

隧道窑结构、热工参数与能耗分析(二)

姬广庆

(甘肃省墙改领导小组办公室,甘肃省兰州市 730000)

3 人工干燥、小断面隧道干燥窑、二次码烧中断面拱顶双筒隧道窑生产红砖

3.1 测试条件

热平衡企业的生产工艺是一条非真空挤出机成型生产线、人工干燥、小断面隧道干燥窑、二次码烧中断面拱顶双筒隧道窑烧成的生产工艺生产普通砖,有职工 216 人,建筑面积 15816m²,占地面积 45396 m²,主要能耗设备有 450 制砖机组 1 套,中断面拱顶双筒隧道窑(断面 3m,全长 105m)1 座,12 条隧道干燥窑,电力变压器 2 台 560kVA,装机容量 896.1KW,能平衡测试年生产普通红砖 5008.64 万块,产品合格率 97.9%。

3.2 能源构成

进入的能源主要有煤、电、油、水等,测试年共

耗能(折标煤)3710.965t,其中耗原煤(包括炉渣)4110t,占总耗能的 71.21%,耗电 257.72 万 kWh,占总耗能的 28.06%,耗油 11.15t,占总耗能的 0.5%。水 65743t,占总耗能的 0.23%。工厂能源利用率 46.35%。隧道窑热效率 26.75%,隧道干燥窑热效率 54.25%,隧道窑与干燥窑综合热效率 58.8%,电效率为 53.77%。

3.3 隧道窑的基本参数及热平衡数据

从隧道窑的基本情况、热工结构、操作特性、原料与燃料、半成品与成品、热平衡参数介绍隧道窑的生产,见表 1。

3.4 干燥室的基本参数及热平衡数据

见表 2。

表 1 隧道窑热工结构、操作特性、热平衡数据

		项目	单位	数值	备注
窑的基本情况	隧道窑结构及历史	名称		中断面拱顶双筒隧道窑	13 号
		尺寸	m	3×3×90	
		基本情况		测试年共生产 4 年,基本完好	人工干燥
	生产产品	产品		普通黏土砖	
		产品规格	mm	240×115×53	
	窑车	窑车数	个	60	双筒
		窑车尺寸(长×宽×高)	m	3×3×2.05	
窑车容积		m ³	18.42		
隧道窑热工结构	排烟系统	排烟口个数	个	2	
		排烟口面积	m ²	0.36	
		总烟道的横截面积	m ²	3.14	
		烟囱高度	m	9	
		排烟风机规格、型号		4-72-11 No 16B	
	电动机功率	kW	30		
抽送热风系统	热风烟道的横截面积	m ²	5.019		
	排烟风机规格、型号		4-72-11 No 22D		
	电动机功率	kW	130		

续表 1

		项目	单位	数值	备注	
隧道窑热工结构	投煤孔	投煤孔直径	mm	120		
		1个窑车纵向投煤孔排数	排	3		
		1排投煤孔的个数	个	3		
		1个投煤盖的外表面积	m ²	0.018		
	窑体	1个窑室的窑顶外表面积	m ²	16.8		
		1个窑室的窑墙外表面积	m ²	10.35		
隧道窑的操作特性	窑室装载量		万块	0.3		
	窑道部火数		部	2		
	各带分配的窑室数	干燥预热带	m	36		
		焙烧带	m	12		
		保温冷却带	m	42		
	1部火分配的窑室数		个	4		
	火行速度		m/h	3.63		
	窑的部火小时产量		万块	0.3625		
	窑的日产量		万块	17.4		
焙烧周期		h	24.8			
原料与燃料的性能	黏土原料化学成分	SiO ₂	%	59.72		
		Al ₂ O ₃	%	11.45		
		Fe ₂ O ₃	%	2.54		
		CaO	%	7.06		
		MgO	%	1.94		
		K ₂ O	%	0		
		Na ₂ O	%	0		
		烧失量	%	8.36		
	内燃料(炉渣)	分析基组成	全水分	%	21	
			C ^f	%	/	
			W ^f	%	21	
			A ^f	%	59.92	
		V ^f	%	/		
		干燥基低位发热量	kJ/kg	10790		
原料与燃料的性能	内燃料(炉渣)	分析基弹筒发热量	kJ/kg	14930		
		每万块砖坯掺配量(干燥基)	kg	2594.91		
	原煤	分析基组成	全水分	%	8.85	
			C ^f	%	/	
			W ^f	%	8.85	
			A ^f	%	15	
		V ^f	%	/		
		应用基低位发热量	kJ/kg	21070		
		分析基弹筒发热量	kJ/kg	23630		
		每万块砖坯掺配量(应用基)	kg	197.7		
半成品与成品	砖坯与砖	外燃入窑时温度	℃	40.8		
		干坯残余含水率	%	7.86		
		入窑砖坯温度	℃	42.5		
		万块干坯重量	kg	28540		
		砖出窑时的温度	℃	47.4		
		万块砖的重量	kg	23630		
		砖内残余含碳量	%	0		

续表 1

		项目	单位	数值	备注	
热平衡测试平均参数	天气	天气		晴		
		大气压	Pa	83326.25		
	环境温度	干球	℃	29.7		
		湿球		/		
	热风	热风温度	℃	142		
		热风内水蒸气的容积百分数	%	0		
		热风流量	m ³ /h	124920.64		
		热风的成分	CO ₂	%	1.94	
			CO	%	0.15	
			O ₂	%	19.38	
	N ₂		%	78.55		
	窑体散热	窑墙	测试点矩形面积	m ²	621	
			对应周围空间温度	℃	29.3	
			热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	-161.43	平均
		窑顶	测试点矩形面积	m ²	556.5	
			对应周围空间温度	℃	17.4	
热流计测得散热流量			kJ/(m ² ·h)	220.23		
灰渣	生产万块砖产生的灰渣重量	kg	19.2			
	含碳量	%	17.06			

