



分布式能源热电联产 “以热定电”的新理解

同济大学 龙惟定[☆]

摘要 如果仅从热效率角度分析,分布式能源的一次能源效率甚至低于燃气冷凝锅炉。必须充分发挥分布式能源所生产的高品位电力的价值。以热定电,就是以热需求(冷热负荷)确定电力驱动热泵的电力需求,使分布式能源热电联供系统综合效率达到 200% 以上。为区域能源系统的优化配置提供了有效的方案。

关键词 分布式能源 热电联产 以热定电 区域能源系统

More understanding about the principal of “determining power by heating load” in heat and power cogeneration

By Long Weiding[★]

Abstract From the point of view of heating efficiency, the primary energy efficiency of a distributed energy system is even lower than a gas power condensing boiler. Points out that the value of the power as high-grade energy produced by the distributed energy system should be fully enhanced. So called “determining power by heating load” is to determine the power demand for electric heat pump according to the heating and cooling load in order that the integrated system efficiency reaches up to 200% or more. Provides an effective option for optimized scheme of district energy systems.

Keywords distributed energy, heat and power cogeneration, determining power by heating load, district energy system

★ Tongji University, Shanghai, China

①

1 热电联产系统要“以热定电”

在低碳城市能源系统中,分布式能源有三种形式,第一种是热电(冷)联产系统,第二种是利用可再生能源的分布式供电系统,第三种是以热泵为核心技术的低品位“未利用能源(untapped energy)”的应用系统。

热电联产(cogeneration)是一项一次能源利用率非常高的技术。传统电力工业是以煤作为燃料的火力发电,必须远离城市建设大型电厂,以发挥大机组的高能效优势、降低煤耗、集中处理污染。但这种大集中模式使发电过程中排出的热量无法得到充分利用,被白白地排放到大气中,再加上远距离输电过程中的线路损失,就使得终端使用电力的一次能源效率很低。而靠近城市建设的热电厂,利用热电联产技术,把发电过程中的一部分排热回收,通过热网输送给用户,则可大大提高一次能源效率。随着天然气等清洁能源的广泛应用,可以将小型热电联产电站建在社区甚至建筑物内,成为区域热电冷联供(DCHP)系统和建筑热电冷联供(BCHP)系统。

但是,热电联产的代价是降低发电效率。从图 1 可以看出,发电机组的功率越小,效率越低。因此,采用小型或微型发电机组的分布式能源系统如果仅作发电之用,其效率低于大发电设备,在能源利用上是不合理的。所以,要求

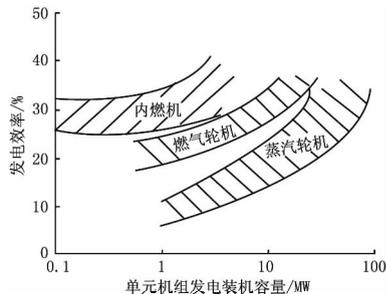


图 1 各种发电机组的功率与效率^[1]

①[☆] 龙惟定,男,1946年11月生,硕士研究生,教授,博士生导师
200092 上海市四平路 1239 号同济大学中德工程学院
(021) 69586960
E-mail: weidinglong@tongji.edu.cn
收稿日期:2010-12-13

分布式能源在系统配置时以热定电,为的是提高综合能效。

热电冷联产技术最重要的技术参数之一是系统的热电比 HPR (heat to power ratio),即:

$$HPR = \frac{Q}{W_e} \quad (1)$$

式中 Q 为系统所利用的热能; W_e 为系统发出的电能。

在为某一特定用途选择热电联产系统时,热电比 HPR 是主要特性参数之一。在原国家计委《关于发展热电联产的规定》文件中,要求使用汽轮机组的热电联产系统总热效率年平均大于 45%;单机容量在 50 MW 以下的热电机组,其热电比年平均应大于 100%;单机容量在 50~200 MW 的热电机组,其热电比年平均应大于 50%;单机容量 200 MW 及以上抽汽凝汽两用供热机组,供暖期热电比应大于 50%。在上海市建设和交通委员会 2008 年颁布的 DG/TJ08-115-2008《分布式供能系统工程技术规范》中明确指出,分布式供能系统容量的选择应依据以热(冷)定电、热(冷)电平衡的原则;并规定分布式供能系统年总热效率不应小于 70%、年均热电比不应小于 75%。

