

燃气锅炉烟气余热回收利用技术规范

2023 - 10 - 31 发布

2024 - 01 - 29 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 余热回收利用工艺流程	2
5 烟气余热回收利用装置及其技术要求	3
附录 A（资料性） 烟气余热回收技术参数计算公式	5

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由河南省承压类特种设备标准化技术委员会提出并归口。

本文件起草单位：河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院。

本文件主要起草人：高庆伟、张磊、李腾蛟、陈帅甫、张罗娜、傅慧明、秦瑞红、马喜振、刘莹。

燃气锅炉烟气余热回收利用技术规范

1 范围

本文件规定了燃气锅炉烟气余热回收利用技术的术语定义、工艺流程和要求。

本文件适用于采用二次管网（地板辐射采暖）回水作为二级冷凝器冷源的燃气锅炉的采用螺旋翅片管制造的烟气余热回收利用装置。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16507（所有部分） 水管锅炉
GB/T 16508（所有部分） 锅壳锅炉
GB 50041 锅炉房设计规范
GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范
CJ/T 515 燃气锅炉烟气冷凝热能回收装置
TSG 11 锅炉安全技术规程
TSG 91-2021 锅炉节能环保技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

烟气余热

烟气中含有的大量显热和水蒸气的潜热所组成的热量。

3.2

烟气回收利用

利用低温冷源来完成与烟气的热量传递过程，使燃气锅炉排烟温度下降，并使烟气中水蒸气冷凝，回收利用烟气的显热和潜热，用于供热。

3.3

一级节能器

采用间壁式换热方式将供热一次管网（锅炉）回水作为冷源来完成与烟气的热量传递设备，回收利用烟气的显热。

3.4

二级冷凝器

采用间壁式换热方式将地板辐射采暖供热的二次管网低温回水作为冷源来完成与烟气的热量传递设备，回收利用烟气中部分水蒸气冷凝放出的汽化潜热及显热。

3.5

冷凝水

烟气中含有的水蒸气（即气态水）经过冷凝过程形成的液态水。

3.6

有效输出热量

单位时间内流经烟气余热回收利用装置的被加热介质进出口所携带热量之差。

3.7

节能量

单位时间内烟气余热回收利用装置的有效输出热量与回收该部分烟气热能所消耗能量之差。

3.8

节能率

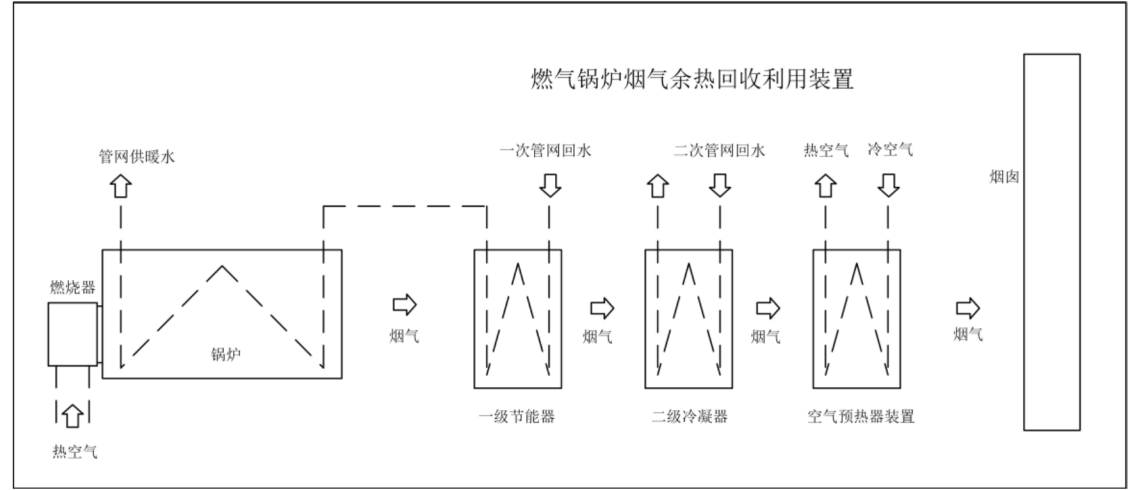
单位时间内，烟气余热回收利用装置的节能量与燃气锅炉所消耗的按燃气低位发热值计算的输入热量的比值。