表 2 干燥室的基本参数及热平衡数据

		项目	单位	数值	备注
干燥室的基本情况	干燥室结构及历史	名称		小断面平顶隧道干燥室	
		尺寸	m	55.4×1.16×1.02	
		基本情况		生产 14 年, 12 条小断面隧道干燥基本完好	人工干燥
	生产产品	产品		普通黏土砖	
		产品规格	mm	240×115×53	
	概况	长×宽×高	m	55.4×1.16×1.02	
		干燥室容积	m ³	78659	
		干燥洞条数	条	12	
	排风系统	排风机数量	台	1	
		排风机规格、型号		4-72-11 No 16B	
		电动机功率	kW	130	
		排风支烟道的横截面积	m ²	0.36	
		排风总烟道的横截面积	m ²	3.13	
	送风系统	热风总道截面面积	m ²	5.019	
		热风总烟道尺寸(长×宽×高)	m ²	/	
		其它热源输送烟道截面面积	m ²	/	
		排烟风机规格、型号		4-72-11 No 22D	
	外表面积	电动机功率	kW	130	
		干燥室顶外表面积	m ²	1072.5	
		干燥室外墙面积	m ²	209	
干燥车	每辆干燥车的重量	kg	180		
	每辆干燥车的装载量	万块	0.028		
	每条干燥洞能容纳干燥车数量	个	50		

续表 2

		项目	单位	数值	备注	
热风及其它热源	热风	热风温度	℃	142		
		热风内水蒸气的容积百分数	%	1.94		
		热风流量	m ³ /h	124920.64		
		热风的成分	CO ₂	%	0.15	
			CO	%	1.9	
	O ₂		%	19.38		
	N ₂		%	78.55		
	其它热源	热风温度	℃	/	无	
		热风内水蒸气的容积百分数	%	/		
		热风流量	m ³ /h	/		
		热风的成分	CO ₂	%	/	
			CO	%	/	
	O ₂		%	/		
	N ₂		%	/		
	废气	废气温度	℃	43.3		
		废气内水蒸气的容积百分数	%	3.64		
废气流量		m ³ /h	59721			
热风的成分		CO ₂	%	1.94		
		CO	%	0.15		
	O ₂	%	19.38			
	N ₂	%	78.55			
坯体	湿坯	湿坯含水率	%	18.48		
		入窑湿坯温度	℃	33.9		
		万块湿坯重量	kg	32400		
	干坯	砖出窑时的温度	℃	91.9		
		万块干砖的重量	kg	26540		
		干坯含水率	%	7.86		
	干燥车	装载万块需要干燥车的重量	kg	35.71		
		温度	进干燥室时	℃	39.8	
出干燥室时			℃	110.2		
窑体表面散热	侧墙	测试点矩形面积	m ²	104.5		
		对应周围空间温度	℃	27.74		
		用热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	161.43	平均	
	侧墙	测试点矩形面积	m ²	104.5		
		对应周围空间温度	℃	27.74		
		用热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	254.66	平均	
	顶面	测试点矩形面积	m ²	1072.5		
		对应周围空间温度	℃	27.74		
		用热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	220.23	平均	
风机散热损失	面积	m ²	40.48			
	测定次数	次	6			
	热流量	kJ/(m ² ·h)	579442.49	平均		
其它	干燥周期	h	22.8			
	干燥室小时产量	万块/h	0.7631			
	干燥 1 万块砖坯蒸发水分	kg	3880			

