

油田火筒加热炉大开孔封头强度研究

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

王怀彬 邢志东 杜军 张洪军 黄波¹⁾

摘要: 油田火筒加热炉密集大开孔封头的设计计算, 因没有相应的强度计算标准在一定程度上限制了我国油田火筒加热炉技术的发展。本文利用板壳元模型分别对无任何加强的大开孔封头、有火筒加强的大开孔封头和有十字加强筋的大开孔封头, 进行了有限元强度分析计算。理论与实验研究结果表明, 本文建立的有限元模型用于大开孔封头强度分析是可行的, 计算结果与实测吻合较好, 实际应力没有超过材料的许用应力。

关键词: 封头; 强度; 大开孔; 有限元分析; 实验研究; 加热炉

中图分类号: TK229 文献标识码: A

油田火筒加热炉是油田上使用最广泛的一种加热炉, 用来为油井热洗清蜡、原油脱水、原油集输、原油稳定、天然气脱水等工艺过程提供热源。由于结构需要, 加热炉封头上需开设4个大孔, 直径甚至超过800 mm, 不符合现行强度计算标准规定, 无法对其进行设计计算。为满足生产需要, 油田设计部门凭经验在大开孔封头上采用焊十字加强筋并增加其壁厚等方法提高强度, 以使加热炉得以投入使用。为了对这种加热炉的安全性能有一个科学、准确的

采用有限元强度分析计算和实物实验两方面进行了研究, 给出了具有实用价值的结果。

1 大开孔封头强度有限元分析

1.1 大开孔封头结构

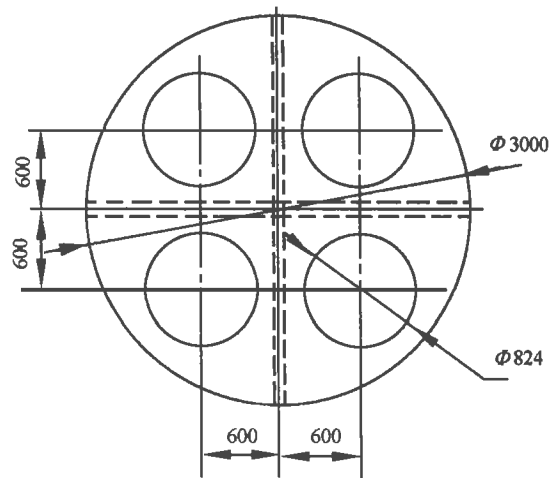


图1 封头结构

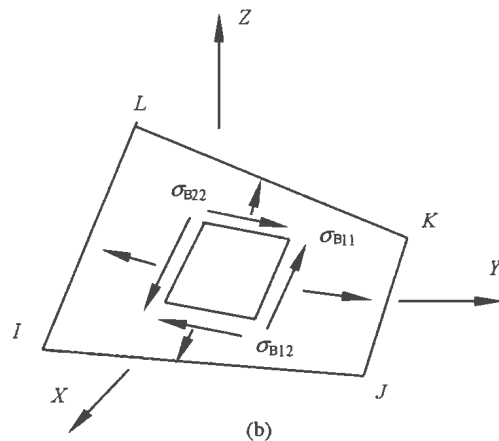
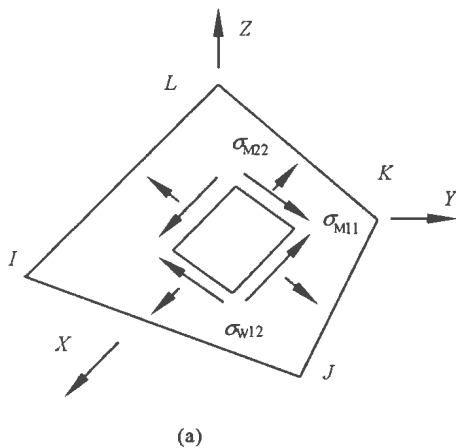


图2 板壳单元应力分量

计算对象为图1所示改进后的封头。该封头为标准旋转椭球面, 其中心截面是一椭圆(长轴 $R = 1500$ mm, 短轴 $h = 750$ mm), 椭球面上开有4个中心对称的大孔, 大孔直径

评价, 并为今后加热炉封头强度设计提供依据, 本文

为 $\Phi = 824 \text{ mm}$, 孔中心水平距离为 $1\ 200 \text{ mm}$ 。

封头上焊有十字筋板, 平分 4 个中心对称的大孔, 封头及筋板壁厚均为 $\delta = 12 \text{ mm}$, 材料均为 20 g, 屈服极限 $\sigma_s = 225 \text{ MPa}$, 许用应力 $[\sigma] = 125 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 1.98 \times 10^5 \text{ MPa}$, 内部介质温度 $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, 承受压力 $P = 0.51 \text{ MPa}$ (为与实验结果进行比较)。

