

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.020

叶片泵入流畸变的研究现状与展望

王悦荟¹, 刘 聪¹, 许忠斌^{1,2*}, 成明祥², 厉永福²

(1. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江申达机器制造股份有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘 要:入流畸变是各种叶片泵入口来流的普遍现象,其本质问题在于入口处流场的不对称性。在高温、高压、高转速和大流量情况下,入流畸变对泵的影响不容忽视,传统设计的均匀入流假设已经不能满足实际要求。在分析叶片泵入流畸变来源及形式的基础上,笔者论述了激光多普勒测速和粒子成像测速实验方法在研究中的应用,以及直接模拟计算法、大涡模拟法和雷诺时均法等计算方法在研究中的作用,进一步分析了入流畸变对泵相关特性的影响。提出今后可从高温工况下温度场的影响、入流畸变内部流体流动规律与泵性能的定量关系等方面进行研究,对于核设备中的冷却水泵、轻工用泵等的研究工作具指导作用。

关 键 词:叶片泵;入流畸变;入口来流;激光多普勒测速;粒子成像测速

中图分类号:TH31 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)06-0092-05

Development and Prospect of Inflow Distortion of Pump

WANG Yuehui¹, LIU Cong¹, XU Zhongbin^{1,2*}, CHENG Mingxiang², LI Yongfu²

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Sound Machinery Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: Harmful inlet situation-inflow distortion exists in field of rotating fluid machinery like pumps which is mainly caused by the asymmetric inlet flow field. In specific situations such as high temperature, high pressure, high speed and high volume mass flow, the influence of inflow distortion cannot be neglected. The uniform inflow hypothesis in traditional design cannot meet the practical requirements now. The mainstream researching methods about the inflow distortion were introduced, including experimental measurements (laser Doppler velocity and particle imaging velocimetry, etc.) and numerical simulation (direct numerical simulation, large eddy simulation and Reynolds average navier-stokes), for further analysis of the inflow distortion characteristics related to the pump. The research can start with the influence of high temperature field, the quantitative relationship between fluid flow pattern of inflow distortion and pump performance, which is instructional for the research of cooling water pump in the nuclear equipment and the pump used in light industry.

Keywords: pump; inflow distortion; non-uniform inflow; LDV (laser Doppler velocity); PIV (particle imaging velocimetry)

叶片泵是在石油、轻工、船舶及航天等工业过程中广泛应用的旋转机械^[1]。现有叶片泵以叶栅理论为基础,以均匀轴向来流为前提进行设计,但这与工程实际并不符合^[2]。真实工况中,受限于空间要求、结构设置等因素,泵的来流情况一般都是非均匀的,泵的入

流畸变产生的主要原因在于入口处的流场不对称。理论上,对于在对称入流轴向速度场下旋转的叶轮,流场速度是稳定的。一旦因某种因素致使流场不对称,流场速度将随时间产生波动变化。来流的畸变性使得泵的入口流场重新分布,进而对泵的外特性、水动力特性

收稿日期:2017-04-06;修回日期:2017-05-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB057301)。

第一作者简介:王悦荟(1992),女,吉林辽源人,硕士研究生,主要研究方向为流体机械。通信作者:许忠斌(1969),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,杭州市钱江特聘专家,主要从事过程微纳米技术与复杂系统流体工程装备。E-mail: xuzhongbin@zju.edu.cn

和水力载荷等产生影响。汤方平、陆林广等^[3-4]发现水流态对泵工作性能的影响是一个不可忽视的因素;而且,过大的人流畸变会严重增大振动及噪声,甚至引起叶轮破坏。然而,入流畸变中复杂结构与流体流动行为的形性协同理论研究至今没有突破性的进展。另外,形状的复杂性导致对泵流场实验测量存在困难,也对数值计算的网格多尺度化提出了要求。所以,分析入流畸变对泵内部流场和性能的影响对于提高泵的扬程、效率以及稳定性,减少叶轮结构疲劳程度,以及改进离心泵的整体设计都有重要的科学意义和工程应用价值。

