



# 振动式钢包下渣检测方法及其关键技术研究进展

谭大鹏<sup>①②\*</sup>, 计时鸣<sup>①</sup>, 李培玉<sup>②</sup>, 潘晓弘<sup>②</sup>

① 浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014;

② 浙江大学机械工程学系, 杭州 310027

\* E-mail: tandapeng@zjut.edu.cn

收稿日期: 2010-03-29; 接受日期: 2010-06-13

国家自然科学基金(批准号: 50905163, 50875242)、浙江省自然科学基金(批准号: Y1090836, Z107517)和浙江大学争创全国百篇优秀博士论文计划(批准号: 2007001A)资助项目

**摘要** 钢包下渣检测技术对钢铁连铸生产具有重要实际意义, 它可以有效地提高铸坯质量、增加钢水收得率以及延长中间包的使用寿命. 综述国内外钢包下渣检测技术方法及其应用情况, 指出其在实际应用过程中存在的主要问题. 对振动式钢包下渣检测方法的检测原理、信号处理流程等技术难点进行了重点描述. 针对振动式钢包下渣检测技术存在的识别稳定性低、调试适用时间长等问题, 对其所涉及的水模实验平台搭建、二相流汇流旋涡卷渣机理、水口套管受迫振动响应及钢流冲击振动信号优化处理等关键技术进行了深入分析, 并给出了相应的研究思路与建议.

**关键词**  
钢包下渣  
汇流旋涡  
卷渣  
冲击振动

随着全球一体化进程的不断深入, 钢铁需求日益增加. 我国的粗钢产量更是增势迅猛, 截止到2008年, 粗钢产量已经达到  $5.02 \times 10^8$  t, 占全球总产量的38%, 超过日本、美国、俄罗斯等七国的总和<sup>[1]</sup>. 但我国钢铁质量水平较低, 出口钢材也是以低附加值的普通钢材为主, 而用于精密机械、仪表以及轿车的高质量钢材基本依靠进口.

钢铁生产中的连铸技术具有生产率和成材率高及节约能源的特点, 同时可减少铸件中夹杂物的含量, 提高铸件质量, 是目前应用最为广泛的冶金技术之一. 利用连铸技术生产钢材的产量占总产量的比重称为连铸比(continuous casting ratio, CCR). 发达国家的 CCR 一般在95%以上, 有些国家如意大利已经达到100%; 我国的 CCR 为94.8%, 高于世界平均水平90.5%<sup>[2]</sup>. 因此在这种高 CCR、低钢材质量的形势下, 提高我国钢铁企业的连铸生产工艺水平与竞争

能力就显得尤为迫切.

在钢铁连铸生产过程中, 氧化剂和钢水中的杂质混合形成液体钢渣, 其比重较轻, 浮于钢水上部. 在钢包浇注后期, 钢渣逐渐从钢包流入中间包, 并在中间包内逐步积累, 影响钢材品质, 严重时甚至使连铸生产无法进行<sup>[3]</sup>. 随着现代工业生产的不断扩大与发展, 对钢铁品种和质量的要求不断提高, 当然对连铸生产中钢水纯净度要求也就越来越高. 连铸下渣检测技术(slag carry-over detection technology, SCDT)就是通过对钢包浇注后期钢水状态的有效识别来控制钢水纯净度, 提高铸件质量与钢水收得率的重要手段之一<sup>[4]</sup>.

SCDT 作为钢铁连铸生产的关键技术, 世界各国尤其是西方发达国家都给予了高度重视. 20世纪80年代末, 德国成功开发出基于电磁感应原理的 SCDT, 成为目前世界上应用最为广泛的 SCDT<sup>[5,6]</sup>. 但电磁

式 SCDT 在应用过程中存在使用寿命短、不易安装维护、使用成本较高等缺点。针对以上问题, 一些其它检测方法逐步被开发应用, 如超声波检测法<sup>[7]</sup>、红外检测法<sup>[8]</sup>、振动检测法<sup>[9]</sup>等, 其中振动检测法能够有效解决电磁检测法存在的问题。与电磁检测法相比, 其在使用寿命、检测准确率、可靠性、系统维护等方面均具有优势。但是振动检测法的技术要求很高, 振动传感器的设计安装、振动信号干扰剔除与分离、处理算法的效率与有效性等问题具有很高的难度, 目前国内尚未能较好的解决以上问题, 开发出具有独立知识产权的振动式下渣检测系统。因此开发一种低成本、可靠性好、检测精度高、使用寿命长的振动式下渣检测系统, 并对其相关技术理论进行研究是非常有必要的工作。

## 1 钢包下渣检测方法及其研究进展

### 1.1 下渣检测方法简介

连铸生产的工艺过程如图 1 所示: 钢水从钢包 1 中流入中间包 2, 再进入结晶器 3, 冷却后凝固成各种截面的铸坯。当流体从一个容器注入另一个容器时, 流体积累的能量尤其是周向动能使液面在降低时产生失稳而形成汇流旋涡。随着旋涡的不断延伸, 其前锋与水口贯穿, 此时漂浮在钢包上部的钢渣将会被卷入中间包<sup>[10,11]</sup>。尽管下渣的原因较多, 但最主要的是汇流旋涡产生的抽力。富含铁(Fe)、硅(Si)、锰(Mn)氧化物的钢渣从钢包流入中间包以后, 会造成钢水中铝(Al)、钛(Ti)等易氧化合金元素的烧损, 产生氧化铝( $Al_2O_3$ )夹杂物, 影响钢水的纯净度, 并容易造成钢材

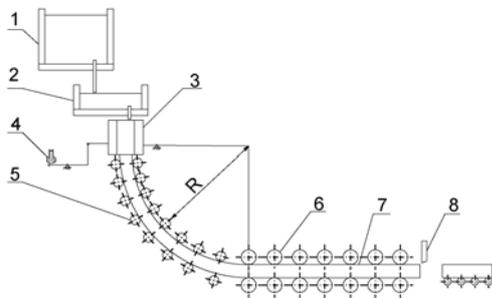


图 1 弧形连铸机生产流程示意图

- 1, 钢包; 2, 中间包; 3, 结晶器; 4, 振动装置; 5, 二次冷却装置;
- 6, 拉坯矫直机; 7, 铸坯; 8, 切割设备

表面质量问题<sup>[3,12,13]</sup>。此外, 钢水中的  $Al_2O_3$  杂质还会造成水口堵塞, 影响连铸多炉连浇, 使连铸生产的正常进行受到很大影响<sup>[14]</sup>。为提高铸坯质量, 增加连铸批次, 必须防止钢渣在钢包浇注后期流入中间包。目前钢包 SCDT 基本采用计算机控制, 将传感器采集的物理信号进行预处理, 然后通过某种算法对钢流浇注状态进行识别; 发现有钢渣混入中间包时, 停止浇注, 从而保证钢材的质量。其基本实现过程如图 2 所示。

现场实验与相关研究表明<sup>[15]</sup>, 采用 SCDT 可以得到以下收益: ① 降低钢包旋涡起旋液面高度即下渣高度, 减少钢包残余钢水, 提高钢水收得率; ② 减少钢包下渣, 提高钢水纯净度; ③ 由于中间包内钢水纯净度的提高, 浸入水口因结瘤而堵塞的现象将得到减轻; ④ 钢包下渣的减少可以减缓中间包内衬的侵蚀, 从而提高中间包的使用寿命; ⑤ 减轻工人劳动强度, 使生产更加人性化。

