

# 金属液测速技术的原理及研究进展

王 畅<sup>1</sup> 李安敏<sup>1,2,3</sup>✉ 王晓东<sup>4</sup>✉

1 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004

2 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 南宁 530004

3 广西铝产业生态协同创新中心, 南宁 530004

4 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

流动是自然界和工程领域中的普遍现象, 对流动行为的理解和监控一直是人们想要实现的目标。金属流体在冶金工业中十分常见, 其流动行为和传输过程涉及高炉、钢包、结晶器等多个加工环节, 对生产效率和产品质量具有显著的影响。在连铸工艺、连续热镀锌工艺及再生铝生产等常见的材料加工过程中, 金属液流速的大小、方向、变化规律对调节工艺参数、控制产品质量具有重要意义。面对不透明、高温、强腐蚀性的熔融金属流体, 如何实现流速的精准测量一直是一大难题。在过去 20 年, 随着电磁技术的不断进步, 金属液的测速技术有了很大的发展, 逐步实现了对多相三维湍流的实时在线非接触测量, 应用范围也逐渐向晶体生长、电化学、核工业、医疗等领域扩展。由于金属液的测速方法种类繁多, 需要针对不同的工业场景选择不同的方法, 本文介绍工业常用的几种金属液测速方法的原理、适用场景和研究进展, 分析不同方法之间的区别与各自的优缺点, 并对未来发展进行了展望。

关键词 金属流体 流速 连续铸造 接触式测量 非接触式测量

中图分类号: TB126 文献标识码: A

## Principles and Research Progress of Metal Fluid Velocimetry Techniques

WANG Chang<sup>1</sup>, LI Anmin<sup>1,2,3</sup>✉, WANG Xiaodong<sup>4</sup>✉

1 School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metals and Featured Materials, Nanning 530004 China

3 Center of Ecological Collaborative Innovation for Aluminum Industry in Guangxi, Nanning 530004, China

4 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Flow is a very common phenomenon in nature and engineering fields, and measurement and control of flow have always been essential goals. Liquid metal flow is indispensable in the metallurgical industry, and its flow behavior and transport process involve multiple processing links, including use of blast furnaces, ladles and molds, all of which significantly impact both production efficiency and product quality. In material processes such as continuous casting, continuous hot galvanisation, and secondary aluminium production, the speed, direction and changing law of molten metal flow is of great important for adjusting process parameters and controlling product quality. However, in the face of opaqueness, high temperature, and chemically aggressive molten metal fluids, accurately measuring the flow velocity yield poses a challenge for researchers and engineers. In the past 20 years, with the advancement of electromagnetic technology, great progress has been achieved in velocity measurement techniques for molten metal, and real-time online noncontact measurement of multiphase three-dimensional turbulence has gradually been realised. The application of velocity measurement technology has gradually been extended to fields such as crystal growth, electrochemistry, the nuclear industry and medicine. There are the wide variety of molten metal velocity measurement methods, and each method has its own advantages and disadvantages. In this paper, we introduce the principles, application scenarios and research progress of several molten metal velocity measurement methods commonly used in industry, analyse the differences among different methods and their respective advantages and disadvantages, and discuss prospects for their future development.

**Key words** metal fluid, flow measurement, continuous casting, contact measurement method, non-contact measurement method

## 0 引言

流体流速的测量是一个广泛的议题, 涉及冶金、化工、核工业等多种形态下的多个领域, 在金属材料加工过程中, 金属液的流动会对产品的质量产生深刻的影响, 例如在连铸工艺中, 钢液流速过大或过小都易造成夹杂或气泡等杂质缺陷, 对金属流体流动行为的测量与监控对保证产品微观结构的稳定至关重要, 如何实现对不透明、高温熔融、化学腐蚀性金属流体的精准测量一直是研究人员研究的重点。近年来, 随着电子技术、数值模拟技术和图像处理技术的不断进步<sup>[1]</sup>, 流体测速技术实现了从简单的一维层流到复杂的三维湍流、从单相流到多相流、从高电导率的金属到低电导率的

弱电解质的飞跃, 测速技术在不同专业的多个领域扩展, 如冶金工业中结晶器内钢水流动行为的研究、核工业中钠泵内液态钠的流速监控以及在医疗领域中对血液红血球浓度的均匀性测量<sup>[2]</sup>等, 未来将以更加适应工业环境为目标, 向着更精准更便捷的方向发展。

金属液的流量测量在国际上引起了冶金领域的极大重视。2015 年, 德国德莱斯敦曾举办过专门的国际会议, 邀请了近百名专家学者对金属液的测速技术进行了研究和讨论, 会上介绍了近 10 种不同测速方法的研究成果, 足见国际学者对此领域的关注与重视。鉴于金属液流动行为在工业生产中的重要作用, 有必要进行不同方法的归纳和总结, 本文综述了传统的接触式流速测量与新型的非接触式测量,

基金项目: 2021 年中央引导地方科技发展资金专项(桂科 ZY21195030); 2022 年广西科技基地和人才专项(桂科 AD21238010); 广西有色金属及特色材料加工重点实验室基金(2021GXMPF02)

This work was financially supported by the Local Scientific and Technological Development Funds Guided by the Central Government in 2021 (GuiKe ZY21195030), Guangxi Science and Technology Base and Talent Project in 2022 (GuiKe AD21238010), and Guangxi Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metals and Featured Materials (2021GXMPF02).