上述规定和规范说明同一个问题,即城市热电厂和分布式能源热电联产系统是为供热目的而设的,在满足热需求的前提下,所发电量作为电网的补充。

2 热电联产的综合热效率分析

热电联产作为一项节能减排技术,与热电分产相比,提高了综合热效率。

在图 2 中,尽管热电联产的发电效率与热电分产相比有所降低,但总热效率达到 60%;产能也较热电分产增加了 21.5%。从热力学第一定律的视角出发分析,即只考虑热效率,不考虑能源品位,显然,热电比越大,热效率越高。

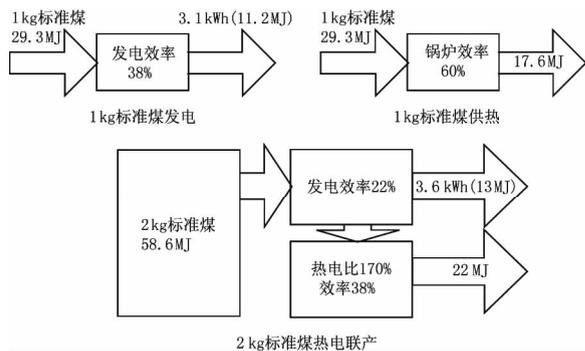


图 2 热电联产与热电分产的能效比较

因为远距离输送热能的损失比较大,所以热电厂的供热输送半径不能太大。一般热电厂供高压蒸汽的供热半径约 4 km,供热水(用于建筑供暖)的供热半径不超过 10 km。受 10 km 半径内的供热需求局限,热电机组的容量不能太大。这就使热电厂的发电效率普遍不高。目前热电厂常用的发电机组机型一是背压式汽轮机,即汽轮机的低压排汽全部用来供热,其综合热效率很高;二是抽凝式汽轮机,将部分没做完功的蒸汽从汽轮机抽出送到热用户,其余

部分在汽轮机继续做功后排入凝汽器凝结成水,然后回到锅炉。为了满足供热负荷对压力、流量的需求,抽凝式机组的抽汽是可以调整的。背压式汽轮机适于有稳定负荷的工业供热,对以供暖空调等变动负荷为主的城市供热则只能用抽凝式机组,这就带来了热效率的“先天不足”。在供热负荷高峰时,还要进一步增加抽汽,从而进一步降低发电效率。

在我国北方的大城市里,热电厂是为城市供热而设的,是根据城市热用户的用热量规划和选型的,即“以热定电”。热电厂所发电量只是作为大电网的补充,它们也不是国家电网中的主力电厂。由于有大电网作为依托,热电厂发电多少都可以通过大电网这个“蓄水池”消化掉。不可否认,热电厂实行以热定电也有经营上的考虑,因为热电厂所发的电力在“竞价上网”中不具优势,所以多数热电厂会将经营重点放到供热上。如果蒸汽价格在 100 元/t 以上,就会比用 1 t 蒸汽发出的电竞价上网的效益更好。而另一方面,由于城市供热有很强的季节性,为了避免夏季的运营亏损,热电厂会在夏季成为纯发电厂,以较高的煤耗发电调峰。

由热力学第二定律可以发现,由于用户端热媒温度为 90 ℃(如果是空调供热则只有 60 ℃),因此热电厂的焓损失很大。文献[2]中对某一热电厂计算得到的焓效率只有 30.9%,要低于纯凝汽发电厂 38%的焓效率。如果再加上蒸汽输送的温降和压降,特别是蒸汽凝水无法回收所带来的焓损失,使得热电厂的热电联产并无节能优势可言。文献[3]经过计算得出的结论是,热电厂的热电比越高,焓效率越低,也就是燃料化学能转变成高品位能量的比率越低,较大的热电比虽然提高了热效率,但降低了焓效率。

比热电厂规模更小的分布式能源热电联产,由于采用清洁能源天然气(温室气体排放量和污染物排放量都比较低)作为燃料,可以在用户集中的园区内设置,甚至可以设置在建筑物内。其原动机也可以采用热电比相对较低的燃气轮机或内燃机。输送距离的缩短,使分布式能源可以“对位供热”,即热水供热,从而降低焓损失。

我们再回过头来考察基于热力学第一定律的热效率。英国剑桥大学教授 David MacKey(2008)在《Sustainable Energy》[4]中用图 3 来比较热电联产技术与热电分产技术的效率。