4 余热回收利用工艺流程

燃气锅炉余热回收系统宜包括：第一级为一级节能器，第二级为二级冷凝器，第三级为空气预热器装置（含烟气热交换器、空气热交换器、介质循环泵、闭路循环管道），以及连通烟风道、烟气冷凝水排放管、放气、排污、温度和压力仪表等组成，用于加热一次管网回水、二次管网回水和助燃冷空气。

烟气余热回收利用工艺流程主要为：烟气从锅炉末端排出，首先经过一级节能器，与一次管网回水进行热交换后，温度降低，而后经过二级冷凝器，与二次管网回水进行热交换后温度进一步降低，最后经过空气预热器，与冷空气进行最后的热交换，完成最后的烟气余热回收利用，最终经过烟囱排放。

烟气余热回收利用工艺流程示意图如图1所示：



注1：一级节能器：用一次管网回水与锅炉出口烟气换热，经过节能器后烟气温度下降幅度约为55℃~75℃。

注2：二级冷凝器：用二次管网回水与节能器出口烟气换热，经过冷凝器后烟气温度下降幅度约为15℃~30℃。

注3：空气预热器装置：利用助燃室外冷空气与冷凝器出口烟气换热，进一步降低排烟温度。

图1 烟气余热回收利用工艺流程示意图

5 烟气余热回收利用装置及其技术要求

5.1 一般要求

烟气余热回收利用装置一般要求如下：

- a) 烟气余热回收利用装置不应影响燃气锅炉的正常安全运行，宜不增加额外风机、水泵等耗能设备；
- b) 烟气余热回收利用装置的排烟温度应低于烟气露点温度，并应符合 CJ/T 515 中有关烟气潜热、烟气冷凝水、减少雾气排放的要求；
- c) 烟气余热回收利用装置应内外表面应整洁，耐腐蚀，不应有划痕、锈斑等缺陷；
- d) 烟气余热回收利用装置应流动阻力小、高效换热、结构紧凑、便于安装和维护；
- e) 烟气余热回收利用装置标志牌、烟气及换热介质连接管的流向标记等应完整、正确、清晰，安装牢固，并应置于明显位置。

5.2 结构

烟气余热回收利用装置分为三级，主要设备由一级节能器，二级冷凝器，空气预热器装置组成。要求如下：

- a) 烟气余热回收利用装置中受压设备的设计、制造、检验应遵循 TSG 11、GB/T 16507 及 GB/T 16508 中的相关规定；
- b) 换热设备推荐采用螺旋翅片管结构形式，采用烟气与介质相互逆流换热方式，管排形式、翅片结构等应满足换热系数高、设备体积小、设备检修方便；
- c) 翅片的设计厚度应考虑使用寿命的要求；
- d) 设备的设计流量应满足工艺流程的要求，尽量降低介质循环阻力；
- e) 连通烟风道要求布置合理，使设备的设计烟气流速应控制在合理范围内，综合考虑换热效率、烟侧阻力、振动频率等参数，满足阻力小，噪音低，振动小；
- f) 烟气余热回收利用装置的最低处应设置烟气冷凝水排放管，防止冷凝水在装置中积存；
- g) 烟气余热回收利用装置和管路的绝热工程应满足 GB 50264 中的相关规定；
- h) 烟气余热回收利用装置的设备支撑结构应按照 GB 50041 的规定执行，综合考虑设备重量、含水量、管道受力等参数，进行基础及钢架设计；
- i) 空气预热器装置根据工艺要求确保密封性。

