

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-549-05

地下综合管廊运行优化研究

李粤川[□] 邓志辉

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 使用 STAR-CCM+ 建立数值模型, 模拟计算城市地下综合管廊通风降温, 分别以排风口和管廊内几个点为通风停止温度控制点。分析对比各温度控制点下, 管廊温度场分布和通风效果。分析表明: 单位时间通风量低时, 管廊空气温度分布均匀性虽较好, 但是排热效率很差; 选用管廊内一点作为温度控制点时, 空气温度分布均匀性和排热效率均优于以排风口温度为控制点。

【关键词】 数值模拟; 综合管廊; 通风散热; 运行优化

中图分类号 TK124 文献标识码 A

Research on Operation Optimization of Utility Tunnel

Li Yuechuan Deng Zhihui

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Using the STAR-CCM+ to establish a numerical model to simulate and calculate the cooling of the urban utility tunnel. The exhaust outlet and the a few points in utility tunnel are used as the ventilation stop temperature control points. Analyzing and comparing the temperature field distribution and ventilation effects of them. Analyzing the simulation results, the air temperature distribution uniformity of utility tunnel is good when the ventilation quantity of per unit time is low, but the heat removal efficiency is very poor; when choose one point in utility tunnel as the temperature control point, the air temperature distribution uniformity and the heat removal efficiency are better than the exhaust outlet temperature is the control point.

【Keywords】 numerical simulation; utility tunnel; ventilation and heat dissipation; operation optimization

作者简介: 李粤川 (1994-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: leeyuechuaneru@163.com

通讯作者: 邓志辉 (1962-), 男, 硕士, 副教授, E-mail: dzhwk1007@163.com

收稿日期: 2019-12-09

0 引言

随着经济发展, 城市对用电量的需求变大, 由于地面空间的紧张, 综合管廊也已经在各大城市开始展露其重要性。其中综合舱主要用于电力电缆、通信电缆以及部分水管的布置。由于综合舱内电力电缆在运营时会散发大量热量, 工作人员的检修与维护也需要氧气。因此综合舱需要设置通风系统排出余热, 并且为工作人员提供必需的氧气^[1]。

由于综合管廊兴起不久, 虽然已经有城市综合管廊工程技术规范 (GB 50838-2015) 对综合管廊的建设有指导作用, 但其中关于综合管廊建成后实

际的运营管理并未在多方面给出标准。特别是具体的通风方案, 运营时基本上都是设计人员在参考规范的基础上以经验来制定。通常情况通风系统风机的启停采用定时控制与温控探测器控制相结合的控制方式^[2]。定时控制即正常工况下每隔一段时间开启风机通风降温, 周期性的运行风机; 温控探测器控制则是在检测温度超过预设上限温度40℃时, 自动开启风机进行降温。通风时长通常是让管廊温度降到一定温度后就停止通风或者直接就是让风机运行一段时间后关机, 没有具体的参考规范。各综合管廊运维放对于这个降温下限温度也是取值

不一，而且参考点也各不一样，通常以排风口平均温度作为参考。本文研究目的旨在探究综合管廊通风降温时的温度场分布，从多方面考虑得出一个较为合理的温度控制点，为综合管廊的运行提供一个优化方向。

1 综合管廊综合舱数值模拟

1.1 物理模型

综合管廊管线的布置应满足以下基本条件^[3]：

- (1) 热力管道不应与电力电缆同舱敷设；
- (2) 110kV及以上电力电缆，不应与通信电缆同侧布置；

(3) 综合管廊标准断面内部净高应根据容纳管线的种类、规格、数量、安装要求等综合确定，不宜小于2.4m；

(4) 综合管廊通道净宽，应满足管道、配件及设备运输的要求，并应符合下列规定：综合管廊内两侧设置支架或管道时，检修通道净宽不宜小于1.0m；单侧设置支架或管道时，检修通道净宽不宜小于0.9m。

