**生物质直燃锅炉设计计算**

生物质直燃锅炉设计计算

3.1锅炉设计时主要的结构尺寸

1）炉膛净空尺寸：250×250×1400

2）炉排有效面积250×600，共做3块，炉排小孔4mm，开孔率40%，炉排下两侧装导轨，机械传动

3）前拱高200，长50；

4）后拱高180，长300

3）炉顶出口：天圆地方结构，出口60mm

4）点火炉门 80×80，装在侧强

5）看火孔42mm

6）炉前装料斗

7）料层厚度60mm

6）炉顶装省煤器，管子18mm，前后各布置测点一个。

8）每隔300mm一个测点，测点预留孔14mm，烟囱上布置一个测点

9）支架高度800mm

10）炉膛内衬80mm厚，布置抓钉

11）整体用不锈钢外包装

12）支架高度800mm

13）整体外形长宽高：760×410×2200

3.2试验原料

本试验是采用生物质颗粒燃料（玉米秸秆颗粒燃料），是由生物质燃料成型机压制而成的。其尺寸是圆柱形，直径是8mm，燃料颗粒自然堆积密度为554.7kg/m3，其颗粒密度为1200kg/m3。

实验前用氧弹式量热仪测定玉米颗粒燃料的收到基净发热量qnet,ar ， qnet,ar=15132kJ/kg。

由燃料元素分析仪分别测定其收到基中C，H，N，S，O的含量，得到：

Car=44.92%，Har=5.77%，Nar=0.98%，Sar=0.21%，Oar=31.26%。

用燃料工业分析仪分别测定其收到基水分含量（Mar），收到基挥发分含量（Var），收到基固定炭含量（Far），收到基灰分含量（Aar）。如下：

Mar= 9.15%，Var= 75.58%，Far= 7.56%，Aar= 7.71%。

3.3直燃锅炉设计的相关参数

1）锅炉功率要求：10 kW；

2）温度：查阅暖通空调设计指南（P63）可以得到室内空气温度在16-24℃范围内[2]，在试验期间实际测得当时温度为 16℃，室外环境温度t0=10℃，排烟温度tpy低于烟气露点，150℃左右 [20]，tpy =165℃；

3）热负荷：查相关锅炉设计手册得炉排单位面积热负荷经验值700~1050kW/m2 [3-8]，由于低温及燃料易燃尽时取上限，所以取qF= 1050 kW/m2；炉膛单位容积热负荷经验值235~350kW/m3 [3-8]，因为低温及燃料易燃尽时取取上限，所以取qV= 350 kW/m3；

4）过量空气系数：炉门和进料槽漏风系数△α= 0.2；炉膛进口空气过量系数α1= 1.5，炉膛出口空气过量系数α2,= α1+△α= 1.7；

5）热损失：固体未完全燃烧损失q4=3.56%，CO未完全燃烧损失q3=2.5%，侧壁散发到室内的热量q5=0%；

6）大气压力P=1atm

总结以上数据绘制成下表1

表1 直燃锅炉主要设计参数

序号 主要设计参数 符号 参数来源 数值 单位

燃料参数

1 燃料种类 给定 玉米桔杆

2 燃料颗粒大小 φs 燃料测定 8 mm

3 燃料颗粒自然堆积密度 ρs 燃料测定 554.7 kg/m3

4 灰渣自然堆积密度 ρash 燃料测定 1200 kg/m3

5 收到基碳含量 Car 燃料元素分析仪测定 44.92 %

6 收到基氢含量 Har 燃料元素分析仪测定 5.77 %

7 收到基氮含量 Nar 燃料元素分析仪测定 0.98 %

8 收到基硫含量 Sar 燃料元素分析仪测定 0.21 %

9 收到基氧含量 Oar 燃料元素分析仪测定 31.26 %

10 收到基水分含量 Mar 燃料工业分析仪测定 9.15 %

11 收到基挥发分含量 Var 燃料工业分析仪测定 75.58 %

12 收到基固定炭含量 Far 燃料工业分析仪测定 7.56 %

13 收到基灰分含量 Aar 燃料工业分析仪测定 7.71 %

14 收到基净发热量 qnet,ar 氧弹式量热仪测定 15132 kJ/kg

直燃锅炉参数

15 功率 W 10 kW

16 温度 thot,2 30-50℃，不超过70℃ [1] 50 ℃

17 室内空气温度 thot,1 在16-24℃范围内选取 [2] 16 ℃

18 炉排单位面积热负荷 qF 经验值700~1050kW/m2 [3-8] 1050 kW/m2

低温及燃料易燃尽时取上限

19 炉膛单位容积热负荷 qV 经验值235~350kW/m3 [3-8] 350 kW/m3

低温及燃料易燃尽时取取上限

20 炉门和进料槽漏风系数 △α 参照文献[9]选取 0.2

21 炉膛出口空气过量系数 α2 α1+△α 1.7

22 炉膛进口空气过量系数 α1 参考文献[10-13] 1.5

23 固体未完全燃烧损失 q4 参考文献[14-16] 3.56 %

24 CO未完全燃烧损失 q3 参照文献[14-16]选取 2.5 %

25 侧壁散发到室内的热量 q5 参考文献 [17-19] 0 %

26 室外环境温度 t0 给定 10 ℃

27 排烟温度 tpy 低于烟气露点，150℃左右 [20] 165 ℃

28 压力 P 给定 1 atm

3.4烟气量的计算

（1）二氧化物量vRO2

二氧化物是指烟气中的量，其计算如下：

vRO2=0.01866(Car+0.375Sar)

=0.01866（44.92+0.375×0.21）

=0.839676675Nm3/kg

（2）理论空气量va,0

理论空气量是指每千克固体、液体燃料或每标准立方米气体燃料在化学当量比之下完全燃烧所需的空气量。此试验所需的理论空气量为：

va,0=0.0889(Car+0.375Sar)+0.265Har-0.0333Oar

=0.0889（44.92+0.375×0.21）+0.265×5.77-0.0333×31.26

=4.488480875Nm3/kg

（3）理论氮气量vN2

理论氮气量包括空气中的氮气量和燃料燃烧所产生的氮气。计算如下：

vN2= 0.008Nar+0.79Va,0

=0.008×0.98+0.79×4.488480875

=3.553739891 Nm3/kg

（4）理论水蒸气量

理论水蒸气量包括自身水分，空气中水分和H燃烧生成的水分：

=0.111Har+0.0124Mar+0.0161Va,0

=0.111×5.77+0.0124×9.15+0.0161×4.488480875

=0.826194542 Nm3/kg

（5）理论烟气量vy,0

理论烟气量是指单位燃料与理论空气进行完全燃烧生成的烟气量。包括二氧化物，氮气和水蒸气的量：

vy,0=VRO2+VN2+VH2O,0

=0.839676675+3.553739891+0.826194542

=5.219611108 Nm3/kg

（6）实际烟气量vy

实际排放或者测量的烟气量，依状态不同，分为工况和标况两种，工况是依实际条件测定的烟气量，标况是工况换算成标准状态下的烟气量：

vy= vy,0+1.0161(α-1)Va,0

α1= 1.5，则vy=5.219611108+1.0161×（1.5-1）×4.488480875

=7.499983817

α2,= α1+△α= 1.7，vy=5.219611108+1.0161×（1.7-1）×4.488480875

= 8.4121329

汇总数据成下表2：

表2 烟气量计算

序号 项目 符号 单位 计算公式 数值

1 过剩空气系数 α 1.5 1.7

2 二氧化物量 vRO2 Nm3/kg 0.01866(Car+0.375Sar) 0.839676675 0.839676675

3 理论空气量 va,0 Nm3/kg 0.0889(Car+0.375Sar)