在均匀入流下,国内外众多学者对叶片泵这类液体叶轮机械的性能进行了大量研究,取得了显著的进展^[5-7]。而对非均匀来流条件,学者对发动机、压气机、风扇等气体叶轮机械也进行了大量研究^[8-10]。但在液体叶轮机械方面,由于均匀轴向来流的假设可以满足绝大部分工程需要,往往忽略非均匀入流问题。然而,随着人们对液体叶轮机械的要求越来越高,要求其在高温、高压、高转速及大流量情况下也能安全工作,如核设备中的冷却水泵、液体火箭发动机涡轮泵等。工程上对设计的可靠性和安全性提出了更高要求,理论上也希望模型更贴近真实情况,非均匀入流条件不可再忽略。笔者从多方面分析非均匀入流对叶片泵性能影响的研究现状,提出非均匀入流的研究方向,有望为核设备中的冷却水泵、液体火箭发动机涡轮泵、轻工用泵等的研究工作提供参考。

1 入流畸变研究的基本方法

1.1 实验方法

实验方法一般用于研究入流畸变问题中非均匀来流对泵整体性能的影响,从而进一步确认数值模拟或理论推导结果的准确性。入流畸变的实验研究中的主要挑战在于畸变流在泵内速度和压力等物理量的精确测量。过去的叶轮机械的流场测量主要是非光学测量(如毕托管、三孔探针和五孔探针等),缺点是需要外界物理支撑,会干扰到原本的流场,影响实验结果的可靠性。因为对测量入流畸变的期望是捕捉整个流场的流态,不同时期的流场变化,所以这些传统测量方法难以满足入流畸变实验研究的要求。相比之下,激光多普勒测速(laser Doppler velocity, LDV)和粒子成像测速(particle imaging velocimetry, PIV)等现代流动测量方法具有最大程度消除测量设备干扰的优点^[11-12],从而逐渐被应用在泵相关的实验测量中^[13]。

而针对泵的入流畸变的实验研究,虽然研究较少,

但也有部分学者采用上述实验方法进行了测量。黄伟^[14]等在研究蒸气发生器下封头和核主泵连接处的流动特性时应用了LDV观察连接处的流场分布情况,发现出口接管的速度场畸变情况严重,进流条件已经严重偏离均匀入流的假设。Ghici^[15]等通过LDV得到不同流量工况下蓄水泵入口处的畸变速度流场,发现对称的吸入弯头恶化了泵内流场。LDV的缺点在于,被测结构表面形状的多样化以及介质折射率的不同会引起激光束的偏转从而使干涉面夹角和测量体空间位置发生变化。且LDV属于单点测量,可测数据量小,实验量大。

相比之下,PIV技术具有在同一时刻记录下整个流场的有关信息的特点,从而更有利于入流畸变中畸变流整体演变过程的测量。Xu^[16]等利用PIV测量泵入口段形状改变对泵性能的影响,发现随着上下端流量差变大,流场不均匀程度和紊乱程度加深,甚至产生入口漩涡,降低了泵的效率及稳定性。PIV方法可以定性地观察整个流场随时间的大致变化情况,缺点是PIV设备复杂,成本高昂。

1.2 数值仿真

泵体内部因叶轮的旋转作用,叶片的曲面结构,导致其流场属于三维空间的复杂流体流动。虽然现有的实验手段可以对切面进行数据测量,获得点的速度参数从而对整体流场进行定性描述,但复杂形状流体内部的流动现象还无法从实验上进行观测,所以计算流体动力学越来越为广大科研工作者所采用。利用模拟计算方法可有效发现设计中的缺陷,指导优化设计,大大缩短了设计周期和降低了成本。

泵内流体的流动状态一般是湍流,工作介质一般是液体,压缩性小,在研究泵的入口来流问题时,通常是把流体看成不可压缩的介质计算得到泵内部流场的各种性能变化。对于泵的湍流数值计算方法,可分为直接数值模拟算法(direct numerical simulation, DNS)、大涡模拟法(large eddy simulation, LES)与雷诺时均法(Reynolds average navier-stokes, RANS)3种。

在泵的流场研究方面,大量学者基于RANS方法研究出了大量成果^[17-18]。而针对泵的入流畸变,也有不少学者进行了数值模拟研究,聂建虎^[19]在研究换热器封头出口处畸变流场中,基于RANS采用改进的壁面函数进行计算优化,得出了高雷诺数下复杂入口的湍流流动,得到了其速度分布特性,但切向和径向的速度分量仍存在较大偏差。徐益荣^[20]、张丽萍^[21]⁵³等采用RANS非均匀情况下叶轮内部流场,发现入流畸变