3.5 工厂能流图

非真空挤出机成型、小断面干燥窑干燥、双筒中断面隧道窑烧成的生产工艺生产普通砖的能流

图(图中均用等价折算吨标煤),见图1。

3.6 隧道式干燥室—隧道窑体系热平衡示意图见图2。

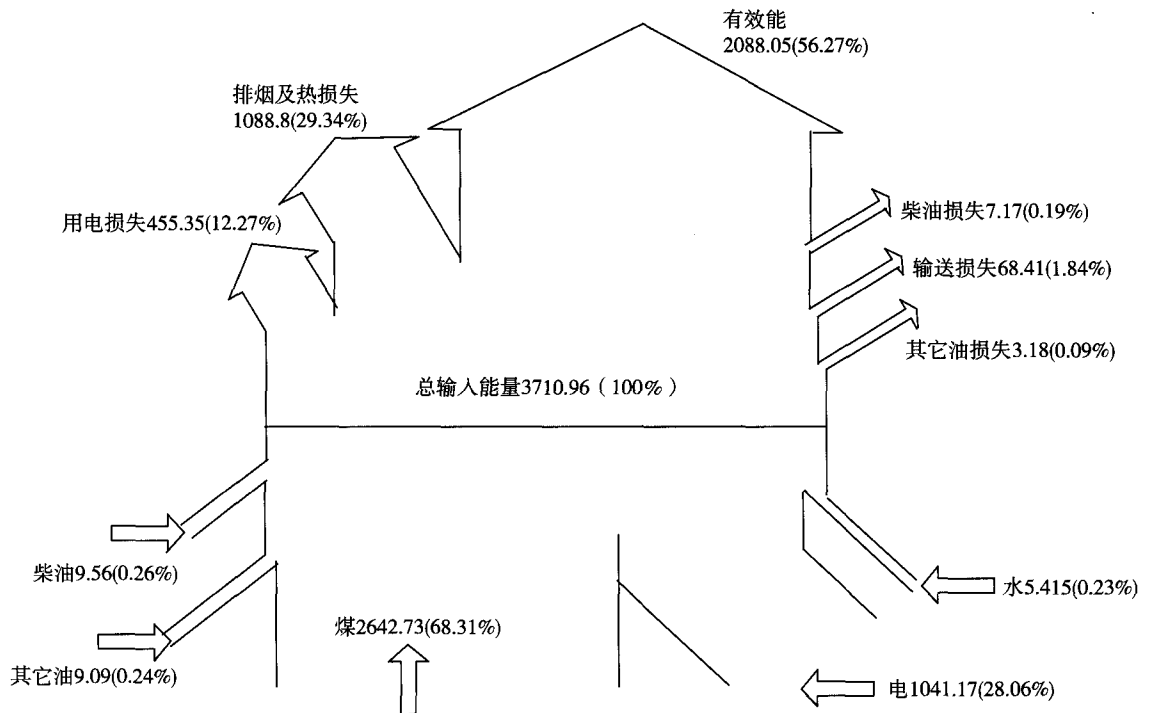


图1 能流图

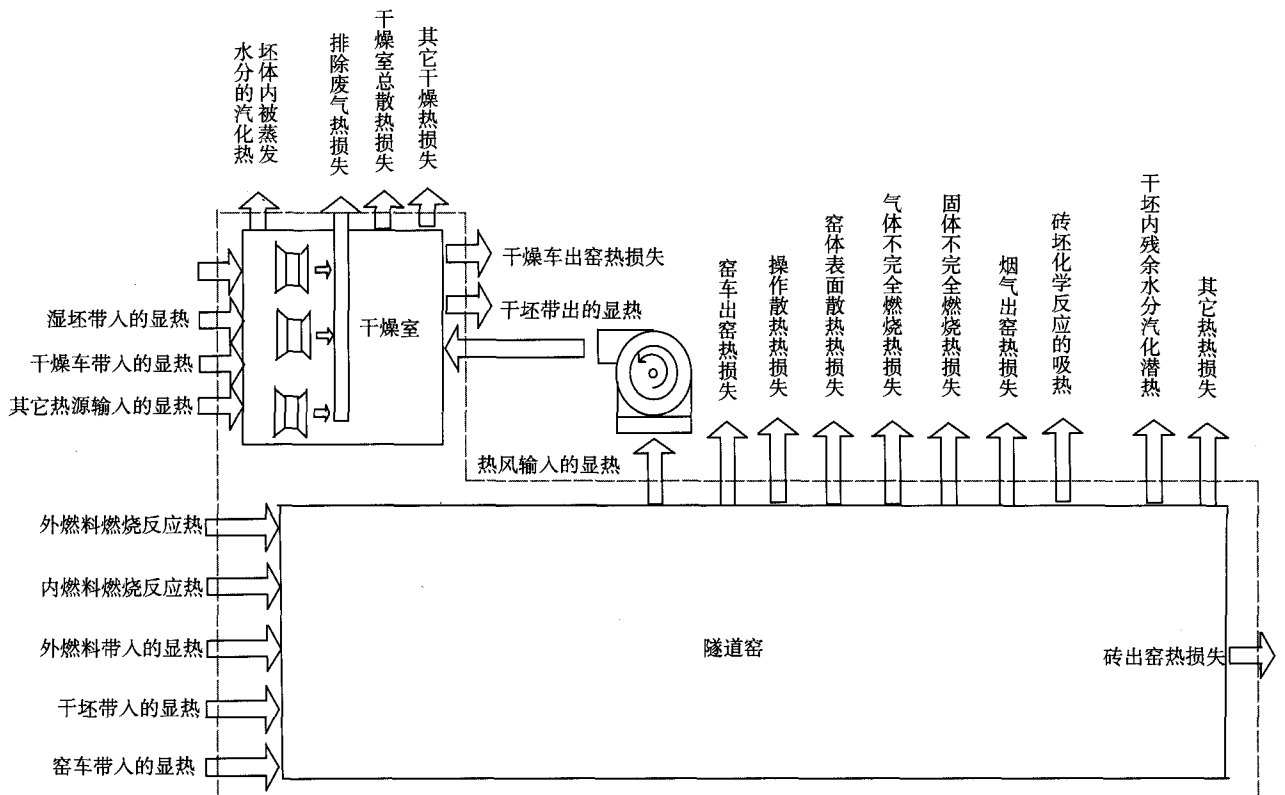


图2 隧道窑-干燥室热平衡示意图

3.7 隧道窑的热能收入与支出
见表3。

3.8 干燥窑的热能收入与支出
见表4。

表3 隧道窑的热能收入与支出

序号	热能收入			热能支出		
	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	比例/%	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	比例/%
1	内燃料燃烧的反应热 Q_N	3874.2	88.63	坯体内残余水分汽化潜热 Q_{df}	538.6	12.32
2	外燃料燃烧的反应热 Q_w	416.6	9.53	砖坯化学反应的吸热 Q_{rx}	567.5	12.98
3	外燃料带入的显热 Q_{wx}	0.3	0.01	输出热风的显热 Q_{df}	2548.7	58.31
4	坯体带入的显热 Q_{cp}	39.9	0.91	烟气出窑热损失 Q_y	0	0
5	窑车带入的显热 Q_{cr}	40.2	0.92	砖出窑热损失 Q_z	34.4	0.79
6				固体不完全燃烧热损失 Q_{qb}	11.1	0.25
7				气体不完全燃烧热损失 Q_{qb}	412.5	9.44
8				窑体表面散热热损失 Q_b	153.3	3.51
9				操作散热热损失 Q_r	/	/
10				窑车带出的显热 Q_{qb}	60.1	1.37
11				其它热损失 Q_i	45	1.03
	合计	4371.2	100	合计	4371.2	100
有效热量 Q_{YX}				1147.83(274.6) 10 ⁴ kJ(10 ⁴ kcal)		
热效率 η /%				26.75		

表4 干燥窑的热能收入与支出

序号	热能收入			热能支出		
	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	比例/%	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	比例/%
1	热风输入的显热 Q_{RFR}	2713.4	99.17	坯体内水分汽化潜热 Q_{ZF}	939.4	34.33
2	其它热源输入的显热 Q_{QR}	0	0	坯体带出的显热 Q_{CP}	133.7	7.08
3	湿坯带入的显热 Q_{SP}	19.5	0.71	干燥车出窑的热损失	26.6	0.97
4	干燥车带入的显热 Q_{CR}	3.3	0.12	排除废气的热损失 Q_{FC}	672.9	24.57
5				散热损失 Q_r	48.1	1.76
6				其它热损失 Q_i	855.6	31.27
7				风机热损失 Q_s		
	合计	2736.2	100	合计	2736.2	100
有效热量 Q_{YX}				1472.18(352.2) 10 ⁴ kJ(10 ⁴ kcal)		
热效率 η /%				54.25		

3.9 能源平衡结果分析

根据上述能源构成及利用情况,通过能源平衡测试可以得出非真空挤出机成型、小断面干燥窑干燥、双筒中断面隧道窑烧成的生产工艺生产普通砖的热平衡的结论:

(1) 热效率

隧道窑的热效率:26.75%;

干燥室热效率:54.25%;

隧道窑与干燥室的综合热效率:58.8%。

(2) 能量利用系数

能源利用率:46.35%。

(3) 体系单位消耗

表5 体系单位消耗

	单位	数值	备注
每万块砖质量	t	23.63	
体系热效率	%	58.8	
体系单位热耗	10 ⁴ kJ/万块	4689.9	折标煤 1494kg/万块
体系单位煤耗(折标煤)	kg/万块	1473	包括炉渣
其中:原煤耗(折标煤)	kg/万块	142.36	
电	kWh/万块	514.55	
水	t/万块	13.13	
油类	t/万块	0.0022	