1.2 有限元计算模型

封头直径与壁厚之比 > 10 , 计算采用板壳元模型^[1~2]。图 2 为板壳单元的应力情况, 按应力的性质分为膜应力和弯曲应力, 每个单元有三个膜应力 σ_{M11} 、 σ_{M12} 和 σ_{M22} , 三个弯曲应力 σ_{B11} 、 σ_{B12} 和 σ_{B22} 。对于这种复杂应力状态, 很难直接根据这些数据进行各点之间的应力比较和判断危险应力。为此, 需要选定强度准则, 计算出各节点的当量应力, 可用其与材料许用应力或屈服极限进行比较, 判断是否超出材料的许用应力范围。

将膜应力和弯曲应力叠加得到单元应力 σ_{11} 、 σ_{12} 和 σ_{22} , 由下式可得到单元内的主应力:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} + \sigma_{22} \pm \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2})] \quad (1)$$

强度准则选用形变比能准则 (Von. Mises 准则)^[3]:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (2)$$

为了清楚地显示火筒加强情况及加强筋的作用, 分别计算无任何加强的大开孔封头、有火筒加强的大开孔封头和有十字加强筋的大开孔封头。由于结构对称, 只研究 1/4 封头的应力分布。

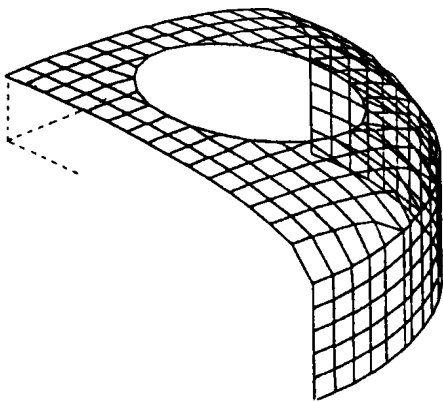


图 3 无加强孔封头计算网格

1.3 开有未加强孔的封头的网格划分

这种情况下网格划分如图 3 所示, 总共划分成 246 个板壳单元, 279 个节点。

1.4 有火筒

加强的封头的网格划分

火筒焊接在封头上, 对大孔本身就起到加强作用, 图 4 为该情况下封头的网格划分情况, 总共划分为 438 个板壳单元, 472 个节点。

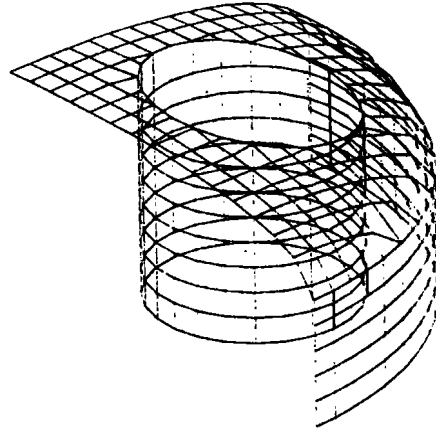


图 4 有火筒加强的封头计算网格

1.5 有十字加强筋的封头的网格划分

图 5 为封头焊了火筒及十字加强筋的网格划分情况, 总共划分成 540 个板壳单元, 570 个节点。

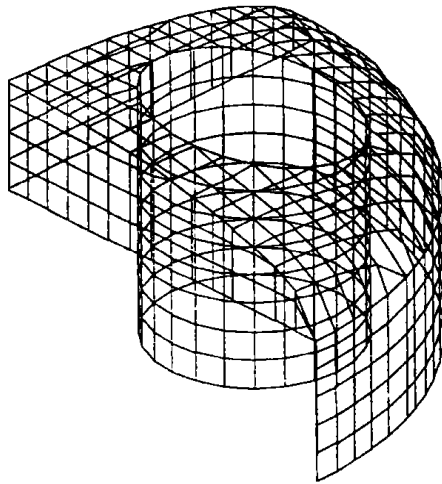


图 5 有加强筋的封头计算网格

2 大开孔封头强度计算结果

与实际测试点对应的计算结果如表 2 所示。对上述三种情况的计算结果分别介绍如下。

2.1 开有未加强孔的封头

封头的最大应力分布在圆形开孔靠近椭球顶的对称的两个部位, 最大应力 $\sigma_{\max} = 297.73 \text{ MPa}$ 。椭球的顶部发生向外凸起的最大变形约为 7.3 mm , 而在椭圆孔靠近边界处有凹向的最大变形约为 2.7 mm 。