降低了泵的扬程和效率,增加了流道内的湍动能损失和对进口处叶片的冲击。但缺乏相应的实验验证。大涡模拟在计算时间和计算费用方面优于直接数值模拟,在信息完整性方面优于雷诺时均法,现有研究也大部分是基于简单结构的畸变条件研究,部分学者^[22-23]在LES上针对结构较简单的叶轮机械中开展计算和指导,然而高度复杂结构对计算机配置的要求较高,导致LES方法的推广使用仍然存在一定困难,且鲜见采用LES对泵入口非对称性的研究。不过,随着计算机的快速发展以及高级计算机的普及化,LES的应用会越来越广泛。

2 入流畸变对泵性能影响的研究

高效率、高负荷和低噪音是现代叶片泵的发展趋势。研究入流畸变对外特性、水动力特性的影响,可以更好地指导叶片泵的设计,进一步提高扬程和效率。而在水力载荷特性方面考虑入流畸变,则可以完善对泵的安全性和使用年限的研究。

2.1 外特性

颜禹^[24]数值模拟发现离心泵入口弯管使得泵的运行效率下降。张富源^[25]等采用LDV进行核主泵入口处的流场风洞试验,发现泵入口处的速度分布明显不均匀,并在出口接管中形成轴向回流。两人的研究表明入流畸变对泵的外特性产生不利影响,但均未深入分析非均匀入流造成叶片泵性能下降的原因。仇宝云^[26]则试验研究了多种因素对大型立式轴流泵叶片进口流态的影响,试验结果表明入流不均匀引起水泵效率下降和叶轮水力振动。仇的分析认为入流畸变使得轴流泵叶片进口流场不符合常规假设,导致叶片进口断面流场径向和周向的速度增加,导致叶轮性能下降,然而,进口断面径向和周向的速度分布规律仍然需要进一步分析。

针对核主泵这类对泵的安全性、稳定性要求极高的设备,入流畸变的研究是十分有必要的。Xia^[27]、侯向陶^[28]和Cheng^[29]等开展了蒸气发生器下封头与核主泵联合仿真。Xia等发现入流畸变使泵的速度场更加紊乱,并降低了核主泵的扬程和效率;侯等研究表明入流畸变使入口处压力脉动更加剧烈,降低了泵的安全性;Cheng则同时研究了连接左右不同朝向下封头的核主泵的外特性,发现两者都降低了泵的效率。3人分析得出非均匀突缩结构造成的入流畸变使得流体在进入泵之前便产生的回流和脱流现象,使得流体以一种较为紊乱的形态进入到泵中,导致泵的外特性降低。但上述分析只针对了一种非均匀入流突缩结构,

并没有拓展分析多个尺寸大小,导致无法得出外特性与非均匀突缩入流结构之间的定量关系,另外核主泵内流体的温度约300℃,由不均匀入流导致的温度非均匀分布对泵性能的影响也并未提及。

不同领域内的行业用泵的实际工况都表明,入流畸变是一种非常普遍的人流现象。学者的研究也表明大部分工况下的入流畸变对泵的外特性产生了不利影响,尤其是针对核泵这类的高安全性用泵。

2.2 水动力特性

张丽萍^[21]^[44]等发现在非均匀条件下,叶轮压力脉动随着来流不均匀度的增加而增大。施卫东^[30]等对比了2种不同的非均匀入流分布对轴流泵性能的影响,结果表明非轴对称分布的入流速度场对轴流泵外特性和径向载荷产生了不利影响。Valle^[31]和Fujii^[32]等实验研究了叶轮在入流畸变下的受力波动变化,发现不等蜂窝孔状的入流装置下所产生的入流畸变使泵的受力波动增加,临界汽蚀余量变大,抗汽蚀性能降低,泵的不稳定性增加。但并未深入研究此种入流结构产生的畸变流的流动性质。上述研究表明,入流畸变不仅影响水泵的外特性,而且对泵的水动力特性也产生了不利的影响,且影响的程度与入流畸变的畸变程度及形式有关,但具体的机理还有待进一步研究。

