

窦照英 编著

承压设备失效 分析与处理



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

承压设备失效分析与处理

窦照英 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

承压设备失效分析与处理/窦照英编著. —北京: 化学工业出版社, 2001.11

ISBN 7-5025-3435-0

I. 承… II. 窦… III. 压力容器-失效分析 IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 070000 号

承压设备失效分析与处理

窦照英 编著

责任编辑: 陈志良

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 田彦文

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 11¼ 插页 2 字数 302 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3435-0/TQ·1419

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

楔子（代前言）

失效分析是为了从失败中汲取教训，类似于解剖探查病因。虽曰亡羊补牢，未为迟也，但是如果能够熟读名家医案，融会贯通，自可减少医疗差错。同理，牢记承压设备各类故障实例，掌握其分析判断和处理方法，遇事则了然于胸，处理起来则得心应手。

《黄帝内经素问》提到，圣人不治已病治未病，不治已乱治未乱。撰写本书的宗旨不是为发生故障后作类比分析判断，而是在有故障苗头时，能见微知著，进行预知处理，防患于未然。下面一例属于此类，希望读者均能运用自如，成为治未病的神医，治未乱的圣手。

2000年6月7日20时，接华能辽东某电厂电话，称该厂1号机（350MW）恢复运转3h，发现凝结水含钠量达 $800\mu\text{g/L}$ ，询问对策。

该厂用海水作凝汽器冷却水，凝汽器管是钛管，未配置凝结水精处理装置。由凝结水含钠量推知其泄漏率达 6×10^{-5} ，已达到DL/T 561—95《火力发电厂水汽化学监督导则》的停机标准。由于正值高峰负荷时刻，该厂希望能暂缓停机。

经询问，该机启动时锅炉水pH值低于规定，已投加氢氧化钠提高到9以上。为此建议该厂在0.5h内通过监测水汽试样氢电导与含钠量确定是下降趋势还是不变甚至上升，确认含钠量超标是停机后的污染还是钛管有新的泄漏。如系前者可在加大排污换水的同时，适当降低参数和负荷维持运行；如系后者则应在1h内停机查漏。

经化验确定是后者，找到漏管后经处理水质合格，机组恢复运行，避免了酸腐蚀失效。

在这之后，又接到该厂电话，称锅炉启动后水汽系统氢电导超

过应停机处理标准，但是含钠量和硬度合格，问询原因及对策（含是否应按《导则》规定停机处理）。

经询问后，判断可能是送入锅炉的除盐水中含有二氧化碳（最高可达 0.5 mg/L ），加之锅炉启动中大量补充除盐水带入的游离二氧化碳，都可使水汽系统氢电导升高。但是水中腐植酸增长也可使氢电导率升高。通过试验排除了腐植酸影响，认为是二氧化碳所致，它可自行降低，无须停机。建议考虑水箱密封或吸收二氧化碳等措施。

该电厂两次水质超标的电话咨询，一次判断为凝汽器管失效泄漏，必须立即停机处理，否则将引起锅炉水冷壁管酸腐蚀大量脆爆失效。另一次判断为无严重危险的水质超标。虽然按行业标准 DL/T 561—95 及国家标准 GB/T 12145—1999 均达 3 级处理值，即应在 4 h 内停炉。但是对后者却建议暂不停炉，继续深入查找水汽氢电导单项超标的原因，并且进行防止贮存的除盐水溶入二氧化碳处理。

一台 350 MW 机组停运后，即使立即恢复运转，也将损失 1 500 万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上电量，即使不算燃料、水和动力的消耗，也将损失约 500 万元产值。由此可知，正确的失效分析及正确的处理，既可以防止失效扩大产生更大的经济损失；也可以避免按规定可以（或可能）产生的经济损失。因此承压设备的失效与分析是有很大实用价值和很大经济效益的技术。

希望本书读者能从书中获取有益的知识，既能见微知著将失效故障消弭与萌芽之中，又能对失效故障进行正确的分析、判断与处理。

本书脱稿后，曾请王秀玲与周军同志对书稿作校对，谨表谢意。

襄照英

2001 年 6 月 6 日



图 4-2 腐蚀破裂爆口

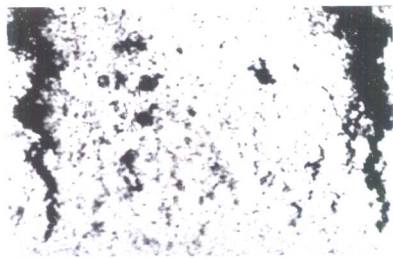


图 4-3 爆口处裂纹(12.5 ×)