前面提到, 关于下渣检测的技术方法很多, 下面就一些常见的并已经获得一定程度应用的技术及其发展概况作简要介绍。

### 1.2 下渣检测方法研究概况分析

#### 1.2.1 电磁检测法

电磁检测法的原理是利用钢水与钢渣磁导率的不同来检测下渣的<sup>[16,17]</sup>。20 世纪 80 年代, 瑞典提出在钢包壁两侧分别设置发射线圈和接收线圈用于检测钢包下渣的检测方法<sup>[18]</sup>。同时, 德国亚琛科技大学(Aachen Technical University)冶金研究所的 Julius E 等人也开发了原理相似的 SCDT, 并获得欧共体的资助。1984 年, 以 Julius E 为首的 3 位研究人员成立了阿米帕(Amepa)公司, 在世界范围内推广基于电磁感应原理的 SCDT。1986 年, Abratis H 等人<sup>[19]</sup>首先将电磁式 SCDT 应用于转炉出钢下渣检测; 1987 年, 德国蒂森-克虏伯(Thyssen-Krupp)钢铁公司首先在一台板

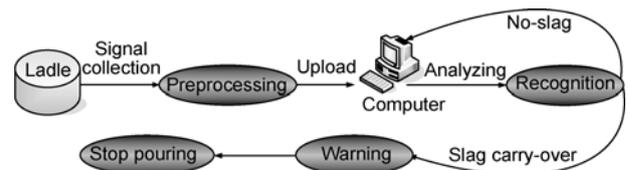


图 2 SCDT 实现方案示意图

坯连铸机上采用了电磁式 SCDT, 取得了满意的结果<sup>[5,6]</sup>. 德国、法国和美国的部分连铸机分别于 20 世纪 90 年代初采用了 Amepa 公司的检测系统<sup>[20-23]</sup>; 到 20 世纪 90 年代中期, 日本的连铸机也采用了 Amepa 公司的技术, 并在韩国浦项钢铁公司(Posco)和台湾中钢公司得到推广应用<sup>[24]</sup>. 中国大陆年产三十万吨钢以上的部分连铸机也已经采用了 Amepa 的技术, 取得了满意的使用效果<sup>[25-29]</sup>. 到目前为止, 全世界共有 250 台以上的连铸机采用了 Amepa 公司的检测系统.

Amepa-SCDT 采用由两个同心环形线圈组成的传感器来检测钢渣, 其工作原理如图 3 所示. 当高频交变电流通过第一个线圈(激励线圈)时, 钢水将有感应磁场产生, 磁场方向可以根据右手螺旋定则判定. 因为钢渣的磁导率远小于钢水的磁导率(1600°C 时其比值为 1:10000), 所以在钢渣中感应产生的磁场则远小于在钢水中产生的磁场(见图 3)<sup>[30,31]</sup>. 在钢包浇注过程中, 开始阶段钢流全部为纯钢水, 产生的感应磁场强度较大; 浇注后期钢流中逐渐有钢渣混入, 使钢流的磁导率下降, 感应磁场则相应减弱. 磁场强度信号由第二个线圈(检测线圈)进行数据采集, 经过放大、预处理等操作后传送至工业控制计算机, 实时显示钢流的浇注状态. 当钢流中的钢渣含量达到预先设定的阈值时, 系统发出报警信号并关闭滑动水口, 停止浇注.

国内的于学斌、王卫平、肖勇等人也对双线圈电磁式 SCDT 进行了独立研究, 并且取得了一定的成果<sup>[32-34]</sup>. 浙江大学的邱东明于 1997 年开发出单线圈传感器, 简化了传感器的结构, 提高了系统可靠性,

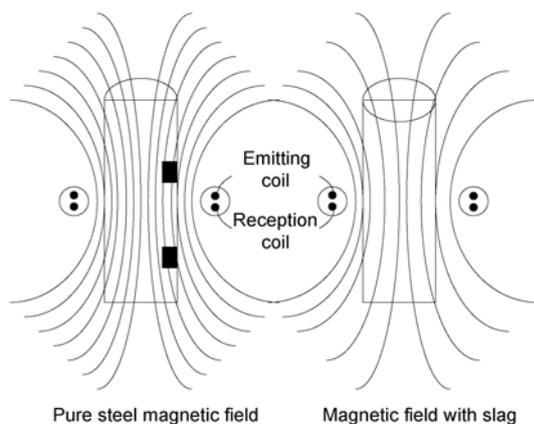


图 3 电磁检测法工作原理

并在杭州钢铁集团公司获得应用<sup>[18,35]</sup>. 衡阳的镭目科技有限公司也成功开发出具有自主知识产权的电磁式 SCDT, 并已经获得较好的经济效益, 其功能已经接近或达到国外同类产品水平.

电磁检测法的优点是它能够实时检测钢流中钢渣含量的多少, 且与水口阀开度无关; 具有较高的检测成功率(90%以上)与较快的反应时间. 但是其应用过程中也存在一些较为突出的问题. ① 价格较高. 例如 Amepa-SCDT 的设备投资至少需要 50 万马克, 对于我国的一些大型钢铁企业来讲, 大量引进该设备, 是一项相当大的投资. ② 安装繁琐. 电磁检测装置的结构复杂, 安装过程比较繁琐, 需要 3~6 个工作日<sup>[20]</sup>, 且安装传感器时需要对接铸生产设备进行一定的改造才能完成, 这将会给连铸生产带来一些负面影响. ③ 维护费用高, 使用寿命短. 由于电磁线圈在恶劣的高温环境下长时间工作, 较容易损坏, 而使检测系统失效, 因此需要定期维护, 更换线圈(线圈的价格较高, 几万至数十万不等)<sup>[9,36]</sup>.

### 1.2.2 红外检测法

红外检测法的原理是利用钢水与钢渣的热辐射系数不同来进行下渣识别的. 物体的结构、表面特征以及温度决定了它的红外线辐射量. 物体向周围环境散发红外能量的效率称为辐射率或者热辐射系数. 如果两个物体的温度相同, 而它们的热辐射系数不同, 通过红外热成像系统可以检测到热辐射系数大的物体显得更“热”一些<sup>[37]</sup>.

1985 年, Miline J M 等人开始将红外热成像技术用于金属与合成材料的表面结构观测<sup>[38]</sup>. 20 世纪 90 年代初, 澳大利亚必和必拓(Broken Hill Proprietary, BHP)墨尔本(Melbourne)实验室的 Chen J 等人将近红外电荷耦合器件(Near Infrared Charge Coupled Device, NIR-CCD)成像技术应用于钢铁工业领域, 实现了对焦炉生产的温度监控<sup>[39]</sup>; 但由于当时的 NIR-CCD 技术只能检测温度低于 350°C 的目标, 其应用范围受到很大限制, 不能满足连铸下渣检测的要求<sup>[40]</sup>.

1989 年, Dewitt D P 等人发现, 在相同的温度条件下, 钢水与钢渣辐射系数是不同的, 且在中远红外区的差异较大<sup>[41]</sup>. Dewitt D P 的研究工作无疑给红外检测法的发展提供了较大推动. 1999 年, 美国伯利恒(Bethlehem)钢铁公司的 Goldstein D A 等人首先利用长波红外成像系统实现了对转炉下渣的检测<sup>[8,42]</sup>.