✉ lianmin@gxu.edu.cn; xiaodong.wang@ucas.ac.cn

21020076-1

DOI: 10.11896/cldb.21020076

总结了探针法、卡门涡街探头法、涡流流量法、超声波多普勒测速技术(UDV)、非接触感应流层析成像技术(CIFT)、洛伦兹力测速技术(LFV)的发展历程和研究进展,分析了各自的优缺点和适用场景,为科研工作者开展新技术的研究提供参考。

## 1 接触式测速方法

### 1.1 探针法

探针法作为古老传统的测速技术,具有结构简单、操作便捷等特点,主要根据浸入式的探针与流体速度的某些特定关系来反映流速,分为反应探针法、熔融探针法、Vives 探针法等几大类。反应探针法是借助作用在探针上的拖曳力与流速之间的线性关系确定流速,最初使用的探针形状为圆盘形,但测量结果极易受流动方向的影响,球体的阻力系数不依赖于流动方向,可以采用球体代替圆盘形来克服流动方向对测量精度的影响<sup>[3]</sup>,该方法结构简单,曾在工业测量中广泛应用,但测量结果极易受流速的增长和弯月面的波动影响,很难在高温高速的湍流流体中得到精准的结果,结构示意图见图 1a;熔融探针法<sup>[4]</sup>是将具有相同化学成分的金属球浸入金属液中,根据金属球的熔化速率与流速之间的线性关系确定流速,结构示意图见图 1b,该方法适合于约 700 °C 的高温熔体,但是金属球的几何形状与熔体温度之间的关系不易掌控,而且金属球在高温时熔化较快,不利于工业上的连续测量;Vives 探针法<sup>[5]</sup>根据电磁感应的原理,当导体在磁场中移动时,产生的电场强度与导体速度呈线性关系,通过测量不同导体尖端 A 和 B 之间的电位差即可确定与电位相关的流体速度,结构图如图 1c 所示,该方法适用于温度低于永磁体居里温度的熔融金属流,相对于热膜探头有更长的使用寿命(约一年),不易受流体温度和物理性质波动的影响<sup>[5]</sup>,不足之处在于其仅适用于测量较短时间内的平均速度,且易受外部磁场干扰,无法测量高速湍流流动。以上方法虽然逐渐被新兴的测速技术所取代,但是凭借其结构简单、成本低廉、操作方便等优势依然以辅助验证的形式存在于实验室校准和工业测量之中。

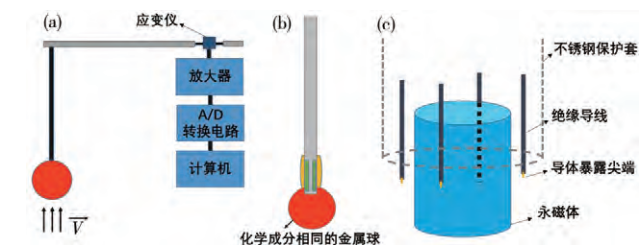


图 1 (a) 反应探针测量系统<sup>[6]</sup>; (b) 熔融探针结构<sup>[4]</sup>; (c) Vives 探针结构<sup>[5]</sup>

Fig.1 (a) Reaction probe measurement system<sup>[6]</sup>; (b) structure of melting probe<sup>[4]</sup>; (c) structure of Vives probe<sup>[5]</sup>

### 1.2 卡门涡街探头法

卡门涡街探头法和探针法具有相似的原理,但其测量结果不易受流体温度变化、化学成分、液面波动等因素影响,具有更高的工业适用性。实际工作时,圆柱体探头后方形成的尾迹会随雷诺数的变化产生不同模式的流动特征,当雷诺数

大于 40 时,探头会因卡门涡街的脱落产生周期性的振荡,通过对振动频率的测量,并根据雷诺数、脱落频率、流速三者之间的关系式确定流速,原理图见图 2a。

Iguchi 团队一直专注于此装置的研究和改进。首先,应用卡门涡街探头法成功测得了室温下管道内水的流量,并在熔融伍德合金液的流速测量实验中探究了试验缸直径、温度、长宽比、倾斜角对实测速度数据的影响<sup>[3]</sup>。其次,将这一装置应用到连铸工艺内弯月面流速的测量之中<sup>[7]</sup>,其实物图见图 2b,并验证得出当探头浸入金属液中的深度  $H$  与圆柱形探头直径  $D$  之比近似大于 6 时,脱落频率  $f$  不受  $H$  影响,意味着弯月面高度的波动不会影响卡门涡街探头的正常工作,这对液面极易波动的工业测量意义重大。随后,为了适用于更低流速的流体,将卡门涡街测速法的探头改进为三角形圆柱体,使其能够在已知弯月面流动方向的条件下,实现 5 ~ 20 cm/s 的低流速探测<sup>[8]</sup>,实验装置见图 2c。

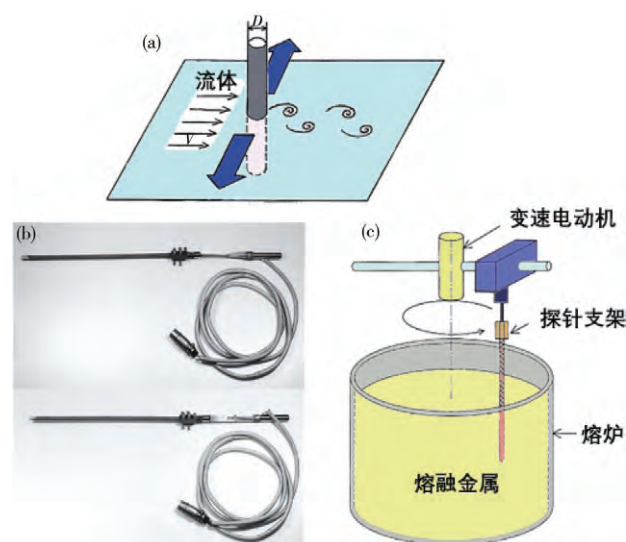


图 2 (a) 卡门涡街探头结构<sup>[3]</sup>; (b) 卡门涡街探头实物图<sup>[7]</sup>; (c) 三角形圆柱探头的实验装置图<sup>[8]</sup>