由图 3 可以看出,对于热电分产而言(图中两根斜线),一次能效率最高的供热技术是冷凝锅炉(90%),而一次能效率最高的供电技术是天然气联合循环发电(50%以上)。所有热电联产技术的能效(图中的散点是英国实际运行的各热电联产项目平均值)都处在中间位置,而且呈现出热效率高则发电效率一定比较低的趋势(如背压式汽轮机技术)。图中所有热电联产技术,在热和电全部用足的前提下,总热效率也只能达到 80%左右,低于冷凝锅炉供热的热效率。也就是说,建筑供热与其用投资很高的热电联产,

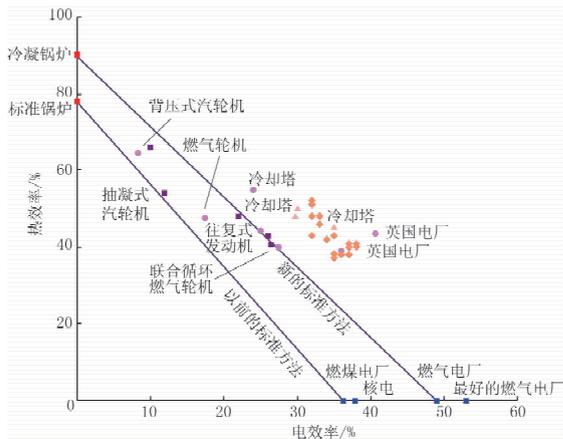


图3 热电联产与热电分产技术的能效比较^[4]

还不如用冷凝锅炉。

但 MacKey 教授还指出,有一点是冷凝锅炉无法比拟的:热电联产还可以发电,而电是高品质能源,不能简单地用热效率来衡量^[4]。因此,如果仅仅将分布式能源热电联产系统当成建筑物的冷热源或当作锅炉使用,显然是降低了热电联产系统的价值。如何发挥分布式能源所发电力的效率以及电力的应用价值、充分利用发电余热和乏热,而不是与电争热,是分布式能源系统配置中需要认真研究的问题。

3 分布式能源热电联产的以热定电

在影响我国分布式能源热电联产系统配置(以热定电还是以电定热)和发展的诸多瓶颈中,最突出的是分布发电多余电力上网的问题。

理论上说,热电联产系统在发电的同时所产生的热量可以用来供热。但是,在一个园区范围或在单栋建筑物中几乎不可能同步地将这些电能和热能完全利用。因为用户的热量/冷量与用电量需求随季节、气候、昼夜、建筑功能等诸多因素变化,而热电联产设备一经选定,其正常运行时的热电比是有一定范围的(见表1),所以总是会有富余的电能或热能。富余的热能可以采取蓄热装置进行贮存,加以调节;而对于富余的电力,现有的大规模蓄电技术(如钠硫电池)还不能实现商业化运行。在热需求远大于电需求的期间,由于电力无法贮存,要么压低发电效率(燃气轮机),要么无法运行而不得不停机。为了解决多余电力的问题,最简单、最直接的方法就是允许其上网。

表1 主要发电机组的热电比^[5]

	电效率/%	综合效率/%	热电比	供热品质
燃气轮机	24~42	70~85	1.3~2.0	高
蒸汽背压汽轮机	14~28	84~92	4.0~22	高
凝汽式汽轮机	22~40	60~80	2.0~10.0	高
往复式发动机	33~53	75~85	0.5~2.5	低
联合循环燃气轮机	34~55	69~83	1.0~1.7	中
燃料电池	40~70	75~85	0.33~1	低到高
微燃机	15~33	60~75	1.3~2.0	中到低

电力系统接入电网的方式有三种:离网、并网、上网。

顾名思义,离网是指电力接入独立的电网,与公共电网并不相联;并网是指电力接入中心变电站的低压侧;上网是指电力直接与输电网接通。

根据我国电力部门的规定,用户的自发电只能自用,即要么离网,要么并网,如果需要上网,需要事先与电力部门签订合同。上网是有条件的,第一,上网的发电机组必须接受电网的统一调度,基本上是当作调峰之用,即大电网电力紧缺时允许分布式发电上网,大电网电力有富余时则不允许上网。第二,分布式能源的上网电价要采用竞价上网方式,没有任何优惠,用天然气做燃料的热电联产只能与用“统配煤”为燃料的电厂在同一“起跑线”上竞价上网。以上海鼓励分布式能源的优惠天然气价为例,天然气价格为2.43元/m³,如果用内燃机发电,每m³天然气发电约3 kWh,每kWh仅燃料成本就是0.81元,而普通火力发电的上网电价大约在0.43~0.47元/(kWh)左右。这些规定和价格政策造成分布式能源的电力上网很难,即使上网,投资者也无利可图。