2000年, 美国林-特姆科-沃特(Ling-Temco-Vought, LTV)钢铁公司的 Peacock G R 对面向转炉下渣的红外检测机理进行了系统、全面的研究论述<sup>[43]</sup>。同年, 德国意特玛(Items)公司的 Zahorszki F 等人也开发出了红外下渣检测系统, 并在 Thyssen-Krupp 钢铁公司获得成功应用<sup>[44]</sup>。之后, 德国 Amepa 公司<sup>[45]</sup>、日本住友(Sumitomo)公司鹿岛(Kashima)钢厂<sup>[46]</sup>、美国阿美特克-兰德(AMETEK-Land)<sup>[47]</sup>、印度塔塔(Tata)钢铁公司<sup>[48]</sup>、美国钮普罗(Nupro)公司<sup>[2]</sup>相继开发出红外下渣检测系统。

国内对于红外下渣检测的研究起步较晚。浙江大学的吴非等人于 2005 年开发出面向转炉下渣的红外检测系统, 且获得实际投产应用<sup>[49]</sup>。

红外检测法的实现方案如图 4 所示, 它属于无接触型检测方法, 不会影响到正常的连铸生产; 对于浇注状态的实时图形显示直观、生动, 可靠性高; 可同时用于钢包浇注与转炉出钢的下渣检测, 且不用经过特殊改造<sup>[50]</sup>。鉴于以上原因, 红外检测法近期发展很快, 并已获得较大面积的推广。但其在应用过程中也存在一些问题: ① 当前连铸生产多采用保护式钢包浇注, 这时红外检测系统只能采集到中间包入口处的有限可见信号, 只能作为其它检测方法的辅助手段使用; ② 易受到高温恶劣环境的影响, 其使用寿命与可靠性有待于提高; ③ 属于后验检测方法, 只有在钢流中混入一定量的钢渣时才能检测到, 且存在不同程度的时间延迟。

### 1.2.3 其他方法

除电磁检测法与红外检测法外, 用于钢包下渣检测的技术方法还有超声波检测法、称重法与振动检测法(见本文第 2 节)。超声波检测法是多伦多(Toronto)大学的 Walker D I 等人于 20 世纪 90 年代初提出的, 其原理是利用钢流有渣和无渣时的超声反

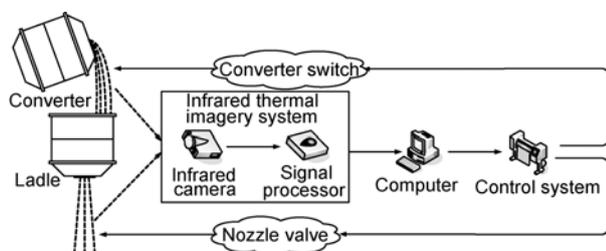


图 4 红外检测法实现方案

射信号差异来实现对钢渣的检测<sup>[7]</sup>。超声检测法主要有浸入式检测与侧壁式检测两种方式, 本文以浸入式检测为例进行简要说明。

如图 5 所示, 浸入式超声检测法主要由超声脉冲发生器、超声发射探头、超声接收探头、信号放大器与工业控制计算机组成。发射探头和接收探头安装在中间包内, 并配有传播导向装置, 使超声的反射区域限定在一定范围内(底部或侧壁)。若反射区域为侧壁, 当没有下渣时, 系统会捕捉到从两个侧壁反射回来的 2 个尖峰反射信号; 当有钢渣进入中间包时, 超声波遇到钢渣会产生反射, 这时系统将得到 3 个或更多个尖峰信号(见图 5)<sup>[51,52]</sup>。

侧壁式检测的原理与浸入式检测的原理是相同的, 只是传感器安装的位置有所不同。超声下渣检测装置比较容易安装, 且不会对浇注过程产生影响, 但其存在的主要问题是: ① 与红外法、电磁法一样, 超声检测法同样属于后验检测, 它只有在钢渣连续的流到中间包以后才能检测出来; 在对钢水洁净度要求较高的情况下, 是不能满足实际生产需求的。② 超声法为接触型检测, 超声波探头的工作环境温度高达 1600℃, 很容易被烧毁而使检测系统失效。由于以上问题, 超声检测法目前仅停留在实验阶段; 进入 2000 年以后, 未见相关方面的研究报道。

称重法的原理是根据钢包与钢水总重量时间变化率的改变来判断下渣发生的<sup>[36,53,54]</sup>。称重检测法在原理上无疑是成功的, 但其在实际使用中却存在较大的限制: ① 称重法要求滑动水口开度维持不变, 这容易与实际生产操作产生冲突; ② 要求称重设备有足够的称量精度, 这就需要一种量程大(50 t 以上)、分辨率高(1 kg 左右)、抗干扰能力强的称重传感器<sup>[55,56]</sup>, 而这一要求在目前来讲还较难满足; ③ 称

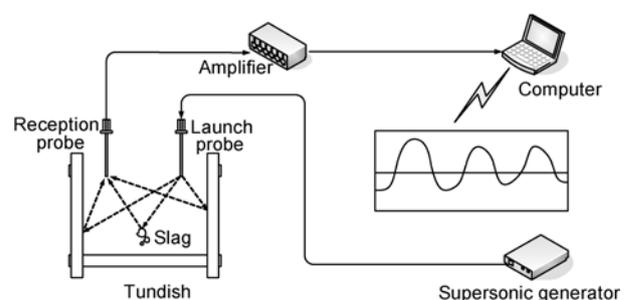


图 5 浸入式超声波检测法实现原理

重法存在较大的时间延迟,当重量变化率发生明显改变时,已有一定量的钢渣进入中间包.鉴于以上问题,称重法目前只能作为其它检测方法的辅助手段使用.

## 2 振动检测法及其研究进展

### 2.1 振动检测法原理

相关研究与现场实验调研结果表明<sup>[9,36]</sup>,在钢包浇注过程中,由于钢流的冲击作用,浸入在中间包中的水口保护套管和与之相连的操作臂会产生一定幅度的振动;水口开度越大,钢流流量越大,振动就越剧烈.因为钢渣的比重较小,只有纯钢水比重的0.4~0.6倍,所以由钢渣流动与纯钢水流动引起的冲击振动必然有差异.只要检测到这种差异,就能有效的判断注流下渣的发生.

振动式 SCDT 的实现方案如图 6 所示,在操作臂远离水口保护套管的一端安装一个振动传感器(加速度传感器或位移传感器),传感器通过专用信号线与工控计算机相连.这样钢流在保护套管中流动时所引起的冲击振动就会传递到操作臂上,并通过传感器把振动信号传送到计算机内,然后经过相应的信号处理算法来判断钢流中是否含有钢渣.当钢流中含有的钢渣量达到或超过预先设定的阈值时,计算机就会发出关闭滑动水口的控制信号,驱动相应的控制装置,停止浇注.从图 6 可以看出,振动式下渣振动检测装置结构简单,易于安装、拆卸与维护,且不会对连铸生产造成任何影响;另外,振动传感器安装在远离钢流的操作臂上,成功的解决了高温环境下传感器的易耗问题,使检测系统的运行可靠性与

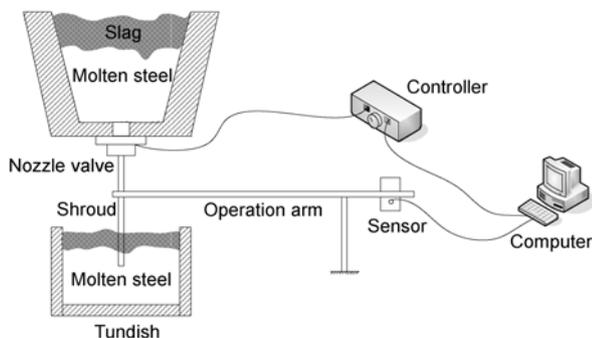


图 6 振动式 SCDT 实现方案示意图

使用寿命大大增加.

