

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108393

高温液态金属流量在线测量方法与技术综述*

李雪菁^{1,2}, 姚新红^{1,2}, 张进明^{1,2}

(1. 上海市计量测试技术研究院 上海 201203; 2. 上海市在线检测与控制技术重点实验室 上海 201203)

摘要:高温液态金属流量在线准确测量对于设备的安全运行,工业过程控制,优化测量及校准装置等均具有非常重要的意义。根据测量仪表在结构中是否存在阻碍件,将现有技术进行分类分析,从测量技术原理、应用环境、特点等方面论述了现有测量技术的优势及应用限制等。为了保证测量的准确性和可靠性,高温液态金属流量测量的仪器仪表在线校准是关键技术之一。对现有技术进行分析,目前能够在600℃以上的环境下长时间连续工作的高温液态金属流量测量仪表技术很少,且在线校准误差在6%(或以上)。在总结现有测量技术的基础上,展望了高温液态金属在线测量及校准技术的未来发展要求及方向。旨在为核工业及其他特种工业生产及控制过程中的流量参数检测、校准提供一定的参考。

关键词:液态金属;流量测量;在线测量;在线校准

中图分类号: TH89 TP29 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Review of on-line measurement methods and technologies for high temperature liquid metal flow

Li Xuejing^{1,2}, Yao Xinhong^{1,2}, Zhang Jinming^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China;

2. Shanghai Key Laboratory of On-line Testing and Control Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract:The on-line accurate measurement of high temperature liquid metal flow is of great significance for the safe operation of equipment, industrial process control, optimization of measurement, calibration equipment, etc. According to whether there are obstacles in the measuring instrument structure, this article classifies and analyzes the existing technologies. The advantages and application limitations of the existing measurement technologies are discussed from the principle of measurement technology, application environment, and characteristics. To ensure the accuracy and reliability of the measurement, the online calibration of instruments and meters for high-temperature liquid metal flow measurement is one of the key technologies. This article analyzes the existing technologies. At present, there are few high-temperature liquid metal flow measuring instruments that can work continuously for a long time in the environment above 600℃, and the online calibration error is 6% (or more). On the basis of summarizing the existing measurement technologies, the future development direction of the online measurement and the calibration technology of high-temperature liquid metal is prospected. It aims to provide a certain reference for the detection of flow parameters in the nuclear industry and other special industrial production and control process.

Keywords:liquid metal; flow measurement; on-line measurement; on-line calibration

0 引言

准确控制高温液态金属流量技术是推动核工业、冶金及其他相关工业发展的强大动力。例如,高温液态金

属是核反应堆及航空航天发动机等优选的冷却剂,准确获取高温液态金属冷却剂的实时流量、流态等信息,是安全控制的核心技术之一。在铸造业中通过控制液态金属的流速可以提高铸件质量,避免卷渣、铸坯裂纹等,同时还可以控制晶粒生长^[1]。然而高温液态金属测量存在很

收稿日期:2021-08-10 Received Date: 2021-08-10

* 基金项目:上海市市场监督管理局科技项目(2019-20,2021-11)资助

多复杂且相互作用的因素使得在流量控制及校准上存在很大困难,具体体现在流体的物理及化学特性、测量环境、机械尺寸、测量方法、流体状态描述,以及对流动过程参数校准等方面。

近年来,国内外众多研究及工程技术人员在高温液态金属流量在线测量方面展开了一系列研究,并取得了一定成果,但远未达到实际工程应用要求。本文对目前已有技术进行了总结,根据测量过程中流量计是否存在干扰件,将现有技术进行分类分析。在总结现有技术的基础上,对高温液态金属在线测量及校准技术的发展方向进行阐述,旨在为特殊工况过程控制中的在线过程参数检测提供一定的参考。

1 存在干扰件的测量技术

存在干扰件的测量技术是指所使用的流量计内含有阻碍件。高温液态金属具有温度高(通常高于 300℃,甚至 500℃ 以上),腐蚀性强等特点,因此流量测量不同于其他流体,测量技术的选择要根据液态金属的特性、应用条件、测试空间的机械尺寸等。例如,流量计材料与被测液态金属的相容性、热工水力特性、安全性以及结构材料、流体的氧化和纯化特性、流动类型等均对测量结果有显著影响。因此用于透明流体的传统测量技术,例如激光多普勒测速仪^[2]、粒子图像测速仪^[3]、纹影法测速^[4]、干涉法^[5]等不再适用。表 1 总结了儿类常见的高温液态金属干扰式流量测量技术。

表 1 干扰式测量技术

Table 1 Interference measurement technology

测量技术	涡轮流量计	涡街流量计	孔板流量计	光学探针法
原理	动量定理	卡门涡街原理	压差测量原理	压差测量原理
适用温度范围/℃	-200~400	-20~250	-50~550	-50~400
限制条件	稳定性差,对几何尺寸有要求,抗干扰差	对被测金属流体的流动特性有要求,不能长时间测量	对压力测量有要求	成本高且不能用于湍流
应用举例	德国 KIT 研究机构 KALLA 实验室 THESYS 回路	德国 KIT 研究机构 KALLA 实验室 THESYS 回路	SnPb、PbBi 合金等测量实验	

1.1 涡轮流量计

涡轮流量计是在测量管道中心安放一个涡轮。当流体通过管道时,冲击涡轮叶片,涡轮叶片的旋转角速度与流体流速成正比。感应线圈或永久磁铁固定在传感器壳体上,当铁磁性涡轮叶片经过感应磁场时,磁路的磁阻发生变化,从而产生感应信号。感应信号经电路放大和整形,输出到计数器或频率计,进而显示流体总的流量,同时将脉冲频率经过频率-电压转换以指示瞬时流量。涡轮流量计结构如图 1 所示。