对于区域分布式能源系统而言,如果有多样性的电力负荷(例如大学校园)和稳定的电力负荷(例如制造业工业园区),根据某一栋建筑或某一建筑群的热需求确定系统容量,而将所发电量采用并网方式在园网内消化,也是不错的选择;如果是经营性园区或分布式能源系统系由第三方运行,则要注意我国电力法是不允许除国家电力公司之外的企业售电的。

如果上网和并网都无法实现,那就只能离网运行,或将电力接入变压器的低压侧。这时对用户而言,项目的经济性决定了项目的成败。

定义电力与天然气的比价 EGR:

$$EGR = \frac{EP}{GP} \quad (2)$$

式中 EP 为单位当量热值的电力价格,元/kJ; GP 为单位当量热值的天然气价格,元/kJ。

EGR 越高,应用热电冷联供系统的经济性越好。在我国,由于各种原因,长期以来电力与天然气的比价偏低,即天然气价格偏高,因而制约了分布式能源热电冷联供技术的推广和市场的开发。以采用微型燃气轮机的楼宇冷热联供(BCHP)与采用电动活塞式空气源热泵的电力空调的寿命周期等额年度成本费用相比较,当电气比价达到或高于4.92时,BCHP 的经济性才好于空气源热泵^[6]。而目前上海的电气比价是4.35,在这种情况下,用户往往是按“以电定热”的原则,按电力基荷配置设备,尽量延长设备运行时间,以求最大回报。

以微燃机热电联产为例,假定设备投资15 000元/kW,天然气价格2.43元/m³,当地电力平均价格0.85元/(kWh),热价0.40元/(kWh)。设某项目热需求2 300 h、基荷电力需求4 000 h,以输入1 m³天然气为计算基准,其运行效益分析见表2。

表2 不同配置下的运行经济效益分析

	总热效率/ %	发电效率/ %	发电能力/ (kWh)	发电折合 价值/元	供热能力/ kW	供热折合 价值/元	运行时间/ h	总收益/ 元	天然气成本/ 元	静态投资回报 年限/a
以热定电	60	15	1.48	1.26	4.45	1.78	2 300	6 992	5 589	10.7
以电定热	75	33	3.26	2.77	4.15	1.66	4 000/2 300	14 898	9 720	2.9

但表2中以电定热的效益分析忽略了一个重要因素,即因为是按电力需求确定的设备容量,所以实际上还需要另外配置供热(冷)设备,需要重复投资。如果按建筑面积冷热量的投资计算,回报也就没有那么好了。这也是为什么国内某些分布式能源项目投资高得惊人、长期亏损的原因。而且,以电定热实际上是投资了小发电厂,对提高综合能效没有好处。

再看表2中以热定电的效益分析,也许有人会质疑,如果能提高冷热价格,不就可以提高回报率了吗?但建筑供热冷价格的定价很特别,它不像电力供应具有垄断性和唯一性。冷热量可以用很多方法来获得,如果供热冷价格不合理,用户完全可以改用其他空调方式。例如,1台售价3 000元的空气源热泵空调(功率1 kW, COP=3),假定使用寿命为5年,与表2中同样的运行时间,折合单位冷热量成本大约为0.5元/(kWh)。也就是说,只有热电冷联供的冷热价格低于0.5元/(kWh)才有竞争力。如果考虑每kW冷热负荷投资在5 000元左右的地源热泵(COP=4.45,使用寿命15年),则折合冷热成本降到0.35元/(kWh)左右,对热电冷联供是更大的挑战。

热泵技术提升了低品位的天然免费能源,成为当今最主要的低碳技术之一。在以往的以热定电的热电冷联供中,把主要注意力放在热利用上,并没有人关心发出的电力是如何利用的。在分布式能源电力不能上网且电气比价很低的条件下,应该研究热电联供的电力使用,使其能源效率和经济效益达到最高。

4 基于热泵的分布式能源热电联产系统的以热定电

David MacKey 教授用了另一张图(图4)说明,当发电效率为50%(天然气联合循环)时,用COP=3.0的热泵可以得到135%的热效率,用COP=4.0的热泵可以得到高达180%的热效率,远高于冷凝锅炉供热和热电联产,而且还有很高的焓效率。

