

# Application and Analysis of Direct Air Cooling Technology in Thermal Power Plants

Qing He, Jing Liu

School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing  
Email: hqng@163.com, liujing\_68@163.com

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2013; revised: Dec. 9<sup>th</sup>, 2013; accepted: Dec. 15<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Qing He, Jing Liu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Qing He, Jing Liu. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** Thermal power direct air cooling unit as a new water-saving way, which has been widely promoted in coal-rich and water-poor regions in China. This article describes the direct air cooling technology development status, principles and characteristics, the problems of direct air cooling technology highlights and development direction of direct air cooling technology to make predictions. Common problems of direct air cooling technology include dust accumulation on condenser, hot air recirculation, anti-freezing estimate of condenser, fan running and vacuum leak. This paper describes the causes and preventive measures of these problems and generally summaries the research methods.

**Keywords:** Direct Air Cooling; Condenser; Fan; Deposition; Hot Air Recirculation; Anti-Freezing Estimate; Vacuum Leak

## 火电厂直接空冷技术应用与分析

何青, 刘婧

华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京  
Email: hqng@163.com, liujing\_68@163.com

收稿日期: 2013年11月24日; 修回日期: 2013年12月9日; 录用日期: 2013年12月15日

**摘要:** 火力发电厂直接空冷机组作为一种新的节水途径, 在我国富煤贫水地区得到广泛推广。本文介绍了直接空冷技术的发展现状、原理及特点、直接空冷技术所凸显的问题, 并对直接空冷技术的发展方向做出展望。直接空冷技术常见问题主要包括凝汽器表面积灰、热风再循环、凝汽器防冻度夏、风机运行和真空泄漏。文中阐述了这些问题产生的原因及预防措施, 针对问题研究方法做了概括性总结。

**关键词:** 直接空冷; 凝汽器; 风机; 积灰; 热风再循环; 防冻度夏; 真空泄漏

### 1. 引言

随着电力工业的迅速发展, 大容量、高参数汽轮机组的不断增多, 不仅需要消耗大量的一次能源, 同时也消耗了大量的水资源。水资源紧张是目前全世界所面临的难题之一。我国人均水资源占有量仅为 2400

m<sup>3</sup>, 占世界平均水平的 1/4, 位于世界第 110 位, 已被联合国列为 13 个贫水国之一<sup>[1]</sup>。空冷机组作为一种新的节水途径, 以节水 65% 以上的优点在一次能源蕴藏丰富, 而水资源又相对非常贫乏的西北地区具有良好的发展前景<sup>[2]</sup>。

火力发电厂空冷系统主要分为三类：直接空冷系统；采用表面式凝汽器的间接空冷系统(哈蒙系统)；采用混合式凝汽器的间接空冷系统(海勒系统)<sup>[2]</sup>。直接空冷系统具有结构简单、节水量大等特点，能有效解决富煤贫水地区的发电问题，运用较广。到目前为止，全世界已投入运行的直接空冷机组已超过 800 台，约占空冷机组总容量的 60%。其发展趋势是装机容量越来越大，而且在整个空冷机组中所占的比例也逐年增加<sup>[2]</sup>。

## 2. 直接空冷技术的发展与应用

直接空冷技术已经有 90 年的发展历史，早在 20 世纪 30 年代就已出现，直到 80 年代该技术才在大型电厂中得到推广和应用，并日臻完善。1920 年，德国 GEA 公司发明了直接空冷系统，并且成功的运用于工业中。1939 年，德国 GEA 公司建造了世界上第一个火力发电厂直接空冷系统。1958 年，意大利的罗马电厂建造了第一座装有直接空冷凝汽器的  $2 \times 36$  MW 公用电站。同一时期，卢森堡的杜德兰格钢厂自备电站 13 MW 机组投运了直接空冷系统。1968 年，尖屋顶式布置的机械通风型直接空冷系统在西班牙的乌特里拉斯坑口电厂投入运行。1978 年，美国怀俄达克发电厂的  $1 \times 365$  MW 直接空冷机组投入运行。1991 年，南非马廷巴发电厂  $6 \times 665$  MW 机械通风式直接空冷机组投入运行，标志着直接空冷技术在单机大容量、大型火力发电厂中的应用进入新阶段。近 20 年来，美国、南非等国家的 365 MW、665 MW 和 686 MW 空冷机组采用直接空冷系统<sup>[3-7]</sup>。

