

铸铁锅炉爆破压力的热态试验和理论分析

刘文铁¹, 何玉荣¹, 李志宏¹, 白武垠²

(1. 哈尔滨工业大学 能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 石家庄宝石电子集团公司玻管厂动力部, 河北 石家庄 050061)

摘要: 基于一次大规模热态爆破试验的结果, 分别对方箱试件、球墨铸铁锅炉的爆破压力、灰口铸铁锅炉和灰口铸铁锅片的爆破压力进行了计算和分析, 得出安全系数选取的推荐值。试验和分析表明, 铸铁锅炉运行安全可靠。

关键词: 热态爆破; 铸铁锅炉; 爆破压力; 安全系数

中图分类号: TK229 文献标识码: B

1 前言

近几年来, 铸铁锅炉和钢制锅炉相比具有价格便宜、安装简便、灵活; 耐腐蚀性好, 使用寿命长; 对水质的敏感性小等独特优点而在采暖和热水供应方面得到了越来越广泛的应用^[1]。为了发展我国铸铁锅炉事业, 北京机电研究中心, 哈尔滨工业大学和哈尔滨锅检所共同组织了一次大规模热态爆破试验, 用以考证铸铁锅炉及试件的承压能力和破坏形式。

2 试件的爆破压力和破坏类型

本次试验由哈尔滨低压锅炉厂、黑龙江省技校和旅顺铸铁锅炉厂提供爆破试件, 试验结果列于表1。

表 1

试件名称	试件设计尺寸	爆破压力 /MPa	爆破形式	备注
灰口铸铁方箱1	见图1	1.3	爆炸	最薄壁厚 $S_{\min} = 6$ mm 个别局部 $S_{\min} = 5$ mm
灰口铸铁方箱2	见图1	1.3	爆炸	最薄壁厚 $S_{\min} = 6$ mm 局部有气孔
灰口铸铁单锅片	见图4	3.9	产生 150 mm 裂纹泄漏	壁厚偏差极小
灰口铸铁锅炉	见图3	2.1	前片上部破开 175×200 天窗 爆破冲击波泄漏型	最薄壁厚 $S_{\min} = 6$ mm
球墨铸铁锅炉	见图2	6.2	第四片上接口泄漏	未加外力压紧密封
球墨铸铁锅炉	见图2	5.2	第四、五片间 上接口密封泄漏	换密封件后重装 未加压紧密封
球墨铸铁单锅片	见图2	10.6	后片有裂纹泄漏	泄压后复原 密封件加外力压紧

由表1可见, 爆破试验设计制造的铸铁件的破坏属爆炸型。原因是当产生裂纹之后, 其内部介质均能直接和大气相通, 高压饱和水中储存的热能可于瞬间释放出来而形成爆炸。而铸铁锅炉和单锅片, 则因结构复杂, 产生小裂口后只有局部介质直接和大气相通, 泄压很慢, 高压饱和水中所储存的热能不可能于瞬间释放出来, 也就不能形成爆炸。试验说明铸铁锅炉的超压破坏并非似“炸弹”, 而是以泄漏方式进行。因此, 铸铁锅炉运行是安全可靠的。

3 灰口铸铁方箱试件的计算爆破压力

方箱中部为拉撑平板区(图1), 该部位的爆破压力可按下式计算: $P_b = S^2 \sigma_w / KR^2$ (1)

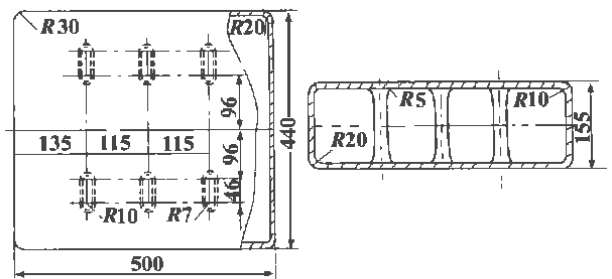


图 1 方箱爆破件

S ——有效壁厚, 由回收残片测得

方箱1 $S_{\min} = 5$ mm, 但其位置不在弯曲应力最大区, 其它部位 $S_{\min} = 6$ mm。

方箱2 $S_{\min} = 6$ mm。

σ_w ——材料抗弯强度, 取三个试件中最小值:

方箱1 $\sigma_{w\min} = 300$ MPa; 方箱2 $\sigma_{w\min} = 275$ MPa

R ——假想圆半径, 由图1中 $R =$

$$\sqrt{\frac{(96+96)^2 + 115^2}{2}} = 112 \text{ mm}$$

K ——系数, 取 0.67

方箱短边侧面可近似看作矩形箱体, 其外壁间距为 155 mm, 壁厚 10 mm, 则内壁间距 $2N =$

135 mm, 方箱拉撑中心线到方箱短边侧面内壁的距离为 $2L = 125 \text{ mm}$, $\beta = L/N = 0.926$ 。爆破件的拉伸强度按下式求取:

$$\sigma_b = \sigma_w \sigma_b / \sigma_w \quad (2)$$

对方箱 1: $\sigma_b = 136 \text{ MPa}$;

对方箱 2: $\sigma_b = 125 \text{ MPa}$

将上述数据代入计算矩形箱体许用工作压力或爆破压力的最终计算式:

$$P_b = \frac{\sigma_w \frac{2N}{s} (1 - \beta + \beta^2) + \sigma_b}{\frac{N}{s} [\frac{2N}{s} (1 - \beta + \beta^2) + 1]^2} \quad (3)$$

计算结果见表 2。

表 2

部 位	1 号计算爆破压力 / MPa	2 号计算爆破压力 / MPa	实爆压力 / MPa
中部假想圆	1.29	1.18	1.30
侧面矩形方箱	1.19	1.11	1.30

由表 2 可知, 侧面矩形方箱部位计算爆破压力较低, 除 1 号试件中部假想切圆外, 试件其余部位实爆压力为该处计算爆破压力的 1.1 ~ 1.17 倍, 这证明计算公式是比较保守的。

4 球墨铸铁锅炉的计算爆破压力

热态爆破试验中, 球墨铸铁锅炉(图 2)在 A 点产生裂纹后, 缓慢泄压, 失效压力为 10.6 MPa, 锅炉设计壁厚为 10 mm, 考虑到允许有 2 mm 的铸造偏差, 因此有效壁厚 $S = 8 \text{ mm}$ 。抗拉强度的试验最小值 $\sigma_b = 502 \text{ MPa}$, 折算抗弯应力 $\sigma_w = 800 \text{ MPa}$, 假想圆直径 $d_j = 175 \text{ mm}$ 。假想圆部位计算爆破压力可按式(1)计算: $P_{bj} = 9.98 \text{ MPa}$ 。

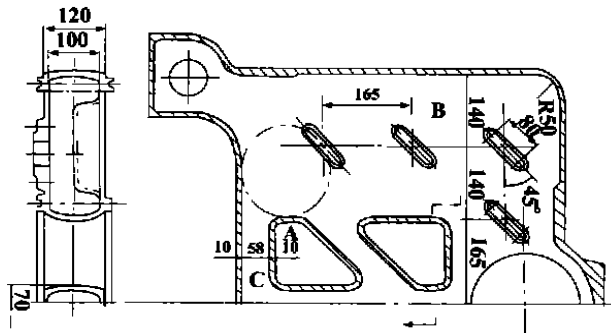


图 2 球墨铸铁锅炉爆破件的后片

部位 B 形状比较复杂, 但可假想为矩形箱体。

矩形箱体的内边长 $2N = 112 \text{ mm}$, 内短边长 $2L = 100 \text{ mm}$, 则 $\beta = 0.893$, 代入式(3)得 B 点的计算爆破压力: $P_{Bb} = 8.14 \text{ MPa}$ 。中部拉撑板的拉撑平面最大, 其值为 $F = 165 \text{ mm} \times 140 \text{ mm} = 23100 \text{ mm}^2$, 拉撑件的最小截面积 $f = 878.54 \text{ mm}^2$, 代入式(3)可得拉撑件的计算爆破压力: $P_{Bb} = 11.9 \text{ MPa}$ 。

从计算结果看, 假想圆部位和 B 部位计算爆破压力均低于实爆压力。但 B 部位计算爆破压力更低 $P_{Bb} = 8.14 \text{ MPa}$, 但裂纹却产生在假想圆的拉撑点 A 处, 这是因为:

(1) 铸铁锅片总难免有些难于觉察的微小裂纹、气孔、夹渣之类的微小缺陷, 使其实际承压能力降低, 这是目前世界上对铸铁承压件取较高的安全系数之重要原因。

(2) 铸造件可能因泥芯浮动和沙型泥芯尺寸偏差产生铸造偏差, 其中壁厚偏差对计算爆破压力影响极大, 如 B 部位实际壁厚取 10 mm 时, 计算爆破压力则增大到 12.4 MPa, 当压力 $P = 10.6 \text{ MPa}$ 时就不可能产生裂纹, 因而铸铁锅炉壁厚的监测是保证安全的重要一环。

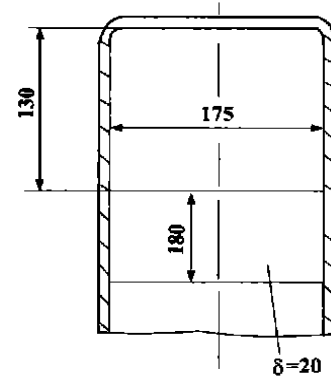
(3) 低压锅炉厂生产的铸铁锅炉的铸造偏差一般不大(实测壁厚偏差小于 1 mm), 在此情况下取壁厚偏差为 2, 按上述方法进行计算是偏于保守的。

5 灰口铸铁锅炉的爆破压力

灰口铸铁锅炉在热态试验中, 当压力达到 2.1 MPa 时, 于前片顶部爆开一个 $300 \times 400 \text{ mm}$ 的大口而泄压失效, 没有测到爆破冲击波, 也无巨大爆破声, 说明它失效仍是泄漏型。该炉设计壁厚为 10 mm, 开裂处实测最小壁厚 $S_{min} = 6 \text{ mm}$, 材料为 TH20-40(TH200) 爆破位置的形状如图 3 所示。锅片内壁间距为 $2N = 175 \text{ mm}$, 距锅片顶 130 mm 处装有密集拉撑板, 板厚为 20 mm, 如将上部看作矩形箱体, 则其短边长度 $2L = 130 \text{ mm}$, $\beta = 0.74$, 将上述数据代入式(3)得: $P_{Bb} = 1.09 \text{ MPa}$, 即按最小壁厚计算的爆破压力为 1.09 MPa。但最小壁厚不在角部, 按

图 3 灰口铸铁锅炉爆破位置周围形状

灰口铸铁锅炉在热态试验中, 当压力达到 2.1 MPa 时, 于前片顶部爆开一个 $300 \times 400 \text{ mm}$ 的大口而泄压失效, 没有测到爆破冲击波, 也无巨大爆破声, 说明它失效仍是泄漏型。该炉设计壁厚为 10 mm, 开裂处实测最小壁厚 $S_{min} = 6 \text{ mm}$, 材料为 TH20-40(TH200) 爆破位置的形状如图 3 所示。锅片内壁间距为 $2N = 175 \text{ mm}$, 距锅片顶 130 mm 处装有密集拉撑板, 板厚为 20 mm, 如将上部看作矩形箱体, 则其短边长度 $2L = 130 \text{ mm}$, $\beta = 0.74$, 将上述数据代入式(3)得: $P_{Bb} = 1.09 \text{ MPa}$, 即按最小壁厚计算的爆破压力为 1.09 MPa。但最小壁厚不在角部, 按



有效壁厚为 8 mm 计算时,则爆破压力为 1.84 MPa,实爆压力仍比该值高 1.14 倍。可见用灰口铸铁锅炉校核推荐计算公式仍是准确而安全的。

6 灰口铸铁单锅片的爆破压力

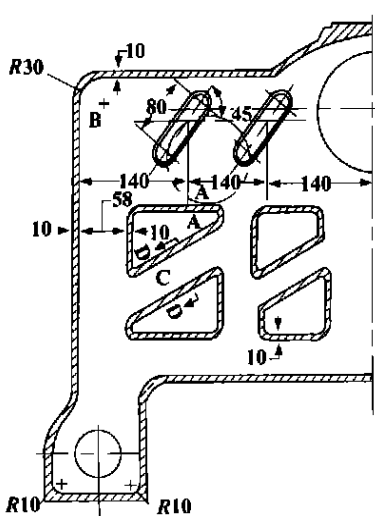


图 4 灰口铸铁锅片热爆破试件

铸铁锅片爆破件(图 4)在热爆试验中,当内压力达 3.9 MPa 时,拉撑区假想圆下部 A 点产生裂纹,缓慢泄压失效,即没有爆破声响,也没有测到冲击波,纯属裂纹泄漏型破坏。爆破件材料性能(三个试样的试验最低值);