如果我国所有发电厂都是天然气联合循环(NGCC)电厂,仅从提高能效这一视角来说就没有必要采用分布式能源热电联产技术,但即便在发达国家也没有达到这样的装备水平。根据中国当前供电的平均效率,用效率较高的地源热泵供热仅能达到140%的综合热效率(见图5)。

因此,采用热电联产系统,使热和电都得到充分利用,并以平均供电效率下的热泵供热效率为基准配置分布式能源热电联产系统,可以得到图6的能源效率(199%)。这一效率高于基于联合循环的热泵供热。

图6中分布式能源系统的原动机采用燃气发动机(内燃机)。内燃机系统发电效率较高,基本上与大电网的平均效

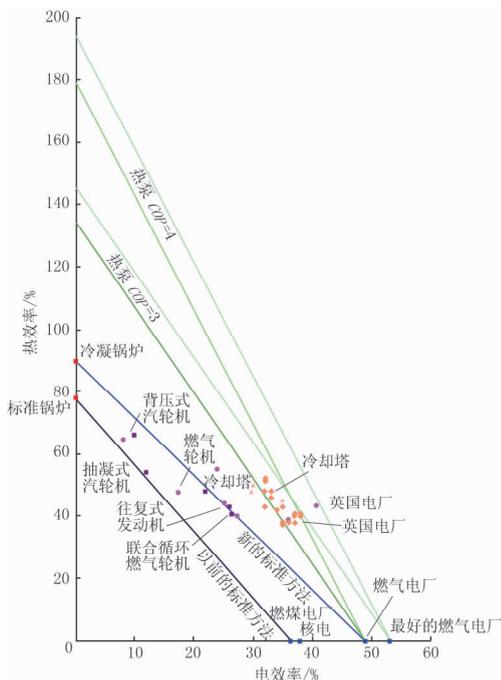


图4 热电联产加热泵技术[4]

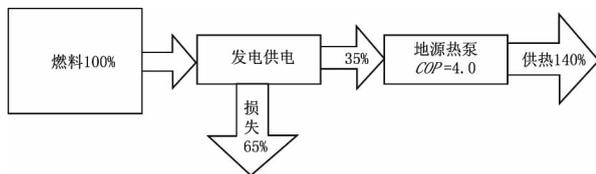


图5 我国当前平均供电效率下的热泵供热效率

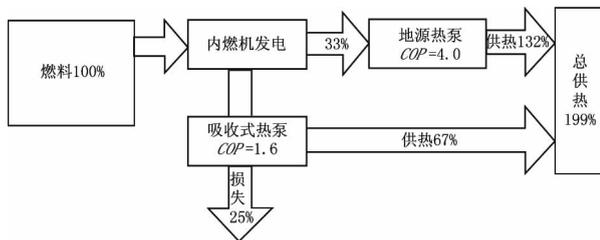


图6 应用内燃机的分布式能源系统结合热泵供热的能源效率

率持平,但烟气温度较低,还有品位更低的缸套水,可以考虑用吸收式热泵提升其品位。最终的总能效近似达到200%,超过NGCC发电厂电力驱动热泵的能效。每m³天然气得到的总供热量可达19.6 kWh。如果热价仍是0.4元/(kWh),年运行2 300 h,单位热量的总收益可达18 000元。

由此可以得到结论,所谓“以热定电”,在区域建筑能源规划中,应理解为“以热需求确定电力驱动热泵的电力需求”,将分布式能源技术与热泵技术结合,以达到最大能源

效率。按照图6中的能流,1000 kW的冷热需求应配置165 kW发电量。

以热定电的流程是:

- 1) 确定原动机类型和热泵的配置,得出系统综合热效率(图6中为199%);
- 2) 根据建筑冷热负荷(热需求)和综合效率,确定热泵机组所需提供的热量;
- 3) 根据热泵机组的性能参数,确定所需要的电力;
- 4) 根据原动机的热效率,确定系统的发电功率;
- 5) 运行调节可采取发电机台数调节、电功率调节和吸收式热泵参数调节等方式,还需要作进一步研究。