图 4-4 酸腐蚀脆爆管样



图 4-5 酸腐蚀引起的脆爆口



图 5-1 层状脱锌失效



图 5-2 栓状脱锌失效

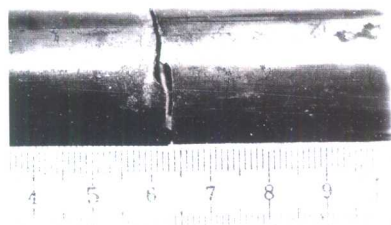


图 5-3 黄铜管的应力腐蚀破裂



图 5-4 70-1.5A 铝黄铜管的晶间腐蚀



图 5-5 铝黄铜管的沉积腐蚀



图 5-6 铝黄铜管端冲击腐蚀(上)
和管内冲击腐蚀(下)



5-7 白铜管停用腐蚀引起的脱镍



5-8 凝汽器管汽侧氨腐蚀



5-9 凝汽器管的汽侧冲刷损坏



5-10 凝汽器管互磨引起的损坏

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 承压设备及其失效	1
1.1.1 锅炉	1
1.1.2 其他承压设备	8
1.1.3 锅炉及其他承压设备的失效	11
1.2 防失效水质处理及安全管理技术	16
1.2.1 防止锅炉腐蚀结垢的水质处理	17
1.2.2 防失效诊断技术与安全评估	26
第 2 章 中低压锅炉的失效分析与处理	35
2.1 低压小容量锅炉的失效分析与处理	35
2.1.1 低压小容量锅炉的结垢失效分析与处理	35
2.1.2 低压工业锅炉的结垢腐蚀失效分析与处理	38
2.2 低压发电锅炉的失效分析与处理	42
2.2.1 低压发电锅炉结垢失效分析与处理	43
2.2.2 低压发电锅炉腐蚀失效分析与处理	44
2.2.3 低压发电锅炉的苛性脆化与碱腐蚀	46
2.3 中压发电锅炉的腐蚀结垢失效分析与处理	52
2.3.1 中压发电锅炉氧腐蚀失效分析及处理	53
2.3.2 中压发电锅炉水冷壁管的各类腐蚀失效	54
2.3.3 中压发电锅炉的停用腐蚀失效	57
2.3.4 中压发电锅炉过热器管结盐垢失效	60
2.3.5 中压发电锅炉的酸腐蚀失效分析及处理	66
2.4 中压工业锅炉的腐蚀结垢失效分析与处理	70
2.4.1 中压工业锅炉的腐蚀结垢失效分析与处理	70
2.4.2 中压工业锅炉过热器管失效分析及处理	73
2.4.3 中压工业锅炉的腐蚀失效分析	81

第3章 高压锅炉的失效分析与处理	86
3.1 高压锅炉的穿孔腐蚀失效分析与处理	86
3.1.1 高压锅炉的碱腐蚀失效分析与处理	86
3.1.2 高压锅炉的酸腐蚀失效分析与处理	97
3.2 高压锅炉的腐蚀脆爆失效分析与处理	101
3.2.1 高压锅炉的碱腐蚀脆爆失效分析与处理	101
3.2.2 高压锅炉的酸腐蚀脆爆失效分析及处理	108
3.2.3 高压锅炉的腐蚀疲劳失效分析及处理	122
3.3 高压锅炉的超温蠕胀失效及其他爆破分析	128
3.3.1 高压锅炉水冷壁管结水垢失效分析及对策	128
3.3.2 高压锅炉过热器管结盐垢爆破的分析及处理	145
3.3.3 高压锅炉的其他爆破分析	162
第4章 大容量锅炉失效分析及故障预防处理	171
4.1 超高压锅炉失效分析及处理	171
4.1.1 由于碱腐蚀引起的失效分析与处理	172
4.1.2 由于酸腐蚀引起的失效分析与处理	183
4.1.3 超高压锅炉的其他失效及处理对策	206
4.2 亚临界和超临界参数锅炉的预防失效处理	216
4.2.1 亚临界参数锅炉水冷壁管的结垢腐蚀失效与处理	216
4.2.2 亚临界参数锅炉过热器、再热器失效分析	242
4.2.3 超临界参数锅炉结垢腐蚀失效的防止及处理	249
第5章 压力容器失效分析及处理	255
5.1 换热器失效分析及处理	255
5.1.1 加热器的失效分析及处理	255
5.1.2 冷凝器的失效分析及处理	267
5.2 其他设备部件的失效分析及处理	294
5.2.1 反应容器的失效分析与处理	294
5.2.2 分离、贮存容器的失效分析与处理	296
5.2.3 其他设备的失效分析及处理	299
第6章 防失效技术措施	316
6.1 锅炉压力容器的安全管理	316
6.1.1 安全管理应是规程制度的管理	316
6.1.2 与防止承压设备失效有关的标准和导则	321

