatively great error can serve as a helpful reference for the design, manufacture and tests of real products. **Key words:** finite element, large opening, head, stress distribution, stress evaluation

热力学焓及其普遍化表达式的动力学特征 = **Thermodynamic Exergy and Dynamic Characteristics of its Generalized Expressions** [刊, 汉] / HAN Guang-ze, LI Shao-xin (College of Physical Science and Technology under the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), GUO Ping-sheng (College of Physics and Electronics Engineering under the Guangxi Normal University, Guilin, China, Post Code: 541004), HUA Ben (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy-saving of the South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(4). — 409 ~ 413

Analyzed were the physical meaning of work, heat, energy and exergy as well as their relations with thermodynamic laws. Doing work and transferring heat are the two ways for transferring and converting energy and exergy. The energy defined from the first law of thermodynamics has only a relative meaning. Exergy represents the ability of a system to do maximal useful work with respect to an environment. Relative to a specified environment, exergy is the status parameter of a system. The conventional calculation formula of exergy is derived from the first and second law of thermodynamics. From the viewpoint of dynamics discussed was the physical meaning of exergy and its generalized expression. The exergy originates from the non-equilibrium of a system with its environment. If any (or several kinds of) intensive property difference exists between a system and its environment, then under the driving force of such an intensive property difference, the system may automatically change to a state featuring a balance with its environment (dead state). During this process, the system can do work to the outside world and such an ability to do maximal useful work is defined as the exergy of the system. On the basis of energy postulation, the differential of exergy is generally expressed as a product of the intensive property difference and the differential of its conjugated extensive variables. The generalized expressions of exergy can fully reflect the physical meaning and dynamic characteristics of exergy. By employing the generalized expressions of energy and exergy, derived was the generalized expression of exergy losses. **Key words:** energy postulation, thermodynamic law, thermodynamic effective energy, intensive property, generalized expression of exergy