2.2 有火筒加强的封头

封头大开孔内加有火筒以后, 应力和变形情况有了明显的改善。最大应力区为椭球顶的十字区域, $\sigma_{\max} = 113.19 \text{ MPa}$; 在火筒与封头的连接处的应力不大; 最大的变形分布在椭球的顶部 (约为 1.7 mm)。

2.3 有十字加强筋的封头

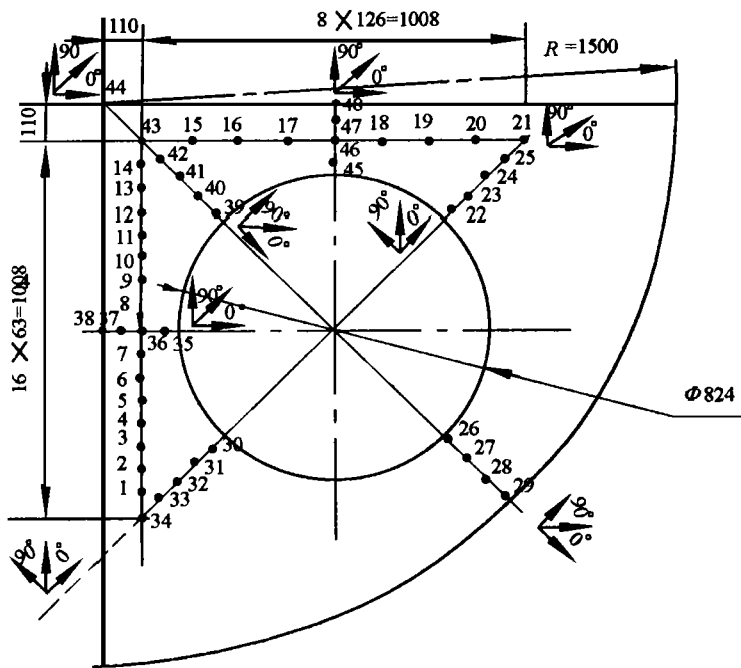


图 6 应力测点 布置

在这种情况下，应力和变形又有了进一步改善，最大应力 $\sigma_{max} = 94.28 \text{ MPa}$ ，最大变形约为 0.36 mm，最大应力和最大变形均发生在圆形孔靠近椭球顶的附近区域中。

由上述计算结果看出大开孔未加强封头，最大应力远超出材料的许用应力范围，其变形之大也是实际设计中不能采用的；考虑在大开孔内焊有火筒的加强作用后，情况有了改善，最大应力在材料的许用应力范围内，变形也不大；再进一步考虑有十字加强筋的作用后，情况就更为有利，材料的许用应力与最大应力之比超过 1.5 倍，变形也很小。

3 大开孔封头强度实验分析

为了验证计算方法的合理性与计算结果的准确性，以便于提出新的设计理论与计算方法，对新设计制造的 2.0 MW 新型火筒加热炉大开孔封头强度进行了实验研究。

3.1 测点布置、测试仪器与方法

以 1/4 封头为测试对象。由于被测点的主应力（主应变）方向未知，采用 45 度应变花进行测试，共布置 48 个测点，测点编号及应变片粘贴方向如图 6 所示。

采用日本产 150 通道逐点扫描高精度应变测量仪进行测试。测试导线用四芯屏蔽电缆，应变片用 45 度箔式应变花，粘贴剂用 502 胶水。

用砂纸打磨待测部位，用钢板尺划线定出各测点的位置，用苯酮认真擦洗测点，按划线位置和方位要求正确贴片，用胶布做好绝缘，线号和点号一一对应，红、黄、蓝、黑分别对应 90 度、45 度和 0 度，应变仪机箱上测量通道号和测点线号一一对应，用焊锡焊好各结点，打开主机，扫描各通道，找出有问题的测点，分析原因及时处理。按 0—0.20 MPa—0.35 MPa—0.50 MPa—0.65 MPa—0.80 MPa 升压方案升压、保压、测试、记录，测试记录采用电脑数据采集与记录。

3.2 数据处理

各点主应变主应力及主应力方向实验公式为^[4]：

$$\epsilon_1, \epsilon_2 = \frac{1}{2}(\epsilon_1 + \epsilon_n) \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \times \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_m)^2 + (\epsilon_m - \epsilon_n)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2}(\epsilon_1 + \mu\epsilon_2) \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2}(\epsilon_2 + \mu\epsilon_1) \quad (5)$$

$$\text{tg}2\theta = \frac{2\epsilon_m - \epsilon_1 - \epsilon_n}{\epsilon_1 - \epsilon_n} \quad (6)$$