5.3 材料

烟气余热回收利用装置选用材料应考虑防腐蚀，要求如下：

- a) 与烟气接触的表面和换热面、管应采用防腐蚀表面改性材料或耐腐蚀材料，且焊接处应采取防腐蚀措施；
- b) 空气热交换器的管及翅片宜使用铜或铝等高效换热材料；
- c) 烟道的材料宜使用不锈钢或复合材料；
- d) 烟气余热回收利用装置的最高允许工作温度应不低于烟气余热回收装置最高进口烟温。

5.4 烟风阻力

烟风阻力相关要求如下：

- a) 烟气余热回收利用装置的换热设备宜采用低烟风阻力的管排结构；

- b) 烟气设计流速宜在 8 m/s~15 m/s 范围内；
- c) 设备烟风阻力、风机选型按照 CJ/T 515 等相关规定执行。

5.5 设备承压

烟气余热回收利用装置的承压要求如下：

- a) 一级节能器的设计压力应按 TSG 11、GB/T 16507、GB/T 16508 中相关的规定确定；
- b) 二级冷凝器的设计压力应按照不低于二次管网循环水最高静压与管网流动阻力之和的 1.5 倍设计。

5.6 配套仪表

配套仪表应符合TSG 91—2021附件D等相关规定的要求。

5.7 烟气冷凝水管管径

烟气冷凝水管管径应符合表1的规定。

表1 烟气冷凝水管管径

锅炉出力		管径/mm
蒸汽锅炉D/t/h	热水锅炉Q/MW	
D≤2	Q≤1.4	≥25
4≤D≤6	2.8≤Q≤4.2	≥32
8≤D≤10	5.6≤Q≤7.0	≥40
12≤D≤15	8.4≤Q≤10.5	≥50
20≤D≤25	14≤Q≤17.5	≥70
30≤D≤40	21≤Q≤29	≥80
50≤D≤100	35≤Q≤70	≥100
130≤D≤160	91≤Q≤116	≥125
注：当使用的锅炉出力表中未列出时，烟气冷凝水管管径由高一级锅炉出力对应的管径确定。		

5.8 烟气余热回收利用技术参数计算

烟气余热回收利用技术参数的计算见附录A。

附录 A

(资料性)

烟气余热回收技术参数计算公式

A.1 烟气余热回收利用的理论计算

A.1.1 烟气显热回收量的计算

A.1.1.1 理论空气的焓值计算公式为：

$$h_K^0 = 2.96143 + 1.27821t + 1.82909 \times 10^{-4}t^2 - 2.59493 \times 10^{-8}t^3 - 1.13129 \times 10^{-12}t^4$$

式中：

t ——烟气温度，单位为摄氏度（℃）。

A.1.1.2 二氧化碳焓值计算公式为：

$$h_{CO_2} = -6.53509 + 1.68067t + 7.7798 \times 10^{-4}t^2 - 2.9419 \times 10^{-7}t^3 + 4.57385 \times 10^{-11}t^4$$

A.1.1.3 氮气焓值计算公式为：

$$h_{N_2} = 5.37036 + 1.23589t + 1.77044 \times 10^{-4}t^2 - 2.53217 \times 10^{-8}t^3 - 1.13002 \times 10^{-12}t^4$$

A.1.1.4 水蒸气焓值计算公式为：

$$h_{H_2O} = 4.75735 + 1.446t + 2.5429 \times 10^{-4}t^2 + 3.46706 \times 10^{-8}t^3 - 1.66507 \times 10^{-11}t^4$$