Fig.2 (a) Structure of Karman vortex probe<sup>[3]</sup>; (b) photographs of Karman vortex probe<sup>[7]</sup>; (c) experimental setup diagram of triangular cylindrical probe<sup>[8]</sup>

卡门涡街探头法的测量结果不受熔融金属化学成分、温度变化和液面波动的影响,结构简单,成本较低,精度可满足一般工业要求,适用于 1 000 °C 左右的高温熔体的流速测量<sup>[9-10]</sup>。这些优势使其超越了当时常用的测速方法,但长时间在高温熔融金属液中工作,测量探头会有一定程度的腐蚀,影响设备的使用寿命,适用场景仅限于冶金反应器中靠近金属液表面的一维流动,以上缺点使其应用受到限制。

### 1.3 涡流流量法

在核工业中,快中子增殖反应堆内钠流量的流速检测对保证钠泵的良好运行和安全稳定至关重要<sup>[11]</sup>。向反应堆中输送液态钠可实现燃料的快速冷却,检测钠流速有利于及时探测组件中的流量堵塞与排放管爆破等问题。适合于反应堆的高辐射区的测速装置是涡流流量法(Eddy current flow meter, ECFM),该系统由交流发电机激励的一个初级线圈和两个次级线圈组成,当钠液运动时,两个次级线圈产生运动电压,上游线圈的电压为运动电压与变压器电压之差,下游



线圈的电压为运动电压与变压器电压之和,两线圈的电压之差与钠流速成正比<sup>[12]</sup>。利用电压差与流速的线性关系确定金属液的速度,ECFM的原理图和实物图见图3a、b。

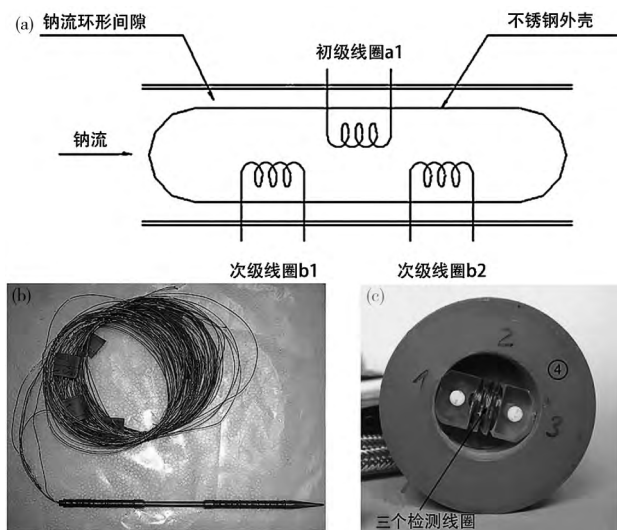


图3 (a) ECFM原理示意图<sup>[12]</sup>; (b) ECFM传感器实物图<sup>[12]</sup>; (c) TECFM在旋转铝液中的测速图<sup>[17]</sup>

Fig.3 (a) Schematic representation of ECFM<sup>[12]</sup>; (b) physical map of ECFM sensor<sup>[12]</sup>; (c) velocity measurement diagram of TECFM in rotating aluminum liquid<sup>[17]</sup>

孔隙率和流速是两个相互关联的物理量,核工业钠冷快堆中的气泡也是一个很重要的检测指标,其不仅会使反应堆核心产生反应性的变化,还会降低组件与金属液间的热传递,并作为热交换器泄露的标志对生产安全和泵的使用寿命造成影响<sup>[13-14]</sup>。利用ECFM中线圈的电压差与孔隙率成正比的关系,可以实现对双相流中孔隙率的检测。Kumar等<sup>[15]</sup>应用椭圆拟合算法建立起椭圆的振荡频率与分散相体积分数的特征函数,通过椭圆倾斜度的波动表征空隙的分布和大小,结果表明,该方法测得的孔隙率信号精准且快速,不过保持流动的稳定性是该方法正常工作的前提。

ECFM应用于管道流动常会出现易受流动角影响和响应速度慢等问题,为此研究人员进行了诸多探究。首先,管道流动的方向大多平行于传感器的轴线,在实际工作中流动角会因反应堆的反应迅速变化,Krauter等<sup>[16]</sup>通过数值模拟和实验研究发现,ECFM可在30°的流动角度下稳定工作,在更大的角度下测量的灵敏度会显著降低。其次,为了缩短ECFM在钠液中测速的响应时间,避免组件装置因流速减少、温度升高而导致的烧毁问题,Poornapushpakala等<sup>[11]</sup>采用易于排除故障并快速处理的电路板设计了一种电子设备,加快了交流到直流转换的处理速度,使系统的响应时间由1.5 s缩短到25 ms。除此之外,ECFM在开放通道中同样具有广泛的应用,Forbriger等<sup>[17]</sup>设计了一种可以追踪的涡流系统,应用脉冲的数据采集方法从三个检测线圈中感应电流的磁信号的变化中推断出流速,并称之为瞬态涡流流量计(Transient eddy current flow metering, TECFM),成功在旋转铝液上进行了测量,适用于开放和封闭管道或容器中的流动,线圈系统的详细视图见图3c。该方法最大优势在于不使用磁性材料、不受导体电导率和温度变化等影响、无需校准传感器,但其综