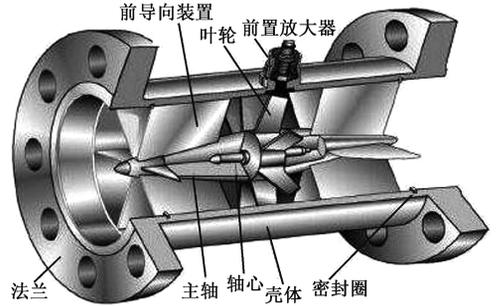


图 1 涡轮流量计结构

Fig. 1 Turbine flowmeter structure

涡轮流量计应用于高温液态金属流量测量中具有误差小,量程宽等优点。缺点是,在高温液态金属测量中涡轮流量计对测量空间有一定的要求。测量高温、具有腐蚀性的金属流体时传感器部件容易受损,影响使用寿命。高温环境下,感应线圈或永久磁铁会发生退磁,导致在小流量测量时信号幅度小,信噪比低,抗干扰能力差^[6]。

1.2 涡街流量计

基于卡门(Karman)涡街原理的涡街流量计是利用流体在管道内的振荡来测量流体流量。涡街流量计的测量管道中置有旋涡发生体,当流体在经过发生体时,在发生体后上下交替产生正比于流速的两列旋涡。通过旋涡的发生频率得到被测流体的流速及流量,测量原理如图 2 所示。Hanao 等^[7]利用涡街流量计短时测量 1 400℃ 时液态铁的流速。

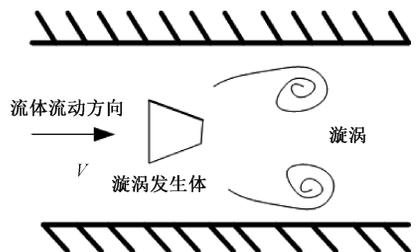


图 2 涡街流量计测量原理

Fig. 2 Measuring principle of the vortex flowmeter

涡街流量计应用于高温液态金属流量测量中的优点是量程范围宽,测量时几乎不受流体密度、压力、粘度等参数的影响。缺点是,由于涡街流量计中的漩涡发生体与高温液态金属接触,流量计使用寿命受到连续测量时间限制。长时间工作下的涡街流量计准确性及重复性受到被测流体的流动特性约束。

1.3 孔板流量计

基于伯努利方程和流动连续性原理的孔板流量计是通过测量上下游两侧的压差来计算流体的流量^[8]。流体流经孔板流量计测量管道内的节流装置时,节流件附近的流体流速增加,在节流件的上、下游两侧产生静压力差。通过测量压力差,并结合信号处理技术得到流体流速及流量。孔板流量计结构示意图如图3所示。

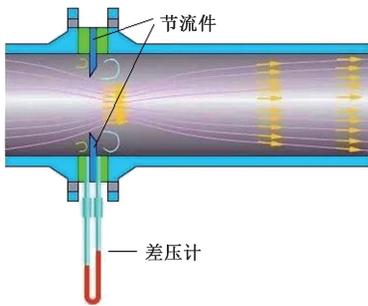


图3 孔板流量计结构

Fig. 3 The orifice flowmeter structure

孔板流量计在高温液态金属流量测量中最大优势是可以适应不同流速下的测量要求。缺点是在孔板的下游存在漩涡导致测量中压损较大。孔板易磨损,影响流量计使用寿命。并且在测量前要充分考虑到被测液态金属的化学性质的稳定性。某些高温液态金属因为化学特性不适宜采用孔板流量计,例如钠或钠合金,因为这类金属流体易挥发、具有腐蚀性,与空气接触容易产生剧烈的化学反应,并引起爆炸。

1.4 机械光学探针法

机械光学探针法由计算机、CCD相机和光学仪器等组成,结构如图4所示。

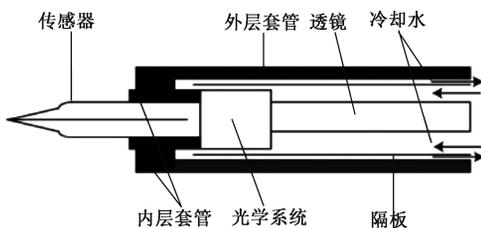


图4 机械光学探针结构

Fig. 4 Mechanical optical probe structure

测量时玻璃管传感器与金属液体接触,玻璃管尖端发生弹性形变,玻璃杆发生偏移,CCD相机记录玻璃杆尖端的偏移距离,通过计算偏移量得到与传感器垂直方向的液体流速。该种流量计中与液态金属接触的测头是传感器核心部件,通常测头为硼硅材料的玻璃,在高温液态金属环境下会发生塑性形变,因此不适合长时间测量。机械光学探针在短时间内可以测量的介质最高温度为230℃左右,长时间可测量的介质最高温度为150℃左右。

为了使其适用于长时间的高温测量,部分学者对机械光学探针结构进行了优化。例如一种改进的机械光学探针,其测头采用了附有保护层的石英玻璃,变形温度可达到1200℃左右。同时在光学系统外通过冷却保证光学系统的工作温度一直低于100℃^[9]。采用这种优化结构的机械光学探针在400℃时分别对SnPb和PbBi合金进行了实验测量^[10],验证了优化后的探头长时间耐高温的有效性。

在高温液态金属流量测量中,改进的机械光学探针法的优点是不受外界磁场和电场干扰,且能在高温环境下连续测量。但缺点是该方法需要精密的光学系统,制造成本昂贵,且不易维修。由于机械光学探针法测量原理限制,该方法不适合测量有速度波动的湍流,这极大限制了使用范围。

2 不存在干扰件的测量技术

不存在干扰件的测量技术是指所使用的流量计内不含阻碍件。这类流量计在测量过程中不会对被测流体的流型、流态产生影响、无压损,因此在测量高温液态金属时有突出优势。近几年不存在干扰件的测量技术发展非常迅速。表2对常见的非干扰式测量技术进行了总结。

