

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-848-08

建陶厂房窑炉车间大长宽比高温廊道 热环境测试分析

蒲 静¹ 蒋福建¹ 牛东兴² 袁艳平¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031

2. 中铁科学研究院有限公司 成都 610032)

【摘要】 为探究因大长宽比高温热源连续排列所形成的廊道热环境特性,对某自然通风建陶厂房的窑炉车间表面温度和室内垂直方向温度进行了实测,得到了廊道目前热环境情况;基于实测数据,计算了车间热源散热量。最后以操作温度作为廊道高温热环境评价指标,通过相关计算指出高温廊道热环境改善的重点方向。研究结果揭示了建陶类厂房中大长宽比高温热源廊道热环境情况,可为其环控系统的设计提供参考。

【关键词】 工业厂房;热环境测试;高温廊道;操作温度

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Thermal Environment Test and Analysis of High-temperature Corridor with Large Aspect Ratio in Ceramic Workshop

Pu Jing¹ Jiang Fujian¹ Niu Dongxing² Yuan Yanping¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway Academy Co., Ltd, Chengdu, 610032)

【Abstract】 In order to explore the thermal environment characteristics of the corridor formed by the continuous arrangement of high-temperature heat sources with large aspect ratios, the surface temperature and indoor vertical temperature of the kiln workshop of a natural ventilation ceramics factory were measured. Based on the measured data, the heat dissipation capacity of the heat source in the workshop was calculated. Finally, the operating temperature is used as the evaluation index of the corridor high-temperature thermal environment, and the key directions for improving the high-temperature corridor thermal environment are pointed out through relevant calculations. The research results reveal the thermal environment of the high-temperature heat source corridor with large aspect ratio in ceramic workshops, which can provide a reference for the design of its environmental control system.

【Keywords】 ceramic workshop; thermal environment test; high-temperature corridor; operating temperature

基金项目:“十三五”国家重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”重点专项子课题(2018YFC0705306);
成都市技术创新研发项目(2019YF0501326SN)

作者简介:蒲静(1996-),女,硕士研究生,E-mail:Pjjqianxi@163.com

通讯作者:袁艳平(1973-),男,博士后,教授,E-mail:ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2021-02-08

0 引言

随着我国工业化的快速发展,工业建筑的规模、

数量以及建设速度在世界上已属前列,其能耗已占到工业生产总能耗的10%以上^[1]。与普通民用建筑

相比,工业建筑的生产厂房具有设备多、体量大及内部有较大宽敞空间等特点,其生产过程往往会散发大量热量^[2],需消耗较多通风空调能耗来控制其热环境,这一问题在二类工业建筑中尤为明显。因生产工艺的需求,在二类工业建筑中,连续排列的多个高温设备将组成大长宽比较宽的带状体热源,并在此类热源之间形成高温廊道,这种热廊道普遍存在于机械加工、冶金和陶瓷等行业。在热廊道中,两侧高温热源的热辐射和热对流共同作用将可能造成局部区域过热,而高温的工作环境会对工人健康和生产效率产生负面影响^[4-Error! Reference source not found.]。因此,廊道热环境的形成和控制亟待关注。

对工业建筑热环境的研究方法通常为现场实测和数值模拟。其中现场实测的主要目的是揭示人员活动区在各类工业热源作用下热环境的实际情况,以为工作环境的保障与改善研究提供背景支撑。刘显晨等人^[7]对某一有大量热源散热的高大空间厂房不同高度和不同热源处的空气温度进行了测试,以明确现有热环境状况,并分析影响自然通风效果的主要因素;孟晓静等人^[8]对西安某热轧厂房的室内辐射热强度和定向平均辐射温度等参数进行了测试,以揭示强热源工业厂房内部的对流辐射特性;Tian 等人^[10]对车间的室内温度和风速进行了测试,以明确通风优化的数值模拟研究;为了获得符合实际的水电站机电设备散热量以正确指导电站内的通风空调系统设计,罗琦^{[11][12]}对三个电站的设备散热量进行了现场测试;Wang 等人^[13]则测试了强热源自然通风工业厂房夏季和冬季的空气温度、空气流速、平均辐射温度和 WBGT 等数据,以探究高温环境评价指标 WBGT 的影响因素。现有研究揭示了不同类型工业厂房的热环境特性,但缺乏对大长宽比带状热源形成的热廊道关注,其热环境特性尚不明确,难以指导廊道环控系统的设计运行。