再考虑到模型的一般适用性以及根据已有综合管廊总结得到本文所使用的综合舱物理模型，10kV和110kV铜芯交联聚乙烯电缆各6孔（详细数据见表1）、通信电缆15孔、DN300给水管道一根，通风区间长度200m，进风口排风口分别位于两端，如图1所示^[4]。

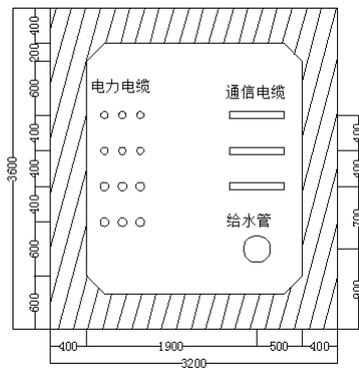


图1 管廊布局

Fig.1 Layout of utility tunnel

表1 电缆属性

Table 1 Cable properties

电缆	导体标称截面	近似外径	20℃直流电阻
	mm ²	mm	Ω/km

10kV	3×240	80	0.0754
110kV	1000	94	0.0176

1.2 数学模型

流体遵循三大基本守恒定律：质量、动量和能量守恒定律^[5]。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为气体密度； t 为时间； u 、 v 、 w 分别为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中： p 为静压； t 为时间； x_i 、 x_j 分别为 i 、 j 方向的坐标； u_i 、 u_j 分别为流体速度沿 i 、 j 方向的分量； ρ 为气体密度； τ_{ij} 为应力矢量； g_i 为 i 方向的重力分量； F_i 为由阻力和能源而引起的其他能源项。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k + k_i) \frac{\partial T}{\partial x_i} + S_h \quad (3)$$

式中： h 为焓； t 为时间； x_i 为 i 方向的坐标； u_i 为流体速度沿 i 方向的分量； T 为温度； ρ 为气体密度； k 为分子传导率； k_i 为有湍流而引起的传导率； S_h 为定义的体积源。

1.3 模型简化

本文使用STAR-CCM+建立模型，为减少网格数量从而偏于计算，对影响因素较小部分适当简化。电缆、通信电缆、管道并没有画出其实体，而是只画出其外形，通过在边界上给出相适应的边界条件、材料特性等进行计算。还做出了一些假设：综合舱室的围护结构各组成材料为各向同性的均匀介质，且物性参数都保持不变设为常数；热源只考虑电缆散热，忽略管廊内灯具等的散热；主要研究的是正常运行的工况，通常无人，忽略人的因素。

1.4 求解设置

本文使用STAR-CCM+进行模拟计算。使用切割体网格，并对电缆周围进行加密。以成都地区为例，通风降温时进风温度设置为成都夏季室外通风温度301.5K，湍流模型设置为k-epsilon模型；通风降温时进风口边界条件设为压力出口，排风口边界条件设为速度进口（速度设置为负数），风量根据

估算的换气次数给出:关闭风机管廊自然升温时,由于进排风口都安装有风机,考虑到阻力比较大,升温工况进风口和排风口边界条件设置为壁面;电缆热规范设置为恒定热流量,根据相关计算公式可算出10kV和110kV的热流量分别为 $61.67\text{W}/\text{m}^2$ 和 $120.41\text{W}/\text{m}^2$;外壁面热规范设置为温度,取当地土壤温度 290K ,材料为混凝土,厚度为 0.4m ;给水管的热规范设置为温度,取 293K ;通信线缆和管廊两端热规范都设置为绝热^[6-9]。

2 模拟结果及分析

本文模拟了排风口速度分别为 2 、 3 、 4 、 5 、 $6\text{m}/\text{s}$,降温下限温度为 309K 时的工况。定义温度控制点,即当该点温度达到设置通风下限温度时就停止通风。本研究共分析对比4个温度控制点下管廊的温度场分布、排热效率。A控制点为排风口;根据初步模拟分析温度场表明,高温区域集中在排风口附近电缆正上方,且温度都较为接近,取距排风口侧防火门 2m 、 5m 、 10m 以及距顶部壁面 0.1m 、中心电缆正上方的点分别为B、C、D控制点。