6.2 防止承压设备失效的超前控制与预警技术	326
6.2.1 由失效故障分析到失效风险因子评估	327
6.2.2 亚临界、超临界锅炉水质管理风险因子评估	329
6.2.3 锅炉酸腐蚀预警及酸腐蚀危险因子的消除	332
6.2.4 故障诊断与预知维修技术用于防止设备失效	336
参考文献	347

第 1 章 总 论

1.1 承压设备及其失效

承压设备中最常见的是各类锅炉，其次是各类压力容器。它们常因结垢影响传热并引发腐蚀，更可能因遭受腐蚀而减损使用寿命或不能正常运转。

1.1.1 锅炉

锅炉是锅与炉的合体，锅用于烧水，使水沸腾并转化为蒸汽；炉用于燃料的燃烧，用以加热水和水蒸气。锅炉把锅与炉融为一体，在封闭的炉膛中，将燃料燃烧放出的热能传输给锅，锅中的水在封闭的条件下提高了沸腾温度，并产生高压蒸汽供各种用途使用。

锅炉按用途分，大致分为采暖锅炉、工业锅炉和电站锅炉。锅炉按工作介质分，大致有饮水锅炉、热水锅炉和蒸汽锅炉。有的锅炉工作介质较为特殊，例如充填热煤油的油炉，使用低沸点金属的锅炉等。按照燃料划分有燃煤锅炉、燃油锅炉和燃气锅炉，有的燃料较特殊，如核燃料、垃圾燃料、杆秸和煤矸石等燃料。按燃料方式分，有链排炉、播撒炉、沸腾炉、流化床炉和煤粉炉等。

锅炉最常见的分类是按蒸汽参数划分，按蒸汽的饱和温度可划分为低压、中压、次高压、高压、超高压、亚临界和超临界 7 种规格。低压炉的压力低于 2.5 MPa，又可分为 0.78 MPa、1.27 MPa 和 2.45 MPa 三种压力规格；中压炉的早期产品为 3 MPa 上下，后期产品为 4 MPa；次高压锅炉数量较少，为 7~8 MPa；高压锅炉压力为 10.8 MPa；超高压锅炉压力为 15.7 MPa；亚临界参数锅炉压力为 17.5~19 MPa；超临界参数锅炉压力超过 24 MPa，有 25 MPa 和 30 MPa 等压力规范。

通常锅炉参数与蒸发量有大体对应关系。低压锅炉蒸发量低于 35 t/h, 其中 0.78 MPa 锅炉蒸发量低于 2 t/h, 而且目前多为热水锅炉, 1.27 MPa 锅炉蒸发量多为 2~10 t/h, 一部分是热水锅炉, 在蒸汽锅炉中, 低于 4 t/h 蒸发量的锅炉不配置过热器; 蒸发量为 6.5 t/h 及以上锅炉常配置过热器。2.45 MPa 锅炉蒸发量为 20~35 t/h, 有过热器提高蒸汽温度。中压锅炉蒸发量为 65 t/h~75 t/h 及 120 t/h~130 t/h; 高压锅炉蒸发量多为 220 t/h 及 410 t/h, 也有蒸发量为 230 t/h 及 430 t/h 者。超高压锅炉蒸发量为 400 t/h 和 670 t/h。亚临界参数锅炉蒸发量为 1 000~2 000 t/h; 超临界参数锅炉蒸发量为 1 600~3 000 t/h。