据此,为掌握高温廊道现有热环境特性,为其厂房与环控系统的设计提供优化措施,本文以建陶厂房的窑炉车间为对象,对其廊道热环境参数进行了现场测试。获取了在自然通风条件下,廊道热源表面温度和垂直方向上的空气温度分布数据,总结了现有热环境特征,研究结果可为其通风方案的有

效设计提供参考。

1 现场测试

1.1 测试对象

四川省夹江县是西部最大的陶瓷生产中心,其主要生产陶瓷类型为建筑陶瓷。因生产过程干燥和烧成工序的要求,窑炉设备连续排列,从而在两排设备间形成大长宽比的热廊道。故本文将现场测试对象定为夹江县某建陶厂窑炉车间,厂房长和宽分别为 230m 和 45m。其中窑炉车间长 145m,宽 15.2m,廊道宽 5.2m,厂区平面图、立面图及测点布置如图 1 和图 2 所示,其中图 1 虚线框部分即为窑炉车间,其东、西侧分别与制粉车间和制釉车间相邻,南侧为打包车间。测试窑炉车间除东侧有隔墙外,其他均为开敞区域,且东侧制粉车间设备几乎对进风没有阻碍作用。

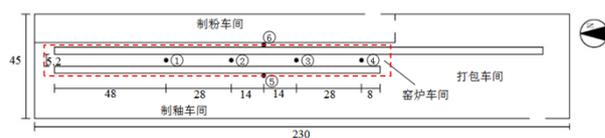


图 1 厂房平面图及测点布置(单位:m)

Fig.1 The horizontal layout of the plant and locations of measurement point(unit:m)

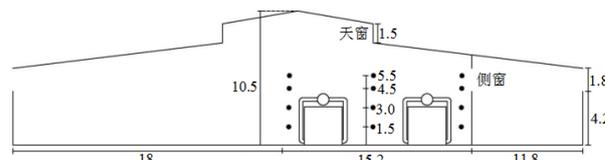


图 2 厂房立面图及测点布置(单位:m)

Fig.2 The vertical layout of the plant and locations of measurement point(unit:m)



图 3 厂房窑炉区廊道实景图

Fig.3 Real view of the corridor of the kiln plant area

厂房现有降温方式为热压主导条件下的自然通风,北墙和南墙分别布置有高度为 1.8m 的一排进风侧窗,屋顶设有高度为 1.5m 的两排天窗排风。整个生产工艺为瓷砖坯体从原料区依次送入窑炉进行干燥和烧成,然后经过上釉、磨边等工序,最

后送往成品区。窑炉是陶瓷生产重要的部件，其内部工作温度可达到 1000℃以上，窑炉两侧每隔 2h 有工人进行日常巡查检修工作，单次停留时间可长达 30min，如图 3 所示廊道即为工人工作岗位，其中两侧窑炉尺寸为 140m×3m×3m，主烟管外径约为 0.9m，辅烟管外径约为 0.6m。热源面积大且温度水平高，其散热量也大。

1.2 测试内容

测试时间为 2020 年 7 月 20 日~23 日，测试期间厂区生产正常运行。测试内容包括廊道两侧热源表面温度和各测点 1.5m、3m、4.5m、5.5m 高度处的空气温度。室内空气温度测点布置如图 1 和图 2 所示，两窑炉中间廊道测点布置按窑炉预热—烧成一—冷却生产过程，从北至南依次布置测点为①-④，测点距离两侧热源均为 2.6m；西侧窑炉靠制釉车间测点为⑤，东侧窑炉靠外墙测点为⑥，测点均布置在距离热源 1m 处。为防止热源高温热辐射对测试结果的影响，在自记仪探头外包铝箔纸。测试车间窑炉总共 70 段，每段 2m，窑炉表面温度测点按每 5 段布置一个，分别对烟气管道、窑顶、上窑