我国对火电空冷技术的研究和应用不是很晚。1966 年，我国在哈尔滨工业大学试验电站的 50 kW 机组上首次进行了直接空冷系统的试验。1967 年，在山西侯马电厂的 1.5 MW 机组上又进行了直接空冷系统的工业性试验。20 世纪 80 年代，庆阳石化总厂自备电站 3 MW 机组应用了直接空冷系统。2001 年，我国自己设计、制造和安装的国内首台单机容量为  $2 \times 6$  MW 空冷机组在山西交城义望铁合金厂自备电厂建成投产。2003 年，山西大唐国际云冈热电有限责任公司的  $2 \times 200$  MW 直接空冷机组投运，标志着我国空冷技术已经跟上了世界的脚步。2004 年，山西漳山发电有限责任公司  $2 \times 300$  MW 直接空冷机组成功投运。

2005 年，山西大同二期电厂投产了我国当时单机容量最大的  $2 \times 600$  MW 直接空冷机组。2006 年，哈空调生产的我国首台国产大型电站直接空冷机组在乌拉山电厂成功运行，打破了国外公司在此领域近 70 年的垄断局面。2007 年，宁夏灵武电厂一期  $2 \times 600$  MW 亚临界直接空冷机组成功完成试运，成为西北地区首座 600 MW 级空冷电站。截止到 2009 年底，我国总计有 59 台 600 MW 直接空冷机组投入运行。2012 年，德国 GEA 集团与山东信发集团公布准备联合打造信发·新疆  $4 \times 1100$  MW 超超临界直接空冷机组的信息。近几年我国直接空冷机组得到突飞猛进的发展，大批大容量机组相继投产运行，相关设备和技术也逐渐成熟<sup>[3-7]</sup>。

## 3. 直接空冷系统的原理与特点

直接空冷系统，是指汽轮机的排气送到空冷凝汽器的翅片管中直接用空气来冷凝蒸汽，空气与蒸汽间进行热交换，蒸汽在凝汽器管束内冷却成水，所需的冷却空气通常由机械通风方式供应。直接空冷系统图如图 1 所示，汽轮机排气通过管道送到室外的空冷平台的凝汽器内，机械鼓风式轴流冷却风机使空气横向吹向空冷散热器外表面，空气将排气冷凝成水，凝结水再经凝结水泵送到汽轮机的回热系统。

直接空冷技术的优点：1) 节水量大；2) 系统结构相对简单；3) 一般采用轴流式风机调节冷却风量，调节方式灵活；4) 运行方式简单，控制灵活可靠，调峰能力强，针对冬季防冻问题有较灵活的调节手段；5) 直接空冷凝汽器一般都布置在汽轮机房房顶，或布置在汽轮机侧面的高架平台上，平台下面通常布置其他电气设备，整体占地面积小。缺点：1) 煤耗高；2) 采用机械式通风方式导致厂用电率高，风机运行噪声较大；3) 排气管道长，真空容积大，密封性要求高；4) 汽轮机运行背压范围较大，必须能承受高背压工况，效率低；5) 受环境温度的影响较大<sup>[8]</sup>。

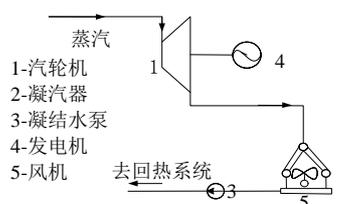


Figure 1. Direct air cooling system  
图1. 直接空冷系统图

## 4. 直接空冷技术应用的现状分析

机组经济、安全运行是发电厂重要标准。大型火电空冷机组的三大主要设备是空冷汽轮机、直接空冷凝汽器和配套风机,三大设备正常高效运行,对机组安全性和经济性起着关键性作用<sup>[8]</sup>。空冷凝汽器建在一定高度的大面积平台上,直接利用周围的空气冷却汽轮机排气,在运行过程中,因环境和设计结构因素的影响,不可避免的会出现一些问题。目前,直接空冷系统在火电厂实际应用时也出现了一些问题,主要有:凝汽器表面积灰问题、热风再循环问题、凝汽器管束防冻度夏问题、风机群运行问题、真空泄漏问题<sup>[8]</sup>。