+0.265Har-0.0333Oar 4.488480875 4.488480875

4 理论氮气量 vN2 Nm3/kg 0.008Nar+0.79Va,0 3.553739891 3.553739891

5 理论水蒸气量 vH2O,0 Nm3/kg 0.111Har+0.0124Mar

+0.0161Va,0 0.826194542 0.826194542

6 理论烟气量 vy,0 Nm3/kg VRO2+VN2+VH2O,0 5.219611108 5.219611108

7 实际烟气量 vy Nm3/kg vy,0+1.0161(α-1)Va,0 7.499983817 8.4121329

3.5烟气焓温表

由于实验需多次用到烟气焓温表，所以查阅工业锅炉实用手册得到下表3以随时查找相关数据：

表3 烟气焓温表[21]

θ/℃ iCO2 iN2 iH2O iy,0 ia,0 iy=iy,0+(α-1)ia,0

(ct)CO2 vRO2(ct)RO2 (ct)N2 vN2(ct)N2 (ct)H2O vH2O(ct)H2O iRO2+iN2+iH2O (ct)a va,0(ct)a 1.5 1.7

100 170 142.7450348 130 461.9861859 151 124.7553759 729.4865965 132 592.479476 1025.726334 1144.22223

200 375 314.8787531 260 923.9723717 304 251.1631408 1490.014266 266 1193.93591 2086.982222 2325.7694

300 559 469.3792613 392 1393.066037 463 382.528073 2244.973372 403 1808.85779 3149.402268 3511.17383

400 772 648.2303931 527 1872.820923 626 517.1977833 3038.249099 542 2432.75663 4254.627416 4741.17874

500 994 834.638615 664 2359.683288 795 656.824661 3851.146564 684 3070.12092 5386.207023 6000.23121

600 1225 1028.603927 804 2857.206873 969 800.5825113 4686.393311 830 3725.43913 6549.112874 7294.2007

700 1462 1227.607299 948 3368.945417 1149 949.2975289 5545.850245 978 4389.7343 7740.717392 8618.66425

800 1705 1431.648731 1094 3887.791441 1334 1102.143519 6421.583691 1129 5067.49491 8955.331145 9968.83013

900 1952 1639.04887 1242 4413.744945 1526 1260.772871 7313.566686 1282 5754.23248 10190.68293 11341.5294

1000 2204 1850.647392 1392 4946.805929 1723 1423.533196 8220.986516 1437 6449.94702 11445.96003 12735.9494

1100 2458 2063.925267 1544 5486.974392 1925 1590.424494 9141.324153 1595 7159.127 12720.88765 14152.713

1200 2717 2281.401526 1697 6030.696595 2132 1761.446764 10073.54489 1753 7868.30697 14007.69837 15581.3598

1300 2977 2499.717461 1853 6585.080018 2344 1936.600007 11021.39749 1914 8590.95239 15316.87368 17035.0642

1400 3239 2719.71275 2009 7139.463442 2559 2114.231833 11973.40803 2076 9318.0863 16632.45117 18496.0684

1500 3503 2941.387393 2166 7697.400604 2779 2295.994632 12934.78263 2239 10049.7087 17959.63697 19969.5787

3.6直燃锅炉热效率和燃料消耗量计算

（1）冷空气理论焓 ia,t0,0

由于经过排烟和灰斗预热，温度接近0℃， 近似为基准温度0℃，所以其焓是0.

（2）排烟焓

由排烟温度为165℃可查得排烟焓 ipy=1740 kJ/kg。

（3）排烟热损失 q2

其值在8～16%范围内，合理。

（4）灰渣温度、焓和排渣率

参照文献[23]可以选取灰渣温度为300℃；参照文献[24]可以得出灰渣焓 iash=(ct)ash=264 kJ/kg；参照文献[25]且通过实验获得排渣率为αash=22%。

（5）灰渣散发到室内的热量 q6

由于在试验中忽略了灰渣散发到室内的热量，所以可以将其设定为0。

（6）直燃锅炉总热损失∑q

∑q= q2+q3+q4+q5+q6=14.11%

（7）直燃锅炉热效率η

η=100-∑q=85.89%>小容量工业锅炉设计效率50-62%

达到了85%的要求，设计合理。

（8）燃料消耗量 m

m=100W/(3600qnet,arη)

=100×10×1000/(3600×15132×85.89)

=0.0007694 kg/s

=0.769 g/s

（9）保热系数ηb

ηb=1-q5/(η+q5)=100%

（10）燃料最大日消耗量 mmax

mmax=3600×24m

=3600×24×0.0007694

=66.467kg/d

（11）料仓容积 Vs

Vs =mmax×nt/ρs =35

（12）灰产生量 mash

mash= mmax×nt×αash×Aar×7

=66.467×30×22×7.71

=2.367 kg/week

（13）综合热效率η’

η’=η+(q5+q6)/qnet,ar

=85.89%

汇总以上数据计算得下表4：

表4 直燃锅炉热效率和燃料消耗量计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1 燃料收到基单位发热量 qnet,ar 表1 15132 kJ/kg

2 冷空气温度 t0 表1 10 ℃

3 冷空气理论焓 ia,t0,0 近似为基准温度0℃

经过排烟和灰斗预热，温度接近0℃ 0 kJ/kg

4 排烟温度 tpy 表1 165 ℃

5 排烟焓 ipy 表3 1740 kJ/kg

6 固体不完全燃烧热损失 q4 表1 3.56 %

7 排烟热损失 q2 100(ipy-α2ia,t0,0)(1-q4/100)/qnet,ar 8.054 %

在8～16%范围内[1, 2]

8 CO不完全燃烧损失 q3 表1 2.5 %

9 侧壁散发到室内的热量 q5 表1 0 %

10 灰渣温度 tash 参照文献[3]、实验和经验选取 300 ℃

11 灰渣焓 iash 参考文献[4]，iash=(ct)ash 264 kJ/kg

12 排渣率 αash 参照文献[5]和实验选择 22 %

13 燃料收到基灰分 Aar 表1 7.71 %

14 灰渣散发到室内的热量 q6 100αash(ct)ashAar/qnet,ar 0 %

15 直燃锅炉总热损失 ∑q q2+q3+q4+q5+q6 14.11 %

16 直燃锅炉热效率 η 100-∑q 85.89 %

>小容量工业锅炉设计效率50-62%[6, 7]

17 直燃锅炉功率 W 表1 10 kW

18 燃料消耗量 m 100W/(3600qnet,arη) 0.0007694 kg/s

0.769 g/s

19 保热系数 ηb 1-q5/(η+q5) 100 %

20

燃料最大日消耗量

mmax 3600×24m 66.477 kg/d

21 运行时间系数 nt 按经验选取 30 %

22 料仓容积 Vs mmax×nt/ρs，1仓/天 35 l

23 燃料月消耗量 mmon 30mmax×nt 0.598 t/mon

24 灰斗容积 Vash mash/ρash 1 l

25 灰产生量 mash mmax×nt×αash×Aar×7，1次/周 2.367 kg/week

26 综合热效率 η’ η+(q5+q6)/qnet,ar 85.89 %

3.7燃烧器和炉膛设计计算

3.7.1水平炉排和侧壁风孔计算

（1）炉排单位面积燃烧率qm

参考文献[21]，Far=7.56%<无烟煤45%，符合计算设计标准

qm=3600×(0.45/Far×qF)/qnet,ar ,

=3600×（0.45/7.56×1050）/15132

=1487 kg/(m2h)