(4) 能源损失主要方面分析

表6 主要能源损失

	损失主要方面	损失主要方面占总能耗的比例 /%
1	排烟及热损失占总能耗	29.34
2	用电损失占总能耗	12.27
3	柴油损失占总能耗	0.19
4	其它油损失占总能耗	0.09
5	输送损失占总能耗	1.84

(5)隧道窑热损失主要方面分析:(热损失占总热耗的比例)

表7 热损失占总热耗的百分比

	热损失主要方面	热损失占总热耗的比例 /%
1	干坯内残余水分汽化潜热	12.32
2	砖坯化学反应的吸热	12.98
3	输出热风的显热	58.31
4	砖出窑热损失	0.79
5	固体不完全燃烧热损失	0.25
6	气体不完全燃烧热损失	9.44
7	窑体表面散热热损失	3.51
8	窑车带出的显热	1.37
9	其它热损失	1.03

3.10 结语

(1)工厂能源利用率46.35%。隧道窑热效率26.75%,隧道干燥窑热效率54.25%,隧道窑与干燥窑综合热效率58.8%,电效率为54.73%。单位产品热耗 $4689.9 \times 10^4 \text{kJ}$ /万块,单位产品煤耗1473kg标煤/万块(其中:原煤单耗142.36kg标煤/万块),电

耗514.55 kWh/万块。

(2)热平衡工作是一个系统的、巨大的基础测试工作,过程长而且复杂,是企业管理的基础工作,也是企业经营状态的具体反映,各企业应根据自己的原料、产品、工艺等实际情况,进行企业能量平衡,不仅对企业降低消耗、提高经济效益提供了科学的依据。而且对提高能源利用、提高环境效率、发展循环经济有着重要的意义。

4 自然干燥、二次码烧中断面拱顶双筒隧道窑生产红砖

4.1 测试条件

热平衡企业的生产工艺是非真空挤出机成型,自然干燥,隧道窑焙烧,建筑面积 4237m^2 ,占地面积 74000m^2 ,有职工280人。主要耗能设备有JZ50非真空制砖机组1套,中断面拱顶双筒隧道窑(全长105m)1座,400kVA变压器1台,各类电机37台。能平衡测试年生产普通红砖4246.83万块,产品合格率94.3%。

4.2 能源构成

进入的能源主要有煤、电、油、水,测试年共耗能折标煤2727.94t,其中原煤(包括炉渣)3388.3t,占总耗能的79.87%,电123.8万kWh,占总耗能的18.33%,油25.34t,占总耗能的1.5%。

4.3 隧道窑的基本参数及热平衡数据

从隧道窑的基本情况、热工结构、操作特性、原料与燃料、半成品与成品、热平衡参数介绍隧道窑的生产、热平衡参数,见表8。

表8 隧道窑热工结构、操作特性、热平衡数据

		项目	单位	数值	备注
窑的基本情况	隧道窑结构及历史	名称		中断面拱顶双筒隧道窑	10号
		尺寸	m	$3 \times 3 \times 105$	
		基本情况		测试年共生产7年,基本完好	自然干燥
	生产产品	产品		普通黏土砖	
		产品规格	mm	$240 \times 115 \times 53$	
	窑车	窑车数	台	70	双筒
窑车尺寸(长×宽×高)		m	$3 \times 3 \times 2.06$		
窑车容积		m^3	18.54		
隧道窑热工结构	排烟系统	排烟口个数	个	2	
		排烟口面积	m^2	0.36	
		总烟道的横截面积	m^2	3.14	
		烟囱高度	m	9	
		排烟风机规格、型号		4-72-11 No 16B	
	电动机功率	kW	40		
抽送热风系统	热风烟道的横截面积	m^2	/		
	排烟风机规格、型号		/		
	电动机功率	kW	/		

续表 8

		项目	单位	数值	备注	
隧道窑热工结构	投煤孔	投煤孔直径	mm	120		
		1个窑车纵向投煤孔排数	排	3		
		1排投煤孔的个数	个	4		
		1个投煤盖的外表面积	m ²	0.015		
	窑体	1个窑室的窑顶外表面积	m ²	17.25		
		1个窑室的窑墙外表面积	m ²	8.7		
隧道窑的操作特性	窑室装载量		万块	0.32		
	窑道部火数		部	2		
	各带分配的窑室数	干燥预热带	m	48		
		焙烧带	m	15		
		保温冷却带	m	42		
	1部火分配的窑室数		个	5		
	火行速度		m/h	3.94		
	窑的部火小时产量		万块	0.42		
	窑的日产量		万块	20.16		
	焙烧周期		h	26.6		
原料与燃料的性能	黏土原料化学成分	SiO ₂	%	56.14		
		Al ₂ O ₃	%	12.39		
		Fe ₂ O ₃	%	4.96		
		CaO	%	8.08		
		MgO	%	3.36		
		K ₂ O	%	0		
		Na ₂ O	%	0		
		烧失量	%	9.48		
	内燃料(炉渣)	全水分		%	14.4	
		分析基组成	C ^f	%	/	
			W ^f	%	14.4	
			A ^f	%	68.81	
			V ^f	%	/	
		干燥基低位发热量		kJ/kg	8760	
	内燃料(炉渣)	分析基弹筒发热量		kJ/kg	7517	
每万块砖坯掺配量(干燥基)		kg	3001.67			
原料与燃料的性能	原煤	全水分		%	4.5	
		分析基组成	C ^f	%	0	
			W ^f	%	4.5	
			A ^f	%	20.1	
			V ^f	%	/	
		应用基低位发热量		kJ/kg	21310	
		分析基弹筒发热量		kJ/kg	20346	
		每万块砖坯掺配量(应用基)		kg	177.75	
	外燃入窑时温度		℃	87.87		
	半成品与成品	砖坯与砖	干坯残余含水率	%	6.75	
入窑砖坯温度			℃	18.5		
万块干坯重量			kg	27910		
砖出窑时的温度			℃	47.55		
万块砖的重量			kg	23200		
砖内残余含碳量			%	0		