2.1 科里奥利质量流量计

科里奥利质量流量计(科氏力流量计)由流量检测元件和转换器组成。流体在振动管道中流动时产生与质量流量成正比的科里奥利力。通过科里奥利力测量流量。常见的测量管形状有以下几种:S型、U型、B型、J型等。双管U型科里奥利质量流量计结构如图5所示。

在高温液态金属测量中,科里奥利质量流量计的优点是实现了质量流量的直接测量,具测量精度较高,能够自校准。缺点是科里奥利质量流量计对测量空间有一定要求,在空间有限的测量环境下使用具有一定的局限性,比如核反应堆回路的空间有限,科里奥利质量流量计使用受到极大限制。

表 2 非干扰式测量技术

Table 2 Non-intrusive measurement technology

测量技术	科里奥利流量计	直流电磁流量计	交流电磁流量计	超声波流量计	照相法	X 光摄像法
原理	科里奥利原理	法拉第电磁感应定律		声波传播原理	时差法	比对前后拍照底片
适用温度范围/℃	-100~400	-20~650		-10~500	-20~250	适用温度没有明显限制
限制条件	对介质物性不敏感	测量受到管道边界条件、电化学等影响		高温下的湿润性有要求	价格昂贵,受到被测环境、空间限制	极大的受到环境、空间、辐射源等限制
应用举例	钠或钠钾测量实验	德国 KIT 机构的 THESYS 回路、意大利 ENEA 机构的 CHEOPE 和 LECOR 回路、瑞士 PSI 机构的 LISOR 回路和瑞典 KTH 的 TALL 等回路		GaInSn 实验室、冶金行业等	冶金、铸造及实验室(室温)下水银流量测量等	GaIn 合金在电磁驱动下的定向凝固、铸件结晶等

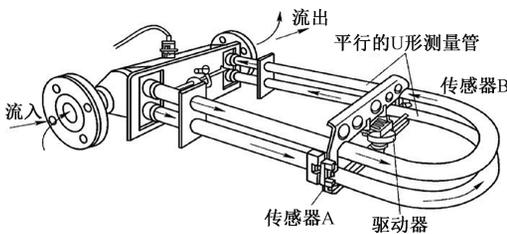


图 5 双管 U 型科里奥利质量流量计

Fig. 5 Double tube U type Coriolis mass flowmeter

2.2 电磁流量计

基于法拉第电磁感应定律的电磁流量计具有结构简单、输出信号强、线性度好、耐高温且对流体流动特征不敏感等优点^[11-12]。电磁流量计的基本结构包括传感器和转换器,其中传感器由励磁模块、电极、法兰、测量管道组成。测量时,励磁线圈在测量管道空间中产生感应磁场,当导电液体流过磁场覆盖的空间时,会在测量电极两端产生相应的感应电势,平均流速与感应电势成正相关。电磁流量计结构如图 6 所示。

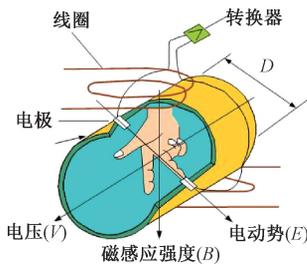


图 6 电磁流量计结构

Fig. 6 Electromagnetic flowmeter structure

根据励磁方式的不同,电磁流量计可以分为交流电磁流量计、直流电磁流量计^[13-14]。

在高温液态金属测量中,由于液态金属的高电导率特点,电磁流量计成为目前在高温液态金属测量中应用最广泛的流量计之一,是国际上核反应中铅铋、钠、钠钾合金等液态金属冷却剂流量测量的主选设备之一^[15]。除了原理上的优势,电磁流量计内部没有阻力件,结构简单等都是高温液态金属冷却剂测量中的显著优势。但缺点是由于受到边界条件、电化学等因素、励磁模块退磁等因此影响,电磁流量计长时间测量液态金属流量时需要进行定期标定来校正输出信号^[16-17]。

2.3 超声波流量计

超声波流量计是利用超声波信号在流体中传播所加载的流体流速信息来测量流量,主要原理是根据声波时间差和位移,计算出液态金属的流速,从而测得流量。超声波流量计由超声波换能器、电路及流量显示和累计系统组成。根据超声波流量计换能器的安装方法可以分为:1)对称法安装:在水平管道上,一般应选择管道的中部,避开顶部和底部(顶部可能含有气泡、底部可能有沉淀);2)V 法安装:先确定一个点,按安装距离在水平位置量出另一个点;3)Z 法安装:先确定一个点,按安装距离在水平位置量出另一个点,然后测出此点在管道另一侧的对称点。各种换能器安装方法分别如图 7 所示。

超声波流量计是液态金属流量测量常用的流量计之一,常用于核反应堆的堆芯仪表^[18-20]。

德国专利^[21-22],美国专利^[23-24]和国际专利^[25]分别公开了适用于测量高温液态金属流速的超声波传感器,但使用中由于传感器具有 100~800 mm 的波导管,因此应用中受到测量环境的空间尺寸限制。文献^[26-27]在永磁体螺旋磁场作用下采用超声波流量计测量了 GaInSn 合金液的轴向和周向速度。文献^[28-30]利用超声波流量计测量了板坯结晶器模型内水银流速的分布。Eckert 等^[31]研制出组合式超声波传感器,测量了 300℃ 的 PbBi