$$\sigma_w = 512 \text{ MPa}, \sigma_b$$

$= 263 \text{ MPa}$;设计壁厚取 $S = 8 \text{ mm}$,爆破点 A 部位假想圆直径 $d_j = 125 \text{ mm}$,A 部位爆破压力按式(1)计算: $P_{Ab} = 12.52 \text{ MPa}$ 。左上角 B 部位假想圆直径 $d_j = 140 \text{ mm}$,则 B 部位爆破压力为: $P_{Bb} = 9.98 \text{ MPa}$,图 4 中 C 部位为水通过区,其截面可看作矩形或椭圆形。按矩形截面计算时,其内壁间距 $2N = 100 \text{ mm}$, $2L = 50 \text{ mm}$, $\beta = 0.5$,按矩形计算的爆破压力: $P_{Cb} = 8.22 \text{ MPa}$ 。按椭圆形截面计算时,其长直径 $2b = 100 \text{ mm}$,短直径 $2a = 50 \text{ mm}$, $\beta = 0.5$,则椭圆度系数:

$$K_2 = 0.24 \left(\frac{1}{\beta^{2.2}} - 1 \right) = 0.8628$$

按椭圆形计算的爆破压力: $P_{Cb} = 8.70 \text{ MPa}$

当其它尺寸相同时,如 $\beta \approx 0.5$,则按矩形或按椭圆形截面计算的爆破压力相近;当 $\beta < 0.5$ 时,按椭圆形和按矩形计算的爆破压力均逐渐下降,且前者下降程度比后者大;而当 $\beta > 0.5$ 时,椭圆形计算的爆破压力增大,但按矩形计算的爆破压力减小。所以当 β 值由 0.5 \rightarrow 1 时,采用椭圆形截面则承压能力增加很快;当 β 值由 0.5 \rightarrow 0 时,采用矩形截面要比椭圆形的承压能力高。

裂纹 A 部位的计算爆破压力为 12.8 MPa,而实际裂纹泄漏压力为 3.9 MPa,前者比后者高 3.27 倍。

这一结果说明在 A 部位本来就存在着漏检的铸造缺陷。即使如此,该锅片用在 0.4 MPa 压力下仍有近 10 倍的安全裕量。

7 安全系数的选取

热态爆破试验证明,在一般情况下热态失效压力均高于计算爆破压力,因而计算爆破压力的最低值,可以代表锅片实爆压力的最低值,但这一结论只有在下述条件下才成立:

(1) 锅片的实测壁厚均应大于或等于计算有效壁厚;

(2) 应力高峰区,如矩形箱体的角部及中部附近、假想圆的拉撑点和中心附近、假想圆的长轴端部附近等部位,都不能有明显的缺陷。

铸铁锅炉厂应具有测定壁厚和缺陷的设备与技术条件,特别对应力高峰区进行认真检测,以保证产品合格。

在保证产品合格的条件下,确定工作压力后,实爆压力或计算最小爆破压力应该是多大,即安全系数应取多大才能满足要求是受普遍关注的问题。世界各国对安全系数均有不同规定,我国铸铁锅炉的安全系数建立取 $n = 7 \sim 8$ 。如图 4 所示铸铁锅炉爆破试件,取 A、B、C 三点爆破压力的最小值 $P_b = 8.22 \text{ MPa}$,按 $n = 7$ 核算时,爆破件许用工作压力为:

$$[P] = \frac{P_{\min}}{7} = 1.17 \text{ MPa}$$

该锅片尚保留 3.32 倍安全裕度。

8 结论

由以上试验及计算结果分析可知,现行强度计算方法是安全可靠的,并有足够的安全裕量;热应力对实爆压力的影响很小,确定安全系数时不必考虑受火问题;铸件铸造水平的高低对铸件强度的影响很大,应尽可能提高其铸造水平。

参考文献:

- [1] 王铎庆,郑瑛,吴志刚,等. 铸铁锅炉扩缩通道内烟气阻力的试验研究[J]. 热能动力工程, 1993 8(5): 239-241.
- [2] 程丰渊,王铎庆. 关于铸铁锅炉承载能力估算方法的探讨[J]. 工业锅炉, 1989(3):
- [3] GB/T16508-1996 锅壳式锅炉受压元件强度计算标准[S].