续表 8

		项目	单位	数值	备注	
热平衡测试平均参数	天气	天气		晴		
		大气压	Pa	84526.15		
	环境温度	干球	℃	20		
		湿球		/		
	热风	热风温度	℃	99.25		
		热风内水蒸气的容积百分数	%	3.84		
		热风流量	m ³ /h	59028.8		
		热风的成分	CO ₂	%	2.2	
			CO	%	0.16	
			O ₂	%	19.61	
	N ₂ '		%	78.03		
	烟气	烟气温度	℃	99.25		
		烟气内水蒸气的容积百分数	%	3.84		
		烟气流量	m ³ /h	59028.8		
		烟气的成分	CO ₂	%	2.2	
			CO	%	0.16	
			O ₂	%	19.61	
	N ₂		%	78.03		
	窑体散热	窑墙	测试点矩形面积	m ²	672	
			对应周围空间温度	℃	17.8	
热流计测得散热流量			kJ/(m ² ·h)	42.05	平均	
窑顶		测试点矩形面积	m ²	1155		
		对应周围空间温度	℃	17.8		
		热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	106.14	平均	
灰渣	生产万块砖产生的灰渣重量	kg	50.8			
	含碳量	%	11.08			

4.4 工厂能流图

艺的能流图(图中均用等价折算吨标煤),见图3。

非真空挤出机成型、自然干燥、隧道窑焙烧工

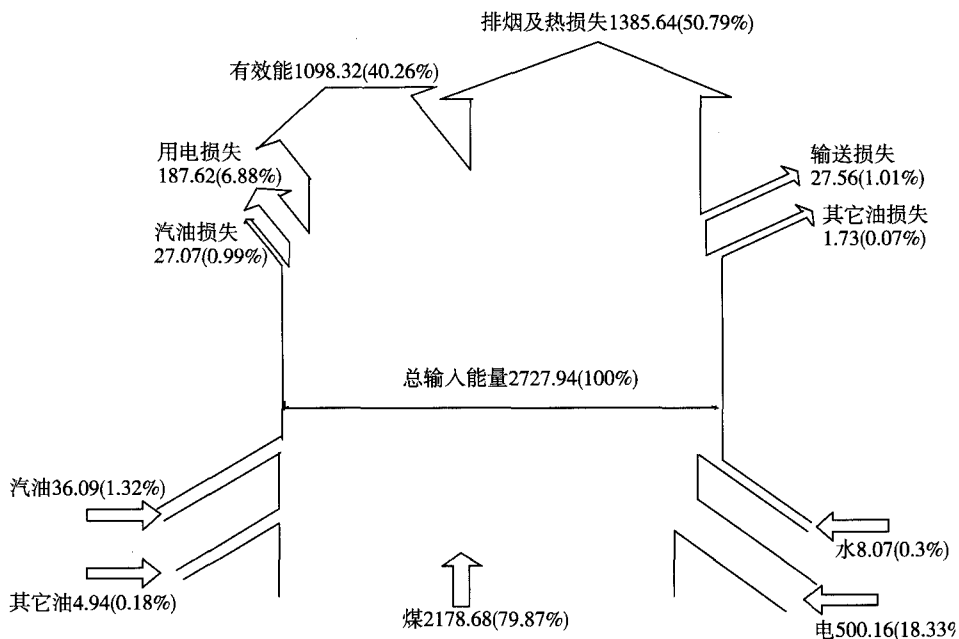


图3 非真空挤出机成型、自然干燥、隧道窑焙烧工艺的能流图

4.5 热平衡示意图

见图4。

4.6 隧道窑热能收入与热能支出

见表9。

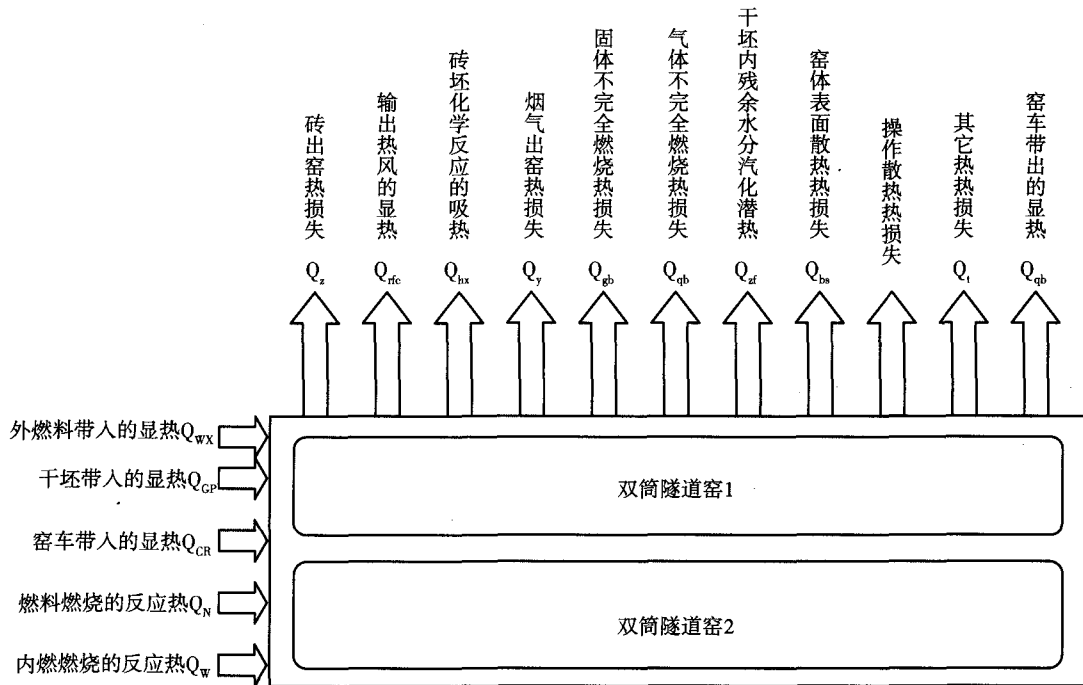


图4 热平衡示意图

表9 隧道窑热能收入与热能支出

序号	热能收入			热能支出		
	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	占总能耗的比例/%	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	占总能耗的比例/%
1	内燃料燃烧的反应热 Q_N	2629.46	85.91	干坯内残余水分汽化潜热 Q_{af}	462.97	15.13
2	外燃料燃烧的反应热 Q_w	361.65	11.82	砖坯化学反应的吸热 Q_{hx}	596.5	19.49
3	外燃料带入的显热 Q_{wx}	1.6	0.05	输出热风的显热 Q_{rc}	1502.55	49.09
4	干坯带入的显热 Q_{cp}	2.02	0.06	烟气出窑热损失 Q_y	0	0
5	窑车带入的显热 Q_{cr}	65.98	2.16	砖出窑热损失 Q_z	56.73	1.86
6				固体不完全燃烧热损失 Q_{gb}	19.06	0.62
7				气体不完全燃烧热损失 Q_{qb}	268.18	8.76
8				窑体表面散热热损失 Q_b	22.12	0.72
9				操作散热热损失 Q_t	0	0
10				窑车带出的显热 Q_{qb}	82.13	2.68
11				其它热损失 Q_l	50.47	1.65
	合计	3060.71	100	合计	3060.71	100
有效热量 Q_{vx}				1087.87(260.26) 10 ⁴ kJ(10 ⁴ kcal)		
热效率 η /%				36.4		