Van Esch^[33-34]等从理论和实验两方面探究了船艇用泵因非对称入口结构的影响,结果表明泵前产生的入流畸变使得混流泵的扭矩、扬程和轴向力都有所降低,而叶轮径向力增大,且在大流量工况下,径向力增加量显著,极可能引发轴承受力过大失效以及叶轮和泵体壁面发生摩擦导致受损。Dular^[35]、Guo^[36]、曹璞钰^[37-38]和Bulten^[39]等发现船艇用泵前入口真实入流与理论均匀流动的流场测试结果差异明显,认为非均匀入流是导致泵低效的重要原因。并从进口预旋和进口环量两方面对入流畸变进行了分析,认为入口处产生了不可忽略的进口预旋改变了轴面速度的分布;与此同时,叶轮进口环量不再遵循线性分布规律,改变了叶片表面载荷分布,并诱发叶片轮缘处的载荷突变,导致做功能力下降。而金实斌等^[40]解释了弯管式离心泵的内流不稳定特性,其研究认为弯管和消旋板导致的进口畸变流导致流体在入口处形成了反向涡对和低压回流,诱导进口边发生流动分离,增加离心泵运行噪声。

以上分析可知,反向涡对和低压回流与泵的性能如受载、噪声及振动等显然是非线性关系,但对其中的定性关系以及影响机理的研究较少,现阶段的研究都

只是针对现象进行了解释,但具有广泛规律性的解释还有待学者进一步发现。

3 结语

综上所述,叶片泵的非均匀入口流场会引起泵的扬程和效率下降,噪声和振动增强,叶片受载不均匀性加重。多年以来,叶片泵入流畸变的研究已经取得了一定的进展,但整体还缺乏一种能够系统地、快速地准确预测不同入流畸变对泵性能的影响与优化泵结构的方法。要达成以上目的,以下几个问题有待解决:

1) 入流畸变与泵性能间的定量关系。目前的研究成果都是针对具体的结构尺寸和实际工况得到的特殊性结论,仍然缺乏从流体力学角度得到的系统性理论。其中,入流畸变的程度仍然缺乏统计学的定量表征。二次流、涡流和旋流在突变结构中的产生过程和泵场中的传递规律问题也尚未解决。速度畸变的轴面分量和周向速度分量各自的作用机理也有待进一步的完善。

2) 入流温度畸变的影响。现有研究主要集中在形状不均匀引发的压力场、速度场畸变,但温度不均匀也是十分重要的影响因素。温度场不均会使过流部件不同部位受力不均,引起局部应力畸变,在长期运行下极易加快部件损耗甚至破坏。这对核主泵等高温高压环境下运行的水力机械而言尤其重要。

参考文献:

- [1] 高忠大,朱玉峰,张平,等. 低比转速化工离心泵改进设计[J]. 轻工机械,2008,26(3):93-95.
- [2] 钱方琦,张淑佳,毛鹏展. 大比转速双吸泵吸水室 CFD 数值模拟[J]. 轻工机械,2010,28(6):32-35.
- [3] 汤方平,袁家博,周济人. 进水流道对泵性能的影响[J]. 水泵技术,1994(4):21-22.
- [4] 陆林广,刘成云,陈玉明. 进水流道对轴流泵装置水力性能的影响[J]. 水泵技术,1997(3):25-26.
- [5] LIMBACH P, MULLER T, BLUME M, et al. Numerical and experimental investigation of the cavitating flow in a low specific speed centrifugal pump and assessment of the influence of surface roughness on head prediction [C]//International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii, Honolulu, USA: ISROMAC, 2016:1-9.
- [6] 段小辉,孔繁余,李洋,等. 高温高压泵的研究现状[J]. 水泵技术,2016(3):1-5.
- [7] 刘巧玲,吕振荣,池志勇,等. 立式屏蔽泵水力性能的数值模拟与分析[J]. 轻工机械,2011,29(5):14-18.
- [8] MAHAFFEY R M, VUUREN S J V. Review of pump suction reducer selection: eccentric or concentric reducers[J]. Journal of the South African institution of civil engineers, 2014, 56(3):65-76.
- [9] 胡绚,张强. 非均匀来流对涡轮流场的影响[J]. 现代机械,2014(3):34-37.
- [10] HAMED A, NUMBERS K, HAMED A, et al. Inlet distortion considerations for high cycle fatigue in gas turbine engine [C]//AIAA 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Seattle, WA, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997: 3364.1-3364.14.
- [11] 李亚林,袁寿其,汤跃,等. 离心泵内部流动 PIV 测试研究进展[J]. 水泵技术,2010(5):1-5.
- [12] 刘玥,梁忠生,鲍锋. 粒子成像测速:非介入式全场技术[J]. 中国科技信息,2010(13):37-40.
- [13] 王秀礼,朱荣生,俞志君,等. 基于 CFD 技术的旋流泵优化设计与试验研究[J]. 动力工程学报,2011,31(6):445-448.
- [14] 黄伟,张文其,陶文铨,等. 蒸气发生器下封头/主泵连接处流动特性试验研究[J]. 核动力工程,2004,23(2):38-42.
- [15] DRAGHICI I, MUNTEAN S, BOSIÖC A I, et al. LDV measurements of the velocity field on the inlet section of a pumped storage equipped with a symmetrical suction elbow for variable discharge values[J]. IOP conference series earth and environmental science, 2014, 22(3):032017.1-032017.9.
- [16] XU Zhaofeng, YI Fan, LIU Shuhong, et al. 2D PIV experiments on non-uniform flow in a rectangular open model pump suction passage [C]//Fluids Engineering Division. ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando, Florida, USA: ASME, 2005:523-530.
- [17] FERNANDEZ O J M, GONZALEZ P J. Numerical modelling of hydraulic turbomachines: a historical review[J]. Ingeniería del agua, 2014, 18(1):15.
- [18] JOHNSTON J P. Effects of system rotation on turbulence structure: a review relevant to turbomachinery flows[J]. International journal of rotating machinery, 1998, 4(2):97-112.
- [19] 聂建虎. 三维复杂区域内湍流流动的试验研究及数值研究[D]. 西安:西安交通大学,2001:77-89.
- [20] 徐益荣. 非均匀来流条件下离心泵内部流动数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2013:13-30.
- [21] 张丽萍. 非均匀来流条件下轴流泵内部压力脉动数值模拟研究[D]. 扬州:扬州大学,2013:38-52.
- [22] 王凤华,杨爱玲,戴韧,等. 前弯叶片对轴流泵噪声辐射性能的影响[J]. 动力工程学报,2011,31(6):440-444.
- [23] 杜媛英,高强,尚长春,等. 基于大涡模拟的导叶式混流泵叶轮内压力脉动特性分析[J]. 西华大学学报(自然科学版),2016,35(4):75-78.
- [24] 颜禹,陆晓峰,朱晓磊. 进口弯管及前置扰流子对离心泵性能影响[J]. 农业工程学报,2013,29(20):74-81.
- [25] 张富源,张文其. AC600 蒸气发生器水箱挡板的设计与模拟试验研究[J]. 核动力工程,1998,19(1):26-32.
- [26] 仇宝云,林海江,黄季艳,等. 大型立式轴流泵叶片进口流场及其对水泵影响研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):28-34.
- [27] XIA Shuan, WENG Minghui, QIU Jian, et al. Steam generator and reactor coolant pump coupled flow field analysis [C]//18th International Conference on Nuclear Engineering. Xi'an: ASME, 2010:205-214.