(孙显辉 编辑)

simulation, power plant system

铸铁锅炉爆破压力的热态试验和理论分析 = **Hot-state Explosion Pressure Test of a Cast-iron Boiler and Its Theoretical Analysis** [刊, 汉] / LIU Wen-tie, HE Yu-rong, LI Zhi-hong (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), BAI Wu-yin (Shijiazhuang Baoshi Electronics Group Co., Shijiazhuang, Hebei Province, China, Post Code: 050061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 434 ~ 436

On the basis of the test results of a full-scale hot-state explosion test a calculation and analysis was conducted of the explosion pressure of the following: square-box test parts, nodular cast-iron boiler, grey cast-iron boiler and grey cast-iron boiler plates. As a result, obtained were the relevant safety factors recommended for selection. The tests and analysis indicate that the safe and reliable operation of cast-iron boilers can be assured. **Key words:** hot-state explosion test, cast-iron boiler, explosion pressure, safety factor

流化床中焚烧有机废液的热力特性分析 = **Thermodynamic Analysis of the Burning of Organic Waste Liquid in a Fluidized Bed Incinerator** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LIU Wen-tie, LU Hui-lin, YANG Li-dan, ZHOU Ding (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 437 ~ 440

With coal serving as an auxiliary fuel heat balance equations were established for the burning of organic waste liquid in the dense-phase zone and rare-phase zone of a fluidized-bed incinerator. By solving for these equations determined were the following: 1. The ratio of waste liquid being incinerated in the dense-phase zone as calculated against the total incinerated quantity; 2. Characteristics curves showing the effect of the incineration temperature in the dense-phase zone, excess air factor at the furnace outlet and the preheating air temperature on the consumption of the auxiliary fuel and the furnace outlet temperature. The results of calculation indicate that with the ratio of the waste liquid incinerated in the dense-phase zone being kept at 70% of the total incinerated quantity the temperature in the dense-phase zone can be roughly maintained at the same level as that at the furnace outlet. Moreover, it is highly desirable to control the dense-phase zone temperature at 850 - 900 °C in order to reduce the consumption of auxiliary fuel and to limit the excess air factor at less than 1.7 in order to maximize the preheating air temperature. The above findings can serve as a theoretical basis for the design and operation of fluidized bed-based waste liquid incinerators. **Key words:** organic waste liquid, fluidized bed, incinerator, auxiliary fuel consumption

WDR 系列 0.35 ~ 1.4MW 电热锅炉及其设计 = **WDR Series 0.35 - 1.4 MW Electric Heating Boilers and Their Design** [刊, 汉] / CAO Xi-gong (Technology Center of Zhengzhou Boiler Works, Zhengzhou, Henan Province, China, Post Code: 450052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 441 ~ 443

Electric heating boilers enjoy the following merits: no noise, no pollution, advanced technology, simple fabrication, compact construction, safe and high-efficiency operation, etc. A detailed account is given of the structural design and specific features of the WDR series 0.35 - 1.4 MW pressure-bearing electric heating hot-water boilers. **Key words:** electric heating, pressure-bearing hot water boiler, cylindrical body, heating surface, specific features

活性炭联合脱硫脱硝工艺 = **Activated Carbon-based Combined Desulfuration and Denitration Technology** [刊, 汉] / LUO Yong-gang, LI Da-ji, YANG Ya-ping (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 444 ~ 446

Described is a kind of new technology featuring combined desulfuration and denitration. With the use of this technology it is possible to remove such a variety of items as SO_x , NO_x and poisonous matter in flue gas like mercury, dioxin, etc. The merits, demerits and the development trend of the above-cited technology have also been presented. The information provided may serve as major reference data for the treatment of air pollution in China. **Key words:** desulfuration, denitration, activated carbon

火力抽水—蓄能发电 = **Thermal Power and Pumped Storage-based Electric Power Generation** [刊, 汉] / SHENG Jian-lun (Computer Department, Qingdao Architectural Engineering Institute, Qingdao, Shandong Province, China,