（2）水平炉排

参考文献[21]，Far=7.56%<无烟煤45%，符合计算设计标准

总面积Ap= m×qnet,ar/(0.45/Far×qF)

=0.00076942×15132/(0.45/7.56×1050)

=0.001863 m2

1)水平炉排类型参照calimax样机确定，是宽而窄；

2)水平炉排形状系数参照calimax样机选取3.5；

3)水平炉排区有效长度lp：联立lp/wP=3.5和lp×wP=Ap求解，可得lp=82mm，进料槽颗粒能

4)沿炉排长度方向较均匀(随机)分布；

5)水平炉排区有效宽度wp减薄火焰厚度和减小炉排中心缺氧区域面积：

wp=1000×Ap/lP

=1000×0.001863/0.082

=24mm

(3) 燃烧需实际空气量va

va= (α1+α2)/2×va,0

=(1.5+1.7)/2×4.488480875

= 7.1815694 Nm3/kg

(4) 空气通过炉排间隙流速ua

ua= va×m×a/(a+1)/[(n1+1)×dp×wp]

= 7.1815694×0.00076942×2/(2+1)/ [(7+1)×5×24]

=5.08 m/s

(5) 水平炉排通风截面积Atf

Atf= va×m×a/(a+1)/ua

=7.1815694×0.00076942×2/(2+1)/ 5.08

=960mm2

(6) 水平炉排通风截面积比ftf

ftf=Atf /Ap×100

=960/0.001863×100

=51.5%

(7) 水平炉排片数目n1

n1=(lp-dp)/(dp+φp)

=(82-5)/(5+5)

=7.7,取整即7

水平炉排片直径φp=5mm

水平炉排片间距dp=5mm

（8）一、二次风孔面积比Atf : Ack=7.5

(9) 侧壁矩形风孔总面积Ack

Ack= Atf /(Atf : Ack)

=960/7.5

=128 mm2

(10) 侧壁矩形风孔宽度wck

考虑颗粒φ和calimax样机侧壁风孔(φ3mm)设计,得wck=2.1mm

(11) 侧壁矩形风孔高度hck

hck=2wck=4.2，和calimax样机侧壁风孔面积相等

(12) 侧壁矩形风孔数目n2

n2=Ack / (wck×hck)

=128/(2.1×4.2)

=14.5,取整即为14

（13）侧壁沿炉宽方向矩形风孔个数n21参照calimax样机选定为3个

（14）前后侧壁矩形风孔个数之比n22:n23参照calimax样机布置为0.6

则，前侧壁矩形风孔个数n22=n22 : n23/(n22 : n23+1)×(n2 - 2×n21)=3个；

后侧壁矩形风孔个数n23=n2-2×n21-n22=5个

（15）通过水平炉排的一次风百分数φa,p

φa,p=100×(n1+1)×dp×wp/[(n1+1)×dp×wp+n2×wck×hck]

=100×（7+1）×5×24/[(7+1)×5×24+14×2.1×4.2]

=88.6%

(16) 通过侧壁风孔的二次风百分数φa,ck

φa,ck=100-φa,p

=100-88.6%

=11.4%

汇总如下表5：

表5 水平炉排和侧壁风孔计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1 燃料消耗量 m 表4 0.00076942 kg/s

2 燃料收到基低位发热量 qnet,ar 表1 15132 kJ/kg

3 炉排单位面积热负荷 qF 表1 1050 kW/m2

4 炉排单位面积燃烧率 qm 1487 kg/(m2h)

5 水平炉排总面积 Ap 0.001863 m2

6 水平炉排类型 宽而窄

7 水平炉排形状系数 lp/wP 3.5

8 水平炉排区有效长度 lp 82 mm

9 水平炉排区有效宽度 wp 1000×Ap/lP 24 mm

10 燃烧需实际空气量 va (α1+α2)/2×va,0 7.1815694 Nm3/kg

11 空气通过炉排间隙流速 ua 5.08 m/s

12 水平炉排通风截面积 Atf va×m×a/(a+1)/ua 960 mm2

13 水平炉排通风截面积比 ftf Atf /Ap×100 51.5 %

14 水平炉排片数目 n1 (lp-dp)/(dp+φp)，取整 7 根

15 水平炉排片直径 φp 5 mm

16 水平炉排片间距 dp 5 mm

17 水平炉排材质 参考文献[3] HT150-200

18 水平炉排脊背形状 参考文献[4] 半圆形

19 一、二次风孔面积比 Atf : Ack 7.5

20 侧壁矩形风孔总面积 Ack Atf /(Atf : Ack) 128 mm2

21 侧壁矩形风孔宽度 wck 2.1 mm

22 侧壁矩形风孔高度 hck 4.2 mm

23 侧壁矩形风孔数目 n2 Ack / (wck×hck)，取整 14 个

24 侧壁沿炉宽方向矩形风孔个数 n21 3 个

25 前后侧壁矩形风孔个数之比 n22:n23 0.6

26 前侧壁矩形风孔个数 n22 3 个

27 后侧壁矩形风孔个数 n23 n2-2×n21-n22 5 个

28 通过水平炉排的一次风百分数 φa,p 88.6 %

29 通过侧壁风孔的二次风百分数 φa,ck 100-φa,p 11.4 %

3.7.2炉膛计算

（1）炉膛容积V炉膛

通过参考文献[21]，设计大炉膛容积，保证燃烬时间，

V炉膛= m×(qnet,ar-Far×0.01×30000)/qv

=0.00076942×(15132-7.56×0.01×30000)/350

=28m3

炉膛类型参照calimax样机确定为宽、高而窄

（2）炉膛梯形区高度h梯

参照calimax样机选定，火焰最高温度正常高度为300mm

(3) 炉膛矩形区高度h矩

h矩= [V炉膛/W炉膛-(l梯下底+L炉膛)×h梯/2]/L炉膛

= [28/150-(152+400)×300/2]/400

=260mm

炉膛梯形区底边长l梯下底利于落灰和组织宽高薄火焰,

l梯下底=lp+2×dfp

=82+2×35

=152

炉膛长度L炉膛=400mm

炉膛宽度W炉膛=150mm

(4) 炉膛侧壁底部与炉排间距dfp

为了便于放取水平炉排，dfp设定为35mm

(5) 炉顶辐射换热管与垂直方向夹角θ按辐射圆管实际布置确定便于在窄小空间里布置更多辐射换热面积，最终确定为40o。

(6) 腔顶斜边长a暖参照calimax样机选定为100mm; 矩形通道斜宽度W暖,1参照calimax样机选定为25mm; 垂直空气腔宽度δ暖参照calimax样机选定为70mm; 辐射换热管端面斜宽度W暖,2，端面布置辐射换热管，参照calimax样机选定为75mm;

(7) 炉膛前侧壁高度H前

H前= h梯+h矩+0.5W炉膛/tgθ

= 300+260+0.5×150/40o

=650mm

(8) 炉膛中间高度H中

H中=h梯+h矩+0.5W炉膛/tgθ+a暖sinθ

=300+260+0.5×150/tg40o +100sin40o

=714mm

(9)垂直空气腔后侧壁高度H后

H后=H中-(δ暖+W炉膛-a暖×cosθ)/tgθ

=714-(70+150-100×cos40o)/tg40o

=543mm

汇总以上数据得下表：

表6 炉膛计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1 炉膛单位容积热负荷 qV 表1 350 kW/m3

