

基于光流分析法检测钢水液位

苏志祁, 何庆, 谢植

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 在覆盖剂黏着于测温管表面的连铸中包中, 基于视觉方法测量钢水液位系统无法通过温度场分析测量钢水液位。为此, 本文使用光流分析算法跟踪测温管拔出钢水后表面黏着并向下流动的覆盖剂, 检测出覆盖剂在测温管不同位置黏着特性的差异, 并从微观角度分析覆盖剂在测温管表面的黏着特性与钢水液位的联系, 最终计算出钢水液位。经验证, 该方法所测得钢水液位误差在 3 mm 以内。大量现场试验表明, 该方法能较好地解决覆盖剂遮挡测温管表面温度信息的问题, 使基于视觉方法的钢水液位测量系统在测温管黏着覆盖剂的异常情况下能准确可靠地测量出钢水液位。

关 键 词: 钢水液位; 液态覆盖剂; 测温管; 光流分析

中图分类号: TP 212.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)02-0158-04

Molten Steel Level Measurement Based on Optical Flow Analysis

SU Zhi-qi, HE Qing, XIE Zhi

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SU Zhi-qi, E-mail: 282805871@qq.com)

Abstract: In some continuous caster, slag often adheres to the temperature-measuring tube. This phenomenon disturbs the vision-based molten steel level measurement system analyzing the temperature field of the temperature-measuring tube. To solve this problem, the liquid slag adhered on the tube lifted from the molten steel was tracked via optical flow analysis and the adherent characteristic in the different position of the tube was gathered, then the relation between the adherent characteristic and the molten steel level prior to lifting was analyzed, finally the molten steel level in the tundish was calculated. Validated by other methods, the error of this method is less than 3 mm. Lots of on-site experiments indicate that this method may well solve the problem of missing temperature data, and accurately measure the molten steel level in the exceptional case of temperature-measuring tube adhering with liquid slag.

Key words: molten steel level; molten slag; temperature-measuring tube; optical flow analysis

冶金连铸生产过程中, 中间包钢水液位的波动会引起中包流场和结晶器入口压力的不稳定。这些不稳定的工况参数直接影响最终产品质量的稳定性。为了避免这种情况, 冶金企业希望能稳定控制中间包钢水液位。然而由于环境恶劣和覆盖剂遮挡的问题, 中间包钢水液位难以精确测量。目前, 大多数冶金企业仅通过中间包重量估算中包钢水液位, 但是由于称重传感器不能分辨钢水与覆盖剂, 加之中间包内部结构复杂, 这种估算方法的误差可达 ± 30 mm, 为此众多学者提出了一系

列测量方法。 γ 射线法采用放射性同位素 Co_{60} 和 Cs_{137} 等来测量结晶器钢水液位^[1-2], 因其对人体有伤害, 存在安全隐患, 并不适用于敞开作业空间的中间包。文献[3-5]提出基于电涡流原理的钢水液位测量方法, 电涡流法不受覆盖剂的影响, 可以测量钢水液位, 但测量范围仅为 50 ~ 200 mm, 不能对整个浇注过程的液位进行监控。文献[6-7]提出利用微波测量钢水液位和覆盖剂厚度, 但因覆盖剂成分差异、不同物理形态的分层结构动态变化和折射率不确定, 微波在覆盖剂中的传播

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N140404022); 流程工业综合自动化国家重点实验室项目(2013ZCX01)。

作者简介: 苏志祁(1985-), 男, 广西柳州人, 东北大学博士研究生; 谢植(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

速度难以确定.文献[8]通过面阵 CCD 采用图像法检测熔池钢水液位,此方法借助计算机视觉检测技术的优势,但只可检测到保护渣的位置,仍然没有解决覆盖剂遮盖问题.

本文作者所在课题组此前提出了一种基于计算机视觉的中间包钢水液位测量方法,将一根测温管插入钢水中,待其达到热平衡后从钢水中拔出,并用 CCD 记录拔出时测温管表面的温度分布,结合传热模型分析求取钢水液位以及覆盖剂厚度^[9-10].然而该方法在推广过程中,遇到一些现场所使用的覆盖剂黏度过高的问题.当测温管拔起时,一部分覆盖剂黏着在测温管表面,遮挡了测温管表面温度信息,随后这些黏着的覆盖剂在重力的作用下产生不规则的向下流动,这种不规则流动进一步扰乱了测温管的表面温度分析.因此早期所使用的温度梯度分析方法不适用这些现场.为此本文利用光流分析法,跟踪覆盖剂的流动过程,利用其流动特性分析测温管表面物性参数,根据测温管表面物性参数的差异求得中间包钢水实际液位.