随着锅炉压力升高, 水的饱和温度升高, 表 1-1 给出了在不同压力下水的饱和温度。

表 1-1 不同压力下水的饱和温度

压力, MPa	饱和温度, ℃	压力, MPa	饱和温度, ℃
0.1	100	6	275
0.5	158	7	285
1.0	184	8	294
1.5	201	9	302
2.0	214	10	310
2.5	225	14	336
3	233	18	356
4	251	20.6	368
5	263	22.1	374

注: 临界压力为 22.14 MPa, 饱和(临界)温度 375.2 ℃。

由表 1-1 提供的数据可知, 随着锅炉压力升高, 所产生的饱和蒸汽温度升高, 使其具有巨大的做功能力。生活用锅炉直接使用饱和温度的蒸汽, 核电站也使用饱和蒸汽。如果需要更高温度的蒸汽, 可通过过热器将饱和蒸汽加热到 350~550 ℃, 成为过热蒸汽。

每年旧历八月十八日, 钱塘江潮壁立数丈, 奔驰百里, 迅若惊鸿, 势如怒马, 溯江而上, 以摧枯拉朽之势, 冲决固若金汤的堤坝, 令古往今来文人墨客惊诧讴歌, 赞叹其速度与力量。其实这种

势不可挡的力量与速度较之锅炉蒸汽逊色多多。据计算，最猛烈的钱塘江潮涌撞击堤坝时，挟有 30 km/h 速度和近 8 t/m^2 冲击力，但这仅仅是 0.78 MPa 锅炉压力的 1/10，流速的 1/5。一台蒸发量仅 0.5 t/h 的 0.78 MPa 小容量锅炉，内表面承受的总压力为 $1.5 \times 10^7 \text{ N}$ ，约为 1 500 t。由此可知，锅炉爆炸失效的后果往往是灾难性的。

(1) 采暖锅炉与工业锅炉

我国有 20 余万台锅炉，其中 9 成以上是采暖锅炉与工业锅炉。采暖锅炉压力低，容量小，但是数量大。生活用的锅炉如餐饮洗浴各类服务行业使用的锅炉通常归入采暖锅炉，以便于压力较高、容量较大的工业锅炉有所区别。

① 生活用锅炉与采暖锅炉 生活用锅炉与采暖锅炉与人民生活有千丝万缕联系，分布于居民区与楼群之中。最简单的生活用锅炉为立式锅炉，仍保留锅与炉的形貌。图 1-1 是立式锅炉，使用原煤在炉条上燃烧。水在炉胆中受热汽化，炉胆吸收火焰与烟气的热量。立式锅炉结构简单，热损失大，效率低。这类锅炉不进行水质处理，通常是在定期的维修中清除水垢和预先更换受腐蚀的部件，进行化学清洗，以防止运行中失效。

分散供热的建筑物使用蒸汽锅炉或热水锅炉采暖。大型建筑物的中央空调装置，也用低压小容量锅炉作为溴化锂冷剂的加热介质。

低压小容量蒸汽锅炉热效率低，结垢腐蚀问题大，采暖锅炉多代之以热水锅炉，或由集中的热力网站经过热交换器供应热水采暖。

② 低压工业锅炉 许多中小型工业企业使用低压蒸汽锅炉供热，这类锅炉的示意图如图 1-2，它利用刚送入锅炉的水密度高于已受热并含有一定数量蒸汽的水汽混合物；形成自然循环。此时密度较大的锅炉水沿炉墙以外的下降管进入底部联箱或泥鼓，再上行进行炉膛中的上升管或水冷壁管，锅炉水在炉膛中吸热产生一部分蒸汽，形成水汽混合物。在锅炉水与水汽混合物密度差的作用下，