2 炉膛容积 V炉膛 28 m3

3 炉膛类型 宽、高而窄

4 炉膛梯形区高度 h梯 300 mm

5 炉膛矩形区高度 h矩 260 mm

6 炉膛侧壁底部与炉排间距 dfp 便于放取水平炉排 35 mm

7 炉膛梯形区底边长 l梯下底 152 mm

8 炉膛长度 L炉膛 400 mm

9 炉膛宽度 W炉膛 150 mm

10 炉顶辐射换热管与垂直方向夹角 θ 40 °

11 腔顶斜边长 a暖 100 mm

12 矩形通道斜宽度 W暖,1 25 mm

13 垂直空气腔宽度 δ暖 70 mm

14 辐射换热管端面斜宽度 W暖,2 75 mm

15 炉膛前侧壁高度 H前 650 mm

16 炉膛中间高度 H中 714 mm

17 垂直空气腔后侧壁高度 H后 543 mm

3.7.3颗粒层阻力计算

（1）阻力系数M

参考文献得知在10-20范围内选取故选取M=10

（2）包括炉排在内的阻力Δm

考虑炉排上积灰百分数，

Δm =M(qmαash)2/103

=10×（1487×22%）/103

=1072 Pa

（3） 颗粒层最大容许厚度hm

参照文献[]可知颗粒和灰渣不堵炉膛侧壁二次风孔在25~50mm之间，参考calimax样机选取为50mm。

（4）侧壁矩形风孔高出水平炉排的高度Δh

Δh和颗粒层最大容许厚度相等，即为50mm

汇总数据得下表7：

表7 颗粒层阻力计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1 系数 M 在10-20范围内选取[2] 10

2 包括炉排在内的阻力 Δm 1072 Pa

3 颗粒层最大容许厚度 hm 50 mm

4 侧壁矩形风孔高出水平炉排的高度 Δh 50 mm

3.8辐射换热计算

3.8.1计算理论燃烧温度

（1）燃料系数e

参考文献[1]，查无烟煤数据可得e=0.15

（2）燃质系数N

参考文献[1]，查无烟煤数据可得N=2500

（3）理论燃烧温度tmax,1

tmax,1= N/(α2+e)

=2500/(1.7+0.15)

=1351℃

（4）理论燃烧温度tmax,2

tmax,2由表3烟气焓温表查得1171℃

（5）理论燃烧温度计算值tmax

tmax=max(tmax,1, tmax,2)= 1351℃

汇总数据见下表8：

表8 理论燃烧温度

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1 炉膛出口过量空气系数 α2 表1 1.7

2 燃料系数 e 0.15

3 燃质系数 N 2500

4 理论燃烧温度 tmax,1 1351 ℃

5 理论燃烧温度 tmax,2 1171 ℃

6 理论燃烧温度计算值 tmax 1351 ℃

3.8.2计算辐射换热量

（1）炉膛出口烟温tll,cal

由参考文献可知tll,cal<灰软化温度860-900℃，设定为700℃

（2）辐射换热量Qrad,cal

Qrad,cal=(tmax-tll,cal)W/(tmax-tpy)

=(1351-700)×10/(1351-165)

=5.489kW

（3）辐射换热面热强度qrad,cal

参照文献[]，结合tll线性外延，可得qrad,cal=30kW/m2

（4）有效辐射换热面Arad,0

Arad,0=Qrad,cal/qrad

=5.489/30

=0.182967m2

(5) 辐射换热面利用率ηrad

参考文献[3]，并结合经验选取ηrad=76%

(6) 辐射换热面积计算值Arad,cal

Arad,cal=Arad/ηrad

=0.182967/76%

=0.240746m2

(7) 观察窗下底边边长awin,down和炉排长度lp相等，取整得80 mm；

观察窗两边预留宽度∆awin,down安装观察窗需要知其为60mm;

观察窗上底边边长awin,up= awin,down-2×∆awin,down=280mm;

观察窗顶边离梯形顶边距离∆hwin= 40mm;

观察窗高度hwin= hwin-∆hwin= 260mm;

观察窗辐射换热面积Awin= (awin,down+awin,up)×hwin/2= 0.0468mm;

过渡烟道宽度∆Wy为了便于布置过渡烟道设置为70mm。

（8）炉顶辐射换热面积Atop

Atop= (L炉膛-2×∆Wy)×W炉膛/sinθ

= (400-2×70)×150/sin40o

=0.060673m2

（9）炉顶换热管外径φpipe

炉顶换热管布置在炉顶外，参照calimax样机选取φpipe=25mm。

（10）炉顶换热管单管长度lpipe

lpipe=W炉膛/sinθ

=150/sin40o

=200mm

(11) 炉顶换热管根数npipe

npipe=Arad,cal/(fpipe×p×lpipe)

= 0.240746/(25×p×200)

=12根

（12）辐射换热管总换热面积Apipe

Apipe= npipe×fpipe×p×lpipe

= 12×25×p×200

= 0.1884 m2

（13）辐射换热管排数npipe,row

辐射换热管排数参照calimax样机布置成2排。

（14）上排辐射换热管根数npipe,up

npipe,up=int[npipe/2+0.5]

=int[12/2+0.5]

=6根

下排辐射换热管根数npipe,down参照calimax样机布置为6根。

（15）上排边缘辐射换热管中心与烟道间距∆d1参照calimax样机布置，∆d1=10+0.5φpipe=22.5mm;

上排辐射换热管管中心间距∆d2=(W炉膛-2×∆Wy-2×∆d1)/(npipe,up-1)=43mm,可以防止积灰；

下排辐射换热管管中心间距∆d4和上排辐射换热管间距相等,为43mm;

下排边缘辐射换热管中心与烟道间距∆d3= (W炉膛-2×∆Wy-(npipe,down-1)×∆d4)/2=22.5mm;

上下排辐射换热管中心与炉顶板间距∆d5参照calimax样机布置为5+0.5φpipe=17.5mm;

上下排辐射换热管管中心间距∆d6= W暖,2-2×∆d5=20mm。

（16）实际辐射换热面积Arad,act

Arad,act= Αpipe+Awin

= 0.1884+0.0468

= 0.2352 m2

（17）实际辐射换热面积与计算值差值ΔΑrad

ΔΑrad= |Apipe-Arad,cal|/Arad,cal×100%

= |0.1884-0.240746|/0.240746×100%

=0.2%

（18）实际辐射换热面利用率ηrad

参考文献[3]，并结合经验选取ηrad=76%

（19）实际有效辐射面积Arad,0

Arad,0=Arad,act×ηrad

=0.2352×76%

=0.178752m2

（20）实际辐射换热面热强度qrad

qrad=Qrad/Arad,0

=5.455/0.178752

=30.707kW/m2

(21) 实际炉膛出口烟温tll

参照文献[3]，结合tll线性外延得知tll=704℃

（22）炉膛出口烟温校核Δtll

Δtll=|tll,cal-tll|/tll,cal×100%

=|700-704|/700×100%

=0.57%

（23）实际辐射换热面吸热Qrad

Qrad=(tmax-tll)W/(tmax-tpy)

=(1351-704)×10 /(1351-165)

=5.455kW

（24）辐射换热与对流换热比Qrad : Qcon=1.2

Qrad : Qcon

= 5.455 : 4.545

=1.2

（25）观察窗辐射换热量Qwin

Qwin= Qrad×Awin/(Apipe+Awin)

= 5.455×0.0468/(0.1884+0.0468)