墙和下窑墙进行测量，测点示意图如图 4 所示。

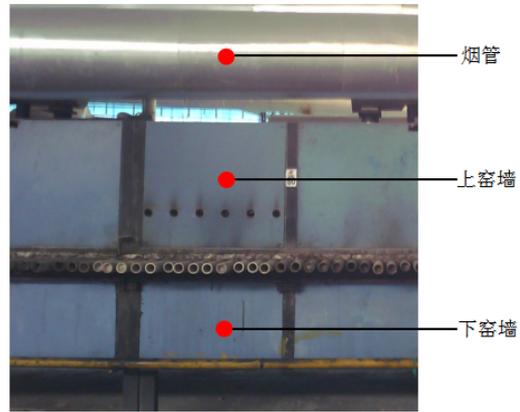


图 4 表面温度测点布置示意图

Fig.4 Schematic diagram of surface temperature measuring point

1.3 测试仪器

测试所用仪器汇总如表 1 所示，其中空气温度和热流密度的测量间隔均为 15min，表面温度的测量间隔为 3h，测量时间总计 3 天。

表 1 测试所用仪器

Table 1 Measurement instrumentation specifications

测量参数	测量仪器	量程	精度
空气干球温度, °C	Testo 175 H1 温湿度自记仪	-20~55 °C	±0.4 °C
	天建华仪 WSZY-1 温湿度自记仪	-40~100 °C	±0.5 °C
空气相对湿度, %	Testo 175 H1 温湿度自记仪	0~100% RH*	±2% RH
	天建华仪 WSZY-1 温湿度自记仪	0~100% RH	±3% RH
风速, m/s	Swema 3000+SWA 03 万向微风速探头	0.05~3 m/s	±0.03 m/s
热源表面温度, °C	Testo 835- T1 红外测温仪	-30~600 °C	±1 °C
	Testo 890 红外热成像仪	0~350 °C	±2 °C
距离坐标, m	SW-M80 激光测距仪	0~80 m	±1.5 mm

2 实测结果

2.1 热源表面温度

对于有高温热源的工业厂房来说，各种热源以辐射和对流的方式向厂区大量散热，厂房内空气温度较高^[15]。因此，确定廊道热源强度，从源头改善

廊道热环境，具有重要意义。本次测量采用红外测温仪和红外热成像仪分别对东西侧窑炉表面温度进行了测试，窑炉顶部温度较为均匀，故不考虑分段测量。窑炉及烟气管道不同段表面温度如表 2 和表 3 所示。

表 2 东侧窑炉不同段表面温度情况/°C

Table 2 The surface temperature of different sections in the east kiln/°C

窑炉分段	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
烟管	55.1	82.5	—	—	47.7	50.2	50.4	53.3	56.8	63.6	65.6	77.3	64.4	64.4	66.2
上窑墙	52.0	51.1	49.0	47.2	48.9	50.2	62.6	73.0	67.8	92.2	106.9	121.3	115.2	104.5	122.6

下窑墙	48.8	51.3	43.7	48.5	51.9	62.4	64.8	61.2	77.6	104.3	100.2	99.2	93.1	86.2	69.9
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	------	------	------	------

表 3 西侧窑炉不同段表面温度情况/°C

Table 3 The surface temperature of different sections in the west kiln/°C

窑炉分段	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
烟管	56.6	53.9	55.6	52.8	47.9	53.4	52.6	42.5	45.8	53.6	60.8	58.1	90.9	84.3	—
上窑墙	67.9	59.3	60.0	56.1	56.6	58.5	59.5	56.2	57.0	67.6	72.4	74.9	72.0	73.8	69.8
下窑墙	56.5	57.3	60.7	49.0	56.2	51.5	48.0	49.0	48.2	58.0	66.3	60.6	60.3	61.9	57.8

从上表可以看出,两窑炉表面温度分布不均且差异较大。这是由于东侧窑炉是烧制瓷砖胚体作用,西侧窑炉是干燥瓷砖胚体作用,而烧成工序温度要求远高于干燥过程。故东侧窑炉表面温度高于西侧窑炉,东侧窑炉窑墙最高温度 122.6°C,西侧窑炉窑墙最高温度 74.9°C。窑炉外表面温度随内部温度的变化而变化,其中在烧成状态下温度水平最高,窑炉内部温度高达 1000 °C 以上,而预热和冷却阶段工作温度相对较低。选取东侧窑炉烧成段(第 43 段窑墙和 53 段烟管)为例,其实景照片和红外热

成像照片如图 5 所示。从 (a), (b) 图可以发现,窑墙表面温度均超过 80 °C,距离烧成砖越近窑墙温度越高,从 (c), (d) 图可以发现车间内部烟气管道表面温度低于上窑墙温度。根据 GBZ1-2010 《工业企业设计卫生标准》^[17] 中规定,工作人员经常停留或靠近的高温地面或壁板,其表面温度不应大于 40°C,瞬间最高温度也不宜大于 60°C,而工人经常靠近的窑墙高温段表面温度均超过 60 °C 规定限值。