4.7 能源平衡结果分析

- (1) 能源利用率为 32.7%
- (2) 隧道窑的热效率: 36.4%
- (3) 单位产品消耗

热耗: 每万块热耗: 30231×10^4 kJ (折标煤 1046t 标煤 / 万块), 其中原煤消耗: 123.6kg / 万块。

(4) 能源损失主要方面分析(按能源类型分析)

表 10 能源损失分析

序号	能源损失类型	能源损失占总能耗 /%
1	热损失占总能耗	50.79
2	用电损失占总能耗	6.88
3	汽油损失占总能耗	0.99
4	其它油损失占总能耗	0.06
5	输送损失占总能耗	1.01

(5) 热损失主要方面分析

表 11 热损失分析

序号	热损失主要方面	热损失占总热耗的比例 /%
1	干坯内残余水分汽化潜热	15.13
2	砖坯化学反应的吸热	19.49
3	输出热风的显热	49.09
4	砖出窑热损失	1.86
5	固体不完全燃烧热损失	0.62
6	气体不完全燃烧热损失	8.76
7	窑体表面散热热损失	0.72
8	窑车带出的显热	2.68
9	其它热损失	1.65

5 自然干燥、二次码烧中断面拱顶双筒隧道窑生产挤出红平瓦

本文对自然干燥、二次码烧中断面拱顶双筒隧道窑生产挤出红平瓦的结构、热工性能参数、能源利用率、热效率、单位产量能耗、有效能等几方面进

行介绍。

5.1 测试条件

热平衡企业的生产工艺是 2 条真空挤出机成型生产线、自然干燥、2 座轮窑和 1 座拱顶双筒大断面隧道窑、砖瓦混烧的生产工艺,生产红平瓦,建筑面积 7561m²,占地面积 990000 m²,主要耗能设备有 JZ350 真空制砖机组 2 套,大断面拱顶双筒隧道窑(全长 105m)1 座,电力变压器 4 台共 1480kVA,各类电机 97 台。能平衡测试年生产普通红平瓦 2895.772 万片,红砖 1309.6 万块,合计折红砖 7101.144 万块。产品合格率 96.75%。

5.2 能源构成

进入的能源主要有煤、电、油、水等,测试年共耗能折标煤 6465.57t,其中耗原煤 8385.55t,占总耗能的 83.39%,耗电 232.8 万 kWh,占总耗能的 14.55%,耗油 72.57t,占总耗能的 1.84%。水 113416t,占总耗能的 0.22%。车间能源利用率 27.43%。热效率 29.28%,电效率为 60.1%。

5.3 隧道窑的基本情况及热平衡数据

从隧道窑的基本情况、热工结构、操作特性、原料与燃料、半成品与成品、热平衡参数介绍隧道窑的生产、热平衡参数,见表 12。

5.4 工厂能流图

真空挤出机成型、自然干燥、轮窑、隧道窑焙烧工艺的能流图(图中均用等价折算吨标煤),见图 5。

表 12 隧道窑热工结构、操作特性、热平衡数据

		项目	单位	数值	备注
窑的基本情况	隧道窑结构及历史	名称		中断面拱顶双筒隧道窑	9 号
		尺寸	m	3×3×105	
		基本情况		测试年共生产 7 年,基本完好	自然干燥
	生产产品	产品		普通黏土平瓦	
		产品规格	mm	360×220×18	
	窑车	窑车数	台	70	双筒
窑车尺寸(长×宽×高)		m	3×3×2.06		
窑车容积		m ³	23.46		
隧道窑热工结构	排烟系统	排烟口个数	个	2	
		排烟口面积	m ²	0.36	
		总烟道的横截面积	m ²	3.14	
		烟囱高度	m	9	
		排烟风机规格、型号		4-72-11 No 16D	
		电动机功率	kW	40	
抽送热风系统	热风烟道的横截面积	m ²	3.14		
	排烟风机规格、型号		4-72-11 No 16D		
	电动机功率	kW	40		

续表 12

		项目	单位	数值	备注	
隧道窑热工结构	投煤孔	投煤孔直径	mm	120		
		一个窑车纵向投煤孔排数	排	3		
		1 排投煤孔的个数	个	3		
		1 个投煤盖的外表面积	m ²	0.018		
	窑体	1 个窑室的窑顶外表面积	m ²	17.25		
		1 个窑室的窑墙外表面积	m ²	8.7		
隧道窑的操作特性	窑室装载量		万块	0.42	以万块砖为基数	
	窑道部火数		部	2		
	各带分配的窑室数	干燥预热带	m	51		
		焙烧带	m	9		
		保温冷却带	m	45		
	1 部火分配的窑室数		个	3		
	火行速度		m/h	1.5		
	窑的部火小时产量		万块	0.523		
	窑的日产量		万块	5	以万块砖为基数	
	焙烧周期		h	70		
原料与燃料的性能	黏土原料化学成分	SiO ₂	%	63.45		
		Al ₂ O ₃	%	10.42		
		Fe ₂ O ₃	%	3.99		
		CaO	%	7		
		MgO	%	3.36		
		K ₂ O	%	0		
		Na ₂ O	%	0		
		烧失量	%	6.64		
	内燃料(银川煤)	全水分		%	10.5	
		分析基组成	C ^f	%	/	
			W ^f	%	10.5	
			A ^f	%	24.66	
			V ^f	%	/	
		干燥基低位发热量		kJ/kg	22685	
		分析基弹筒发热量		kJ/kg	20300	
每万块砖坯掺配量(干燥基)		kg	1210			
原料与燃料的性能	内燃料(银川煤)	全水分		%	9.8	
		分析基组成	C ^f	%	0	
	W ^f		%	9.8		
	A ^f		%	15.64		
	V ^f		%	/		
	应用基低位发热量		kJ/kg	24210		
	分析基弹筒发热量		kJ/kg	21840		
	每万块砖坯掺配量(应用基)		kg	143.3		
	外燃入窑时温度		℃	38.25		
	半成品与成品	砖坯与砖	干坯残余含水率	%	5.09	
入窑砖坯温度			℃	6.75		
万块干坯重量			kg	29827.5		
砖出窑时的温度			%	14.05		
万块砖的重量			kg	25807.5		
砖内残余含碳量			%	0		