=0.242 kW

（26）辐射换热管换热量Qpipe

Qpipe= Qrad×Apipe/(Apipe+Awin)

= 5.455×0.1884/(0.1884+0.0468)

= 5.213 kW

（27）观察窗辐射换热百分数

Qwin/(Qpipe+Qwin)×100

= 0.242/(5.213+0.242)×100

=4.44%

汇总辐射换热量数据见下表9：

表9 辐射换热计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

7 直燃锅炉功率 W 表1 10 kW

8 固体不完全燃烧损失 q4 表1 7.5 %

9 直燃锅炉热效率 η 表4 85.89 %

10 助燃空气显热 Qa 表4 0 kW

11 炉膛出口烟温 tll,cal 700 ℃

12 排烟温度 tpy 表1 165 ℃

13 辐射换热量 Qrad,cal 5.489 kW

14 辐射换热面热强度 qrad,cal 30 kW/m2

15 有效辐射换热面 Arad,0 0.182967 m2

16 辐射换热面利用率 ηrad 76 %

17 辐射换热面积计算值 Arad,cal 0.240746 m2

18 实际辐射换热面积计算值 Arad,cal 0.240746 m2

19 观察窗下底边边长 awin,down 80 mm

20 观察窗两边预留宽度 ∆awin,down 60 mm

21 观察窗上底边边长 awin,up 280 mm

22 观察窗顶边离梯形顶边距离 ∆hwin 40 mm

23 观察窗高度 hwin 260 mm

24 观察窗辐射换热面积 Awin 0.0468 m2

25 过渡烟道宽度 ∆Wy 70 mm

26 炉顶辐射换热面积 Atop 0.060673 m2

27 炉顶换热管外径 φpipe 25 mm

28 炉顶换热管平面与垂直方向夹角 θ 表5 40 °

29 炉顶换热管单管长度 lpipe 200 mm

30 炉顶换热管根数 npipe 12 根

31 辐射换热管总换热面积 Apipe 0.1884 m2

32 辐射换热管布置

33 辐射换热管排数 npipe,row 2 排

34 上排辐射换热管根数 npipe,up 6 根

35 上排边缘辐射换热管中心与烟道间距 ∆d1 22.5 mm

36 上排辐射换热管管中心间距 ∆d2 43 mm

37 下排辐射换热管根数 npipe,down 6 根

38 下排辐射换热管管中心间距 ∆d4 43 mm

39 下排边缘辐射换热管中心与烟道间距 ∆d3 22.5 mm

40 上下排辐射换热管中心与炉顶板间距 ∆d5 17.5 mm

41 上下排辐射换热管管中心间距 ∆d6 20 mm

42 实际辐射换热面积 Arad,act 0.2352 m2

43 实际辐射换热面积与计算值差值 ΔΑrad 0.2 %

44 实际辐射换热面利用率 ηrad 76 %

45 实际有效辐射面积 Arad,0 0.178752 m2

46 实际辐射换热面热强度 qrad 30.707 kW/m2

47 实际炉膛出口烟温 tll 704 ℃

48 炉膛出口烟温校核 Δtll 0.57 %

49 实际辐射换热面吸热 Qrad 5.455 kW

50 辐射换热与对流换热比 1.2

51 辐射换热分配

观察窗辐射换热量 Qwin 0.242 kW

辐射换热管换热量 Qpipe 5.213 kW

观察窗辐射换热百分数 4.44 %

3.9对流换热计算

3.9.1对流换热量和换热前后烟空气温度及平均温差

（1）对流换热热量Qcon

Qcon=(tll-tpy)W/(tmax-tpy)

=(704-165)×10 /(1351-165)

=4.545kW

（2）热空气出口温度thot,med

thot,med=thot,1+(thot,2-thot,1)/W×Qcon

=16+(50-16)/10×4.545

=31.45℃

（3）最大温差Δtmax

Δtmax=tll-thot,1

=704-16

=688℃

（4）最小温差Δtmin

Δtmin=tpy-thot,med

=165-31.45

=133.55

（5）平均温差Δtm

根据参照文献[]可知温差修正系数ψ=Δtmax/Δtmin=0.477；

Dtm=y×Dtmax=0.477×688=328.18℃

数据统计如下表10：

表10 对流换热量和换热前后烟空气温度及平均温差

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

计算对流换热量及对流换热前后烟空气温度

1 离炉烟气温度 tll 表6 704 ℃

2 排烟温度 tpy 表1 165 ℃

3 理论燃烧温度 tmax 表6 1351 ℃

4 直燃锅炉功率 W 表1 10 kW

5 助燃空气显热 Qa 表4 0 kW

6 对流换热热量 Qcon 4.545 kW

W-Qrad 4.545 kW

7 室内空气温度 thot,1 表1 16 ℃

8 热空气出口温度 thot,med 31.45 ℃

计算平均温差

9 最大温差 Δtmax tll-thot,1 688 ℃

10 最小温差 Δtmin tpy-thot,med 133.55 ℃

11 温差修正系数 ψ 按Δtmax/Δtmin 0.477

12 平均温差 Δtm ψ×Δtmax 328.18 ℃

3.9.2烟空气流量和流速计算

（1）空气平均温度thot,aver

thot,aver=0.5×(thot,1+thot,med)

=0.5×(16+31.45)

=23.73℃

（2）烟气平均温度ty,aver

ty,aver=thot,aver+Δtm

=23.73+328.18

=351.91

（3）烟气流量Vy

Vy=m×vy×(1+ty,aver/273)

=0.0007694×7.499983817×(1+351.91/273)

=0.014816m3/s

（4）烟气流速wy,cal

wy,cal按经验选取经济流速[2]为6.52m/s

（5）假设烟气流通截面积Ay,cal=Vy/wy,cal=0.002272m2；

对流换热管数量ny参照calimax样机设计为2个；

垂直烟气腔水平截面宽度by参照calimax样机选取为100mm；

垂直烟气腔水平截面厚度δy=Ay,cal/ny/by=0.002272/2/100=11mm。

（6）烟气实际流速wy

wy= Vy/(ny×by×δy)，属经济流速[2]

= 0.014816/(2×100×11)

=6.73

（7）烟气实际流通截面积Ay

Ay= by×δy×ny

= 100×11×2×10-6

=0.0022m2

（8）空气流量Va

Va=W/[1.165×1.005×(thot,2-thot,1)]

=10/[1.165×1.005×(50-16)]

=0.251205

（9）空气流通截面布置

垂直腔宽度见表1为70mm；

炉膛侧壁夹套厚度δ参照calimax样机选取为30mm；

垂直腔空气流通截面积Aa=δ暖×L炉膛+δ×2×(W炉膛+δ暖)−Ay

=70×400+30×2×(150+70)×10-6−0.0022

=0.039m2

（10）风速wa

wa=Va/Aa，属经济流速[2, 3]