图 7 为主应力计算示意图。

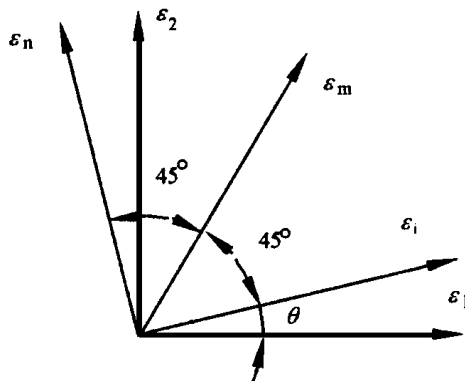


图 7 主应力计算示意图

根据变形比能准则式(2)，测试应力计算结果列于表 2。

可见，26、

35、45 点应力较大，其中，35、45 点为孔桥部位，应力为 90 MPa 左右，26 点为大孔与封头边缘间超规范区部位，应力最大，达到 123.53 MPa，但都没有超过材料的许用应力范围 ($[\sigma] = 125 \text{ MPa}$)^[5~6]。

表 1 测试应力 ($P = 0.51 \text{ MPa}$)

测点	当量应力 (MPa)	测点	当量应力 (MPa)	测点	当量应力 (MPa)
1	51.83	17	8.65	33	60.29
2	54.71	18	47.93	34	45.46
3	50.38	19	44.22	35	95.48
4	46.69	20	41.74	36	41.97
5	51.58	21	30.75	37	36.59
6	57.68	22	92.99	38	74.25
7	59.80	23	72.85	39	3.44
8	68.11	24	54.12	40	66.01
9	54.25	25	30.75	41	54.27
10	53.52	26	123.53	42	48.46
11	49.46	27	26.05	43	43.37
12	41.47	28	61.41	44	36.21
13	45.03	29	73.27	45	105.96
14	42.32	30	78.67	46	65.78
15	44.34	31	83.07	47	89.15
16	44.84	32	74.58	48	48.67

表 2 计算结果与实测数据比较 ($P = 0.51 \text{ MPa}$)

测点	测试数据 $a(\text{MPa})$	计算结果 $b(\text{MPa})$	绝对误差 $a-b(\text{MPa})$	相对误差 $ a-b /a(\%)$	修正后误差 $ a-b /a(\%)$
1	51.83	44.13	7.30	14.80	6.34
3	50.38	42.38	8.00	15.88	7.47
5	51.58	42.29	9.29	18.01	9.81
7	59.80	42.43	17.37	29.00	21.95
9	54.25	49.44	4.81	8.87	0.25
11	49.16	54.89	-5.73	11.66	21.93
13	45.03	47.76	-2.73	6.06	16.50
26	123.53	94.82	28.71	23.24	15.57
28	61.41	46.95	14.46	23.55	15.90
30	78.67	59.80	18.87	17.52	16.38
32	74.58	56.66	17.92	24.03	16.43
34	45.36	39.05	6.31	13.91	5.33
36	65.78	42.43	23.35	35.50	29.05
38	48.67	40.96	7.71	15.84	7.43
40	66.01	47.52	18.49	28.01	20.81
42	48.46	52.18	-3.72	7.68	18.44
44	36.21	39.43	-3.22	8.89	19.78

4 理论计算与实验结果比较

表 2 给出了理论计算与实验比较结果, 可以看

(上接第 355 页)

效率和分级效率。对试验灰尘的临界分级粒径 d_c 约为 $90 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

(5) 气力循环清灰系统下一步要解决的问题是过滤介质输送管的磨蚀。

出计算与实验结果的相对误差在 30% 以内 (只有 36 点为 35%), 说明计算方法可行, 结果可信。从表中还可看出绝对误差多为正数, 即计算结果普遍比测试结果小, 这可能是计算中材料性能参数取值与实际有偏差。可用修正系数 k 做修正, 即:

$$b' = ka \quad (7)$$

修正后结果与实际测试数据误差平均在 20% 以内 ($k=1.1$)。

5 结论

(1) 测试结果表明, 大开孔封头由于火筒及十字加强筋加强后, 实际应力没有超过材料的许用应力, 安全裕量较大。

(2) 计算结果与实际吻合较好, 有限元方法用于大开孔封头强度分析可行。

(3) 大开孔边缘与封头边缘应力较大, 实际设计中, 此处距离不宜过小。

(4) 十字加强筋板对于封头的强度和刚性有明显的加强作用。

参考文献:

[1] 张允真, 曹富新. 弹性力学及其有限元法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

[2] 李之光等. 锅炉受压元件强度分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[3] 赵经文, 王宏钰. 结构有限元分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.