合的数值分析仍需在大量的实践中不断改进<sup>[18]</sup>。随后,Krauter等<sup>[19]</sup>将该装置改进为浸入式的测速仪,优化了励磁和接收线圈的不同布置,使其能够浸入金属液池或管道内部进行局部流速的测量。未来的研究致力于优化激励方案 and 进行更多种类流体的实验以验证传感器的免校准特性。

在核工业上,目前常用的是法拉第流量计,已被广泛应用于在回路型主泵的出口或者各反应器旁的管道,但这种测量电势的方法需要经常校准,这对需要长期使用的核工业情形不利,TECFM的优势是传感器系统没有使用磁性材料,摆脱了电导率波动引起的干扰,而且避免了因磁性部件影响流量计使用性能等问题,适合于电导率波动较大或有杂质气泡流体的流速或孔隙率检测,但在实际工业测量中很难达到传感器周围流速均匀恒定,而且ECFM对温度变化和湍流高度敏感,所以测量结果会有百分之几的附加误差,仍然需要在不同电导率和温度下进行更多的实验<sup>[19-20]</sup>,使其优化改进以适合更广泛的商业应用。

## 2 非接触式测速方法

### 2.1 超声波多普勒测速技术

超声波多普勒测速技术(Ultrasound doppler velocimetry, UDV)的原理是利用超声脉冲回波技术对运动粒子的反向回波信号进行调制和数值转换,保留运动粒子的多普勒频移,并根据颗粒速度与多普勒频移的关系式推导出流体的速度<sup>[21-22]</sup>。实验装置见图4a。该方法与常规光学方法和浸入式的探针法相比具有很大优势,可以测量不透明金属液的流速且成功避免对流体扰动,但是对温度有严格的限制,不适合强化学腐蚀性流体的测量,目前常用作验证其他测速技术正确性的辅助工具。

近几年来,研究人员为了实现UDV在高温和具有湍流结构的复杂流体中工作,付出了很多努力。首先UDV的温度限制在于超声换能器无法在温度过高的环境中工作,人们最初想到的是采用压电材料,但在高温下的压电材料的电性能严重损失,无法满足UDV的灵敏度要求,Eckert等<sup>[23]</sup>设计了一种由波导和电子元件组成的超声波传感器,其结构图和实物图见图4b,利用换能器与流体间发生的热与化学解耦成功测得了750℃液态铝的流体速度<sup>[24-25]</sup>;另一方面,Cramer等<sup>[24]</sup>通过同时应用多个换能器来实现对交变磁场驱动下的复杂流体湍流行为的测量,实验证明示踪剂的浓度和流体的纯度会对超声测量产生显著的负面影响,装置仍需不断完善

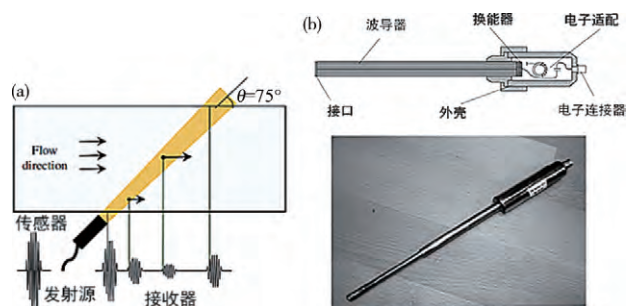


图4 (a) UDV实验装置图<sup>[22]</sup>; (b) 集成超声探头的结构及实物图<sup>[23]</sup>  
Fig.4 (a) UDV experimental set-up<sup>[22]</sup>; (b) schematic view and photograph of the integrated ultrasonic probe<sup>[23]</sup>

才能测量成功。Jaafar 等<sup>[22]</sup>基于频谱识别的方法应用多个脉冲重复频率来减少壁回波的影响,成功测得了管道系统内的湍流流速。

UDV 是一种可以在不透明流体中获得瞬时速度分布的非接触测量方法,被广泛应用于冶金、电化学、医疗等领域,该项技术的难点在于探头顶部与高温金属的润湿问题,随着时间的变化润湿程度不同,这会影响测量结果的前后一致性。确保超声波探头与流体之间充分声耦合是获得可靠的多普勒信号的关键,另外,生成稳定的多普勒信号还需要足够数量的 US 脉冲,这一原理的统计学特性限制了 UDV 的时间分辨率,对于高频湍流的分析仍需要开发更小的电位探头以从局部的时间序列中获得湍流功率谱<sup>[26-28]</sup>。

## 2.2 非接触感应流层析成像技术

非接触感应流层析成像技术(Contactless inductive flow tomography, CIFT)是一种可以重构三维速度场的可视化非接触的测速方法。工作原理为在流动导体上施加一个或多个主磁场,测量相应的感应磁场的扰动,通过解决数学上的线性反问题来构建流场,其中存在的非唯一性问题可以通过 Tikhonov 正则化和 L 曲线技术解决。该技术不受流体的不透明、高温、强腐蚀性等特性的影响,适用于实时跟踪各种缓慢的流体变化,在晶体生长和冶金领域都有所应用和发展<sup>[29-30]</sup>。