### 4.1. 凝汽器表面积灰

直接空冷机组由于节水量大的特点在我国富煤贫水地区颇受欢迎。但由于我国北部地区气候恶劣,沙尘天气较多,空气质量较差,凝汽器管子数量多、翅片结构复杂、翅片间距小,导致空气所携带的灰尘、纤维等絮状物在冷却面上的不断附着而形成积灰层。积灰层构成了积灰热阻,使凝汽器散热性能下降、背压升高,凝汽器的效率降低。因此,为了防止落在空冷凝汽器表面的灰尘腐蚀管道和影响散热效果,要设置固定和移动相结合的自动清洗系统,定期对散热表面进行清洗<sup>[9,10]</sup>。

研究直接空冷凝汽器积灰对传热性能的影响问题,寻求影响规律并提出监测措施,对提高凝汽器散热效率具有重要意义。一般研究方法如下:一种是建立空冷凝汽器积灰情况下的换热理论模型,推导传热系数与其它参数的关系。通过分析凝汽器传热系数与汽轮机背压、汽轮机排气量、冷却空气流量、凝汽器总传热面积以及环境温度之间的关系,在维持相关其它参数不变的情况下,得到传热系数和汽轮机背压之间的关系以及凝汽器积灰对汽轮机背压的关系,分析积灰对背压的影响。通过监测空冷机组运行过程中汽轮机背压变化状况,预测积灰的程度,为轴流式风机转速的调节和直接空冷凝汽器的清洗提供一定的参考依据。另一种采用对比法。通常以两个空冷凝汽器单元为研究对象,即一个空冷单元表面积灰和另一个空冷单元保持洁净,通过理论计算和试验研究相结合的方法,分别得到凝结温度和凝结蒸汽量与积灰厚度

的关系,分析积灰对凝汽器工作的影响。或是在积灰不严重的情况下,通过调节单元风机风速观察两个空冷单元出口空气温度和速度分布。利用空冷凝汽器出口空气温度监测系统对温度值偏高单元的风机进行局部调节,用于改善空冷凝汽器积灰部分的换热状况<sup>[11]</sup>。

### 4.2. 热风再循环

空冷凝汽器排出的热风,其中一部分又被风机抽吸到空冷凝汽器的入口,该现象称之为热风再循环,也称热风回流。热风再循环问题是一个复杂的气动力学问题,产生此现象的原因很多,热风再循环的形成不仅与直接空冷器的结构参数有关,也与外界环境的风速、风向、周围的建筑物高度和布局等有密切关系。如,空冷凝汽器的布置不当,或冷却单元的风机运行不当可能引起热风回流。热风回流导致空冷凝汽器进口风温度升高从而降低了空气的冷却能力,若发生在夏季又遇见从锅炉房侧吹来大风,甚至会造成停机危害。在工程实践中,可通过在空冷凝汽器平台下方装设类似风裙的挡风板,适当提高空冷器出口风速,空冷平台四周设置挡风板,或使迎风面风速维持在不低于2.2~2.3 m/s等措施降低热风回流的发生<sup>[12-15]</sup>。

引起热风再循环具体的影响因素有多种,通过试验研究和数值模拟的途径,得出风速与这些影响因素的关系,为直接空冷机组的设计和安全经济运行提供一定的理论依据。试验研究方法主要是应用相似原理对大型直接空冷系统进行风洞模拟试验。试验一般以热风回流率作为衡量直接空冷凝汽器冷却效率的评价标准之一,通过试验发现环境风速、来流风向角和空冷平台高度对直接空冷凝汽器的换热效率的影响规律,在风洞中进行相应的PIV测速试验得到环境风速、空冷平台高度、挡风墙高度与直接空冷岛热风回流率的关系。数值模拟方法主要以下几个方面对热风回流问题进行研究:一是借助于CFD软件中的FLUENT软件包,采用标准K-E模型对横向风对空冷平台流场影响进行了三维数值研究,分析了不同速度的横向风对空冷平台温度场、速度场的影响;二是通过CFD模拟分别研究直接空冷平台高度和横向风对直接空冷风机性能的影响,以不同形式的风筒为例,分析不同类型的风筒条件下风机性能的规律;三是采用SIMPLE算法和K-E模型,对空冷岛周围空气流场进行数值模拟,分