A.1.1.5 理论烟气焓值计算公式为：

$$h_y^0 = \sum V_i h_i$$

式中：

h_y^0 ——标态下理论烟气焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

V_i ——标态下烟气中各组分的含量；

h_i ——标态下烟气中各组成成分的焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）。

A.1.1.6 实际烟气的焓值计算公式为：

$$h_y = h_y^0 + (\alpha - 1)h_k^0$$

式中：

h_y ——标态下实际烟气焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

α ——过量空气系数；

h_k^0 ——标态下理论空气焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）。

A. 1. 1. 7 回收烟气显热量计算公式为：

$$Q_s = (h_{y1} - h_{y2}) m_s$$

式中：

Q_s ——标态下回收烟气显热量，单位为千焦每秒（kJ/s）；

h_{y1} ——标态下烟气进口焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

h_{y2} ——标态下烟气出口焓值，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

m_s ——烟气的流量，单位为立方米每秒（m³/s）。

A. 1. 2 烟气潜热回收量的计算

A. 1. 2. 1 冷凝的水蒸气容积计算公式为：

$$V_{H_2O}^C = \frac{V_{H_2O} - \frac{p_s}{p_y} V_y}{1 - \frac{p_s}{p_y}}$$

式中：

$V_{H_2O}^C$ ——标态下冷凝的水蒸气容积，单位为立方米（m³）；

V_{H_2O} ——水蒸气容积，单位为立方米（m³）；

p_s ——对应温度水蒸气饱和压力，单位为帕（Pa）；

p_y ——烟气压力，单位为帕（Pa）；

V_y ——烟气容积，单位为立方米（m³）。

A. 1. 2. 2 冷凝的水质量计算公式为：

$$m_{H_2O}^C = \frac{V_{H_2O} - \frac{p_s}{p_y} V_y}{\left(1 - \frac{p_s}{p_y}\right) \times \frac{18}{22.4}}$$

A. 1. 2. 3 冷凝率计算公式为：

$$\Phi = \frac{V_{H_2O}^C}{V_{H_2O}} = \frac{1 - \frac{p_s}{p_y} \frac{V_y}{V_{H_2O}}}{1 - \frac{p_s}{p_y}}$$

A. 1. 2. 4 水蒸气的潜热计算公式为：

$$r_{H_2O} = 2501.40526 - 2.33661t - 0.00176t^2 + 6.11591 \times 10^{-5}t^3 \\ - 1.0562 \times 10^{-6}t^4 + 5.38223 \times 10^{-9}t^5$$