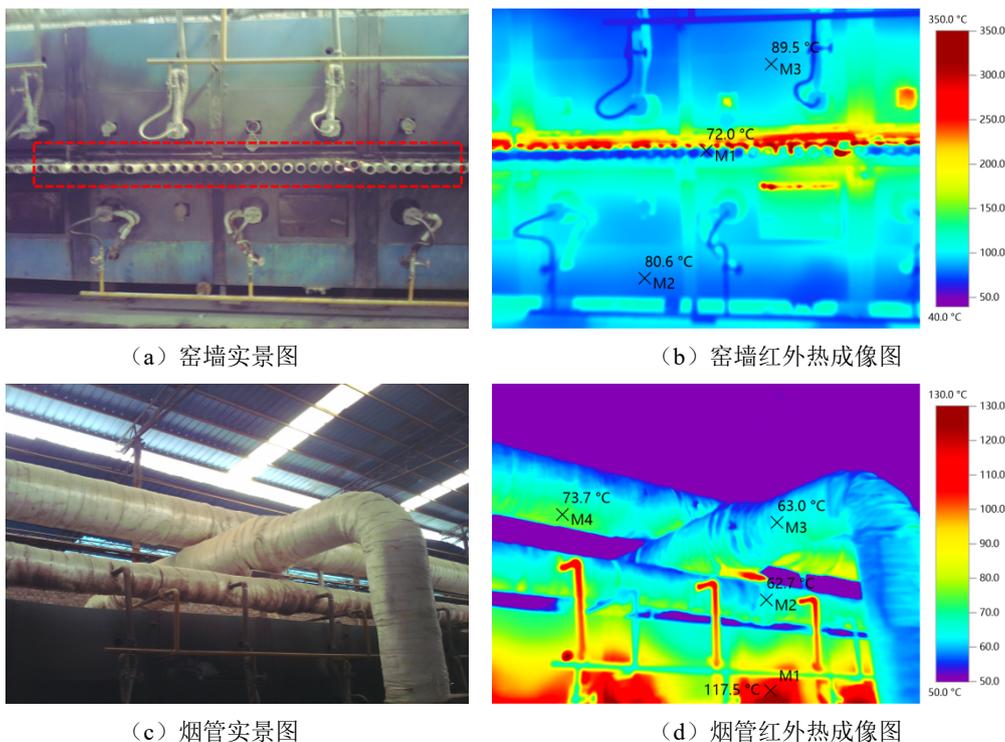


图 5 热源局部实景图 and 热成像图

Fig.5 Local view and thermal image of the heat source

2.2 室内空气温度

测试期间天气为阴转小雨,故选取没有降雨的 21 号测试数据进行分析,室外逐时平均温度变化

如图 6 所示,室外平均气温 25°C,日最高气温 29 °C,室外无持续风向,风力等级为 1~2 级。图 7 给出了窑炉区廊道各测点垂直方向 24h 的逐时空气

温度变化情况。

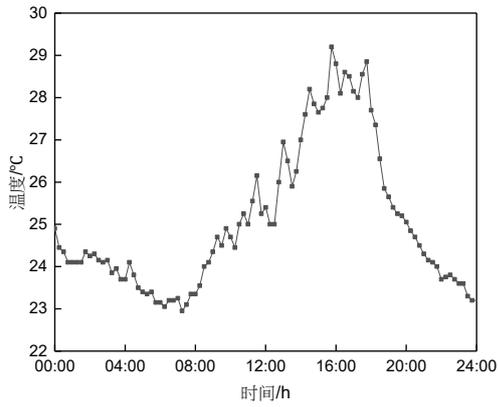
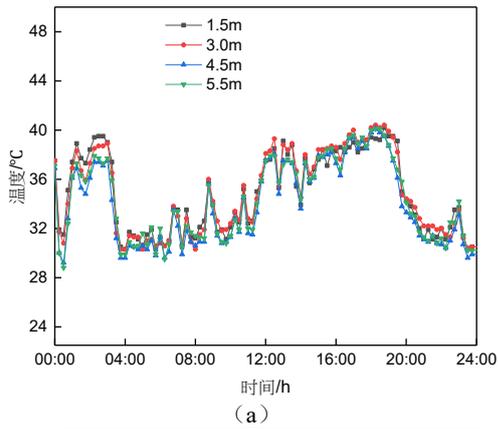
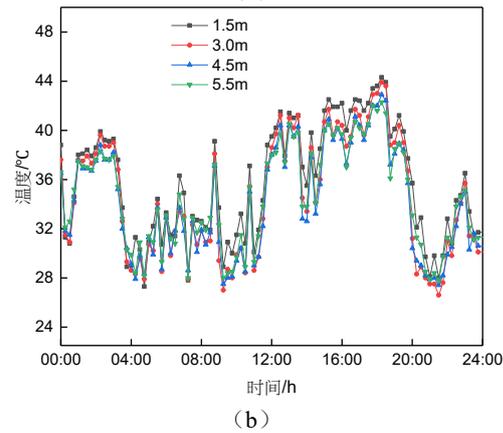