### 2.2 振动检测法研究进展

20 世纪 80 年代初,日本川崎(Kawasaki)制铁千叶(Chiba)厂的伊藤俊之等人首先提出利用振动传感器来检测钢包下渣的方法<sup>[57]</sup>. Kawasaki-SCDT 主要由加速度传感器、信号放大器、模数转换器与振动幅值演算器组成,并配有下渣自动控制装置.通过绘图仪获得的振动时域信号发现,下渣时的振动信号幅值有明显减小,约为未下渣时振幅的 30%~40%,这时系统可以发出水口控制信号,并通过驱动器关闭水口,停止浇注.虽然该系统可以将下渣延迟时间控制在 3 s 以内,具有较可靠的反应时间,但它仍是一种后验检测方法,即当有一定量的钢渣进入水口套管致使钢流冲击信号发生明显变化时才能检测到下渣的发生.

1991 年, BHP 的 Trotter D J 等人使用加速度传感器测量操纵臂的机械振动强度,进而判断钢流的浇注状态,并在其纽卡斯尔(Newcastle)钢厂和肯布拉港(Kembla Port)钢厂进行了试验研究.但由于各种环境干扰对操作臂振动影响较大,因此检测的准确性难以保证,容易产生误报现象;需要通过人工调谐的方法,在保持灵敏度的前提下降低失误率,这使系统的实际应用受到很大的限制<sup>[58,59]</sup>. 1994 年, BHP 的 Barrow R 等人在上述系统的基础上,利用人工神经网络(artificial neural network, ANN)技术对振动信号进行处理识别,使检测成功率得到了明显改善,且与电磁式检测系统进行了性能对比,但其需要针对具体的检测对象进行长时间的调试,且稳定性还不能满足连铸生产的实际要求<sup>[60]</sup>.

1997 年,日本钢管公司(Nihon Kokan Kabushiki-gaisha, NKK)提出了一种通过振动传感器测量流经空气密封管(水口保护套管)的钢流振荡级别差异,利用快速傅立叶变换(fast Fourier transform, FFT)与神经网络技术分析振动信号的功率谱来判断下渣发生的方法,并获得了专利授权<sup>[61]</sup>.由于连铸生产现场存在诸多干扰信号(机械振动干扰或电气干扰),通过简单的 FFT 与神经网络算法对采集的现场振动信号进行直接处理,实现对钢流浇注状态的识别是难度很高的,因此上述方法未能得到推广应用.

由于振动式 SCDT 技术要求较高以及当时科技条件的限制,致使其提出以后发展缓慢.但随着计算

机与传感器技术的不断进步, 进入 2000 年来, 振动式 SCDT 获得了较快发展. Toronto 大学的 Walker D I 等人成功的开发出振动下渣检测系统, 并以此为基础成立了 Nupro 公司, 其产品已经在美国、印度等国家的 20 余条连铸线上获得应用<sup>[62,63]</sup>. Nupro-SCDT 在墨西哥伊思帕特公司(Imexsa)某台板坯连铸机的应用效果证明, 其在检测成功率、响应时间等方面要优于电磁式 SCDT, 钢包残余钢水量可减少 1 t, 中间包残壳量减少 50%以上, 且可以提高钢包水口套管与中间包浸入式水口的使用寿命<sup>[9]</sup>. 2003 年, 美国威苏威(Vesuvius)公司的 Uhlenbusch J 等人开发出振动式 SCDT, 并辅助以红外检测技术使系统的可靠性得到保证; 能够对旋涡卷渣过程进行检测, 实现对下渣检测的提前预警<sup>[64]</sup>. 提前预警就意味着在钢渣未进入水口保护套管之前就可以预测到下渣过程的发生, 这与电磁检测法、红外检测法等有着本质的不同, 即实现了对钢包下渣的先验检测. 同年, 日本新日本制铁公司(Nippon Steel Corporation)也成功开发出振动式 SCDT, 其主要利用无渣与下渣时的时滞向量关系进行下渣检测<sup>[65]</sup>.

国内方面, 浙江大学机械系的李培玉等人从 2000 年开始对振动式 SCDT 进行研究, 并于 2004 年获得国家自然科学基金项目(50374061)支持, 独立开发的振动式下渣检测系统已经在武钢、首钢、济钢、台湾丰兴等十余家企业获得应用, 成果显著<sup>[36,66-68]</sup>. 浙江大学仪器系的王友钊等人结合虚拟仪器技术振动式 SCDT 进行了初步研究, 并在南京、杭州等钢厂取得一定的试用效果<sup>[69]</sup>.

振动检测法是一种间接接触型检测方法, 主要优点为: ① 与电磁法、红外法等检测方法不同, 振动法可以通过对汇流旋涡振动信号的判断, 实现对钢包下渣的先验检测; ② 振动传感器可以安装在远离钢流的低温区域, 使检测系统使用寿命得到可靠保证, 且不会对正常的连铸生产造成任何不良影响; ③ 设备构造简单, 易于安装、拆卸与维护, 不需要对现有的连铸生产设备进行改造; ④ 制造成本低, 易于推广.

振动法作为一种新兴的检测方法已经获得了一定的成功, 但其在应用过程中主要存在以下几个问题: ① 由于钢流的冲击力是很有限的, 因此系统采集的水口冲击振动信号相对比较微弱, 容易被连铸生产现场环境干扰所淹没, 而使系统产生错误判断

而不能保证系统识别的稳定性; ② 信号识别要求高, 检测特征参数的确定需要大量的实验数据以及现场实践经验作为支持, 而这将给系统的应用范围与有效性带来问题; ③ 由于下渣冲击信号具有突变性质, 且随机性较强, 这使振动式 SCDT 需要较长的调试时间才能满足实际的连铸生产需求. 造成以上问题的根本原因是缺乏对钢包下渣机理及其振动动力学特性的深入研究.

### 3 面向振动下渣检测的关键技术理论研究

利用振动法进行下渣检测的基本思路是比较简单的, 就是通过振动传感器采集钢流冲击振动信号, 然后进行滤波、干扰剔除等预处理操作, 分离出有用的下渣特征信号, 以达到对下渣过程进行识别的目的. 但是现场采集到的钢流振动信号是比较微弱的, 且夹杂了众多环境干扰成分, 这给振动式 SCDT 的具体实现提出了较高要求. 在本文第 1 节中提到, 汇流旋涡是引起钢包下渣的主因, 因此对于汇流旋涡产生过程、卷渣机理及其振动动力学特性的研究将是必要的. 此外, 对于振动式 SCDT 的直接检测对象-水口保护套管, 在下渣振动冲击下的振动响应也是非常必要的工作. 因此, 要想保证振动检测法的有效性, 则需要解决以下几个关键问题.