续表 12

		项目	单位	数值	备注	
热平衡测试平均参数	天气	天气		晴		
		大气压	Pa	85059.691		
	环境温度	干球	℃	9.4		
		湿球		/		
	热风	热风温度	℃	110.75		
		热风内水蒸气的容积百分数	%	2.01		
		热风流量	m ³ /h	50697.63		
		热风的成分	CO ₂	%	1.44	
			CO	%	0.22	
			O ₂	%	19.04	
	N ₂		%	79.3		
	烟气	烟气温度	℃	/		
		烟气内水蒸气的容积百分数	%	/		
		烟气流量	m ³ /h	/		
		烟气的成分	CO ₂	%	/	
			CO	%	/	
			O ₂	%	/	
	N ₂		%	/		
	窑体散热	窑墙	测试点矩形面积	m ²	609	
			对应周围空间温度	℃	9.4	
热流计测得散热流量			kJ/(m ² ·h)	-239.65	平均	
窑顶		测试点矩形面积	m ²	1207.5		
		对应周围空间温度	℃	9.4		
		热流计测得散热流量	kJ/(m ² ·h)	518.58	平均	
灰渣	生产万块砖产生的灰渣重量	kg	/			
	含碳量	%	/			

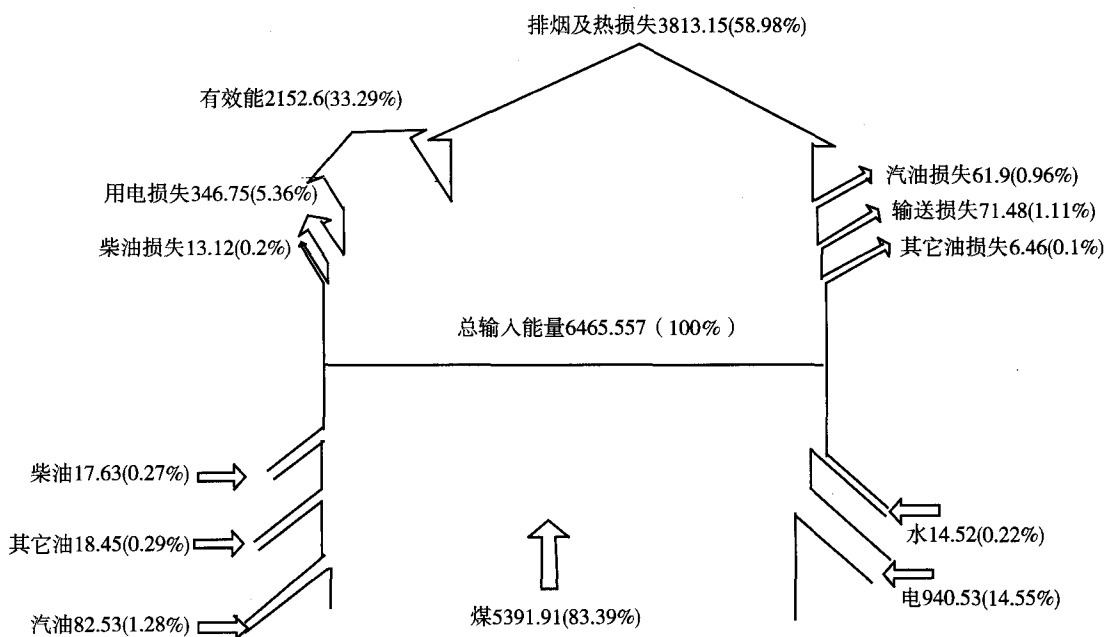


图 5 工厂能流图

5.5 隧道窑的热平衡示意图

见图6。

5.6 隧道窑的热能收入与支出

见表13。

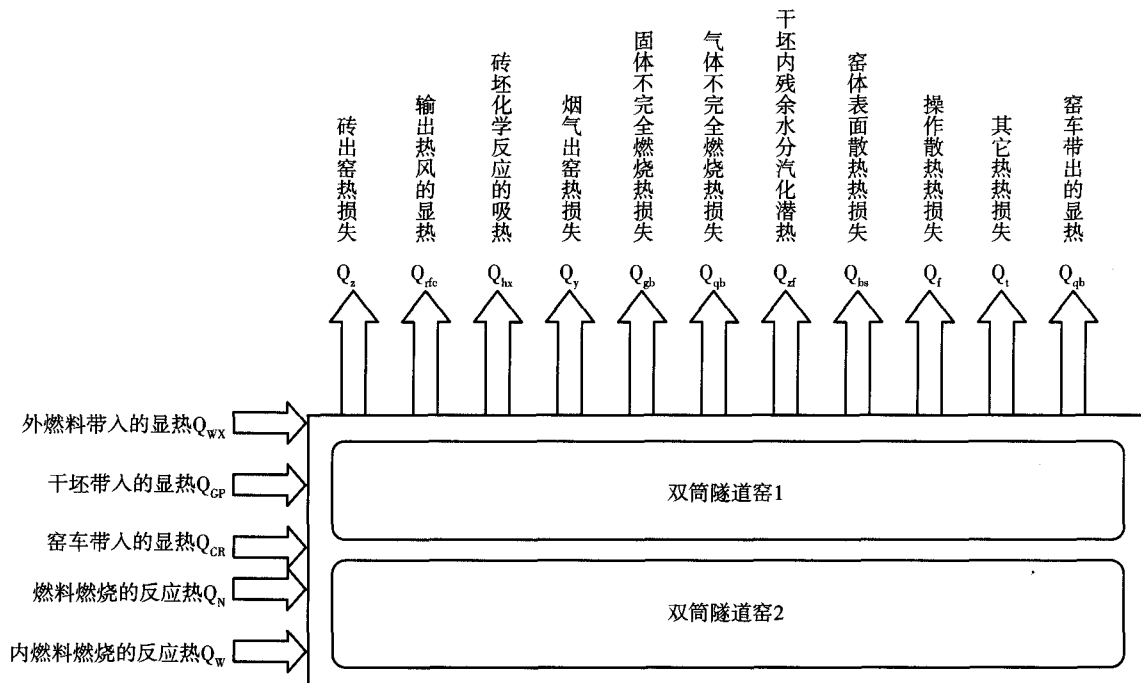


图6 隧道窑热平衡图

表13 隧道窑的热能收入与支出

序号	热能收入			热能支出		
	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	占的比例/%	项目	数值/(10 ⁴ kJ)	占的比例/%
1	内燃料燃烧的反应热 Q_N	2744.89	89.6	干坯内残余水分汽化潜热 Q_{zf}	377.43	12.32
2	外燃料燃烧的反应热 Q_w	313.19	10.22	砖坯化学反应的吸热 Q_{hx}	590.45	19.27