- [28] 侯向陶,王鹏飞,许忠斌,等. 蒸气发生器下封头对核主泵入口流场影响[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(4):277-282.
- [29] CHENG Hui, LI Hua, YIN Junlian, et al. Investigation of the distortion suction flow on the performance of the canned nuclear coolant pump[C]//ISFMFE-6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering. Wuhan:IET,2014:166-171.
- [30] 施卫东,张光建,张德胜,等. 入口非均匀流对轴流泵性能和压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,34(4):277-282.
- [31] VALLE J D, BRAISTED D M, BRENNEN C E. The effects of inlet flow modification on cavitating inducer performance[J]. Journal of turbomachinery, 1992, 114(2):360-365.
- [32] FUJII A, AZUMA S, YOSHIDA Y, et al. Unsteady stress of 4-bladed inducer blades and the effect of inlet flow distortion[J]. Bulletin of the JSME, 2002, 45(1):47-54.
- [33] VAN ESCH B P M, BULTEN N W H. Numerical and experimental investigation of hydrodynamic forces due to non-uniform suction flow to a mixed-flow pump[C]//ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers. Houston, Texas, USA: ASME, 2005:1203-1209.
- [34] VAN ESCH B P M. Performance and radial loading of a mixed-flow pump under non-uniform suction flow[J]. Journal of fluids engineering, 2009, 131(5):51101.1-51101.7.
- [35] DULAR M, BACHERT R, STOFFEL B, et al. Influence of the velocity distribution at the inlet boundary on the CFD prediction of local velocity and pressure fields around a hydrofoil[J]. Experimental thermal & fluid science, 2008, 32(3):882-891.
- [36] GUO Shuxiang, CHEN Yao. Non-uniform distribution of water-jet inlet flow field[C]// IEEE International Conference on Information and Automation. Haerbin:IEEE, 2010:1452-1456.
- [37] 曹璞钰, 印刚, 王洋, 等. 离心泵内双龙卷风式分离涡的数值分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):22-28.
- [38] 曹璞钰. 非均匀进流下喷水推进效率的研究[D]. 镇江:江苏大学, 2014:27-41.
- [39] NORBERT B. Numerical analysis of a waterjet propulsion system[D]. Eindhoven, Netherlands: Library Eindhoven University of Technology, 2006:49-62.
- [40] 金实斌, 曹璞钰, 王洋. 非均匀进流下喷水推进泵进流速度场的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2):115-121.

(上接第91页)

3) 烟气温度越高, 气液两相传质传热越快, 液滴群完全蒸发的时间也越短。在实际的工程中, 控制好急冷器进口的温度较为关键, 防止因液滴群未能完全蒸发而产生的附壁现象的发生。

4) 液滴的初始粒径对液滴群完全蒸发时间起着重要的影响, 初始粒径越大, 蒸发所需的时间越长且液滴运动的距离越长。考虑到喷嘴的制作及运行成本, 在满足急冷器的运行效果情况下, 最佳喷雾初始粒径应在 150 μm 及以下。

5) 液滴的初始温度及喷射速度对其蒸发时间影响甚微, 可用其他高温废水代替自来水以达到资源的合理配置。

参考文献:

- [1] 张记市, 王华, 谢刚, 等. 垃圾焚烧二噁英污染物的控制技术[J]. 环境保护, 2003, 6(1):20-21.
- [2] 黄蕾, 李晓东, 陆胜勇, 等. 城市生活垃圾焚烧产生的二噁英的防治措施[J]. 电站系统工程, 2005, 21(2):5-7.

- [3] 罗阿群, 刘少光, 林文松, 等. 二噁英生成机理及减排方法研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(3):910-916.
- [4] 孙权. 高温除尘系统应用蒸发冷却技术[J]. 资源节约与环保, 2015(12):11.
- [5] 孙凤贤, 姜任秋. 非等温柴油液滴对流蒸发的热膨胀与环境压力影响分析[J]. 热能动力工程, 2008, 23(3):311-315.
- [6] 倪培永, 王忠, 毛功平, 等. 静止环境中甲醇液滴蒸发的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(3):269-272.
- [7] 马力, 仇性启, 王健, 等. 高温气流中液滴蒸发特性的研究[J]. 石油化工, 2013, 42(3):298-302.
- [8] 段小龙, 仇性启, 马力, 等. 高温气流中双液滴蒸发过程实验研究[J]. 工业加热, 2014, 43(1):1-3.
- [9] 陈亚利, 杨学忠. 高温灰渣在斜面冷渣器中的流动分析[J]. 轻工机械, 2014, 32(6):21-24.
- [10] 洪孝伟, 王栓虎, 张宝. 基于 FLUENT 烘房恒温区温度场模拟与优化[J]. 轻工机械, 2014, 32(1):22-27.
- [11] 黄思杰, 邵春雷. 熔盐泵内颗粒属性对固液两相流动的影响[J]. 轻工机械, 2016, 34(5):1-6.
- [12] 黄明星, 刘丹. 垃圾焚烧电厂烟气降温模拟分析[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(7):27-31.