#### 3.1 旋涡卷渣振动特性检测水模实验平台

由于连铸生产现场环境条件的特殊性, 给系统实验研究带来了较大困难, 因此必须针对具体的检测目标, 搭建面向钢包下渣检测的实验平台. 此项工作是进行下渣振动信号识别研究的物质前提. 进行冶金控制、检测方面的研究工作主要通过水模型实验的方法来实现. 基于流体相似性原理, 针对所研究对象的具体物理量即测控标的, 可选择相应的流体准数计算法则来确定水模型与原型之间的几何比例以及其它的物理参数关系<sup>[70,71]</sup>. 当前面向冶金工程的水模型研究, 主要集中在中间包与结晶器方面, 因为二者具有相对稳定的流体入口条件与出口条件<sup>[72-74]</sup>. 通过水模型的模拟检测, 可以得到关于中间包、结晶器的内部流场运动规律; 结合数值模拟方法, 可实现对现有模型进行优化与修正. 而关于钢包流场的水模型实验研究则相对较少, 这主要是因为钢包并非连铸生产的核心设备<sup>[75]</sup>.

对于振动检测法来讲, 实验平台是试制系统的物质载体, 是必要的研究环节, 其重要性不言而喻. 除 Trotter D J 等人在对其开发的振动式 SCDT 进行测试时对水模型实验进行简要的描述外<sup>[75]</sup>, 目前国内国外未有对面向钢包下渣检测的水模实验平台研究记录.

### 3.2 汇流旋涡形成与卷渣冲击振动机理

汇流旋涡是钢包下渣的最主要原因, 它的形成过程与钢流振动信号的突变特征有着十分密切的关系. 因此, 对汇流旋涡形成过程机理及其振动动力学特性的研究是实现下渣振动信号识别的理论前提. 汇流旋涡虽然是看似简单的自然现象, 但却是一个具有相当难度的湍流力学问题. 20 世纪 60 年代, Shapiro A H, Trefethen L M 等人通过简单的实验设备, 对汇流旋涡的形成进行了定性研究, 发现旋涡形成后旋转的方向是随机的, 这与容器内部流场的初始条件有关; 如果让容器内部的流体镇定足够长的时间, 其形成旋涡的方向才符合北半球逆时针方向、南半球顺时针方向的规律<sup>[76,77]</sup>. Lewellen W S 通过闭回线积分与流函数方法对不可压缩流体的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程进行了简化, 建立了轴对称的三维汇流旋涡模型, 且在其推导计算过程中首次引进了径向雷诺数(radial Reynold number,  $R_{cr}$ )的概念<sup>[78]</sup>. 20 世纪 70 年代末, 上海交通大学的杨文熊教授基于粘性流体理论, 对汇流旋涡的形成机理进行了系统研究, 证明  $R_{cr}$  是形成汇流旋涡的一个关键参数, 并通过自制的实验系统进行了验证<sup>[79,80]</sup>. 1985 年, Lundgren T S 在轴对称模型的基础上, 引入罗斯比数(Rossby number,  $Ro$ ), 利用埃克曼(Ekman)层流理论对汇流旋涡的成因进行了研究, 发现旋涡形成过程中的非线性排流与由埃克曼边界层控制的无粘流具有相似性, 并证明在旋涡形成时具有较小的  $Ro$ <sup>[81]</sup>. 1993 年, Mory M 与 Yurchenko N 在 Lundgren T S 研究的基础上, 对汇流旋涡成因进行了实验研究, 发现旋涡贯穿后的结构主要由埃克曼层决定, 而旋涡的具体形状尺寸则由埃克曼数(Ekman number,  $Ek$ )决定<sup>[82]</sup>. 2003 年, Andersen A 等人基于埃克曼层流理论, 对汇流旋涡的成因及运动规律进行了较为系统深入的研究, 发现周向旋转速度是形成旋涡的最主要原因; 旋涡形成后在旋涡中心具有转速非常高的刚性涡核, 具有复合涡的性质; 通过巧妙的荧光流体实验

观测到了埃克曼上升流的存在, 并发现旋涡形成时伴随尖锐声音发生<sup>[83]</sup>. 同时西安交通大学的赵永志等人采用标准紊动能-耗散( $k-\varepsilon$ )湍流模型与流体体积(volume of fluid, VOF)模型对汇流旋涡的形成过程进行了仿真计算, 发现汇流旋涡是一种类兰金(Rankine)组合涡, 在其成熟阶段具有三个特性区域: 抽气孔、吸气孔与抬气区, 这与 Andersen A 的研究结论基本一致<sup>[84,85]</sup>.

根据上述分析可知, 目前尚没有成熟理论模型对汇流旋涡成因、运动规律进行精确的定量分析, 只能在某种理想假设下或结合实验研究, 得到其有限的局部特征. 而了解汇流旋涡的运动规律, 并对其动力学特性进行研究, 是振动下渣检测实现的关键环节. 1994 年, 印度的 Korla S C 与 Kanth U 对广泛的冶金容器卷渣现象进行了实验研究, 通过线性回归的方法得到了旋涡形成高度、持续时间与容器几何尺寸之间的关系, 并强调了容器内部流场的初始条件对于旋涡形成后的运动规律及形态具有重要影响<sup>[3]</sup>; 1995 年, 北京科技大学的黄晔等人也对冶金容器的卷渣现象进行了实验研究, 发现旋涡形成高度与渣层厚度、容器出口的位置与几何尺寸有关<sup>[86]</sup>. 除此之外, 国内外关于旋涡卷渣的研究多集中在中间包、结晶器方面, 且大多为实验研究, 未涉及旋涡形成机理及动力学特性方面的内容, 更未有对旋涡二相流卷渣过程诱发冲击振动机理的相关研究记录.

### 3.3 水口保护套管冲击振动响应

水口保护套管是振动式 SCDT 的检测对象, 它的振动特性会对系统的检测结果产生直接影响. 因此, 对于保护套管的冲击振动响应、固有频率分析等动力学特性的研究也是非常必要的工作. 水口套管为典型的管壳结构, 对其振动动力学方面的研究已有较为成熟的理论基础. 20 世纪 60 年代初, 美籍德裔力学家弗留盖(Flügge W)以壳体中面微元为研究对象, 结合基本的弹性体本构关系, 提出了著名的 Flügge 方程, 成为研究管壳力学特性的基础理论<sup>[87]</sup>. 1962 年, 西安交通大学的唐照千教授基于扁壳—唐奈尔(Donnell)理论, 对圆柱/圆锥壳体的振动特性进行了系统研究, 并提出了利用并联弹簧叠加进行微分方程组简化求解的计算方法, 可以直接通过解析方法得到所研究壳体的振型与固有频率<sup>[88,89]</sup>. 1981 年, Fuller C R 提出利用波传播的方法进行 Flügge 方程求

解, 并以真空状态下的有限长管壳为算例, 得到了自由振动状态下的壳体无量纲频率与能量分布、传输损失之间的关系; 给出了连续圆柱壳结构振动波传播过程的频散曲线; 首次提出复波数的对应波在圆柱壳中是以衰减驻波的形态存在的观点, 但未对这种驻波及虚波数对应波的性质作出分析, 且对传播性质的分析也仅局限于低阶周向模态的弯曲波情况<sup>[90]</sup>. 1982年, Fuller C R 与 Fahy F J 对充液管壳的液固耦合系统进行了振动特性研究, 对 Flügge 方程组中的径向位移方程进行了修正, 增加了液动力项, 得到了关于充液圆柱壳的振动波能量分布表达式<sup>[91]</sup>. 在上述研究成果的基础上, Fuller C R 于 1983 年对充液柱壳的受迫振动进行了研究, 提出了利用傅里叶变换结合留数定理的方程求解方法, 并未给出具体的求解过程; 得到了理想余弦线载荷激励条件下的无量纲频率与传输导纳之间的关系, 并与真空状态下的振动情况进行了比较研究<sup>[92]</sup>. 1993年, Brevart B J 与 Fuller C R 对具有流动状态的液固耦合系统进行了研究, 得到了流体马赫数(Mach number)对自由振动条件下的频散曲线与能量分布的影响<sup>[93]</sup>. 1998年, 华中科技大学的徐慕冰等人在 Fuller C R 的基础上, 对液固耦合系统在受迫振动时的振动能量流传播情况进行了研究, 得到了壳体中面微元各个内力所传播能量流的相对值, 并由此说明各传播波随频率变化的特性<sup>[94]</sup>.