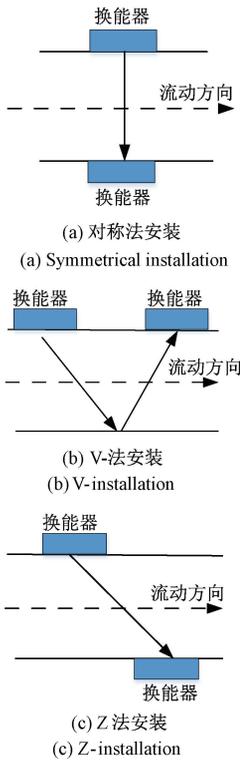


图7 换能器安装方法

Fig. 7 Transducer installation

合金液体流速。Timmel 等^[32]研制的超声波阵列多普勒测速仪可以对金属流体的三维流型进行测量。

在高温液态金属流量测量中,超声波流量计在大口径流量测量时有突出优势。缺点是测量精度会受到被测金属流体的纯净度、流速、流场复杂程度等因素影响。

2.4 照相法

照相法是在液态金属表面布置一定量的耐高温非金属粒子,非金属粒子与被测金属液体的密度相近且不会被高温熔化。通过相机或高速摄影机对流动液体表面拍摄,根据时间差和非金属粒子流动的距离得到金属液表面的流速。照相法测量金属液体示意图如图8所示。

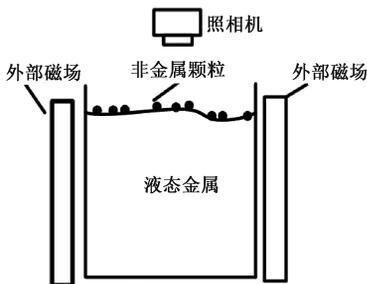


图8 照相法

Fig. 8 The photographic method

温长飞^[33]利用高速摄像机记录了复合电磁场作用下的金属液面的波动。Tarapore 等^[34]利用照相法并配合频闪闪光灯记录了金属流体表面流动速度,验证了在感应炉中电磁搅拌力驱动的金属流体的流动模型和理论计算的一致性。Dubke 等^[35]用照相法分析了电磁搅拌后金属液体表面的流动状态。

在高温液态金属流量测量中,照相法的优点是操作简单,且非接触式测量方式不会干扰流场。缺点是该方法只能测量金属液表面流速。测量结果容易受其他物体遮挡和强光的影响。

2.5 X光摄像法

X光摄像法是通过比对拍摄底片上的跟踪示子进行定量测量。X光摄像法示意图如图9所示。

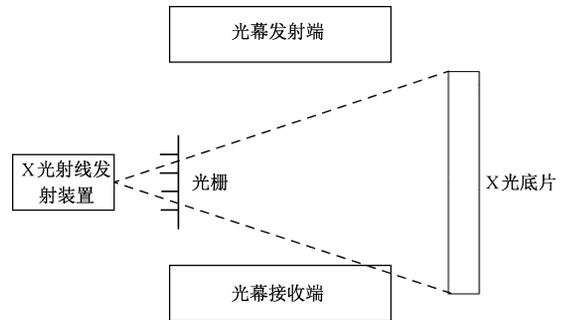


图9 X光摄像法

Fig. 9 X-ray imaging

Boden 等^[36]用X光射像法研究了GaIn合金在电磁驱动下的定向凝固情况。Shevchenko 等^[37]将X光摄像法用于液态金属两相流的研究。

在高温液态金属流量测量中,X光摄像法的优点是使不透明的金属液内部可视,这是研究金属液体流场变化的前提。缺点是透射深度有限,拍摄区域小,且需要辐射源,很多工业场合不适用。因此在使用场合方面,这种方法更适用于研究聚能射流等高速形变的场合或铸件结晶过程。

3 其他测量技术

3.1 软测量方法

软测量技术是根据某种最优准则,选择一组既与主导变量有密切联系又容易测量的变量,构造数学关系,再通过计算机软件实现对主导变量的估计^[38]。近些年,构建流量与质量关系数学模型的软测量技术在液态金属流量测量研究中逐渐展开。

孙强等^[39]利用称重孔口流出的金属,结合神经网络,实现精馏过程中锌等金属的流量控制。文献[40-41]先用水做流体介质进行称重测量,再推导到高温金属流

体测量。也有应用多元线性回归的方法建立非线性数学模型^[42],并设计了粗锌液流量实时监视系统。

在高温液态金属流量测量中,软测量技术也是学者们研究的热点之一。这是因为流量参数很难或无法直接测量,利用流量与其他参数之间的相关性构造某种数学模型或逻辑关系,对一些容易测量的过程参数进行测量,借助于数学关系等进行推断和估计,得到流量参数。目前这种方法更多的是在实验室阶段。

3.2 改进的流量计

还有一些测量方法通过对传统流量计进行优化,无论在实验还是现场都取得了不错的效果。如将传统电磁流量计进行结构优化应用于钠冷快堆冷却剂流量测量^[43]。

还有对探针法进行结构优化。例如,Vives 探针法就是文献[44-46]采用特制的电磁流体探针测量电磁感应条件下的金属流场。Hayashi 等^[47]从理论和实验的角度分别探索了电磁体取代速度探针的方法,改进后的探针能应用于铜合金或钢等更高的环境温度。该方法解决了当温度达到永磁铁居里温度时,磁场消失导致无法测量液态金属流速的问题。

此外,还有结构优化后的涡街流量计、涡轮流量计等^[6,48-49]。

4 高温液态金属流量测量仪表在线校准

仪表校准是为了保证流量测量仪表的准确可靠。高温液态金属流量测量仪表在工作过程中长期受到高温、辐照、热冲击、热循环等影响,在使用一段时间之后,测量精度会下降。有些流量计需要全封闭环境运行,无法进行离线校准,因此在线校准对于提高流量测量计的准确性和可靠性是非常重要的。