图 6 室外逐时平均温度

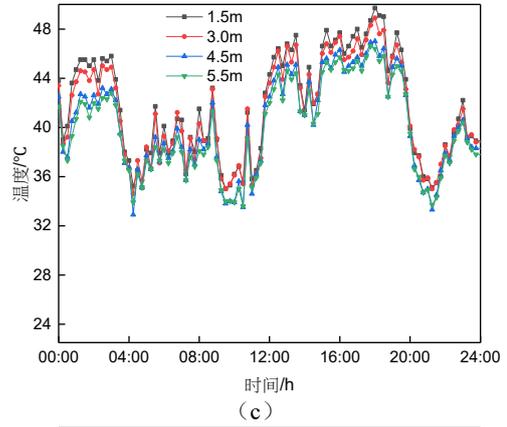
Fig.6 The average outdoor air temperature by hour



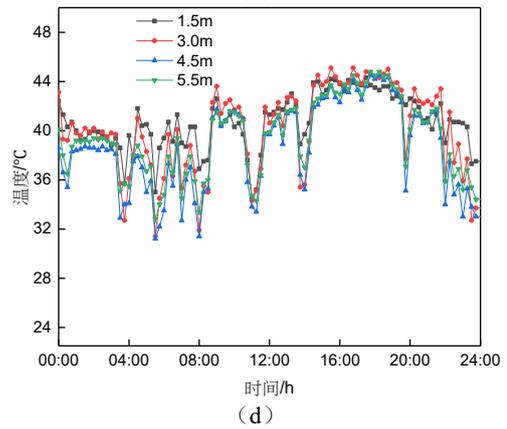
(a)



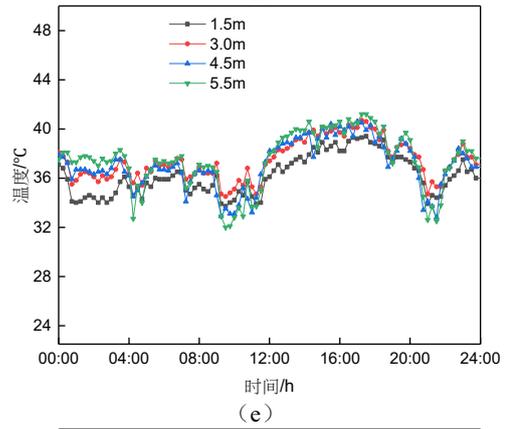
(b)



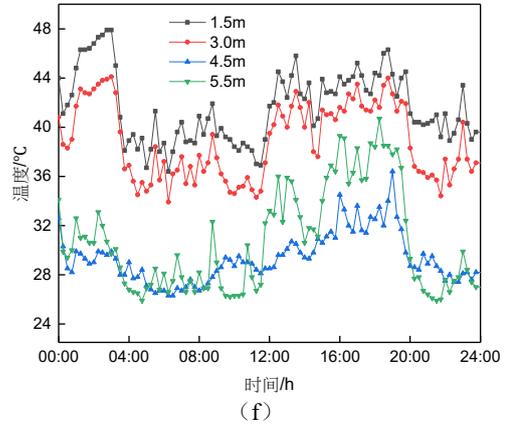
(c)



(d)



(e)



(f)

图 7 各测点垂直方向上的逐时平均温度 (图(a)~(f)依次对

应测点①~⑥)

Fig.7 Hourly mean air temperature in the vertical direction of each measuring point

空气测点①~④依次对应窑炉段为 24、38、52、66, ⑤和⑥测点对应窑炉段为 45 段, 其中 24 段前为预热段, 窑炉内部温度较低, 24~38 段内部开始升温向烧成段过渡, 之后进入高温烧成段, 66 段以后温度开始逐步下降向冷却段过渡。从图 7 可以看出, 廊道空气温度随着窑炉表面温度的变化而变化。①~④测点温度先升高, 后稍有降低, ③测点空气温度最高, 廊道平均空气温度 37.5℃。即热源表面温度越高, 空间范围内空气温度越高。而热源东侧⑥测点由于距侧墙进风口较近, 在风口作用范围内, 垂直方向 4.5 和 5.5m 处温度较低。而距离风口越远温度越高, 1.5m 和 3m 测点由于距热源较近, 空气温度最高达 48℃; 除⑥测点外, 其他区域测点空气沿垂直方向的温度梯度较小, 说明热空气没有形成明显的温度分层; 这主要是由于东侧侧墙风口进入的冷空气在掠过热源表面时温度逐渐升高, 到中间廊道区域时冷空气温度与区域热空气温差逐渐减少至零。此外, 各测点 24h 逐时空气温度随室外气温波动较小, 故廊道热环境主要是由于室内强热源影响。