3	外燃料带入的显热 Q_{wx}	0.65	0.02	输出热风的显热 Q_{dc}	1298.15	42.38
4	干坯带入的显热 Q_{cp}	-7.73	-0.25	烟气出窑热损失 Q_y	0	0
5	窑车带入的显热 Q_{cr}	12.4	0.41	砖出窑热损失 Q_z	9.74	0.32
6				固体不完全燃烧热损失 Q_{gb}	0	0
7				气体不完全燃烧热损失 Q_{qb}	263.31	8.6
8				窑体表面散热热损失 Q_b	-13.49	-0.44
9				操作散热热损失 Q_t	0	0
10				窑车带出的显热 Q_{qb}	22.48	0.73
11				其它热损失 Q_l	515.33	16.82
	合计	3063.4	100	合计	3063.4	100
	有效热量 Q_{yx}	997.43(238.62) 10 ⁴ kJ(10 ⁴ kcal)				
	热效率 η /%	32.6				

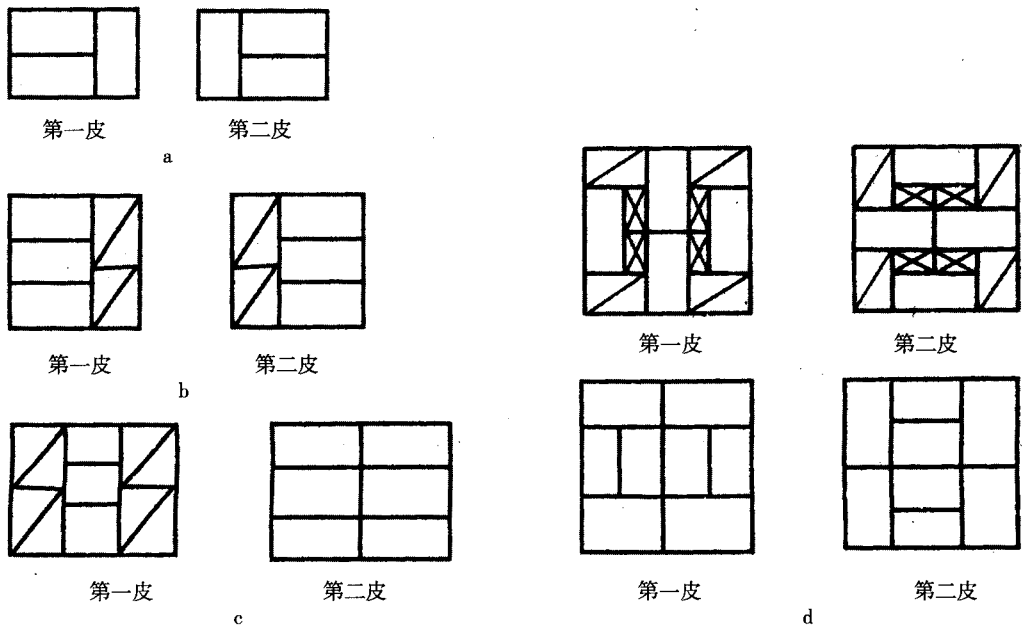
5.7 能源平衡结果分析

(1) 隧道窑的热耗每万块为 $3.63.39 \times 10^4$ kJ, 折标煤 1047kg
原煤消耗折标煤 107kg

(2) 产品合格率: 96.7%

(3) 隧道窑热损失主要方面分析

(下转第 38 页)



a 240 × 365 砖柱 b 365 × 365 砖柱 c 365 × 490 砖柱 d 490 × 490 砖柱

图 11 矩形柱正确砌法

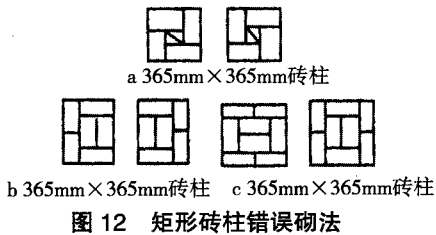


图 12 矩形砖柱错误砌法

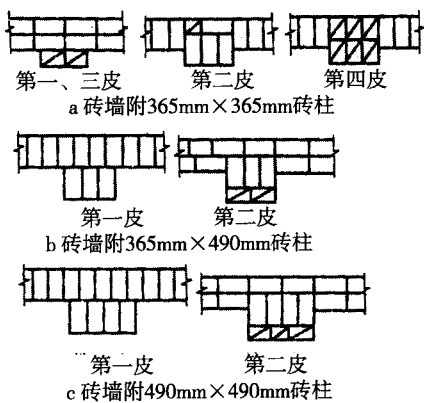


图 13 砖墙附砖垛分皮砌法



(上接第 17 页)

表 14 隧道窑热损失分析

序号	不同类型的热损失	不同类型的热损失占总能耗的比例/%
1	干坯内残余水分汽化潜热	12.32
2	砖坯化学反应的吸热	19.27
3	输出热风的显热	42.38
4	砖出窑热损失	0.32
5	气体不完全燃烧热损失	8.6
6	窑体表面散热热损失	-0.44
7	窑车带出的显热	0.73
8	其它热损失	16.82