析不同风速下,空冷平台高度和挡风墙高度对空冷凝汽器冷却效果的影响,得出最佳挡风墙高度范围,为直接空冷结构的设计和机组安全经济运行提供一定的理论依据。通过试验研究和数值模拟,得到环境风速、空冷平台高度、挡风墙高度与直接空冷岛热风回流率的关系,合理的设计空冷岛平台高度,挡风墙高度和风机运行速度,减小热风回流现象的发生<sup>[12-15]</sup>。

### 4.3. 凝汽器管束防冻度夏

与湿冷系统相比,空气的比热比水小,空冷器空气侧传热系数低,冷却同容量蒸汽需要的空气量较多。直接空冷系统的运行对环境温度的变化比较敏感,在夏季高温工作时,由于冷却效果差,使得汽轮机的背压增高,降低了机组的效率。一般通过调节风机速度、高压清洗管束、设置加湿器、喷水降温、运行调节、减少热风再循环影响等措施来提高机组的度夏能力<sup>[16-19]</sup>。度夏能力一般从机组运行实践中得到规律。

导致管束冻结的原因有多种,汽机的启停过程中热负荷变化缓慢,蒸汽流量较低,凝结水在低温环境下可能出现结冰现象;真空泄漏引起的凝汽器内不凝结气体的聚集,会引起局部蒸汽流量减少,换热量减小从而导致管壁温度降低,使凝结水流过低温壁面时发生结冰现象;多排管空冷凝汽器,由于各排管束间散热状况的不同,可能出现压力不平衡现象,引起蒸汽回流,导致不凝汽的聚集,出现管子局部结冰,总的来说是在环境温度低、负荷低、背压低的情况下,防止管子冻结现象。管束结冰增加了换热热阻,使换热性能下降;严重的情况下,管束被冰块堵塞、真空下降,导致机组被迫停机;更严重会引起冻裂翅片管或使翅片管变形,造成永久性损害。一般通过改进空冷岛结构,选择合适的管束结构,合理布置顺逆流凝汽器管束;根据不同环境温度,灵活调节风集群的运行方式;增加挡风墙高度等措施等,可有效克服直接空冷系统运行中出现的冻结问题,从而提高空冷机组安全经济运行水平。或通过基于模糊层次分析法,建立了直接空冷凝汽器防冻性能监测模型,对空冷凝汽器防冻性能进行定量评价,缩小查找结冰故障的范围,为结冰故障的预防、采取预处理措施、实施冬季优化运行奠定基础<sup>[16-19]</sup>。

### 4.4. 风机群运行

风机群在运行中要变速。一方面是因为风机群用于强化空气与散热面间的换热,提高换热效率,但在外界环境风场作用下,如果空冷风机群维持一致的运行特性,势必导致不同空冷单元传热能力存在差异,可能出现换热死区,导致不同空冷单元蒸汽凝结状况不同,换热面积得不到充分利用;另一方面由于空冷机组经常处于变工况条件下运行。因此,风机群可采用双速电机或调频电机驱动进行调频。目前国内外直接空冷发电厂都采用调频电机驱动方式。空冷系统轴流风机群分区调节,可削弱环境风的不利影响,改善空冷岛的运行特性。风机运行过程中要降低噪音污染和能耗。风机作为散热的动力设备,在运行中将会产生不同程度的噪音<sup>[20-22]</sup>。

一般在风机群运行中,着重于风机供应空气流场的数值模拟、风机降噪和风机能耗方面的研究。对风机群分区调节,冷却前、后空冷岛,模拟空气流动换热特性,获得不同气温、风速、风向向下冷却空气的速度场和温度场,计算得到了空冷岛迎面风速、进口空气温度与机组背压的变化规律。风机群不同位置的噪声叠加后的分贝大小取决于风机群的总体布置和单个风机的噪声值,风机的降噪主要对空冷岛整体结构和风机结构进行分析和优化。风机的能耗,主要是基于正交实验法,分析影响耗能的主要因素。风机运行研究目的使风机在“大而少、低噪声、低能耗”条件下运行,提高机组经济性。