常规的校准技术包括容积法校准、标准表法校准、称重法校准。文献[50]利用容积法对永磁式高温钠流量计进行在线校准;文献[51]以文丘里流量计为标准表,利用标准表法实现高温铅铋电磁流量计的在线校准;文献[40]利用称重法对锌流体流量计在线校准。然而由于高温液体金属流量计的特殊性,传统的校准技术应用范围非常有限,且校准误差基本在 10% 以上。

除了传统的校准技术,还可以通过构建互相关函数进行在线校准。Raptis 等^[52]建立两路流量波动信号的相关函数,对 2~10 m/s 流速下的 DN12、DN300 和 DN400 的永磁式电磁流量计在线校准。该方法的校准误差大约在 10%。Endou^[53]基于测量管道内流速分布与信号波动频率之间的关系,利用两路波动信号的相关函数提出了一种基于传播速度法的校准技术,并在

2~5 m/s 流速范围内进行在线校准,校准误差在 $\pm 5\%$ 左右。Ramakrishna 等^[54]分别对口径为 DN40、DN100 和 DN200 的永磁式电磁流量计进行在线校准实验,流量范围分别为 0.84~2.79 m/s、0.91~3.71 m/s 和 0.75~1.59 m/s。具体方法是构建测量管路间的感应电动势的波动信号互相关函数。该方法应用于印度英迪拉甘地中心的钠水反应测试设备(第 1 组)、蒸汽发生器测试设备(第 2 组)和快速增殖试验反应堆(第 2 组),且校准结果误差在 $\pm 6\%$ 左右。Jian 等^[55]介绍了一种利用两路洛伦兹力信号进行互相关分析的镓钢锡合金流量计在线校准方法,并提供了数值仿真结果,但是这个方法有待于进一步的验证。

随着计算机技术的发展,也有部分科研人员利用计算机软件进行在线校准的研究。刘云焰等^[56]设计了一套基于 LabVIEW 的在线校准系统,并在流速为 0.3~2.1 m/s 下,对 DN48 永磁式钠电磁流量计进行校准,校准误差在 $\pm 7\%$ 以内。

5 高温液态金属流量测量技术展望

5.1 相关测量理论体系进一步完善

目前大多数测量理论都是建立在典型流型或典型流型特定相分布推导基础上的,但高温液态金属具有特殊的物化性质,以及高温、强腐蚀性等,测量方程无法准确描述,因此无法对流量进行准确测量及控制。这在很大程度上限制了液态金属在线测量技术的发展。根据高温液态金属的特性,不断的深入研究测量方程,这是直接对流量进行控制及测量的有效方法,也会极大推动高温液态金属流量测量及校准技术的发展。当边界条件无法满足时,测量方程无解析解,导致传统流体理论极难解决高温液态金属测量方程解析解的问题。随着计算机技术的发展,借助数值仿真技术可以进一步探究高温液态金属的基本流动规律,针对复杂环境、实时工况环境突破现有的多参数、在线测量等综合测量技术,解决高温液态金属的准确计量难题。数值分析方法的特点是分析结果不能表达为一个明确的函数而是离散数值。数值分析方法可以用于高温液态金属流量测量拉普拉斯方程的数值表达,尤其适用于具有复杂边界条件以及不规则复杂区域问题的求解。流体的流量变化规律是与粘度密切相关的,而液态金属的粘度受到流体的高温、氧化和纯化等影响。针对液态金属测量方程的特殊边界的测量方程的求解,可以借助于数值分析方法和实验方法结合,从测量理论触发,提高对高温液态金属流动现象的解释的准确性和完整性,这是完善高温液态金属流量测量理论体系的重要途径之一。

5.2 与现代智能信息处理技术结合的测量方法的进一步完善

为了保证高温液态金属流动的过程装置维持在最佳工况下运行,需要对流速、流量这类重要过程参数实现闭环控制并进行在线测量。现代智能信息处理技术有效融合了计算机技术、通信技术等技术,能够对过程控制中的数据信息、图像信息、包括视频信息进行高效的采集、整合并分析,为高温液体金属流量测量提供准确决策信息。通过人工智能、动态信号分析、深度学习、神经网络等技术实时掌握监测控制系统的现状及发展趋势。现代智能信息处理技术的应用是推动高温液态金属测量技术发展的主要途径之一。

5.3 多种传感器融合的测量方法

多传感器融合包括两个方面,一是传感器体系结构的融合,二是多传感器信息的融合。由于每种测量技术方法和限制条件各不相同,适用于高温液态金属流量在线测量的单一流量计很少。实际工况中希望能更全面地了解液态金属过程控制的全流程。考虑到不同类型传感器的适用条件及测量原理不同,可根据具体工况要求及传感器的特点,采用同类传感器的不同模式或者多种传感器融合的形式,实现不同测量技术的优势互补,实现比如提高测量宽度及精度。多传感器融合体系结构形式包括:分布式、集中式、混合式。其中,混合式融合具有较强的适应能力,能适用不同的工业过程控制场合,兼顾了分布式和集中式的优点,具有可靠性高、信息量大、结构延展性好等优势,最重要的是混合式结构稳定性强。但混合式结构比前两种融合方式的结构复杂。针对液态金属流量测量过程控制的要求及特点,可以选择多传感器信息融合的方法,包括:数据级融合、特征级融合和决策级融合。随着信息技术、计算机技术、大数据技术的发展,液态金属流量测量技术采用多传感器融合形式是发展的必然趋势。

5.4 现有流量计的进一步优化

目前已有电磁流量计、超声波流量计、涡轮流量计等应用于高温液态金属流量测量,尤其是电磁流量计和超声流量计应用的更为广泛。为了适应更多的测量场合,无论是流量计适用温度范围提高,还是对仪表的反应速度、可测流量范围以及小型化等方面都有更多要求。