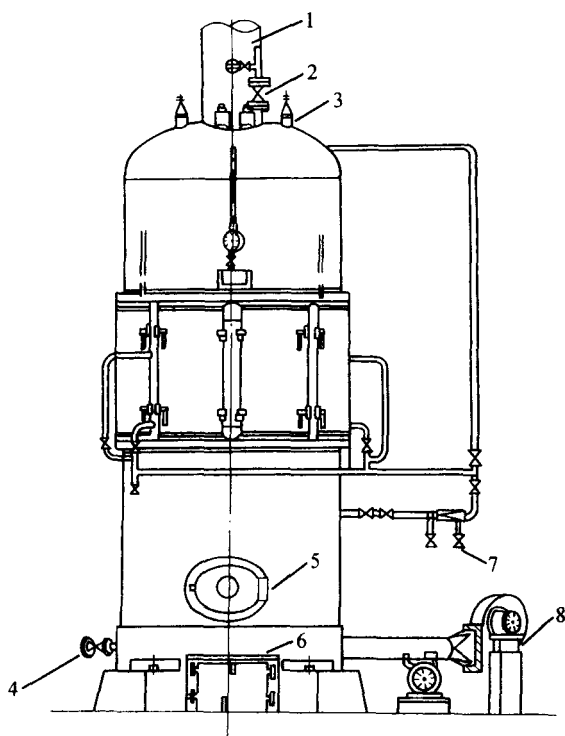


图 1-1 立式锅炉

1—烟囱；2—汽管；3—安全门；4—排污门；

5—炉门；6—灰门；7—上水门；8—风机

形成锅炉水的自然循环。

在上升管或水冷壁管中产生的蒸汽在汽鼓中与水进行分离，并被送出锅炉汽鼓。由于蒸汽温度与锅炉水温度相同，称饱和蒸汽。希望饱和蒸汽中携带的锅炉水雾沫数量少于蒸汽量（蒸发量）的 5×10^{-4} 以下。

由汽鼓中送出的饱和蒸汽在过热器中受热成为过热蒸汽。如果饱和蒸汽中携带锅炉水雾沫量大，则在过热器中将析出成垢，这是过热器管超温失效的常见原因。

蒸发量在 10 t/h 及以下的锅炉多是链排炉, 20 t/h 及以上锅炉有燃用煤粉的。在对大气环境要求严格的城市中, 常燃用重油或天然气, 也有试用水煤浆等新型燃料和燃用煤矸石等低热值燃料的循环流化床锅炉。

(2) 电站锅炉

电站锅炉是指中压及压力更高的锅炉, 大容量工业锅炉也是这种规范的锅炉, 它们在一定的参数与容量范围内有所交叉。

电站锅炉主要依靠水冷壁管吸收燃料燃烧的辐射热, 用过热器和省煤器继续吸收烟气的热量, 在炉膛顶部的过热器吸收一部分辐射热, 其余的过热器和省煤器依靠对流获得热量。为进一步利用烟气热量, 还设置了空气预热器。因此, 这类锅炉的热效率可达 90% 左右。