### 4.5. 真空泄漏

随着空冷机组容量的不断增大,直接空冷机组除具有湿冷机组原有的真空容积(如轴封系统、低压缸本体、疏水扩容器、低压加热器等)外,又增加了排气装置、排气管道、庞大的空冷凝汽器等,使其构成的真空容积与同容量湿冷机组相比约大5~6倍。汽轮机真空度是决定汽轮机经济运行的主要指标,而真空系统严密性是影响汽轮机真空的主要因素之一,提高运行机组真空度和保证真空严密性的工作已是提高机组循环效率和降低机组热耗率的一个主要手段。真空泄漏不仅会使机组效率下降,空气漏入凝结水中还会使凝结水溶氧升高,腐蚀汽轮机、锅炉设备,影响机组的安全运行。目前国内许多机组都存在由于真空值低

造成机组热耗高和机组效率偏低的问题<sup>[23,24]</sup>。

真空泄漏问题主要是对真空严密性进行研究。真空系统的严密性用空气泄漏率来衡量。空气泄漏率和真空系统的容积成反比,直接空冷机组在正常真空泄漏时的真空泄漏率应在30~60 Pa/min<sup>[23,24]</sup>。直接空冷系统一般以调节风机转速作为冷却风量的调节手段。因此,真空严密性试验通过不同风机控制方式,在主蒸汽参数、负荷、环境条件保持相对稳定的情况下,观察排气压力的变化。常用的调节方式包括以下三种:空冷风机处于手动调节方式,固定空冷风机转速控制凝结水过冷度为2℃~6℃,保证蒸汽完全冷凝;空冷风机保持自动方式,风机转速随蒸汽流量的大小进行自动调节,保证所设定的排气压力的稳定;空冷风机为手动方式且保持风机转速额定(50 HZ)<sup>[23,24]</sup>。对直接空冷机组真空严密性研究除了试验的方法分析探讨外,通过理论分析空冷凝汽器经历的热力学和传热过程,建立真空严密性的数学模型,得到了进行严密性试验时汽轮机背压随试验时间的变化关系,为分析空冷机组真空严密性变化规律提供了依据。

## 5. 直接空冷技术应用的发展趋势

近年来,随着直接空冷技术的不断深入研究,针对直接空冷机组运行中所出现的问题,空冷凝汽器管束的结构不断得到改进。空冷机组运行过程的恰当操作,对降低常见问题出现率,起到至关重要的作用,直接空冷机组操作规程逐步得到完善。直接空冷技术应用的发展趋势具体如下:

1) 直接空冷技术的发展主要是围绕如何提高管束性能进行的,即冷却效果和防冻性能。冷却管束型式不断革新从多排管到单排管,管束形状由圆管到椭圆管、等翅片间距到不等翅片间距的改进。针对直接空冷机组运行中出现的问题,对管束结构及布置形式还需进一步研究。

2) 直接空冷机组凝汽器表面清洗方式主要分为管束式和矩阵式。清洗形式由手动清洗发展为半自动清洗和全自动清洗。所谓的全自动清洗装置并不能避免设备运行时出现的问题及风险,还没达到真正意义上的全自动化。清洗的自动水平还有待提高。清洗过程中所用高压除盐水,不仅成本高,而且耗水量大。研制更加环保、有效的清洗装置有较大的市场前景。

3) 随着直接空冷机组容量的不断提高,直接空冷机组的轴流冷却风机向“大而少、低噪声、低能耗、灵敏度高、稳定性强”的方向发展,推动空冷风机在设计和工艺方法上的创新和发展。

4) 目前,国内外直接空冷机组真空严密性没有统一规范的实验标准,需要在运行实践中不断摸索,形成统一的标准。

5) 直接空冷系统设备性能的在线监测、诊断和优化运行目前还不能满足市场的节能需求,还需在工程实践中不断得到优化。

直接空冷技术的主要研究手段包括试验研究和数值模拟。由于现场试验所需成本高、时间长、受环境影响大,因此试验数据处理起来十分复杂,不利于单个因素作用的分析,难以得到不同工况下系统的运行特性。随着CFD技术的发展,数值模拟已成为研究直接空冷技术的主要方法。在用数值模拟方法研究中,关键是建立与实际工况相似的计算模型。直接空冷系统的结构复杂,其结构模型是否得当、计算模型是否合理将直接影响计算结果的准确性。目前一些模型的简化和经验取值使数值模拟的结果偏离了实际情况,因此还需要对直接空冷技术进行更进一步详细的研究。