1) 能够适应高温环境下连续长时间工作。在核能、铸造或冶金等行业都要求传感器能在高温环境下长期连续的工作,如结晶器内熔融高温合金液的流动状态对控制铸件质量十分重要,但目前的测量技术通常只能在温度低于 800℃ 情况下连续工作 1 h,这与期望指标还有很大距离。新测量仪表(技术)能够适应高温环境并连续

长时间工作是高温液态金属测量技术发展中必须要解决的问题之一。

2) 结构的小型化和屏蔽设计。特殊工况下的仪表工作空间十分有限,流量计的几何尺寸是限制高温液态金属流量计应用场合的重要因素之一。此外为了减少或防止外界环境(如加热器件、电噪声、辐射等)的干扰,提高流量计的屏蔽性将有助于提高测量精度。因此无论是仪表的小型化还是测量中屏蔽的优化设计都是高温液态金属流量计的重要发展方向。

3) 提高仪表相应速度和扩大量程范围。在测量高温液态金属时流量计的快速响应对测量实时性非常重要。比如在核反应的安全控制方面,仪表测量的准确、快速反应直接影响着对监控对象的有效控制。在测量高温液态金属结晶过程中,有些仪表的发展受到了快速响应的制约,如超声波阵列多普勒测速仪可以实现三维流速测量,但测量湍流时存在响应速度不够快,影响了金属流体流场测量技术发展。除此之外,有些仪表测速范围不够宽,如机械光学探针法的测速范围有限,故不适用区域流速差异较大的场合。所以,新测量技术应朝着高测试反应速度和宽量程范围的方向发展。

5.5 高精度在线校准技术

高温液态金属流量计受到高温、热循环、热冲击、辐照等的影响,且部分液态金属有较强的腐蚀性,在流量计使用一段时间之后,测量精度下降。高温液态金属流量计的运行环境要求全封闭,无法取出进行离线校准,所以需要流量计进行在线校准,保证流量计在良好状态下工作。

传统的质量法、容积法、标准表法较难实现液态金属流量计的在线校准。目前很多研究聚焦在基于相关法的在线校准,但是由于构建相关数学关系方法一般不能代表整个管道截面内的平均流量,必须经过修正才能作为管道内的实际流量。因此当检测信号所用的传感器不同时,会导致信号具有不同的特点,如信号的频带不同,抗干扰能力不同,所适用的信号处理方法也不同。并且目前大部分的相关法在线校准误差均在 $\pm 6\%$ 以上,远远不能满足计量要求。如何保证流量计长时间的良好计量状态,高精度在线校准技术需要进一步探讨优化。

6 结 论

高温液态金属流量测量技术是相关产业及其他特种工况过程控制的重要研究内容。在线、实时、准确、可靠、适用范围广、无需或仅需简单标定,这是高温液态金属流量测量技术的研究目标。我国对于高温液态金属流量测量及校准技术的研究起步较晚。虽然有些

测量技术可以帮助实现高温液态金属流量测量,但目前测量装置仍然没有完全满足工业现场对高温液态金属在线流量测量的技术要求。因此,在高温液态金属流量测量方面仍需广大科研与工程人员继续投入,以求对液态金属流动过程机理、准确测量及在线校准等方面进行更加深入的研究。

参考文献

- [1] ZHANG X, DONG Y, WANG C, et al. Influence of P content on SMPs in Fe-Si-B-P-C-Cu-Nb amorphous alloys under longitudinal field annealing [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021(3): 1-11.
- [2] 刘伟玲, 谭超, 董峰. 基于超声多普勒与电导环的油水两相流流速测量[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 318(8):51-58.
- LIU W L, TAN CH, DONG F. Flow velocity measurement of oil-water two-phase flow based on ultrasonic Doppler and conductivity loop[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 318(8):51-58.
- [3] 王爽, 谭思超, 祁沛焱, 等. 大变形自由面两相流测量方法研究[J]. *中国舰船研究*, 2021(4):43-47.
- WANG SH, TAN S CH, QI P Y, et al. Research on two-phase flow measurement method of large deformation free surface [J]. *Chinese Ship Research*, 2021(4): 43-47.
- [4] 曹萍, 顾浩, 周静伟, 等. 一种基于纹影法的无接触流场光学检测装置: CN212482857U[P]. 2021.
- CAO P, GU H, ZHOU J W, et al. A non-contact flow field optical detection device based on schlieren method: CN212482857U[P]. 2021.
- [5] 伊鹏宇, 王世博, 张子超, 等. 基于激光自混合散斑干涉的微小流量检测[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2020, 38(1):110-113.
- YI P Y, WANG SH B, ZHANG Z CH, et al. Micro-flow detection based on laser self-mixing speckle interference[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2020, 38(1):110-113.
- [6] 查美生. 核反应堆堆芯冷却剂流量测量用涡轮流量计的研制及应用[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2004(2): 18-22.
- ZHA M SH. Development and application of turbine flowmeter for measuring nuclear reactor core coolant flow rate [J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2004(2): 18-22.
- [7] HANAO M, KAWAMOTO M, MIZUKAMI H, et al. Influence of molten steel flow velocity near the meniscus in continuous casting mold on surface quality of slabs [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2000(13), 11: 55-57.
- [8] NASIRUDDIN S, SINGH S N. Performance evaluation of an innovative design modification of an orifice meter[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 80(1): 101944.
- [9] OECD/NEA Nuclear Science Committee. Hand-book on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal hydraulics and technologies[M]. Cambridge:OECD, 2007(91): 479-488.
- [10] SCHULENBERG T, STIEGLITZ R. Flow measurement techniques in heavy liquid metals [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(9): 2077-2087.
- [11] 蔡武昌. 电磁流量计的发展和应用动态[J]. *自动化仪表*, 1988(3):11-15,51-52.
- CAI W CH. Development and application trends of electromagnetic flowmeters [J]. *Automation Instrumentation*, 1988(3):11-15,51-52.
- [12] SHERCLIFF J A. The theory of electromagnetic flow-measurement [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1962.
- [13] 黄宝森, 孔昭育, 施希行, 等. 电磁流量计[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
- HUANG B S, KONG ZH Y, SHI X X, et al. *Electromagnetic flowmeter* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981.
- [14] 苏彦勋, 梁国伟, 盛健. 流量计量与测试(第二版)[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- SU Y X, LIANG G W, SHENG J. *Flow measurement and testing (second edition)* [M]. Beijing: China Metrology Press, 2007.
- [15] SCHULENBERG T, STIEGLITZ R. Flow measurement techniques in heavy liquid metals [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, 240(9): 2077-2087.
- [16] FOLETTI C, SCADDOZZO G, TARANTINO M, et al. ENEA experience in LBE technology [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2006, 356(1): 264-272.
- [17] 刘一哲, 许义军, 陈道龙, 等. 中国实验快堆全堆芯