1 覆盖剂在测温管表面的特性机理分析

在拔起测温管过程中,黏着的液态覆盖剂下流时,可以看到这些覆盖剂在测温管不同位置流动速度有较为明显的差异.

1.1 覆盖剂对测温管的附着机理

为了研究覆盖剂在测温管表面的流动规律,需要先研究覆盖剂对测温管的附着力.本课题检测中间包所用的测温管由铝碳材料为基质的耐火材料加工而成.液态覆盖剂对铝碳耐火材料的黏附力主要取决于测温管的表面微观结构和两者的成分.其中,铝碳耐火材料由氧化铝、石墨和少量的黏结剂组成;而覆盖剂主要由氧化钙、氧化镁和二氧化硅组成.投入中间包后,覆盖剂原料中成分在高温下发生化学反应,其最终会以硅酸盐的形式存在,而液态硅酸盐对耐火材料中的氧化铝表现出强烈的浸润能力和附着能力.由于不同冶金企业所用的覆盖剂组分之间的比例相差很远,有些现场的液态覆盖剂几乎不黏着在测温管表面,而另一些现场的液态覆盖剂却显著黏着在测温管表面.

根据 Schmitt 浸润与侵蚀模型^[11],当测温管浸入带有覆盖剂的钢水时,测温管与覆盖剂的接触部分中氧化铝会略微溶于覆盖剂,使得测温管

表面形成 70 μm 富含石墨的微观结构,液态覆盖剂与这种微观结构表现出较差的附着能力.而在钢水与测温管接触的部分,测温管中的碳溶于钢水,使得表面形成富含氧化铝的微观结构,而液态覆盖剂对这一层表现出较强的附着能力.

1.2 流速发生突变的解释

当测温管被拔起时,由于富含石墨的微观结构对覆盖剂浸润与附着力较小,因此,如图 1a 所示覆盖剂液滴与测温管的接触角 θ 较大,接触面积小,此时液滴在表面凸起比较大,测温管对液滴的附着摩擦力较小,所以在重力的作用下,覆盖剂液滴在富含石墨的表面结构上能比较快地流下.反之,覆盖剂液滴在氧化铝结构部分由于其浸润能力较好,摊开面积变大,测温管对液滴以范德华力形式提供的吸引力更强,从而提供了更强的固液之间的类似摩擦力的阻力作用,使得液滴在该部分较慢地流过,如图 1b 所示.

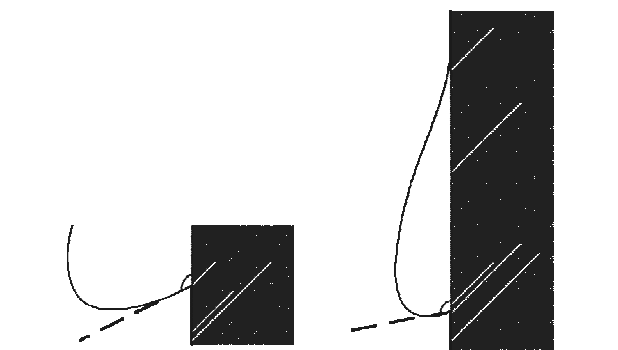


图 1 流速差异的解释
Fig. 1 Explanation for the difference of flow speed
(a)—液态覆盖剂与富含石墨结构相接处示意图;
(b)—液态覆盖剂与富含氧化铝结构相接处示意图.

2 从热图像流提取钢水液位

2.1 覆盖剂流动状态跟踪

本系统从高温热像仪中获取测温管从钢水拔出的整个过程的热图像序列.如果能对该图像序列中测温管表面向下流动的液态覆盖剂进行跟踪,并提取出覆盖剂在测温管表面每一部分的流动信息,就能间接地分析得到测温管表面微观结构分布,从而间接地得到测温管拔起之前钢水液位高度.