2.1 综合管廊内空气温度场分析对比

以排风口风速为 $5\text{m}/\text{s}$ 的工况为例,分析管廊温度场特性。图2和图3中,以靠近进风口侧防火门为 $X=0$ 作为起点。

(1) 管廊纵向空气温度场

取管廊中心纵向截面图即图1,可以看出温度由进风口沿排风口方向逐渐升高,而且由下到上也是逐渐升高。形成这样温度场的主要原因首先是管廊外部较低温度空气进入后在风机带动下向排风口移动,途中与管廊内部空气进行换热,温度逐渐升高,到后面由于与管廊主流温度接近,换热效率下降;其次,由于空气密度不一,高温空气在浮升力的作用下往上聚集较冷空气则下沉。

(2) 管廊横向空气温度场

如图2所示,可以发现任意截面左侧温度高于右侧,这主要是因为电缆在左侧,外界空气与之换热形成;右侧上部空气温度也比较高,是因为左侧高温空气上浮时被顶部壁面阻挡,向右侧迁移引起;上部区域整体温度高于下部,是由于热浮升力的影响,高温空气往上聚集,并且在远离进风口的区域形成明显的分层现象。对比4张图可进一步看出,距离送风口越远,截面温度差越明显,温度值

也越高,越不利于散热。

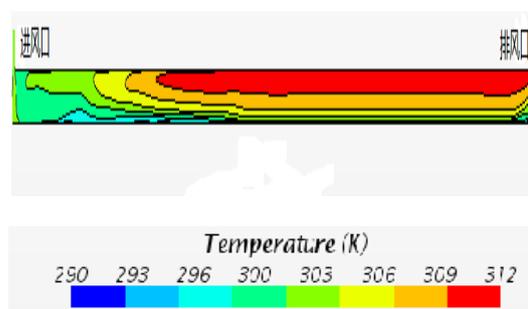
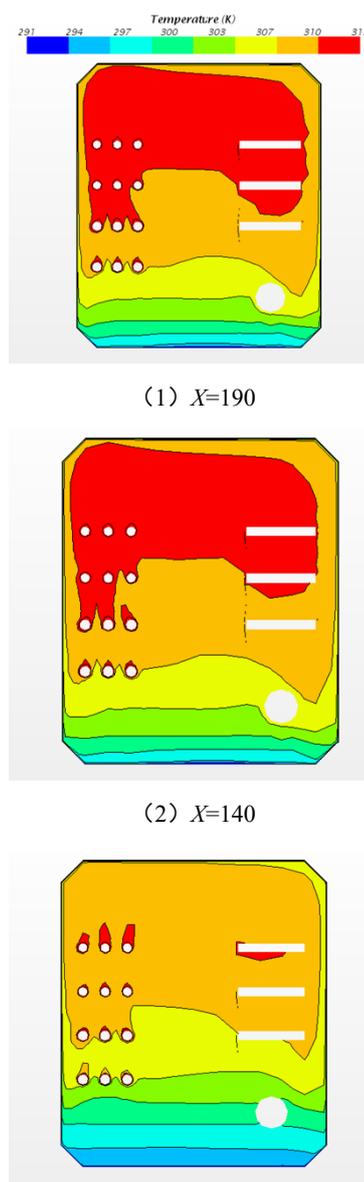


图2 管廊降温工况纵向中心面温度场

Fig.2 Longitudinal center surface temperature field of pipe gallery



(1) $X=190$

(2) $X=140$

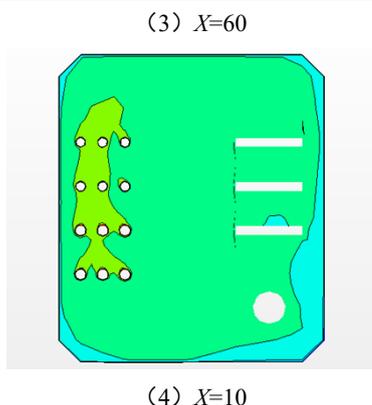


图3 横向截面温度场

Fig.3 The temperature field of transverse

2.2 通风效果对比

(1) 空气温度分布的均匀性

虽然管廊内虽一般无人值守,而且规范只要求管廊空气平均温度不高于40°C,对管廊内具体温度分布等并无具体要求。电缆达到稳态运行时,导体温度的变化受外界环境温度的变化影响灵敏,降低外界环境温度,可以提高电缆载流量^[10]。较为合理的温度分布,可以减少甚至避免部分区域出现较高温度影响电缆寿命和输电性能。所以应该要求通风后管廊内温度分布具有一定的均匀性。