## 6. 结语

节能、环保、节水是21世纪我国火力发电的主题,为响应可持续发展战略号召,电厂以省煤节电、清洁生产、节约资源作为发展目标。目前,在我国日趋严格的节水政策下,电站空冷系统已经成为我国淡水资源匮乏的“三北”地区新建火电的主要选择。大型火电直接空冷技术以更大程度上的节约用水、减少排放为目标,在节约用水、降低能耗等方面作用显著,与间接空冷技术相比,综合经济效益较高,新形式、大容量直接空冷系统的研究和应用具有良好的发展前景。

## 参考文献 (References)

- [1] 王瑗, 盛连喜 (2008) 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究. *水资源与水工程学报*, **19**, 10-14.
- [2] 王钊, 杨建蒙, 赵兴楼 (2008) 直接空冷技术及其应用现状. *建筑节能*, **3**, 15-18.
- [3] 陈立军, 米利俊, 徐超 (2010) 新形势下直接空冷与间接空

- 冷的发展分析. *电站系统工程*, **26**, 5-9.
- [4] 肖金平, 郭民臣 (2009) 发电厂直接空冷技术研究现状及展望. *中国电力教育*, **1**, 383-385.
- [5] 戴振会, 孙奉仲, 王宏国 (2009) 国内外直接空冷系统的发展及现状. *电站系统工程*, **25**, 1-7.
- [6] 于洋 (2013) 浅析直接空冷技术及应用现状. *中国新技术新产品*, **8**, 10.
- [7] 王佩璋 (2007) 我国火力发电厂直接空冷技术发展. *电力设备*, **8**, 52-57.
- [8] 翟承光 (2010) 电站直接空冷技术关键问题的研究. 哈尔滨工业大学.
- [9] 魏栋, 王建平, 吴鹏 (2012) 300MW 直接空冷凝汽器污垢热阻对换热面积影响. *电力科学与工程*, **28**, 51-56.
- [10] 陈俊丽 (2012) 积灰对直接空冷凝汽器性能影响的分析. *华电技术*, **34**, 56-59.
- [11] 郭民臣, 陈文飞, 任德斐 (2012) 直接空冷凝汽器积灰的数值研究. *热力发电*, **10**, 41-43.
- [12] Chen, H.P., Wang, S.L. and Wang, Z.P. (2011) Numerical simulation and performance analysis of windproof net in direct air cooling unit. *International Forum On Strategic Technology*, **6**, 628-631.
- [13] 周新兰, 白中华, 李卫华 (2008) 直接空冷机组空冷岛结构优化研究. *汽轮机技术*, **50**, 95-97.
- [14] 吕燕, 熊扬恒, 李坤 (2008) 横向风对直接空冷系统影响的数值模拟. *动力工程*, **28**, 589-595.
- [15] 赵文升, 王松岭, 汤世凯 (2007) 基于 CFD 软件的直接空冷系统热风回流现象的分析. *汽轮机技术*, **45**, 344-348.
- [16] 张康, 赵伟, 赵红霞 (2007) 直接空冷系统冬季防冻问题研究. *承德石油高等专科学校学报*, **9**, 27-31.
- [17] 朱大宏, 雷平和 (2006) 600MW 直接空冷凝汽器的度夏与防冻能力探讨. *电力建设*, **9**, 33-37.
- [18] 张学镭, 周兰欣, 陈海平 (2012) 基于模糊层次分析法的直接空冷凝汽器防冻性能监测. *动力工程学报*, **32**, 809-814.
- [19] 邵大勇 (2010) 发电厂直接空冷系统的防冻渡夏措施. *中国高新技术企业*, **16**, 96-97.
- [20] 杨立军, 杜小泽, 杨勇平 (2010) 风机群分区调节对空冷岛传热特性的影响. *工程热物理学报*, **31**, 147-150.
- [21] 莫子高, 石磊 (2011) 风机模型对直接空冷单元数值研究的影响分析. *热力发电*, **40**, 31-36.
- [22] 杨桂秋 (2009) 电站直接空冷风机的设计目标和影响因素. *应用能源技术*, **5**, 22-25.
- [23] 尹海宇, 郭民臣, 张晶宇 (2010) 直接空冷系统真空严密性研究. *现代电力*, **27**, 62-66.
- [24] 续宏 (2008) 直接空冷机组真空严密性试验方法及漏空原因分析探讨. *热力透平*, **37**, 128-133.