为跟踪覆盖剂在测温管表面的流动特性,首先要对测温管拔起过程热图像序列进行光流分析.本文选用 Horn - Schunck 光流法提取两帧图

片之间特征点运动轨迹^[12]. 假设一个特征像素点 t 时刻处于 (x,y) 位置, 该目标点此时的光流矢量为 (u,v) , 那么在 $t + \Delta t$ 时刻, 该像素点应该处于 $(x + u\Delta t, y + v\Delta t)$ 位置. 假设相邻两帧图像中同一个特征点灰度值不变, 可得光流法基本方程式:

$$I(x,y,t) = I(x + u\Delta t, y + v\Delta t, t + \Delta t) . \quad (1)$$

式中 $I(x, y, t)$ 表示 t 时刻处于 x 列 y 行的像素的灰度值. 对式(1)右侧泰勒展开并化简得到

$$I_x \cdot u\Delta t + I_y \cdot v\Delta t + I_t \cdot \Delta t = 0 . \quad (2)$$

式中 I_x, I_y 和 I_t 分别表示 $I(x, y, t)$ 对 x, y 和 t 的偏导数, I_x, I_y 可以通过对图像水平方向和垂直方向求导得到, I_t 可以通过相邻两帧图像之间做差得到. 通过式(2)可以求得相邻两帧图像中所有相匹配的运动特征点的光流矢量 (u,v) 和这些特征点在这两帧图像中运动的起点与终点. 其中某一次典型光流分析结果如图 2 所示. 图中短白线表示某一特征点在相邻两帧图像之间的运动轨迹, 由于拔起之后覆盖剂只会向下流动, 短白线上方表示两帧之间的轨迹起点, 下方表示终点.

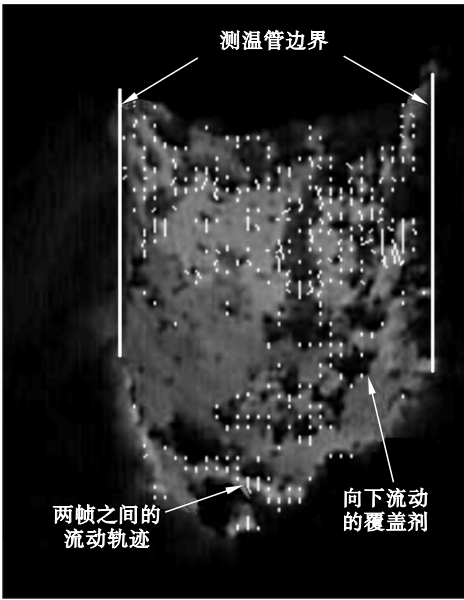


图 2 拔管过程光流分析图

Fig. 2 An image of optical flow analysis of lifting tube process

为了对某一特征点进行全程追踪, 以得到特征点轨迹及其高度随时间变化的关系, 本文在相邻帧的光流分析结果中, 将本次光流矢量的终点与下次光流矢量的起点拼接, 最终得到特征点在整个过程完整的高度随时间的变化关系. 其中一个特征点的高度随时间的变化关系如图 3 中的跟踪点所示. 从图中可以看到, 附着在覆盖剂表面的特征点在某一位置的运动速度发生了突变, 而该位置与测温管拔起前钢水液位吻合得较好.

2.2 钢水液位提取

2.2.1 单条轨迹突变点提取

根据前述界面物理学原理, 只要获得图 3 中速度转折点所处高度即可求出钢水液位. 本文采用两段拟合法求取速度突变点. 设图 3 中跟踪点为 $H(i), i = 1, 2, \cdots, n$, 求取突变点算法如下:

1) 假设第 i 个点 is 转折点, 作直线方程 L_1, L_2 .

$$L_1 : y = f_{i1}(x) = \frac{H(i) - H(1)}{i - 1}x + H(1) ,$$

$$L_2 : y = f_{i2}(x) = \frac{H(n) - H(i)}{n - i}x + H(i) .$$

2) 求取总误差平方和 E_i .

$$E_i = \sum_{j=2}^{i-1} (H(j) - f_{i1}(x))^2 + \sum_{j=i+1}^{n-1} (H(j) - f_{i2}(x))^2 .$$

3) 对变量 i 遍历第三个点至倒数第三个点, 搜索总误差平方和 E_i 最小的点, 该点即为速度转折点.