近 10 年来,西方学者大都将研究的焦点集中于 CIFT 在钢的连续铸造和硅晶体生长的应用上。在板坯连铸工艺中,CIFT 主要解决了如何测量浸入式喷嘴(Submerged entry nozzle, SEN)氩气与金属流体气液分布和如何在电磁制动器(Electromagnetic brake, EMB)存在的情况下实现对金属流体二维流场的重构的问题。首先,为了保证钢坯的质量在连铸过程中会吹入氩气,但是过量的氩气会引起单辊流和直接射流的直接碰撞导致钢的夹渣<sup>[31-32]</sup>,因此需要进行氩气含量的检测。Wondrak 等<sup>[33]</sup>通过将 CIFT 与互感层析成像技术(Mutual inductance tomography, MIT)结合推断出 SEN 中的气/液分布和横截面中的电导率分布,验证了组合电磁可视化技术观测金属流体复杂两相流动的可行性。其次,连铸工艺中 EMB 的作用是减少流体的振荡维持流动的稳定性,但是由此产生的强静电场会干扰 CIFT 的工作磁场,Ratajczak 等<sup>[31]</sup>通过在极靴下方添加励磁线圈,使用比典型的流量振荡更高的频率成功测得了 CIFT 的感应磁场。

半导体晶体生长是 CIFT 另一重要应用领域。在直拉晶体生长中,结晶边缘经常存在大温度梯度导致强烈的温度波动<sup>[34]</sup>,需要通过外加磁场来稳定上述温度变化,进而控制流动结构,保证稳定的热量传输。Wondrak 等<sup>[35]</sup>利用 CIFT 进行了金属流体的瑞利-贝纳德(Rayleigh-Bénard, RB)对流实验,通过在共晶合金 GaInSn 外部配置一对励磁线圈,由多个传感器测量因初级磁场作用下导电液体产生的涡流,在不同的传感器布置方式下,成功测出了 1 cm/s 量级的晶体生长速度<sup>[36]</sup>。实验装置图见图 5。

CIFT 突破了常规光学测量技术、超声波传感器、探针法等无法测量不透明、高温、强腐蚀性流体的限制<sup>[37]</sup>,它的独特优势在于可以获得整个三维流场的瞬态变化,以秒为单位可

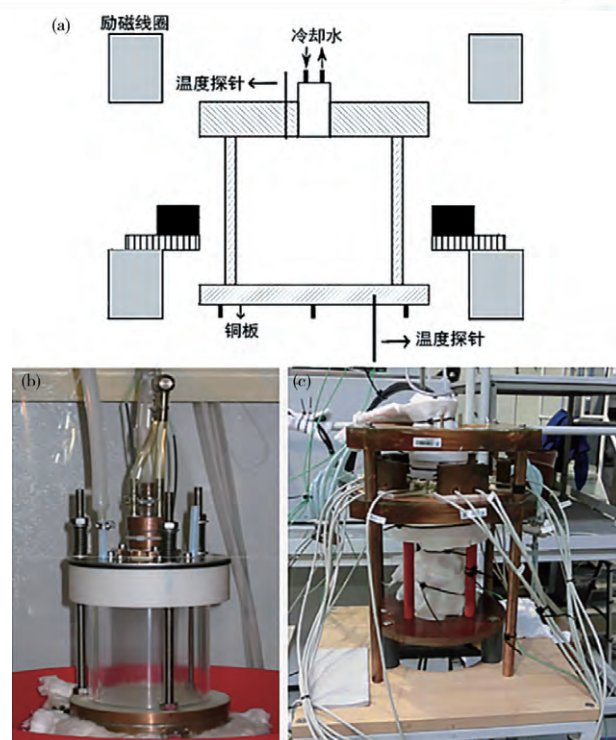


图 5 (a) 对流实验结构图<sup>[34]</sup>; (b) 晶体实物图<sup>[34]</sup>; (c) 对流实验装置图<sup>[34]</sup>  
Fig.5 (a) Schematic sketch of RB experiment<sup>[34]</sup>; (b) photograph of the cell<sup>[34]</sup>; (c) RB experimental set-up<sup>[34]</sup>

以观察到各过程中发生的缓慢流动,在冶金和晶体生长等方面取得了一定成果,但是选用 CIFT 方法还要考虑周围环境中交流磁场的干扰,未来需要更多的研究以获得更高的深度分辨率和信噪比,进而实现对振动等恶劣机械及电磁条件下的工业测量。

## 2.3 洛伦兹力测速技术

法拉第对磁流体动力学(Magnetohydrodynamics, MHD)的发展具有重大贡献,在 19 世纪,他尝试测量由泰晤士河在地球磁场中的运动引起的电压,这是历史上第一次应用磁流体动力学进行的实验<sup>[38]</sup>。洛伦兹力测速仪(Lorentz force velocimetry, LFV)应用相近的原理,当移动导体在磁场中运动时,会受到一个阻碍其运动的洛伦兹力,根据牛顿第三定律,磁系统同时会受到一个与该洛伦兹力大小相等且方向相反的反作用力,根据该反作用力与导体电导率、移动速度之间的线性关系确定移动导体的速度,原理图见图 6a。洛伦兹力测速技术具有无接触、原位、实时测量等优点,主要针对高温、不透明、腐蚀性金属液的测量,与常规方法相比具有巨大优势。