水口保护套管在钢包浇注过程中有钢流流过, 显然是一个典型的流固耦合系统. Fuller C R 等人对于管壳流固耦合系统的振动特性研究成果, 为此项技术研究提供了有利的借鉴. 对于振动检测法来讲, 需要利用振动传感器从与水口套管相连的操纵臂采集加速度或位移信号, 虽然 Fuller C R 提出了强迫振动条件下壳体位移响应的计算思路, 并未给出具体的求解过程.

### 3.4 信号处理算法设计与优化

由于不同连铸车间的现场环境存在一定差异, 再加上钢包中钢水重量以及钢种的变化, 使经过干扰剔除以及信号分离处理后的数据还是含有大量与下渣无关的信号, 这给下渣识别算法的设计实现带来很大困难. 因此简单或者单一的信号识别方法(如 FFT, ANN)是不能满足要求的, 需要根据钢流振动信号的特点对其进行优化整合, 才能使系统检测的有

效性得到保证. 因此文献[61]中所描述的采用 FFT 与 ANN 相结合的方法并没有得到很好的应用效果. 2005年, 美国 Nupro 的 Kemeny F L 与 Walker D I 对基本的 ANN 算法进行了优化, 使之能够达到连铸生产的实际要求; 但由于 ANN 本身的缺陷以及连铸现场振动信号的复杂性, 致使 Nupro-SCDT 需要很长的调试时间<sup>[63]</sup>. 同年, 浙江大学仪器系的赵丽与王友钊<sup>[69]</sup>基于虚拟仪器技术, 将 LabVIEW 软件包中的小波包(Wavelet Package, WP)分析技术与 ANN 算法相结合, 使下渣的识别准确率得到了一定保证; 浙江大学机械系的李培玉与邹福星<sup>[95]</sup>利用隐性马尔可夫模型(hidden Markov model, HMM)对钢流冲击振动信号进行识别, 并在首钢的现场实验获得较好的结果. 2007年, 笔者采用离散小波变换法(discrete wavelet transform, DWT)与 WP 相结合的方法进行下渣过程识别, 并取得了不错的结果, 但其识别稳定性与判断反应时间尚需进一步提高<sup>[96,97]</sup>.

振动信号的识别是下渣检测的最终环节, 直接关乎检测系统的有效性. 上述研究工作无疑提供了有益的思路, 而识别算法是否有效很大程度上取决于对钢包下渣物理过程的分析以及振动检测法本身的研究. 因此, 根据旋涡形成机理与水口套管振动特性的研究成果, 选择合适的信号处理算法进行钢流状态识别将是此项研究内容的主要思路.

根据对上述关键问题的分析与综述, 振动式 SCDT 的研究与开发可从以下几个方面展开. 1) 基于流体相似原理, 利用振动传感器, 搭建了面向钢包下渣检测的水模实验平台, 实现在实验室条件下对下渣演变过程及其动力学特性的物理模拟, 为旋涡卷渣机理的研究工作提供物质条件. 2) 分析钢包浇注末期下渣物理过程, 研究形成汇流旋涡的充分条件; 根据粘性流体稳定性理论, 建立钢包内部流场的流体动力学模型, 得到可能产生旋涡的各阶临界值, 在此基础上研究旋涡形成贯穿时的振动动力学特性. 3) 建立水口保护套管动力学模型; 根据流固耦合理论及研究方法, 对模型进行修正, 得到关于轴向波数的弹性充液圆柱壳系统特征方程, 并研究系统各阶周向模态下的旋涡冲击位移响应及其他动力学特性. 4) 分析钢包浇注末期的旋涡冲击振动特点, 确定水口冲击振动时间序列的典型阶段; 选择相应的数字信号识别算法判断钢流状态, 实现钢包浇注的自动控制.

## 4 结论

(1) 对电磁感应、红外热成像、超声反射、钢包称重等下渣检测技术方法及其应用情况进行了综述, 发现其在实际应用过程中主要存在下渣过程识别率低、工作可靠性差、使用寿命短、制造成本高、不易安装与维护等问题。

(2) 振动检测法是一种利用钢渣、钢水密度差异来间接检测钢包下渣过程的检测方法, 能够解决其它方法存在的固有问题, 其主要优点为: 先验检测、使用寿命长、易于安装维护、成本低且不会对正常的连铸生产造成任何不良影响。

(3) 针对振动式 SCDT 存在的识别稳定性低、调试适用时间长等问题, 对其所涉及的关键技术进行

了分析, 并给出如下建议: 基于流体流动相似原理, 搭建面向钢包下渣检测的水模实验平台, 对钢包下渣演变过程进行物理模拟, 为旋涡卷渣机理研究提供物质条件; 研究形成汇流旋涡的充分条件, 根据粘性流体稳定性理论, 建立钢包内部流场的流体动力学模型, 得到可能产生旋涡的各阶临界值, 在此基础上研究旋涡形成贯穿时的振动动力学特性; 根据流固耦合理论方法, 得到弹性充液圆柱壳特征方程, 并研究其在各阶模态下的旋涡冲击位移响应; 分析钢包浇注末期的旋涡冲击振动特点, 确定水口冲击振动时间序列的典型阶段, 并选择相应的数字信号识别算法判断钢流状态, 实现钢包下渣的准确检测与控制。