式中：

t ——烟气的露点温度与烟气出口温度的平均值，单位为摄氏度（℃）。

A. 1. 2. 5 烟气潜热回收量计算公式为：

$$Q_l = m_{H_2O}^C r_{H_2O}$$

A. 1. 3 烟气余热理论回收总热量

烟气余热理论回收总热量计算公式为：

$$Q_r = Q_s + Q_l$$

式中：

Q_s ——回收显热量的值，单位为千焦每秒（kJ/s）。

A. 1. 4 节能率

烟气冷凝热能回收装置的节能率计算公式为：

$$\eta_{yrh} = \frac{Q_r - Q_d}{B_g \times q_{dw}} \times 100\%$$

式中：

η_{yrh} ——烟气冷凝热能回收装置的节能率；

Q_r ——烟气余热理论回收总热量，单位为千焦每秒（kJ/s）；

Q_d ——回收烟气冷凝热能所消耗能量（按发电平均效率折算为一次能源的能量），单位为千焦每秒（kJ/s）；

B_g ——燃气锅炉的标准状态下燃气流量，单位为立方米每秒（m³/s）；

q_{dw} ——燃气低位发热量，单位为千焦每立方米（kJ/m³）。

A. 2 烟气余热回收技术参数理论计算

烟气余热回收技术参数理论换算见表A. 1。

表A. 1 烟气余热回收技术参数理论换算表

烟气温度 °C	显热 kJ/m ³	潜热 kJ/m ³	总焓值 kJ/m ³	理论回收总热量 kJ/s	冷凝水量 kg/m ³	冷凝水率 %	理论节能率 %
180	2945.34	0.00	2945.34	0.00	0.00	0	0
170	2779.88	0.00	2779.88	165.46	0.00	0	0.5
160	2614.94	0.00	2614.94	330.40	0.00	0	1
150	2450.53	0.00	2450.53	494.81	0.00	0	1.5
140	2286.66	0.00	2286.66	658.68	0.00	0	2
130	2123.33	0.00	2123.33	822.01	0.00	0	2.4
120	1960.53	0.00	1960.53	984.811	0.00	0	2.9
110	1798.28	0.00	1798.28	1147.06	0.00	0	3.4
100	1636.58	0.00	1636.58	1308.76	0.00	0	3.9
90	1475.42	0.00	1475.42	1469.92	0.00	0	4.4
80	1314.81	0.00	1314.81	1630.53	0.00	0	4.8
70	1154.75	0.00	1154.75	1790.59	0.00	0	5.3
60	995.26	0.00	995.26	1950.08	0.00	0	5.8
55	915.72	450.16	1365.87	2479.78	0.18	7	7.4
54	899.82	768.11	1667.93	2813.62	0.31	12	8.4
53	883.94	1067.81	1951.75	3129.21	0.43	17	9.3
52	868.06	1350.44	2218.50	3427.72	0.54	22	10.2
51	852.18	1617.09	2469.27	3710.25	0.65	26	11
50	836.32	1868.75	2705.07	3977.78	0.75	30	11.8
49	820.45	2106.35	2926.80	4231.23	0.84	34	12.6
48	804.60	2330.73	3135.32	4471.47	0.94	38	13.3
47	788.74	2542.68	3331.43	4699.28	1.02	41	14
46	772.90	2742.95	3515.85	4915.39	1.10	44	14.6
45	757.06	2932.20	3689.26	5120.49	1.18	47	15.2
44	741.22	311.08	3852.30	5315.20	1.25	50	15.8
43	725.39	3280.16	4005.56	5500.11	1.32	53	16.3
42	709.57	3440.01	4149.58	5675.78	1.38	56	16.9
41	693.75	3591.14	4284.89	5842.73	1.45	58	17.3
40	677.94	3734.01	4411.95	6001.42	1.50	60	17.8
39	662.13	3869.10	4531.23	6152.31	1.56	63	18.3
38	646.33	3996.81	4643.14	6295.82	1.61	65	18.7
37	630.53	4117.55	4748.08	6432.35	1.66	67	19.1
36	614.74	4231.68	4846.43	6562.28	1.71	69	19.5
35	598.96	4339.56	4938.52	6685.94	1.75	70	19.8
34	583.18	4441.52	5024.70	6803.67	1.79	72	20.2

表 A.1 烟气余热回收技术参数理论换算表 (续)

烟气温度 $^{\circ}\text{C}$	显热 kJ/m^3	潜热 kJ/m^3	总焓值 kJ/m^3	理论回收总热量 kJ/s	冷凝水量 kg/m^3	冷凝水率 %	理论节能率 %
33	567.41	4537.86	5105.27	6915.79	1.83	74	20.5
32	551.64	4628.88	5180.52	7022.57	1.87	75	20.8
31	535.88	4714.85	5250.73	7124.31	1.91	77	21.2
30	520.12	4796.04	5316.16	7221.26	1.94	78	21.4
29	504.37	4872.69	5377.06	7313.66	1.97	79	21.7
28	488.63	4945.04	5433.67	7401.75	2.00	80	22
27	472.89	5013.30	5486.19	7485.75	2.03	82	22.2
26	457.16	5077.69	5534.84	7565.87	2.06	83	22.5
25	441.43	5138.40	5579.83	7642.31	2.08	84	22.7
24	425.71	5195.62	5621.33	7715.25	2.11	85	22.9
23	409.99	5249.53	5659.52	7784.88	2.13	86	23.1
22	394.28	5300.30	5694.58	7851.36	2.15	87	23.3
21	378.58	5348.09	5726.66	7914.85	2.17	87	23.5
20	362.88	5393.04	5755.92	7975.51	2.19	88	23.7

注1：上表计算中天然气低位发热量为33684 kJ/m^3 ，高位发热量为37348 kJ/m^3 ，过剩空气系数取1.15。

注2：饱和水蒸气分压力计算公式采用戈夫·格雷奇公式。