近些年来,西方学者对洛伦兹力测速仪的改进主要集中在磁场优化和工业应用两方面。2006 年,Thess 等<sup>[39]</sup>首先改进了洛伦兹力测速仪,使其能够应用到流体测速之中,并预测该装置可以适用于低电导率流体;多年后,Halbedel 等<sup>[40]</sup>通过两方面的改进实现了这一设想,一方面通过使用具有更高磁通密度的 Halbach 方式布置的永磁体<sup>[41]</sup>,减少了不利的杂散磁场,使洛伦兹力增至原来的三倍,布置方式见图 6b,另一方面采用电磁力补偿的高精度测力系统,降低相对测量的不确定度(<1%)。这种新颖的 LFV 可以测得电导率小于  $6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  的弱电解质在  $0.2 \sim 3 \text{ ms}^{-1}$  之间的流速。之后, Vasilyan 等<sup>[42]</sup>采



用高精度差分力测量装置,将这一测量范围扩展至  $0.06 \sim 10 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  的弱电解质在  $0.2 \sim 2.5 \text{ ms}^{-1}$  之间的流速,虽然相对之前的工作有了很大改进,但对于腐蚀性流体(如玻璃熔体、酸液、碱液),由于隔离壁过大、流体和闭合磁场无法实现相互作用、磁体的最大磁通密度受限等原因,该方案不能很好地运行。2018 年 Vakaliuk 等<sup>[43]</sup> 提出了使用块状高温超导材料(High temperature superconducting, HTS)作为准永磁体的理论性证明,并在铜和铝棒的测速实验中进行了验证,由此产生的极高磁场使 LFV 可在具有腐蚀性的弱电解质中使用,这些结果可作为开创新型高性能 LFV 研究的起点。

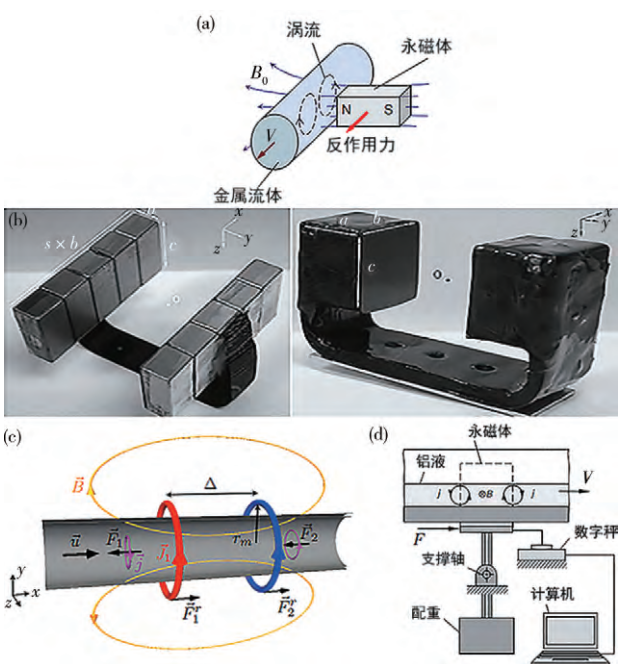


图 6 (a) 洛伦兹力测速仪原理示意图<sup>[38]</sup>; (b) 磁铁系统配置图: 左—Halbach 方式布置, 右—传统方式布置<sup>[40]</sup>; (c) ToF LFV 技术原理示意图<sup>[44]</sup>; (d) 测量再生铝流量计结构图<sup>[46]</sup>  
Fig.6 Schematic of Lorentz force velocimetry<sup>[38]</sup>; (b) magnet system configurations: left—Halbach array, right—conventional magnets<sup>[40]</sup>; (c) schematic of ToF LFV<sup>[44]</sup>; (d) structure of measuring secondary aluminum flowmeter<sup>[46]</sup>

在实际工作中,电导率会受温度和合金成分的变化而波动,还是会给 LFV 的测量结果带来误差,近些年来一直有学

者探索如何让其使用摆脱电导率的束缚。2010 年 Viré 等<sup>[44]</sup> 研发了一种不依赖导体电导率的新型 LFV,它围绕圆形管道放置一个或两个线圈,记录当管道内流体流过时线圈产生的两个相互抵抗的力,通过测量经过两个流量计之间的时间差,根据流量计之间的距离,计算出局部位置下的平均速度,不过测得的结果完全依靠数值模拟,并没有进行实验验证,原理图见图 6c。时隔两年后, Jian 等<sup>[45]</sup> 在此基础上设计了双探头式的测量装置,成功测得了 GaInSn 熔体的流速。该设计原理虽然不受流体的电导率、温度、化学成分等物理参数影响,但由于时间差和间隔距离的限制,只能反映整体的平均流速,不需要严格的校准,不过局部磁场引起的流体表面变形会限制该技术的应用,未来仍需要使用更复杂的数据收集系统、更灵敏的力传感器和不同尺寸的磁体进行反复的模拟实验才能更好地应用此方法。

近些年来, LFV 在工业领域的应用逐渐向更多的工业领域拓展,2011 年, Kolesnikov 等<sup>[46]</sup> 利用洛伦兹力流量计(Lorentz force flowmeter, LFF)实现了再生铝生产中液态铝合金的流量监控,解决了实际生产中无法准确评估废料性能和确定合金成分等难题,充分证明了 LFF 在黑色金属和有色金属冶金中的应用潜力,测量装置见图 6d。2020 年,郑锦灿等<sup>[47]</sup> 利用 LFV 实现了对连续热镀锌工艺中锌锅内锌液表面流速的测量及在线监控,为实施工业测量和构建数值模拟方案提供了新思路和新选择;除此之外, Wang 等<sup>[48-49]</sup> 利用导体中的非金属杂质和缺陷在经过永磁体磁场时产生的电磁力信号的突变,无损检测出导体中的绝缘颗粒和缺陷,进一步扩展了洛伦兹力在材料领域的应用范围。