- 流量分配试验与分析[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2010(1):12.
- LIU Y ZH, XU Y J, CHEN D L, et al. Test and analysis of flow distribution in the whole core of China experimental fast reactor[J]. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2010(1):12.
- [18] 于湛, 雷作胜, 贾洪海, 等. 液态金属流速的测量技术[J]. 上海金属, 2007(2):54-58.
- YU ZH, LEI Z SH, JIA H H, et al. Measurement technology of liquid metal flow velocity[J]. Shanghai Metal, 2007(2):54-58.
- [19] 李坤鹏, 徐雅, 谢代梁, 等. 大口径超声波流量计内部流-声耦合特性仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(7):53-57.
- LI K P, XU Y, XIE D L, et al. Simulation analysis of internal flow-acoustic coupling characteristics of large-aperture ultrasonic flowmeter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34(7):53-57.
- [20] 李广峰, 高勇. 超声波流量计的高精度测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(6): 644-647.
- LI G F, GAO Y. High-precision measurement technology of ultrasonic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(6): 644-647.
- [21] ARA K, HIRABAYASHI M. Ultrasonic transducer for liquid metal; U. S. Patent Application 11/352,990[P]. 2006-2-14.
- [22] MANSFIELD T L. Probes for the ultrasonic treatment or inspection of molten aluminum; U. S. Patent 4,287,755[P]. 1981-9-8.
- [23] ECKERT S, GERBETH G, GUNDRUM T. Ultrasonic sensor for measuring flow rates in liquid melts; U. S. Patent 8,205,507[P]. 2012-6-26.
- [24] ITAKURA M. Molten slag flow rate measuring device and furnace facilities using the same; U. S. Patent 5,694,480[P]. 1997-12-2.
- [25] CISKO L W, STIFFLER R C, URBANIC J M, et al. Apparatus and method for ultrasonic particle detection in molten metal; U. S. Patent 5,708,209[P]. 1998-1-13.
- [26] 王松伟, 那贤昭, 张新德. 螺旋磁场驱动金属液轴向流动的研究[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(4): 52-56.
- WANG S W, NA X ZH, ZHANG X D. Study on the axial flow of molten metal driven by spiral magnetic field[J]. Iron and Steel Vanadium and Titanium, 2013, 34(4): 52-56.
- [27] 王松伟, 王晓东, 倪明玖, 等. 模式螺旋磁场驱动金属液流动的研究[J]. 金属学报, 2013, 49(5): 544-552.
- WANG S W, WANG X D, NI M J, et al. Study on the mode spiral magnetic field driving molten metal flow[J]. Acta Metall Sinica, 2013, 49(5): 544-552.
- [28] 王敏, 贾皓, 张振强, 等. 电磁制动下板坯结晶器内金属流动的物理模拟[J]. 上海金属, 2011, 33(6): 41-60.
- WANG M, JIA H, ZHANG ZH Q, et al. Physical simulation of metal flow in slab mold under electromagnetic braking[J]. Shanghai Metal, 2011, 33(6): 41-60.
- [29] 贾皓, 张振强, 吴吉文, 等. 板坯连铸电磁制动下结晶器内金属流场的研究[J]. 过程工程学报, 2012, 12(5): 721-727.
- JIA H, ZHANG ZH Q, WU J W, et al. Research on the metal flow field in the mold under electromagnetic braking for slab continuous casting[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(5): 721-727.
- [30] 李洁, 周月明, 王俊. 电磁搅拌作用下板坯结晶器内金属液流动行为试验研究[J]. 上海金属, 2014, 36(1): 42-47.
- LI J, ZHOU Y M, WANG J. Experimental study on the flow behavior of molten metal in the slab mold under electromagnetic stirring[J]. Shanghai Metals, 2014, 36(1): 42-47.
- [31] ECKERT S, GERBETH G, MELNIKOV V I. Velocity measurements at high temperatures by ultrasound Doppler velocimetry using an acoustic wave guide[J]. Experiments in Fluids, 2003, 35(5): 381-388.
- [32] TIMMEL K, ECKERT S, GERBETH G. Experimental modeling of the continuous casting process of steel using low melting point metal alloys—the LIMMCAST program[J]. ISIJ International, 2010, 50(8): 1134-1141.
- [33] 温长飞. 复合磁场作用下金属液面行为的试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- WEN CH F. Experimental research on the behavior of metal liquid under the action of compound magnetic field[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [34] TARAPORE E D, EVANS J W. Fluid velocities in induction melting furnaces; Part I. Theory and laboratory