=0.251205/0.039

=6.44m/s

相关数据统计如表11：

表11 烟空气流量和流速计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1

空气平均温度 thot,aver 23.73 ℃

2 烟气平均温度 ty,aver 23.73 ℃

3 对流换热区空气过剩系数 α2 表1 1.7

4 直燃锅炉热效率 η 表4 85.89 %

5 烟气流量 Vy 0.007035 m3/s

6 烟气流速 wy,cal 6.52 m/s

7 烟气流通截面积假设 Ay,cal 0.001079 m2

8 对流换热管数量 ny 2 个

9 垂直烟气腔水平截面宽度 by 100 mm

10 垂直烟气腔水平截面厚度 δy 5 mm

11 烟气实际流速 wy 7.04 m/s

12 烟气实际流通截面积 Ay 0.0022 m2

13 空气流量 Va 0.251205 m3/s

14 空气流通截面布置

垂直腔宽度 δ暖 表5 70 mm

炉膛侧壁夹套厚度 δ 30 mm

垂直腔空气流通截面积 Aa 0.039 m2

15 风速 wa 6.44 m/s

3.9.3传热系数的计算

（1）传热系数K

与烟气流速有关系数k1，由参考文献[1]，顺排4wy+6= 40.92；

管径系数k2，为了简化计算，取近似值1；

冲刷系数k3，参照文献[4]选取值为1；

传热系数K= k1×k2×k3×1.163×10-3= 40.92×1×1×1.163×10-3=0.048kW/(m2K)。

（2）对流换热面积Acon

Acon=Qcon/(K×Δtm)

=4.545/(0.048×328.18)

=0.288523m2

（3）对流换热面布置

水平排烟高度hy参照calimax样机选取为130mm；

对流换热单管高度hcon=H后-hy=543-130=413mm；

对流换热单管周度ΣL=Acon/(hcon×ny)，取整得348 mm；

波纹换热富裕系数kbo考虑波片粘结粉尘和换热富裕为1.225；

波纹单片伸展宽度bbo= (ΣL-δy)/2×kbo= (348-5)/2×1.225= 206 mm；

波纹单片数目nbo= 2×ny= 4片；

波纹倾斜角θbo= arccos(by/bbo)= 61°；

波纹单片面积Abo= hcon×bbo= 413×206×10-6=0.085284m2；

数据统计如下表12：

表12 传热系数的计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1

与烟气流速有关系数 k1 40.92

2 管径系数 k2 1

3 冲刷系数 k3 1

4 传热系数 K 0.048 kW/(m2K)

5 对流换热面积 Acon 0.288523 m2

6 对流换热面布置

水平排烟高度 hy 130 mm

对流换热单管高度 hcon 414 mm

对流换热单管周度 ΣL 348 mm

波纹换热富裕系数 kbo 1.225

波纹单片伸展宽度 bbo 206 mm

波纹单片数目 nbo 2×ny 4 片

波纹倾斜角 θbo 61 °

波纹单片面积 Abo 0.085284 m2

3.9.4对流换热面校核计算

（1）实际对流换热面积Acon

Acon= 2×ny×Abo+ny×δy×hcon

= 2×2×0.085284+2×11×414

=0.350244 m2

（2）烟管污染系数k4

考虑波纹换热富裕，k4=1/kbo= 0.82

（3）考虑污染的烟管传热系数K'

K'= K×k4

= 0.048×0.82

= 39 W/(m2K)

（4）对流换热量Qcon,act

Qcon,act= K'×Acon×Δtm

= 39×0.350244×328.18

=4.483kW

（5）对流换热量误差ΔQcon

ΔQcon=|Qcon,act-Qcon|/Qcon×100%

=|4.483-4.545|/4.545×100%

=1.36%

数据统计如下表13：

表13 对流换热面校核计算

序号 项目 符号 数据来源 数值 单位

1

实际对流换热面积 Acon 0.350244 m2

2 烟管污染系数 k4 0.82

3 考虑污染的烟管传热系数 K' K×k4 39 W/(m2K)

4 对流换热量 Qcon,act 4.483 kW

5 对流换热量误差 ΔQcon 1.36 %

3.10 风机风压与风量计算

3.10.1空烟气流动阻力计算

（1）对流换热区烟气密度ρy

ρy=(1-0.01Aar+1.306αVa,0)×Vy×(1+ty,aver/273)

=(1-0.01×7.71+1.306×1.7×4.488480875)×0.014816×(1+351.91/273)

=0.565kg/m3

（2）对流换热区入口局部阻力系数ξy,1

ξy,1通过参考文献[1] ，由于圆角过渡选取为0.5。

（3）对流换热区入口局部阻力Δhξ,1

Δhξ,1=ξy,1×ρy×wy×wy/2

=0.5×0.565×6.73×6.73/2

=6.4a

（4）烟气管沿程阻力系数λy

λy通过参考文献[2] ，按钢管阻力系数选取为0.04。

（5）烟管当量直径dy

dy= Ay/ny×4/[(by+δy)×2]

= 0.0022/2×4/[(100+11)×2]

= 19.8mm

（6）烟管沿程阻力Δhl,1

Dhl,1= λy×ly×ρy×wy×wy/(2×dy)

=0.04×0.414×0.565×6.73×6.73/(2×19.8)×103

=10.7Pa

（7）烟气管等径拐直角弯局部阻力系数ξy,2

ξy,2参考文献[1]取1.15。

（8）烟气管等径拐直角弯局部阻力Δhξ,2

Δhξ,2=ξy,2×ρy×wy×wy/2

=1.15×0.565×6.73×6.73/2

=14.7Pa

（9）排烟连接管直径dy,out

排烟连接管直径dy,out参照calimax样机选取为0.1m。

（10）烟气管变径局部阻力系数ξy,3

参考文献[1]，ξy,3= power(1-dy×dy/dy,out/dy,out,2)

= power(1-19.8×19.8/0.1/0.1,2)

= 0.92

（11）烟气管变径局部阻力Δhξ,3

Δhξ,3= ξy,3×ρy×wy×wy/2

= 0.92×0.565×6.73×6.73/2

= 11.8 Pa

（12）排烟连接管烟气速度wy,out

wy,out= Vy/dy,out/dy,out/π/4

= 0.014816/0.1/0.1/π/4

= 0.059

（13）排烟连接管长度ly,out按安装需要预留为1m。

（14）排烟连接管沿程阻力Δhl,2

Δhl,2=ly×ly,out×ρy×wy,out×wy,out/(2×dy,out)

=0.414×1×0.565×0.059×0.059/(2×0.1)

=0.0041 Pa

（15）助燃空气入口负压Pa按经验值选取20 Pa

（16）进气管长度la为装箱安装备用件选取为1m；

进气管直径da参照calimax样机选取为0.05m。

（17）空气入口流速wa

wa= m×α1×va,0/(da×da×π/4)

= 0.0007694×1.5×4.488480875/(0.05×0.05×π/4)

= 2.638 m/s

（18）实验测得进气管空气密度ρa= 1.293；

进气管沿程阻力Δhl,3= λy×la×ρa×wa×wa/(2×da)

=0.04×1×1.293×2.638×2.638/(2×0.05)

= 3.6 Pa

（19）进气管入口局部阻力系数ξa,4和进气管出口局部阻力系数ξa,5参考文献[1]分别为0.5和1。

（20）进气管进出口阻力Δhξ,4−5

Δhξ,4−5= (ξa,4+ξa,5)×ρa×wa×wa/2

= (0.5+1)×1.293×2.638×2.638/2

=6.7 Pa

（21）辐射换热单管局部阻力系数ξy,60

ξy,60通过参照文献[1]选取，取近似值为0.75；

辐射换热管束局部阻力系数ξy,6

ξy,6= (npipe,up+npipe,down+1)×ξy,60

= (6+6+1)×0.75

=9.75

（22）换热管束局部阻力Δhξ,6

Δhξ,6简化估算为，Δhξ,6=ξy,6×ρy×wy×wy/2

= 9.75×0.565×2.638×2.638/2

= 124.8 Pa

（23）空烟气流动阻力总和Σ(Δh)