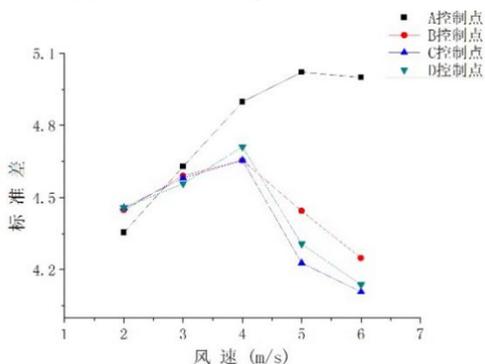


图4 管廊空气温度标准差

Fig.4 The temperature standard deviation of utility tunnel

通过模拟计算结果可知以A点作为降温温度控制点时,单次通风时间都少于B、C、D点。首先研究管廊内空气温度的标准差,值越小则说明空气温度分布越均匀。从图4可知B、C、D控制点下,标准差基本上都小于A控制点。主要原因是B、C、D控制点下,通风时间较A控制点下长,换热更充分,近壁面温度逐渐稳定,且趋于空气温度平均值,所以温度分布均匀性较好。A控制点在低风速时,标

准差低于另外3点,表现出空气温度分布均匀性较好。主要原因是A控制点下,排风风速小,单位时间内换气量少,而且管廊内断面风速较低,导致空气整体温度都偏高,温度分布均匀性有所提升。

沿管廊纵向方向每隔10m截取一个平面,共19个面。计算不同排风口风速下这19个截面的空气平均温度与管廊空气平均温度的标准差,值越小则说明空气温度分布越均匀。如图5所示,可发现其规律与图4所示基本一致,原因也相同,此处不再赘述。

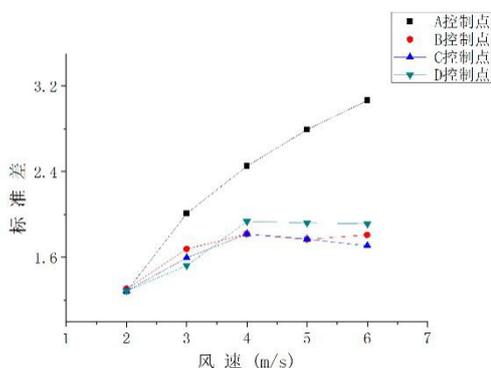


图5 管廊截面空气平均温度标准差

Fig.5 The air average temperature standard deviation of utility tunnel's transverse

(2) 通风降温排热效率

不同温度控制点的选择,判断其合理性不能只对比空气温度分布的均匀性,能量的利用率也是一个参考因素。由此可以通过排热效率气流组织形式的能量利用有效性来考察,定义式(4):

$$\eta_t = \frac{t_e - t_s}{\bar{t}_a - t_s} \quad (4)$$

式中, η_t 为排热效率; t_e 为排风口平均温度, K; t_s 为进风口温度, K; \bar{t}_a 为管廊内空气平均温度, K^[11]。

图6是4个温度控制点在各排风口风速下的排热效率。可以发现,一方面4个温度控制点的排热效率的值都是随着风速增加而逐渐增大;另一方面,同排风风速下,B、C、D点为温度控制点时的排热效率要大于A点。前者主要是因为排风口风速越大,单位时间内进风量和断面平均风速越大,同时根据纵掠平壁对流传热系数的特征关联式,可知速度越快,空气与壁面对流传热系数越大;后者原因是BC、D点为温度控制点时,通风时间更长。从而管廊内空气与外界空气换热更充分,管廊自身的围护结