表 4 廊道工作区空气温度

Table 4 Air temperature in corridor working area

测点	①	②	③	④	⑤	⑥
工作地点 温度/℃	34.8	35.8	41.7	40.7	36.2	41.6

考虑到工人工作岗位, 将距离地面 1.5m 高定义为工作区, 表 4 给出了廊道不同热源段测点工作区温度。从上表发现廊道热源高温段工作区温度超过 40℃, 工作区平均气温为 38.5℃。文献[14]指出工作地点的气温超过 38℃即为高温作业, 故在现有热压主导自然通风作用下, 廊道工作区属于高温作业场所。

3 实测结果分析

3.1 车间热源散热分析

热源表面温度一定程度上决定了厂房内热源强度, 故分别对上述测试的热源散热量进行计算。对于室内设备和管道, 可只考虑辐射换热和自然对流换热, 综合为复合换热过程, 其表面散热量简化

计算式^[18]:

$$Q = A \cdot \alpha_s \cdot (T_w - T_a) = A \cdot \bar{X} \quad (1)$$

式中: Q 为管道或设备表面散热量, W; \bar{X} 为散热热流密度, W/m²; A 为设备及管道的外表面积, m²; α_s 为综合换热系数, W/(m²·K), 按式 (2) 和式 (3) 计算; T_w 为设备及管道的外表面温度, ℃; T_a 为环境温度, ℃。 T_w 和 T_a 的取值均按实测的表面温度和环境温度数据取值。

对于圆筒壁^[19]:

$$\alpha_s = 9.42 + 0.05(T_w - T_a) \quad (2)$$

对于平壁^[19]:

$$\alpha_s = 9.77 + 0.07(T_w - T_a) \quad \text{Error!}$$

Reference source not found. (3)

管道表面散热损失按求算术平均值的方法处理, 按式 (4) 计算; 设备表面散热损失按求表面积加权平均值的方法处理, 按式 (5) 计算^[19]。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} + x_n}{n} \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{x_1 A_1 + x_2 A_2 + \dots + x_{n-1} A_{n-1} + x_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_{n-1} + A_n} \quad (5)$$

式中: n 为测点数, 个; $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ 为管道或设备各段的表面散热热流密度, W/m²; $A_1, A_2, \dots, A_{n-1}, A_n$ 为各区域面积, m²。散热量计算结果如图 8 所示。

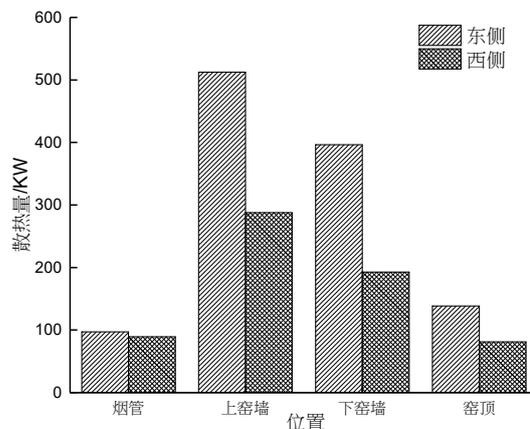


图 8 窑炉车间热源散热量

Fig.8 Heat dissipation of heat source in kiln workshop

计算得到本次调研厂房窑炉车间热源总散热量为 1795kW, 车间余热强度约为 93W/m³。由图 8 可以看出, 东侧热源散热量高于西侧, 由于窑墙表

面温度水平较高、散热面积较大，故廊道两侧窑墙是车间最大的热源。车间热源单位设备表面积散热损失如表 5 所示。

表 5 车间热源参数

Table 5 The parameters of workshop heat source

参数	位置	烟管	上窑墙	下窑墙	窑顶
单位设备面积散热	东侧	245	610	472	330
损失 (W/m ²)	西侧	226	342	229	193

从表 5 可以看出，车间热源散热不均匀，上窑墙的单位面积损失高达其他热源的 3 倍，热源最小单位面积损失为 193W/m²。根据相关保温规范^[19]的说明：常年运行工况设备、管道及附件保温后外表面温度为 100℃时，允许的最大散热损失均不得超过 84W/m²。可以发现，窑炉车间热力设备和管道保温工程的单位面积热损远高于规定值。