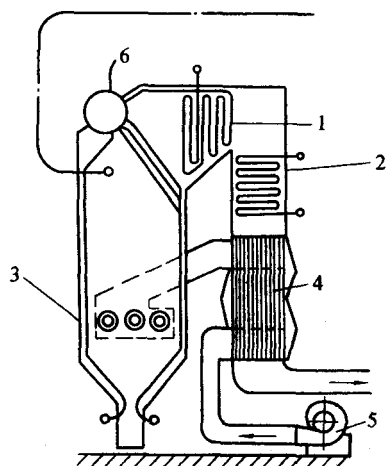


图 1-3 电站锅炉

1—过热器；2—省煤器；3—水冷壁；
4—空气预热器；5—风机；6—汽鼓

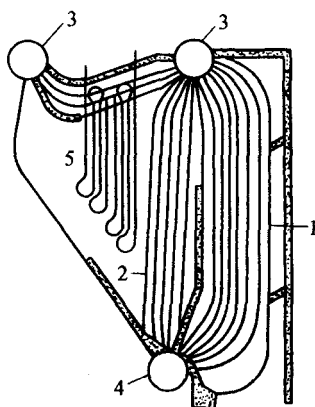


图 1-2 低压蒸汽锅炉

1—下降管；2—上升管；3—汽鼓；4—泥鼓；5—过热器

热, 其余的过热器和省煤器依靠对流获得热量。为进一步利用烟气热量, 还设置了空气预热器。因此, 这类锅炉的热效率可达 90% 左右。

图 1-3 是带有水冷壁、过热器、省煤器和空气预热器的锅炉。

汽鼓中装有水汽分离器、给水分配装置。排污管、临时放水管和锅内处理药剂管用于调整锅炉水质。水位计及压力、温度测点是安全的保障。

在汽鼓 (也称锅筒) 壁上开有下降管和水汽混合物返回

管。锅炉给水和由水汽混合物中分离出来的锅炉水，由炉墙外的下降管进入锅炉底部的各集箱（联箱），集箱底部还开有底部放水管（常称定期排污管）。锅炉水由集箱进入布置在炉膛四周的水冷壁管，锅炉水在水冷壁管中受热蒸发产生饱和蒸汽。由于锅炉水中含有蒸汽，密度变小，使水汽混合物沿水冷壁管上升，进入汽鼓后经水汽分离器分离，蒸汽被引出汽鼓，锅炉水与进入锅炉的给水又开始了另一次循环。压力较低、蒸发量较小的锅炉，在每一次水汽循环水产生的蒸汽量不足锅炉额定蒸发量的 5%。随锅炉压力升高，蒸发量增大，蒸汽占的份额提高，大容量锅炉每一循环可产生锅炉额定蒸发量的 20%~30%。直流锅炉可由给水产生额定出力的全部蒸汽，因此无需汽鼓和水汽分离。

电站锅炉和工业供汽锅炉以及采暖锅炉不同之处，是它的蒸汽用于带动汽轮发电机工作，对蒸汽质量要求高；作过功的低压蒸汽可在凝汽器由冷凝水（称凝结水）重复使用，成为锅炉给水的主要组成部分，不足的部分使用经过处理的水补充。

饱和蒸汽在过热器中受热成为过热蒸汽，过热蒸汽温度由 450℃ 到 540℃，过热器则有 2~5 组。为使蒸汽温度过高，使用减温器调整过热蒸汽温度，不使超过额定值。

根据我国化石燃料构成，我国电站锅炉主要燃用煤粉，有少量锅炉燃用渣油与天然气。

中压电站锅炉与 12 MW 及 25 MW 汽轮发电机组配套运行，用于不与电网联接的城镇供电。中压电站锅炉在较大的城市中，作为热电联产的热电厂仍在使用，但是作为单纯发电的凝汽式电厂正在被大容量锅炉取代。较大型的工业企业使用中压电站锅炉作为动力和供热锅炉。

高压锅炉与 50 MW 及 100 MW 汽轮发电机组配套运行，在 70 年代是大电网的主力发电锅炉，80 年代后退居调峰运行，但在中小型电网仍为主力锅炉。大型和特大型工业企业自备电站多为这一规范的锅炉，大城市的热电厂仍使用这一规范锅炉供热发电。

超高压锅炉及压力更高的锅炉统称为大容量锅炉，所配机组也

称为大机组。这类大容量锅炉的主要特点是配置了再热器，它用于将在汽轮机中作过部分膨胀降压降温后的过热蒸汽，引入再热器中受热，使蒸汽温度由 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高到 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 送入汽轮机中压缸中继续作功。这种锅炉机组称中间再热锅炉机组（见图 1-4）。

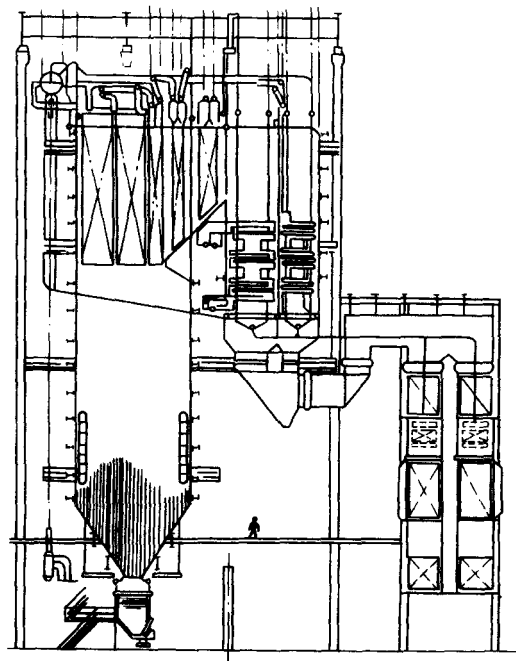


图 1-4 中间再热锅炉

超高压锅炉与 125 MW 及 200 MW 机组配套运行，在 80 年代中期到 90 年代中期是大电网的主力锅炉，与其配套的 200 MW 机组总容量曾达全国总发电量的 40%。亚临界参数锅炉与 300 MW 及 600 MW 机组配套运行，也有出力为 250 MW 及 320 MW 的机组；超临界机组与 500~1 000 MW 机组配套运行，这些锅炉机组自 90 年代中期以来，已成为我国火电生产的主力机组，新型的 GW（百万 kW）组火电厂均配备亚临界或超临界机组。