Σ(Δh)1= Δhl,1+Δhl,2+Δhl,3+Δhξ,1+Δhξ,2+Δhξ,3+ Δhξ,4−5 +Δhξ,6+ Δm- Pa

= 10.7+0.0041+3.6+6.4+14.7+11.8+6.7+124.8+ 1072-20

=1230.7Pa

汇总数据如下表14：

表14 空烟气流动阻力计算

序号 项目 符号 计算依据 数值 单位

1 对流换热区烟气密度 ρy 0.565 kg/m3

2 对流换热区烟气流速 wy 表7 6.73 m/s

3 对流换热区入口局部阻力系数 ξy,1 参考文献[1] 0.5

4 对流换热区入口局部阻力 Δhξ,1 6.4 Pa

5 烟气管沿程阻力系数 λy 参考文献[2] 0.04

6 烟气管长度 ly 表7 0.414 m

7 烟管当量直径 dy 19.8 mm

8 烟管沿程阻力 Δhl,1 10.7 Pa

9 烟气管等径拐直角弯局部阻力系数 ξy,2 参考文献[1] 1.15

10 烟气管等径拐直角弯局部阻力 Δhξ,2 14.7 Pa

11 排烟连接管直径 dy,out 0.1 m

12 烟气管变径局部阻力系数 ξy,3 参考文献[1] 0.92

13 烟气管变径局部阻力 Δhξ,3 11.8 Pa

14 排烟连接管烟气速度 wy,out 0.059 m/s

15 排烟连接管长度 ly,out 1 m

16 排烟连接管沿程阻力 Δhl,2 0.0041 Pa

17 助燃空气入口负压 Pa 按经验值选取 20 Pa

18 进气管长度 la 1 m

19 进气管直径 da 0.05 m

20 空气入口流速 wa 2.638 m/s

21 进气管空气密度 ρa 1.293 kg/m3

22 进气管沿程阻力 Δhl,3 3.6 Pa

23 进气管入口局部阻力系数 ξa,4 参考文献[1] 0.5

24 进气管出口局部阻力系数 ξa,5 参考文献[1] 1

25 进气管进出口阻力 Δhξ,4−5 6.7 Pa

26 料层阻力 Δm 表5 1072 Pa

27 辐射换热单管局部阻力系数 ξy,60 参照文献[1] 0.75

28 辐射换热管束局部阻力系数 ξy,6 9.75

29 换热管束局部阻力 Δhξ,6 124.8 Pa

30 空烟气流动阻力总和 Σ(Δh)1 1230.7 Pa

3.10.2排烟通道总阻力计算

（1）空气腔入口负压Phot按经验值选取为20Pa

（2）空气腔当量直径dhot,

dhot,= δa×L炉膛×4/[(δa+L炉膛)×2]

=70×400×4/[(70+400)×2]

=119mm

（3）室内空气入口局部阻力系数ξhot,1

参考文献[1]，圆角过渡(r/d=0.05)，ξhot,1= 0.25。

（4）空气密度ρhot

按定性温度(thot,1+thot,med)/2查表得1.15 kg/m3

（5）空气腔长度lhot,

根据结构尺寸得lhot,= hcon= 414mm。

（6）空气腔出口局部阻力系数ξhot,2

参考文献[1]， 圆角过渡(r/φpipe=0.1)，ξhot,2= 0.12

（7）辐射换热管空气流速whot,○

whot,○= whot,×(δa×L炉膛-Ay)/(npipe×φpipe×φpipe×π/4+W暖,1×L炉膛

= 6.44×(70×400-0.0022)/(12×25×25×π/4+25×400)

=10.46 m/s，属于经济流速[3]

（8）排烟通道阻力总和Σ(Δh)

Σ(Δh)2= ρhot×[(λy×lhot,/dhot+ξhot,1)×whot,×whot,/2+ (λy×lpipe/φpipe+ξhot,2)×whot,○×whot,○/2]-Phot

= 1.15×[(0.04×414/119+0.25)×10.46×10.46/2+(0.04×200/25+0.12)×10.46×10.46/2]-20

=17

数据汇总如下表15：

表14 排烟通道总阻力计算

序号 项目 符号 计算依据 数值 单位

31 空气腔入口负压 Phot 按经验值选取 20 Pa

32 空气腔当量直径 dhot, 119 mm

33 室内空气入口局部阻力系数 ξhot,1 圆角过渡(r/d=0.05)，参考文献[1] 0.25

34 空气密度 ρhot 1.15 kg/m3

35 空气腔长度 lhot, hcon 414 mm

36 空气腔内空气流速 whot, 表7 6.44 m/s

37 空气腔出口局部阻力系数 ξhot,2 0.12

38 辐射换热管上方空隙宽度 W暖,1 表5 25 mm

39 辐射换热管空气流速 whot,○ 10.46 m/s

40 辐射换热单管长度 lpipe 表6 200 mm

41 排烟通道阻力总和 Σ(Δh)2 17 Pa

3.10.3排烟风机及电机选型计算

（1）排烟风机类型

排烟风机类型为离心引风机。

（2）风机压头备用系数k1

参考文献[4-6]确定k1= 1.2。

（3）风机选型压头Hend

Hend= k1×Σ(Δh)1

= 1.2×1230.7

=1477 Pa

= 150 mmH2O

（4）风机风量备用系数k2

参考文献[4-6]，确定k2=1.15。

（5）风机选型风量Vend

Vend= k2×Vy×3600

= 1.15× 0.014816×3600

=61m3/h

（6）风机效率η1

参考文献[7]，比大风机效率60-70%要低，确定为η1= 45%。

（7）电机功率备用系数k3

参考文献[8, 6, 9]，确定k3= 1.5。

（8）电机效率η2

参考文献[10]，确定η2=0.9

（9）驱动电机校核功率Wend

Wend= Hend×Vend×k3/(η1×η2)

= 1477×61×1.5/(0.45×0.9)

=92.7 W

汇总数据如下表15：

表15 排烟风机及电机选型计算

序号 项目 符号 计算依据 数值 单位

42 排烟风机类型 离心引风机

43 风机压头备用系数 k1 参考文献[4-6] 1.2

44 风机选型压头 Hend 1477 Pa

150 mmH2O

45 风机风量备用系数 k2 参考文献[4-6] 1.15

46 风机选型风量 Vend 17 l/s

61 m3/h

47 风机效率 η1 45 %

48 电机功率备用系数 k3 参考文献[8, 6, 9] 1.5

49 电机效率 η2 参考文献[10] 0.9

50 驱动电机校核功率 Wend 92.7 W

3.11本章小结

本章参照诸多相关文献对生物质成型燃料（玉米秸秆颗粒）进行分析实验。

（1）对生物质成型燃料进行工业分析，元素分析和发热量的测定；

（2）对直燃锅炉的相关参数进行确定，计算了烟气量，锅炉热效率，燃料消耗量，辐射换热量，对流换热，风机风量，并与实际试验过程中数据进行比对分析，都较为符合实际。

（3）对炉排和炉膛进行了设计计算，确定排烟风机类型，并进行了数据的校核。

根据本章计算可以得知直燃锅炉的热效率为85.89%>85%，符合设计要求。炉膛容积为28m3, 炉膛类型宽、高而窄。各方面误差均在允许范围之内，设计也较为合理。

直燃锅炉对生物质成型燃料的种类和功率适应性：可以通过调整辐射换热管和波纹片倾斜角，可以调整辐射换热和对流换热比例，适应生物质燃料种类变化(但消耗不变)导致的理论燃烧温度变化；可以通过调整炉膛高度和炉排宽度，且等比例调整辐射换热和对流换热，可以适应生物质燃料消耗变化(燃烧功率变化但种类不变)；炉膛高度、辐射换热管倾斜角和波纹片倾斜角调整幅度有限，直燃锅炉燃烧功率大幅度增加的空间不大；从进料槽落下的颗粒能随机均匀覆盖的炉排区域(炉排宽度)有限，在高效清洁燃烧前提下直燃锅炉功率大幅度增加的空间不大。