- experiments[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1976, 7(3): 343-351.
- [35] DUBKE M, TACKE K H, SPITZER K H, et al. Flow fields in electromagnetic stirring of rectangular strands with linear inductors: Part I. Theory and experiments with cold models [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1988, 19(4): 581-593.
- [36] BODEN S, ECKERT S, GERBETH G. Visualization of freckle formation induced by forced melt convection in solidifying Ga-In alloys [J]. *Materials Letters*, 2010, 64(12): 1340-1343.
- [37] SHEVCHENKO N, BODEN S, ECKERT S, et al. Application of X-ray radioscopic methods for characterization of two-phase phenomena and solidification processes in metallic melts [J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2013, 220(1): 63-77.
- [38] 俞金寿. 软测量技术及其应用[J]. *自动化仪表*, 2008, 29(1): 1-7.
- YU J SH. Soft measurement technology and its application [J]. *Automation Instrumentation*, 2008, 29(1): 1-7.
- [39] 孙强, 桂卫华, 李勇刚, 等. 高温金属流体的测量与控制系统[J]. *检测与仪表*, 2004(2): 44-47.
- SUN Q, GUI W H, LI Y G, et al. Measurement and control system of high temperature metal fluid [J]. *Detection and Instrumentation*, 2004(2): 44-47.
- [40] 孙强, 桂卫华, 李勇刚, 等. 一种高温流体流量在线检测的新方法[J]. *计算技术与自动化*, 2001, (4): 10-13.
- SUN Q, GUI W H, LI Y G, et al. A new method for online detection of high temperature fluid flow [J]. *Computing Technology and Automation*, 2001, (4): 10-13.
- [41] 杜海鸥, 吴杰, 王荣东, 等. 钠钾合金制备在线计量技术研究 [J]. *原子能科学技术*, 2010, 44(9): 1105-1108.
- DU H OU, WU J, WANG R D, et al. Research on on-line measurement technology of sodium-potassium alloy preparation [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(9): 1105-1108.
- [42] 孙强. 精馏过程粗锌液流量自动检测系统的研究与开发[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- SUN Q. Research and development of automatic detection system for crude zinc liquid flow rate in distillation process [D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [43] 查美生, 王秀清. NRTM 型涡轮流量计的研制及对 5 MW 低温供热堆堆芯冷却剂流量的测量 [J]. *核科学与工程*, 1995(1): 27-32.
- ZHA M SH, WANG X Q. Development of NRTM turbine flowmeter and measurement of coolant flow rate in 5 MW cryogenic heating reactor core [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1995(1): 27-32.
- [44] RICOU R, VIVE C. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated magnet probe [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1982, 10(25): 1579-1588.
- [45] LEE H C, EVANS J W, VIVES C. Velocity measurement in woodps metal using an incorporated magnet probe [J]. *Metallurgical Transactions (Process Metallurgy)*, 1984, 10B(15): 734-736.
- [46] VIVES C, RICOU R. Fluid flow phenomena in a single phase coreless induction furnace [J]. *Metallurgical Transactions*, 1985, 16(2): 227-235.
- [47] HAYASHI H, BECKER A, EVANS J W. Toward a probe for velocity measurement in molten metal at high temperature [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1999, 30B(4): 623-630.
- [48] 李雪菁. 用于堆芯冷却剂测量的非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法研究 [D]. 上海: 上海大学, 2015.
- LI X J. Research on analysis method of non-insulated tube wall electromagnetic flow sensor for core coolant measurement [D]. Shanghai: Shanghai University, 2015.
- [49] 吴宏岩, 董康乐, 杨建伟, 等. 一种永磁式液态金属流量计: CN105509824A [P]. 2016.
- WU H Y, DONG K L, YANG J W, et al. A permanent magnet type liquid metal flowmeter: CN105509824A [P]. 2016.
- [50] 徐科军, 闫小雪, 许伟, 等. 一种内嵌旋涡发生体的永磁式钠流量计的在线校准方法和系统: CN109186722A [P]. 2019.
- XU K J, YAN X X, XU W, et al. On-line calibration method and system of permanent magnet sodium flowmeter with embedded vortex generator: CN109186722A [P]. 2019.
- [51] 卢洋. 铅铋电磁流量计研制与初步标定实验 [D]. 合

- 肥:中国科学技术大学, 2014.
- LU Y. Development and preliminary calibration experiment of lead-bismuth electromagnetic flowmeter[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [52] RAPTIS A C, FORSTER G A. A signal analysis method using cross-correlation of turbulence flow signals to determine calibration of permanent magnet sodium flowmeters[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, 25(1):278-281.
- [53] ENDOU A. In-service calibration method of electromagnetic-flowmeter for LMFBR utilizing cross-correlation of output voltage fluctuations. Examination from viewpoint of flow velocity distribution in pipe[J]. J. Nucl. Sci. Technol, 1984, 21(7): 501-514.
- [54] RAMAKRISHNA R, KUMAR P A, THIRUMALAI M, et al. In-situ calibration of permanent magnet flow meters in PFBR using noise analysis technique [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2013, 34(Complete): 76-82.
- [55] JIAN D, KARCHER C. Electromagnetic flow measurements in liquid metals using time-of-flight Lorentz force velocimetry [J]. Measurement Science & Technology, 2012, 23(7):894-894.
- [56] 刘云焰, 陈道龙, 杨建伟, 等. 基于 Labview 的相关法测量钠流量系统设计[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(10):1865-1869.
- LIU Y Y, CHEN D L, YANG J W, et al. Design of a system for measuring sodium flow based on the correlation method of Labview [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(10):1865-1869.

作者简介



李雪菁(通信作者), 2015 年于上海大学获得博士学位, 并于 2019 年上海大学博士后出站。现在上海市计量测试技术研究院工作, 主要研究方向为流量计量、仪器仪表。

E-mail: lxj05030@163.com。

Li Xuejing (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Shanghai University in 2015. She was a postdoctoral fellow at Shanghai University until 2019. She is currently working at Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology. Her main research interests include flow measurement and instrumentation.