[4] 杨德品. 应用薄壳力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1988.

[5] [英]沃诺克, 本哈姆. 材料力学手册[M]. 江秉琛译. 北京: 人民教育出版社, 1982.

[6] [法]阿弗里尔. 实验应力分析手册[M]. 陈棣华译. 北京: 机械工业出版社, 1985.

(渠源 编辑)

参考文献:

[1] 上渚具贞. 粒体の空気输送[M]. 日刊工业新闻社 1974.

[2] 黄标. 气力输送[M]. 上海: 上海科学技术出版社 1982, 96.

[3] 许世森. 移动颗粒层过滤高温除尘系统的结构和参数优化试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, (4).

(复 编辑)

Described in this paper is a new type of high temperature air-fired boiler featuring the following key techniques: high-temperature air combustion, a ceramic honeycomb heat storage bed, a burner adapted for graded burning of fuel, in-furnace re-circulation of flue gases and a four-way high-frequency switch-over valve. The boiler working principle and process was explained in detail and the basic innovative approach for further development of the boiler explored along with an analysis of its main technical characteristics. In addition, the authors have also assessed the potential significance of popularizing this new type of boiler in China. **Key words:** high-temperature air combustion, new type of boiler, heat exchanger, burner, analysis of characteristics

移动颗粒层过滤高温除尘器中循环清灰系统的试验研究 = **Experimental Study of a Pneumatic Conveyor-based Ash-removal System for a High-temperature Precipitator Featuring a Moving Granular Bed Filter** [刊, 汉] / XU Shi-Sen (Thermotechnical Research Institute of China National Electric Power Corporation, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 352 ~ 355, 363

Described in this paper is a pneumatic-conveying and filtrating media-based ash removal system capable of uninterrupted steady and high-efficiency operation. An experimental study aimed at structure optimization has been performed of the granular media feeding device, a transport system and the ash removal device. The operation experience of the above-cited ash removal system demonstrates the feasibility of a continuous and stable process of pneumatic-conveyor-based ash removal. The detailed information presented in the paper can serve as helpful hints and valuable reference data for the development of high-temperature ash removal technology based on the use of a moving granular bed filter. **Key words:** moving granular bed filter, pneumatic cycle ash removal, high-temperature dust elimination

混煤热天平燃烧模型研究 = **A Study of Thermobalance Model for the Burning of Blended Coals** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-jie, NIE Qi-hong, SUN Shao-zeng, ZHU Qun-yi, WU Shao-hua, QIN Yu-kun (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 356 ~ 359

Each coal component in blended coals will keep its individual combustion characteristics during the combustion process. On this basis set up is a thermogravimetric combustion model of blended coals. The results obtained from the model are in fairly good agreement with those of experimental tests. **Key words:** blended coals, combustion, model, thermobalance

油田火筒加热炉大开孔封头强度研究 = **A Study of the Strength of a Crude Oil Heating Boiler Head Perforated by Large Openings** [刊, 汉] / WANG Huai-bin, XING Zhi-dong, DU Jun, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(4). — 363 ~ 363

At present there exist no applicable standards or specifications for calculating the strength of crude oil heating boiler (COHB) heads perforated by densely distributed large openings. This has to a certain extent hampered the further development of crude oil heating boilers in China. In this paper a finite-element strength analysis and calculation for the following three types of boiler head perforated by large openings is performed with the help of a plate-shell model: i. e., one without any reinforcement, another one with a reinforcement and a third one with a cross-shaped reinforcement. The results of a theoretical and experimental study indicate that the finite-element model set up by the authors is feasible and effective for the strength analysis of boiler heads perforated by large openings. The calculation results agree quite well with those obtained through tests. The actual stress sustained by the heads has not surpassed the allowable stress of the relevant material used. **Key words:** head, strength, large openings, finite-element analysis, experimental study, heating boiler

储冰桶换热管组流动特性研究 = **A Study of the Flow Characteristics of a Heat Exchange Tube Bank in an Ice Storage Tank** [刊, 汉] / QIAN Huan-qun, MIAO Zheng-qing, HU Zhi-hua, *et al* (Xi'an Jiaotong University, Xi'an,