洛伦兹力测速技术基于电磁感应原理,实现了流速的非接触式测量,凭借着高精度、可实时在线测量等优势备受工业技术人员的青睐,不过 LFV 易受外部磁场干扰,但 Tan 等<sup>[50]</sup> 的研究表明, LFV 在中等外部磁场下可以正常工作,当 LFV 测量的力小于静磁力的 1% 时,测量变得困难,在更强外部磁场下工作的情况仍需进一步研究和验证。近些年来,诸多学者对 LFV 进行改进,逐步实现了对更低电导率、更低流速、更强腐蚀性流体的测量<sup>[51]</sup>。目前,王晓东课题组正在研发可以在核工业中应用的新一代 LFV,相信其能够成为多领域流速测量的强大工具。

表 1 各种流体测速技术优缺点总结及应用领域

Table 1 Summary of advantages and disadvantages of each fluid velocity measurement techniques and their scope of application

测速方法	优点	缺点	主要应用领域
探针法	结构简单,操作方便	易受湍流,弯月面波动影响,不耐高温,探头易被腐蚀	较低温度下的简单一维流动,可用于实验室校准
卡门涡街探头法	不受熔融金属物理性质和局部温度不均匀性的影响,操作简单	不适于化学腐蚀性强的流体,无法长期连续工作	约 1 000 ℃ 左右的金属液表面的一维流动,可用于实验室校准
涡流流量测速法	体积小,耐高温,抗辐射,易于维护	响应时间慢,易受温度变化和湍流影响	结构紧凑、可在狭窄的通道中使用,适用于核工业流速测量和孔隙率检测
超声波多普勒测速法	非接触式,即时获得瞬态速度	不适于高温、强腐蚀性流体测量	冶金、电化学、医疗等领域下的低温不透明流体
非接触感应层析成像技术	非接触式,可重构三维速度场	技术要求高,测量系统较复杂	冶金或半导体晶体生长,可实时监控缓慢的流动变化
洛伦兹力测速法	非接触式,实时在线测量,工业适用性强	永磁体易受环境的静磁干扰	再生铝生产、连铸工艺、连续热镀锌工艺等高温湍流流体

### 3 结语与展望

近十几年来,流体测速技术获得了国内外学者的广泛关注,实现了技术上的突破与革新,本文通过介绍不同测速方法的原理及研究进展,得出以下结论:

(1) 测速技术逐渐成为一门跨学科、多领域的研究课题,与机械制造、数字模拟、电子信息等技术的联系日益密切,测量方法近几年获得了极大的改进,传统的浸入式测速技术通过探针与流体的独特关系确定流速,但浸入式的方式会给流体造成干扰,在高温、强腐蚀性的流体中,探针本身也会受到一定的影响;UDV、CIFT、LFV等非接触式的技术突破了流体的不透明、高温、强腐蚀等限制,避免了电极腐蚀的问题,实现了对流体更加精准的检测,具有巨大的应用潜力;

(2) 多种测速技术的结合可显著提高测量精度和生产效率。实际测量环境复杂多变,流体的温度、局部速度、湍流强度等信息对合理选择测速方法至关重要,对于中等温度范围内( $<300\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的流体测量,传统的测速技术依然具有较高的应用价值,高速湍流流动是工业中流体的发展趋势,非接触式的测速技术在该特征的流体中具有广阔的研究前景,传统技术则主要以辅助验证的形式存在于实验室校准和工业测量之中;

(3) 各种测速仪器逐渐向着小型化、精准化、便捷化的目标发展,实验测量与数值模拟的结合越来越紧密<sup>[52-53]</sup>,测速技术的应用范围越来越宽广,然而并没有一种方法可以适用于工业测量的所有场景,需要根据不同的技术参数调整测速仪器的类型与结构,高频湍流脉动速度测量仍然是业内研究的重点和难点,如何提高装置的抗干扰能力、简化校准程序、实现更长时间内的稳定运行仍然是科学研究需要努力的方向。