## 参考文献

- 1 Int Iron Steel Inst. World steel in figures 2008. <http://www.worldsteel.org/pictures/storyfiles/Past%20top%20producers%202008.pdf>, 2009
- 2 谭大鹏. 振动式大包下渣检测机理及其关键技术研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008
- 3 Koria S C, Kanth U. Model studies of slag carry-over during drainage of metallurgical vessels. *Steel Res*, 1994, 65(1): 8—14
- 4 Odenthal H J, Bolling R, Pfeifer H, et al. Mechanism of fluid flow in a continuous casting tundish with different turbo-stoppers. *Steel Res*, 2001, 72(11): 466—476
- 5 Julius E. Elektromagnetische schlackenerkennung an metallurgischen gefaessen. *Stahl Eisen*, 1987, 107(9): 397—402
- 6 Julius E, Theissen W, Block F R. Function and application of electromagnetic slag detection system. *World Steel Metalw*, 1987, 8: 51—56
- 7 Walker D I, Dawson S, Mountford N D G, et al. Development of ultrasonic sensors for the early detection of slag carryover. *Trans Iron Steel Soc AIME*, 1991, 12: 223—230
- 8 Goldstein D A, Sharan A, Stofanak J A. Infrared imaging for BOF slag detection. *Iron Steelmak*, 2000, 27(7): 31—38
- 9 UET Int Inc. 新型的大包下渣检测系统. 板坯连铸技术研讨会论文集汇编. 北京: 中国金属学会, 2003: 47—53
- 10 Novikov A E, Novikov E A. Vortex-sink dynamics. *Phys Rev E*, 1996, 54(4): 3681
- 11 Kwon Y J, Zhang J, Lee H G. Water model and CFD studies of bubble dispersion and inclusions removal in continuous casting mold of steel. *ISIJ Int*, 2006, 46(2): 257—266
- 12 Ghosh S, Majumdar S, Prasad M M, et al. Development and implementation of BOF slag splashing at Rourkela Steel Plant. In: *Steelmak Conf Proc*. Nashville: Iron Steel Soc, 2002
- 13 Tossavainen M, Engstrom F, Yang Q, et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Manag*, 2007, 27(10): 1335—1344
- 14 Warczok A, Riveros G. Slag cleaning in crossed electric and magnetic fields. *Miner Eng*, 2007, 20(1): 34—43
- 15 Lyons R A. 新的钢包下渣检测系统. *钢铁*. 2004, 39(增刊): 603—604
- 16 王惠波, 李小华, 谢元旦. 出钢口下渣检测系统. *鞍山钢铁学院学报*. 1996, 19(4): 23—26
- 17 Petry S, Au A, Grziwotz U, et al. Einsatz eines neuen systems zur schlackenfruherkennung an stahlgiesspfannen. *Stahl Eisen*, 2003, 123(12): 103—109
- 18 邱东明. 300吨连铸钢包下渣检测系统的研制. *仪器仪表学报*, 1998, 19(1): 22—28
- 19 Abratis H, Julius E. Untersuchungen ueber das mitlaufen von schlacke meim konverterabstich. *Stahl Eisen*, 1988, 108(18): 54-58
- 20 Dauby P H, Havel D F, Medve P A, et al. Steel quality leapfrog - detection and elimination of ladle-to-tundish slag carry-over. *Iron Steelmak*, 1990, 17(7): 27—30
- 21 Gokey T J. Methodology to improve ladle slag detection. In: *Steelmak Conf Proc*. Chicago: Iron Steel Soc, 1994, 77: 261—264
- 22 Brinkmeyer L, Melville S D. Submerged ladle opening and electromagnetic ladle slag detection to produce clean steel. *Ironmak Steelmak*, 1995, 22(1): 45—48

- 23 Machini J, Asselborn A. Slag detection in the electric arc furnace at the Ascometal's Hagondange works. *SEAIQ*, 1998, 27(2): 52—57
- 24 Idstein D J, Hoffman J P, Witek E T, et al. Development of an improved ladle nozzle system. *Iron Steelmak*, 1994, 21(10): 79—81
- 25 史美平. 钢包下渣检测系统的开发研制. *连铸*, 1995, 6:17—20
- 26 何绍清, 柴毅忠. 下渣检测技术. *冶金丛刊*, 1999, 3: 17—18
- 27 Theissen W. 渣检测技术的新进展. 见: 中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 28 职建军, 裘嗣明, 侯安贵. 钢包下渣检测技术在宝钢的应用. *宝钢技术*, 2004, 5: 5—7
- 29 陈华. 宝钢一连铸钢包下渣检测技术的应用. *炼钢*, 2004, 20(4): 5—7
- 30 Julius E. The operation effect and new application of the electromagnetism slag detector. *World steel metalw*, 1989, 10: 78—84
- 31 Julius E, Bertermann K. Advances in furnace tapping. In: *Steelmak Conf Proc*. Nashville: Iron Steel Soc, 2002
- 32 于学斌, 张红, 邱玲惠, 等. 连铸钢包下渣检测技术的开发. *华东冶金学院学报*, 1997, 14(4): 53—56
- 33 肖勇. 钢水下渣检测技术及其应用. *工业计量*, 2001, s1: 262—264
- 34 王卫平, 任敬武, 卿志明, 等. 连铸钢包熔渣检测系统. *钢铁*, 2002, 37(增刊): 137—140
- 35 Qiu D M. Novel continuous casting slag detection system using a single-coil sensor. *Scand J Metall*, 1997, 26(4): 178—182
- 36 李培玉, 赵明祥. 连铸钢包下渣检测方法的研究现状与进展. *炼钢*, 2003, 19(3): 51—55
- 37 Dewitt D P, Incropera F P. *Physics of Thermal Radiation*. New York: Wiley-Intersci, 1989
- 38 Miline J M, Reynolds W N. Application of thermal pulses and infrared thermal imagers for observing subsurface structures in metals and compositions. *Proc SPIE*, 1985, 590: 293—303
- 39 Chen J, Osborn P, Paton A, et al. CCD near infrared temperature imaging in the steel industry. In: *Proc Instrum Meas Tech Conf*. Irvine: IEEE, 1993
- 40 Chen J, Barrow R. Novel applications of thermal imaging in the steel industry. *Proc SPIE*, 1995, 2473: 289—294
- 41 Dewitt D P, Richmond J C. *Thermal Radiative Properties Materials*. New York: Wiley-Intersci, 1989
- 42 Goldstein D A, Sharan A, Fuchs E A. System and method for minimizing slag carry-over during the tapping of BOF converter in the production of steel. USA Patent, 5968227. 1999
- 43 Peacock G R. Thermal imaging of liquid steel and slag in a pouring stream. *Proc SPIE*, 2000, 4020: 50—60
- 44 Zahorszki F, Lyons A R. On-line slag detection in the steelmaking. *Proc SPIE*, 2000, 4020: 10—14
- 45 Rau H, Röpenack I V. Application of thermographic slag detection. *Metall Plant Tech Int*, 2002, 25(1): 52—55
- 46 Kikuchi J, Kimura T. Improvement of carryover slag detection during BOF tapping at kashima steel works of sumitomo metals industries. *SEAIQ*, 2004, 33(4): 29—38
- 47 Land Instrum Int. SDS: The definitive infrared thermal imaging system for steel slag monitoring. [http://www.landinst.com/infrared/downloads/pdf/SDS\\_slag\\_detection\\_system.pdf](http://www.landinst.com/infrared/downloads/pdf/SDS_slag_detection_system.pdf), 2005
- 48 Tata Steel. Slag monitoring and detection system (SMDS). <http://www.automationatasteel.com/products.htm>, 2005
- 49 吴非, 王友钊. 利用视频系统监控大包下渣的方法研究. *工业控制计算机*, 2005, 18(3): 38—47
- 50 Viale M, Martin O, Muratori F, et al. Application of on-line infrared thermography in steel making industry. *Proc SPIE*, 2007, 6541: 65410H
- 51 Kupperman D S, Reimann K J, Lopez J A. Application of ultrasonic waves to assess grain structure in cast stainless steel. In: *Proc Eyes Eagle: 11th World Conf Nondestruct Test*. Las Vegas: ICNT, 1985
- 52 Hatta N, Takuda H, Ishii R, et al. Theoretical study on nozzle design for gas-particle mixture flow. *ISIJ Int*, 1989, 29(7): 605—613
- 53 Bolger D, Guthrie R I L, Kings D H M, et al. Ladle shroud slag detector. In: *Steelmak Conf Proc*. Pittsburgh: Iron Steel Soc AIME, 1996
- 54 Dewinter G. Automatic slag detection with stopper. *Iron Steel Eng*, 1996, 73(11): 29—32
- 55 Gillespie T D, Karamihas S M. Feasibility of multiple-sensor weighing for increased accuracy of WIM. *Heavy Veh Syst*, 1996, 3(1-4): 149—164
- 56 张萌, 柳旭. 称重传感器高精度自动检测系统设计. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2005, 44(2): 206—209
- 57 伊藤俊之, 越川隆雄, 高橋暁, et al. CC・取鍋スラグ流出の検知装置の開発. *鐵と鋼: 日本鐵鋼協會々誌*, 1981, 67(12): S847
- 58 Trotter D J, Duncan G, Camplin J M. Development of a ladle/tundish slag detector. *Iron Steelmak*, 1991, 18(10): 57—60
- 59 Downey M, Conter J, Gordon P, et al. Ladle-tundish slag detection using vibration measurements. *Steel times*, 1992, 9: 416—420
- 60 Barrow R, Blake N, Downey M, et al. Recent developments in caster instrumentation in BHP slab and bloom caster. In: *Proc 13th Contin Cast Process Technol Conf*. Nashville: Iron Steel Soc AIME, 1995
- 61 NKK Corp. Slag out flow detection method for air seal pipe of ladle, involves judging bottom of outflow of slag after measuring oscillation level and equalizing smaller magnitude value of oscillation level from preset value. Japan Patent, JP2000117407-A. 1998