3.2 窑炉廊道热环境分析

强热源工业建筑内部往往散发大量辐射，仅用空气温度很难准确评价人体舒适。文献^[19]指出，对于过热环境或辐射换热环境普遍以操作温度作为热环境评价指标，因此本文以操作温度作为廊道热环境对人体热感觉影响的评价指标，根据 ASHRAE 手册 **Error! Reference source not found.** 中操作温度的简化计算公式：

$$t_o = At_a + (1 - A)\bar{t}_r \quad (6)$$

式中： t_o 为操作温度，℃； t_a 为空气平均温度，℃； A 为相对风速 v_r 的函数，本文取 0.5**Error! Reference source not found.**； \bar{t}_r 为平均辐射温度，℃。平均辐射温度是指一个假定的黑色等温面的表面温度，人在其中产生的热损失与在真实的内表面温度不均匀的环境的热损失相等，可由面积加权法按式 (7) 计算 **Error! Reference source not found.**。

$$\bar{t}_r = \frac{t_1B_1 + t_2B_2 + K + t_NB_N}{B_1 + B_2 + K + B_N} \quad (7)$$

式中： t_i 为表面 i 的温度，℃； B 为表面面积 m²。根据以上公式对测试 6 个测点的操作温度进行计算，计算结果如图 9 所示。

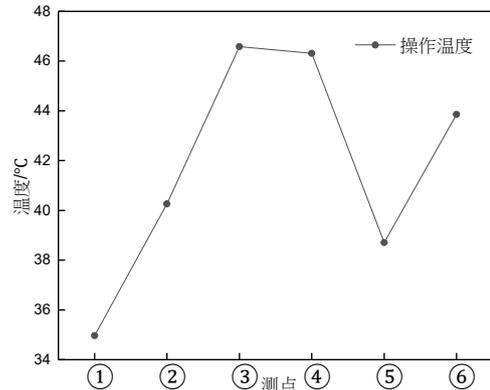


图 9 夏季各位置操作温度

Fig.9 Operating temperature of each measuring location in summer

本文以文献 **Error! Reference source not found.** 中使用的操作温度 35℃ 限值作为工业建筑操作温度评定标准，从图 9 可以看出，廊道除了①测点外，其他测点操作温度均超过 35℃，最高操作温度 46.6℃，廊道平均操作温度 41.2℃，现有热环境较为恶劣。对于高温热源工业建筑，厂房内热源以对流和辐射的形式向室内散发热量，因此合理的通风方式降低厂区热对流作用和有效的隔热措施减少热源热辐射作用对于热环境的改善具有重要意义。

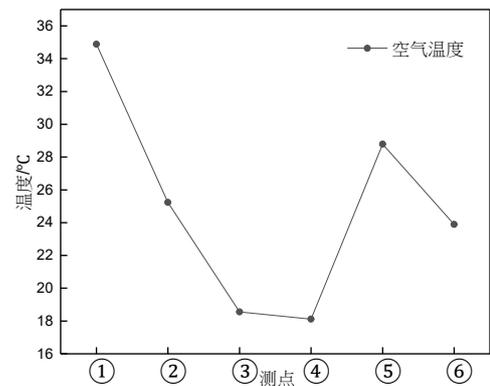


图 10 维持操作温度要求的各位置空气温度

Fig.10 Air temperature at each measuring location as required by operating temperature

假设空气温度变化对热源表面温度的影响可以忽略不计，即保持平均辐射温度不变，通过式 (6) 和式 (7) 计算廊道各位置达到操作温度 35℃ 的空气温度限值，计算结果如图 10 所示。从图 10 可以看出，①测点由于热辐射作用较弱，故通过合理的气流组织使空气温度控制在 35℃ 即可满足要

求。③和④测点由于两侧热源温度水平较高,导致平均辐射温度较大,故达到规定操作温度限值的空气温度较低,操作温度为35℃的空气温度控制值为18℃。显然在实际情况中通过通风的方式使厂房温度达到18℃是不现实的,必定消耗大量通风与制冷能耗。因此,对于内热源辐射热量较大的厂房,可以考虑采取有效的隔热措施,例如采用隔热板降低热源对工作区的辐射热量,效果比较显著。Error! Reference source not found。以规范^[17]规定的工作人员经常停留或靠近的高温地面或壁板,其表面温度不应大于40℃为依据,若采取有效的防辐射措施使廊道热源表面温度达到规定要求,通过式(6)和式(7)计算,则达到操作温度限值的空气温度为30℃。这一结果与上述计算的空气温度控制值18℃相比,在实际环控系统设计中更为合理。因此,强热源厂房降低其内部热源辐射作用是热环境改善的重点方向。