在大型园区里,有条件时还可以采用天然气联合循环热电联产,从而实现更高的能效(如图7所示)。其中,电力驱动热泵可以在建筑物附近就近布置,以减少冷热量的输送损失。

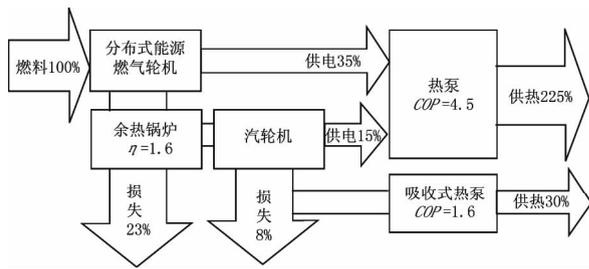


图7 联合循环热电联产结合热泵供热的能源效率

(上接第103页)

生和生命安全的主要因素对于母线层来说是可见度、CO浓度和温度,而对于水轮机层和发电机层来说主要是可见度。

4.3 机械排烟能够有效的排除烟气,使烟气浓度、CO浓度降低,可见度升高,当排烟量大于 $1.0G_0$ 时,火源熄灭2000 s后,整个发电机层的CO浓度均能满足我国职业卫生标准规定的CO浓度限值。然而火灾发生时排烟量增大对整个空间的降温效果并不明显。就排烟效果来看,排烟量 $1.0G_0$ 要比 $0.6G_0$ 时好得多,而 $1.4G_0$ 的排烟量则会显得过大。

参考文献:

- [1] 那艳玲. 地铁站通风与火灾的CFD仿真模拟与实验研究[D]. 天津:天津大学,2003
- [2] Hu L H, Li Y Z, Huo R, et al. Full-scale experimental studies on mechanical smoke exhaust efficiency in a underground corridor[J]. Building and Environment,2006,41(12):1622-1630
- [3] Hu L H, Huo R, Wang H B, et al. Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling[J]. Building and Environment,2007,42(11):3905-3915

5 结论

分布式能源热电联产按照以热定电的原则确定容量,在电力不能上网的运行条件下基本没有经济效益。如果仅从热效率角度分析,分布式能源的一次能源效率甚至要低于燃气冷凝锅炉。因此,必须充分发挥分布式能源所生产的高品位电力的价值。以热定电,就是以热需求(冷热负荷)确定电力驱动热泵的电力需求,从而实现分布式能源热电联产的效益最大化。

参考文献:

- [1] 中国科技知识元数据库[EB/OL]. <http://define.cnki.net/>
- [2] 黄建恩,郭民臣. 热电冷联产系统节能性的焓分析[J]. 暖通空调,2006,36(12):35-39
- [3] 魏照臣. 对热电联产机组指标规定的质疑[C/OL]//中国电机工程学会热电联产为“十一五”节能20%做贡献研讨会论文集,2006. <http://www.renhe.cn>
- [4] MacKay D J C. Sustainable energy[M/OL]. University of Cambridge, 2008. <http://www.withouthotair.com>
- [5] Catherine S. A review of existing cogeneration facilities in Canada [R/OL]. U. S. Department of Energy Northwest Clean Application Center,2004. <http://www.chpcenternw.org/>
- [6] 白玮,龙惟定. 三个城市应用BCHP系统的可行性气价分析[J]. 暖通空调,2006,36(10):35-38
- [7] 戎卫国,孟繁晋. 空调节能技术的热力学分析与思考[J]. 暖通空调,2008,38(12):58-60,102

- [4] Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, et al. Fire dynamics simulator: technical reference guide[M]. Baltimore: NIST Special Publication, 2008;15-22
- [5] Kevin McGrattan, Bryan Klein, Jason Floyd, et al. Fire dynamics simulator user's guide[M]. Baltimore: NIST Special Publication, 2008;30-56
- [6] 水利水电规划设计总局,公安部消防局. SDJ 278—2002 水利水电工程设计防火规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002
- [7] 范维澄,孙金华. 火灾风险评估方法学[M]. 北京:科学出版社,2004:437-488
- [8] Zukoski E E, Kubota T, Cetegen B. Entrainment in fire plumes[J]. Fire Safety Journal, 1980/1981, 3(1):107-121
- [9] NFPA. NFPA 92B Guide for smoke management system in malls, atria and large areas[S]. Quincy: National Fire Protection Association, 2000
- [10] 中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所,复旦大学公共卫生学院,华中科技大学同济公共卫生学院,等. GBZ 2.1—2007 工作场所有害因素职业接触限值[S]. 北京:人民卫生出版社,2007
- [11] 李烈,孙建军,智会强,等. 中庭火灾烟气流动的大涡模拟[J]. 暖通空调,2006,36(12):5-8