- 62 Davidkhanian A, Kemeny F L, Langari A, et al. Slag detector for molten steel transfer operations. USA Patent, 6737014. 2004
- 63 Kemeny F L, Walker D I. System and method for minimizing slag carryover during the production of steel. USA Patent, 6929773. 2005
- 64 Uhlenbusch J, Stajduhar M C, Krajcik W J, et al. Trial of the R.A.D.A.R. vibra-acoustic ladle slag detection system at a European steel plant. *Iron Steelmak*, 2003, 30(7): 19—21
- 65 Nippon Steel Corp. Slag outflow detection method for continuous casting of steel slab, involves producing delay vector based on measured vibration level, to draw time behavior for detecting slag outflow. Japan Patent, JP2004268122-A. 2003
- 66 Tan D P, Li P Y, Pan X H. Application study for a kind of improved HMM algorithm in slag detection system. *J Iron Steel Res Int*, 2009, 16(1): 1—6
- 67 李培玉, 谭大鹏, 邹福星, 等. 矢量化在钢水连铸下渣检测方面的应用研究. *浙江大学学报: 工学版*, 2007, 41(4): 556—559
- 68 Li P Y, Tan D P, Pan X H, et al. Steel water continuous casting slag detection system based on wavelet. *Key Eng Mater*, 2007, 353-358: 3067—3071
- 69 赵丽, 王友钊. 钢铁连铸过程中的振动式高灵敏度大包下渣检测系统的研究及开发. *电子器件*, 2005, 28(4): 823—833
- 70 段云祥. LF吹氩过程中钢液流动的数学物理模拟. 硕士学位论文. 唐山: 河北理工学院, 2003
- 71 黄卫星, 陈文梅. 工程流体力学. 北京: 化学工业出版社, 2006
- 72 张立, 黄耀文, 杨时标, 等. 连铸中间包湍流控制水模实验研究. *钢铁*, 2002, 37(12): 17—19
- 73 胡皓, 赵和明, 张炯明, 等. 结晶器液面波动的水模型研究. *钢铁钒钛*, 2005, 26(1): 10—13
- 74 Yokoya S, Jönsson P G, Sasaki K, et al. The effect of swirl flow in an immersion nozzle on the heat and fluid flow in a billet continuous casting mold. *Scand J Metall*, 2004, 33(1): 22—28
- 75 张鲁芳. 钢包底吹氩水模实验研究. *河南冶金*, 2006, 14(2): 11—14
- 76 Shapiro A H. Bath-tub vortex. *Nature*. 1962, 196: 1080—1081
- 77 Trefethen L M, Bilger R W, Fink P T, et al. The bath-tub vortex in the southern hemisphere. *Nature*, 1965, 207: 1084—1085
- 78 Lewellen W S. A solution for three-dimensional vortex flows with strong circulation. *J Fluid Mech*, 1962, 14: 420—432
- 79 杨文熊. 汇流旋涡发生的基本理论. *上海交通大学学报*, 1979, 13(1): 40—52
- 80 杨文熊. 发生汇流旋涡的实验研究. *力学与实践*, 1979, 1: 50—51
- 81 Lundgren T S. The vortical flow above the drain-hole in a rotating vessel. *J Fluid Mech*, 1985, 155: 381—412
- 82 Mory M, Yurchenko N. Vortex generation by suction in a rotating tank. *Eur J Mech B-Fluids*, 1993, 12(6): 729—747
- 83 Andersen A, Bohr T, Stenum B, et al. Anatomy of a Bathtub vortex. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(10): 104502
- 84 赵永志, 顾兆林, 郁永章, 等. 盆池涡流动过程数值研究. *水利学报*, 2002, 12: 1—6
- 85 赵永志, 顾兆林, 郁永章, 等. 自由水涡结构及运动特征的数值研究. *西安交通大学学报*, 2003, 37(1): 85—88
- 86 黄晔, 叶树峰, 陶玉平, 等. 渣层厚度和出口口形状对汇流旋涡下渣的影响. *钢铁研究学报*, 1995, 7(6): 9—14
- 87 Flügge W. *Stresses in Shells*. New York: Springer-Verlag, 1973
- 88 唐照千. 圆柱壳自由振动的简化计算方法. *西安交通大学学报*, 1962, 2: 1—10
- 89 唐照千. 圆锥形(及圆柱形)壳体的振动形式和固有频率. *力学学报*, 1963, 6(2): 133—153
- 90 Fuller C R. The effect of wall discontinuities on the propagation of flexural waves in cylindrical shells. *J Sound Vib*, 1981, 75(2): 207—228
- 91 Fuller C R, Fahy F J. Characteristics of wave propagation and energy distributions in cylindrical elastic shells filled with fluid. *J Sound Vib*, 1982, 81(4): 501—518
- 92 Fuller C R. The input mobility of an infinite circular cylindrical elastic shell filled with liquid. *J Sound Vib*, 1983, 87(3): 409—427
- 93 Brevart B J, Fuller C R. Effect of an internal flow on the distribution of vibrational energy in an infinite fluid-filled thin cylindrical elastic shell. *J Sound Vib*, 1993, 167(1): 149—163
- 94 Xu M B, Zhang X M. Vibration power flow in a fluid-filled cylindrical shell. *J Sound Vib*, 1998, 218(4): 587—598
- 95 李培玉, 邹福星. HMM在钢水连铸下渣振动检测方法中的应用. *冶金自动化*, 2005, 1: 14—18
- 96 刘峰. 基于小波变换的图像扩散滤波方法. *中国科学E辑: 信息科学*, 2006, 36(6): 668—677
- 97 谭大鹏, 李培玉. 基于小波的钢水连铸下渣检测系统研究. *机械工程学报*, 2007, 43(2): 141—146