第四章 生物质成型燃料燃烧污染物

生物质成型燃料是比较清洁的燃料，排放的污染物较少，但是无法避免燃烧的污染物的排放。实际过程中，由于锅炉设备，燃料质量，燃烧操作问题也会造成更多的污染物情况。本章就通过实验后实际观察和检测来说明生物质成型燃料燃烧的污染物情况和相应的处理方法。

4.1生物质成型燃料燃烧污染物的类型

污染物主要分为以下几种：

工业废气。包括有机废气（未完全燃烧的），酸碱废气和异味废气（CO等）。其中污染物CO的排放是非常主要的大气污染物。

二氧化硫。这是造成酸雨的主要污染物。

烟尘。指在生物质成型燃料的燃烧过程中形成的漂浮于空中的颗粒物，主要成分是二氧化硅、氧化铝、三氧化二铁、氧化钙、氧化镁等。典型的烟尘是烟筒里冒出的黑色烟雾，即燃烧不完全的小小黑色碳粒。烟尘的粒径很小，一般小于1gm 。

氮氧化物，氮氧化物是生物质成型燃料燃烧排放的主要污染物之一，其中包括多种化合物，如一氧化氮、二氧化氮等。

粉尘。粉尘不会直接对人体造成伤害，但随着时间的推移，人接触粉尘逐渐积累，影响人的呼吸道，可能会导致呼吸道感染。并且如果人的眼睛进入了粉尘，会影响人眼睛的健康，也会影响现场工作人员的仪器操作，对经济生产造成损失。由于生物质燃料的基本特性会产生木尘等，它着火点低，容易燃烧，如果不对其控制处理则会造成火灾等重大人员伤亡或经济方面的损失。另外，有些粉尘例如悬浮性粉尘会磨损生产装置，导致装置使用年限缩短，使工厂的支出费用增加，给人们带来非常大的损失。

灰渣。灰渣是生物质成型燃料燃烧充分燃烧后剩余的矿物渣滓。灰渣主要成份为硅酸盐、铝硅酸盐、氧化硅、硫酸盐、铁等物质。对土地、地表水，空气具有一定的污染。

4.2污染物的对应处理方法

（1）对于CO等工业废气，通常采用活性炭吸附法、催化燃烧法、催化氧化法、酸碱中和法、生物洗涤、生物滴滤法、等离子法等，氧化未完全燃烧部分，酸碱中和吸附和洗涤异味。

（2）对于二氧化硫，需要在锅炉尾气排放前安装一个脱硫装置（如下图），进行脱硫后再排放可以有效控制二氧化硫对空气的污染。目前烟气脱硫技术种类达几十种，按脱硫过程是否加水和脱硫产物的干湿形态，烟气脱硫分为：湿法、半干法、干法三大类脱硫工艺。湿法脱硫技术较为成熟，效率高，操作简单。传统的石灰石/石灰—石膏法烟气脱硫工艺采用钙基脱硫剂吸收二氧化硫后生成的亚硫酸钙、硫酸钙，由于其溶解度较小，极易在脱硫塔内及管道内形成结垢、堵塞现象。双碱法烟气脱硫技术是为了克服石灰石—石灰法容易结垢的缺点而发展起来的。

（3）对于烟尘和粉尘的处理，需要配套电除尘器设备。也可以使用通风设备，把粉尘扩散到大范围的空间，减少粉尘浓度从而降低粉尘的污染，不过这种措施显然是下下之策。还可以对烟尘和粉尘进行回收利用变废为宝，它目前的主要作用用于制作水泥、复合型材料以及建筑行业等综合使用；或者采用封闭的生产环境，把粉尘封闭在小环境内从而减少了粉尘的排放。上上之策是使用不产生粉尘的生产工艺，或者从源头，通过控制燃料的粒径细度，或者更充分地燃烧燃料，降低粉尘产生的可能，从而可以从根本上解决这种问题。

（4）对于氮氧化物，工业中主要适用氨气与氮氧化物发生化学反应中和氮氧化物，氨气与氮氧化物分解反应后产生氮气与水，从而达到无污染排放。

（5）灰渣处理需要排渣水系统，防止灰渣水污染土地。灰渣除直接用于填埋、铺路外，也可以回收利用，目前最主要的用途是作建筑材料，如制砖、作水泥混合材料、混凝土骨料等。

附中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单：

4.3其他措施

虽然处理措施可以有效改善污染物的排放情况，但不能完全避免污染物的排放，所以有时候需要采取一些其他措施来降低污染并保障人员安全和身体健康。

（1）对燃烧过程的控制。合理控制炉膛的负压，不能过大；合理配风，使燃烧更充分减少污染物的生成，从源头控制污染物。

（2）准备和后期工作充分。做好点火启动前准备工作，减少启动时间；锅炉排污要勤排、少排、均匀排，从而减少浪费，降低污染物排放。

（3）定时检查维修设备。发现问题马上处理，保证燃烧充分，处理污染物效率高。

（4）提高职工人员的环保意识。通过环保意识的加强可以有效提高锅炉热效率并降低污染物含量。

4.4本章小结

本章对生物质成型燃料在直燃锅炉中燃烧污染物进行分析归类并查阅相关资料给出了一些处理措施来有效控制污染物的排放。

第五章 结论和建议

5.1结论

（1）本文通过查阅许多相关文献了解了生物质在今后能源发展中的意义和目前生物质成型技术，燃烧设备的发展状况和我国目前在此方面的研究水平与国外的进行对比。

（2）通过去实习公司对生物质成型燃料（玉米秸秆颗粒）进行试验，了解和掌握了生物质成型燃料直燃锅炉的结构，工作原理，燃料燃烧过程和生物质锅炉与其他锅炉相比的优缺点。

（3）参照诸多相关文献对生物质成型燃料（玉米秸秆颗粒）进行分析实验，并设计了生物质直燃锅炉，得直燃锅炉的热效率为85.89%>85%，符合设计要求。炉膛容积为28m3, 炉膛类型宽、高而窄。各方面误差均在允许范围之内，设计也较为合理。

（4）最后对燃烧后产生的污染物进行了分析归类并给与了一些相关的处理措施，减少污染物的产生和排放，提高锅炉的热效率和保障人员的健康安全。

（5）本文的创新之处是试验所用燃料是生物质成型燃料，设计的是生物质直燃锅炉，所得的相关数据误差在允许范围内，对今后自己更深入的了解和研究生物质燃烧方面内容提供了经验和一些值得参考的数据。

5.2建议

（1）本文由于实验材料和时间有限，只取了一种生物质成型燃料（玉米秸秆颗粒燃料）进行了实验分析。故而可能会造成相关数据对于所有的生物质成型燃料是否都适用存在了疑问。

（2）锅炉设计中炉膛高度、辐射换热管倾斜角和波纹片倾斜角调整幅度有限，直燃锅炉燃烧功率大幅度增加的空间不大。

（3）从进料槽落下的颗粒能随机均匀覆盖的炉排区域(炉排宽度)有限，在高效清洁燃烧前提下直燃锅炉功率大幅度增加的空间不大。