构带走的热量也更多,使得管廊内空气平均温度进一步下降,排热效率也就更高。管廊空气平均温度如图7所示。

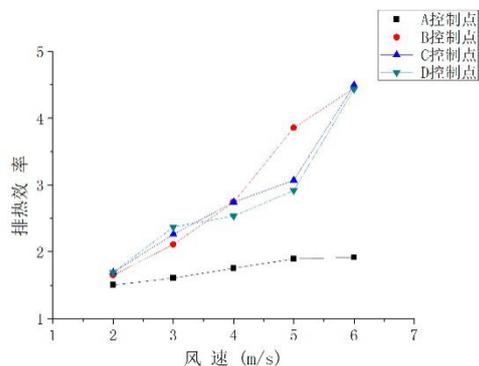


图6 排热效率

Fig.6 heat rejection efficiency

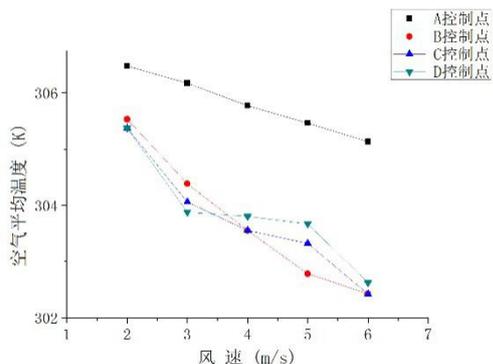


图7 管廊空气平均温度

Fig.7 Average air temperature of utility tunnel

2.3 温度控制点的评价

通过上文模拟结果综合分析,可以发现通风温度控制点选择管廊内的点相较于选择排风口,更加合理。而针对管廊内的3点,B点在较高风速下排热效率以及管廊内平均温度都表现出更好的数值。虽然B点在空气温度分布均匀性上相比另外两个点略微有所补足,但是由于模拟计算的是正常运行工况而非巡检工况,管廊无人员活动,高效的排出余热比空气温度分布均匀性更加重要。因此,在综合舱通风降温时选择更靠近排风口的B点作为温度控制点更具有优势。B点离排风口侧防火门距离为2m(单个通风区间长度的1%),位于电力电缆侧中心

正上方,距顶部壁面0.1m。

3 结论

(1) 综合管廊空气平均温度较低时,通常具有更好的排热效率。

(2) 低排风风速通风时,管廊空气温度分布均匀性虽好,但整体空气温度较高,排热效率欠佳,所以一般应选择较高风速。

(3) 综合管廊综合舱通风温度控制点,应选择管廊内上部更靠近排风口的点,通常都具有更高效的排出余热能力。

参考文献:

- [1] 赵辉.城市电力电缆隧道的通风设计[J].华北电力技术,2009,(6):11-13,16.
- [2] 于浩.城市综合管廊工程通风系统设计浅析[J].科技创新导报,2016,13(36):50-51.
- [3] GB 50838-2015,城市综合管廊工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [4] 王恒栋,薛伟辰.综合管廊工程理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5] 李军,武磊,向璐.基于star-ccm+进气歧管的稳态CFD分析[J].湘潭大学自然科学学报,2015,37(2):97-101.
- [6] 马国栋.电线电缆载流量(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [7] 杨智国.西安地铁沿线地层地温夏季分布规律观测研究[J].西安科技大学学报,2012,32(05):610-616.
- [8] 肖庆峰.城市越江公路隧道服务层通风及防灾研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [9] 刘丹丹,胡安焱,刘彩波,等.西安市浅层地温场垂向分布特征及其影响因素分析[J].地下水,2014,36(6):1-3,8.
- [10] 刘刚,雷成华.提高单芯电缆短时负载流量的试验分析[J].高电压技术,2011,37(5):1288-1293.
- [11] 邱灏,邓志辉,袁艳平,等.通风形式对综合管廊内空气温度影响的研究[J].制冷与空调,2018,32(6):668-672.