4 结论

为探究大长宽比高温廊道热环境特性,以夹江县某建陶厂房的窑炉车间为例,对表面温度和室内温度进行了测试,并对实测结果进行分析,得到以下结论:

(1)在现有热压主导的自然通风降温方式下,窑炉车间廊道工作区平均气温38.5℃。中间廊道空气沿垂直方向没有形成明显的温度分层。廊道逐时空气温度变化不明显,热厂房空气温度随室外气温变化不大,主要受强热源影响。现有侧墙自然通风方式与热源形式不匹配,室外新风由于热源的遮挡无法直接作用于廊道工作区。东侧热源表面温度范围为43.7~122.6℃,西侧热源表面温度范围为42.5~90.9℃,两热源高温段表面温度均超过规定的60℃热表面温度限值。热源散热量计算结果表明窑炉车间余热强度约为93W/m³。

(2)选取操作温度作为廊道热环境评价指标,发现廊道平均操作温度41.2℃,最高操作温度46.6℃。若不采取防辐射措施,仅采用合理的气流组织,则达到操作温度限值的空气温度控制值为18℃。若采取有效的隔热措施使廊道热源表面温度保持在规范规定的40℃,则达到操作温度限值的空气温度为30℃。这一结果与空气温度控制值18℃相比,在实际环控系统设计中更为合理,能显著降低

通风或制冷能耗。因此,对于强热源厂房减少其内部热源辐射作用是热环境改善的重点方向。

参考文献:

- [1] 古洁.烟草工业建筑可持续性评价系统研究[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [2] 赵鸿佐.室内热对流与通风[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] GB 51245-2017,工业建筑节能设计统一标准[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [4] Varghese B M, Hansen A, Bi P, et al. Are workers at risk of occupational injuries due to heat exposure? A comprehensive literature review[J]. Safety Science, 2018,110:380-392.
- [5] Bai L, Ding G Q, Gu S H, et al. The effects of summer temperature and heat waves on heat-related illness in a coastal city of China, 2011-2013[J]. Environmental Research, 2014,132:212-219.
- [6] Li X D, Chow K H, Zhu Y M, et al. Evaluating the impacts of high-temperature outdoor working environments on construction labor productivity in China: A case study of rebar workers[J]. Building and Environment, 2016,95(1):42-52.
- [7] 刘显晨,郭西龙.某高大空间厂房自然通风现场测试结果分析[J].工程建设与设计,2016(12):11-12.
- [8] 孟晓静,王怡,邢晓,等.强热源工业厂房室内对流辐射特性分析[J].暖通空调,2016,46(9):36-39.
- [9] 孟晓静.高温热源工业建筑双辐射作用下室内热环境特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [10] Tian G J, Fan Y S, Wang H, et al. Studies on the thermal environment and natural ventilation in the industrial building spaces enclosed by fabric membranes: A case study [J]. Building Engineering, 2020.
- [11] 罗琦.三个水电站的机电设备散热量现场测试分析[J].四川建筑科学研究,2015,41(3):211-214.
- [12] 罗琦.惠州蓄能电站、江边水电站及瀑布沟水电站主厂房机电设备散热量测试计算[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [13] Wang Y, Gao J, Xing X, et al. Measurement and evaluation of indoor thermal environment in a naturally ventilated industrial building with high temperature heat sources[J]. Building & Environment, 2016,96:35-45.

- [14] 符红. 高温车间热环境辐射热测量及有关标准的探讨[J]. 劳动保护科学技术, 1995, (1): 51-52.
- [15] Park H J, Holland D. The effect of location of a convective heat source on displacement ventilation: CFD study[J]. Building & Environment, 2001, 36(7): 883-889.
- [16] Wang Y, Meng X J, Yang X N, et al. Influence of convection and radiation on the thermal environment in an industrial building with buoyancy-driven natural ventilation[J]. Energy & Buildings, 2014, 75: 394-401.
- [17] GBZ1-2010, 工业企业设计卫生标准[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] GB/T 17357-2008, 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 热流计法和表面温度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 金福锦, 蔡子明. 设备及管道绝热应用技术及标准解读[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010. (下转第 883 页)