### 参考文献

- Jin G, Jiao J J, Wu X. *Mining & Processing Equipment*, 2015, 43(12), 10 (in Chinese).
- 金光, 焦晶晶, 吴恒. *矿山机械*, 2015, 43(12), 10.
- Rutkevich I M. *Fluid Dynamics*, 1981, 16(3), 414.
- Iguchi M, Takeuchi M, Kawabata H, et al. *Materials Transactions, JIM*, 1994, 35(10), 716.
- Mikrovas A C, Argyropoulos S A. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 1993, 24(6), 1009.
- Lee H C, Evans J W, Vives C. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1984, 15(4), 734.
- Iguchi M, Kawabata H, Morita Z. *High Temperature Materials & Processes*, 2000, 19(3-4), 187.
- Iguchi M, Kosaka H, Hayashi A, et al. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 1999, 30(1), 53.
- Iguchi M, Terauchi Y. *ISIJ International*, 2002, 42(9), 939.
- Iguchi M, Kawabata H, Ogura T, et al. *ISIJ International*, 1996, 36(1), 190.
- Mizukami H, Hanao M, Hiraki S, et al. *Tetsu-to-Hagane*, 2000, 86(4), 265.
- Poornapushpakala S, Gomathy C, Sylvia J I, et al. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 38, 98.
- Sureshkumar S, Sabih M, Narmadha S, et al. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 265, 1223.
- Kumar M, Tordjeman P, Bergez W, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(10), 106104.
- Guichou R, Ayroles H, Zamansky R, et al. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(9), 94504.
- Kumar M, Tordjeman P, Bergez W, et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 1, 1.
- Krauter N, Galindo V, Wondrak T, et al. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2021, 86(10), 106104.
- Forbriger J, Stefani F. *Measurement Science & Technology*, 2015, 26(10), 105303.
- Looney R, Priede J. *Flow Measurement Instrumentation*, 2017, 1705, 02939.
- Krauter N, Stefani F. *Measurement Science & Technology*, 2017, 28(10), 105301.
- Krauter N, Stefani F. *Materials Science and Engineering*, 2018, 424(1), 12004.
- Eckert S, Gerbeth G. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(5), 542.
- Jaafar W, Fischer S, Bekkour K. *Measurement*, 2009, 42(2), 175.
- Eckert S, Gerbeth G, Melnikov V I. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(5), 381.
- Cramer A, Zhang C, Eckert S. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2004, 15(3), 145.
- Eckert S, Gerbeth G, Melnikov V I. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(5), 381.
- Eckert S, Buchenau D, Gerbeth G, et al. *Journal of Nuclear Science & Technology*, 2011, 48(4), 490.
- Perez A, Kelley D H. *Journal of Visualized Experiments*, 2015, 102, 52622.
- Gates P E, Gurung A, Mazzaro L, et al. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2018, 44(7), 1392.
- Ratajczak M, Gundrum T, Stefani F, et al. *Journal of Sensors*, 2014, 2014, 1.
- Stefani F, Gundrum T, Gerbeth G. *Physical Review E*, 2004, 70, 56306.
- Ratajczak M, Wondrak T, Timmel K, et al. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2015, 15(1), 41.
- Wondrak T, Galindo V, Gerbeth G, et al. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(4), 45402.
- Wondrak T, Eckert S, Gerbeth G, et al. *Steel Research International*, 2014, 85(8), 1266.
- Wondrak T, Pal J, Stefani F, et al. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, 62, 269.
- Wondrak T, Stefani F, Galindo V, et al. *Materials Science and Engineering*, 2018, 424(1), 12007.
- Wondrak T, Galindo V, Stefani F, et al. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2019, 59(4), 1291.
- Ratajczak M, Wondrak T, Stefani F. *Philosophical Transactions A*, 2016, 374, 2070.
- Davidson P A. *An introduction to magnetohydrodynamics*, Cambridge University Press, UK, 2001.
- Thess A, Votyakov E V, Kolesnikov Y. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16), 164501.
- Halbedel B, Resagk C, Thess A, et al. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2014, 92(1), 361.
- Werner M, Halbedel B. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(11), 2925.
- Vasilyan S, Ebert R, Weidner M, et al. *Measurement Science & Technology*, 2015, 26(11), 115302.
- Vakaliuk O V, Ainslie M D, Halbedel B. *Superconductor Science & Technology*, 2018, 31(8), 84003.
- Viré A, Knaepen B, Thess A. *Physics of Fluids* (1994), 2010, 22(12), 125101.
- Jian D, Karcher C. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(7), 894.
- Kolesnikov Y, Karcher C, Thess A. *Metallurgical and Materials Transactions B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2011, 42(3), 441.
- Zheng J C, Liu R C, Wang X D. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(7), 3 (in Chinese).
- 郑锦灿, 刘润聪, 王晓东. *金属学报*, 2020, 56(7), 3.
- Wang X D, Thess A, Moreau R, et al. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(1), 188.
- Wang B, Wang X D. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(12), 125601.

- 50 Tan Y Q, Liu R C, Dai S J, et al. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, 29(6), 80.
- 51 Kolesnikov Y, Karcher C, Thess A. *Metallurgical and materials transactions B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2011, 42(3), 441.



王畅, 2020年毕业于河北科技大学, 获得工学学士学位。现为广西大学与中国科学院大学联合培养硕士生, 主要研究方向为材料的电磁过程。



李安敏, 通信作者, 广西大学资源环境与材料学院副教授、硕士研究生导师。1995年7月本科毕业于武汉科技大学材料系, 2010年6月在广西大学结构工程专业取得博士学位。主要从事高熵合金、铝合金的强韧化、复合材料的研究工作。近年来, 在高熵合金、铝合金、复合材料等领域发表论文30余篇, 包括 *Journal of Materials Engineering and Performance*、*Acta Metallurgica Sinica*、*Journal of Electronic Materials* 等。

- 52 Carmen Stelian. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2013, 33, 36.
- 53 Wang X D, Kolesnikov Y, Thess A. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4), 45005.

(责任编辑 李承佳)



王晓东, 通信作者, 2002年博士毕业于大连理工大学, 同年, 进入德国伊尔梅瑙科技大学 (Ilmenau) 从事博士后研究, 从事纳米磁性材料的研究工作; 2003—2008年在法国国家科研中心 (CNRS) 材料的电磁过程研究所 (EPM/SIMAP) 从事材料的电磁过程的研究工作; 2008—2010年在加拿大麦吉尔大学 (McGill) 从事电磁检测方面的工作; 2010—2011年在德国伊尔梅瑙科技大学 (Ilmenau) 从事磁流体力学方向的研究工作, 现为中国科学院大学材料科学与光电技术学院教授, 博士研究生导师、中国科学院“百人计划”入选者。发表论文70余篇, 发表著作两部, 从事与电磁场相关的材料科学研究工作。