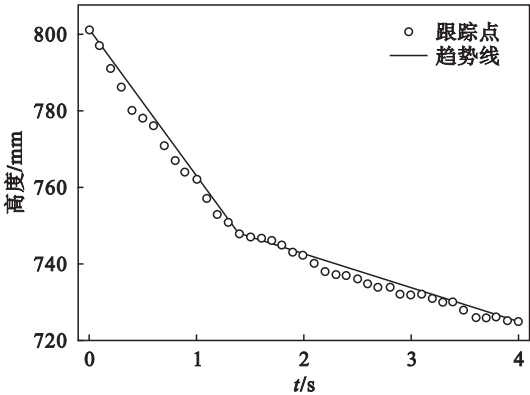


图 3 特征点高度随时间变化关系及趋势线

Fig. 3 Feature point height varying with time and its trend line

最终结果如图 3 趋势线所示. 实践证明, 与简单求导数随后二值分类的方法相比, 该算法虽然计算量略大, 但却有较好的全局搜索能力, 不易受某次跟踪错误而产生的噪声影响.

2.2.2 多条轨迹的融合

在整个拔管过程中, 往往可以求出大量的跟踪轨迹. 本文认为跟踪轨迹的长度越长, 跟踪结果的可信度越高, 因此本文仅关注 5 条长度超过 50 mm 的轨迹. 对 5 条轨迹, 以最长轨迹指示的位置为基准, 假如第二长的轨迹跨过最长轨迹所指示的钢水液位, 则把第二长轨迹所指示的钢水液位与最长轨迹所指示的钢水液位加权平均; 假如第二长的轨迹没有跨过最长轨迹所指示的钢水液位, 则直接将其舍弃. 第三、第四和第五长的轨迹依此类推.

3 实验结果与分析

求得的速度突变点位置在图4的“+”位置。从该图中也可以看到测温管上半部分温度高,而下半部分温度低,两块相交部分有一明显的温度阶跃。这种温度台阶的出现存在一定的偶然性。但是当这个温度台阶出现时,这种水平而清晰的台阶位置可以准确地指示出钢水液位。图4中温度台阶的位置验证了光流法测量钢水液位的结果,光流法多条轨迹测量结果与其指示的位置最大偏差仅3 mm。

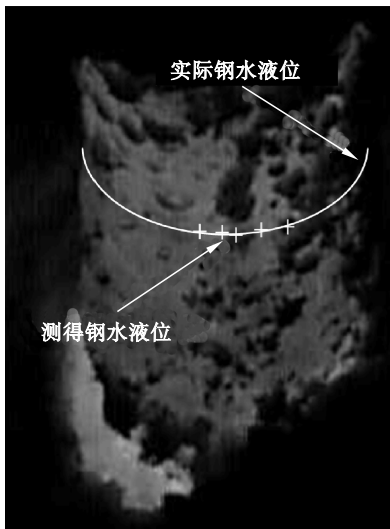


图4 实验结果
Fig. 4 Experiment result

4 结 语

从钢水中拔起的测温管表面会黏着覆盖剂,本文分析了覆盖剂对测温管表面黏着的微观机理,并指出,测温管的不同部分受到的侵蚀方式不同从而形成不同的表面微观结构,又进一步解释了液态覆盖剂在测温管不同部位流动速度差异的原因。本文通过图像处理方法跟踪测温管表面覆盖剂的流动状态,进一步证实了钢水液位高度与测温管表面黏着覆盖剂流速的关系,实现

了在测温管黏着覆盖剂的异常情况下对钢水液位的准确测量。

参考文献:

- [1] Solhed H, Jonsson L. An investigation of slag floatation and entrapment in a continuous-casting tundish using fluid-flow simulations, sampling and physical metallurgy [J]. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 2003, 32(1): 15–32.
- [2] Maneschg W, Laubenstein M, Budjáš D, et al. Measurements of extremely low radioactivity levels in stainless steel for GERDA [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 593(3): 448–453.
- [3] Kim G, Kim H, Oh K, et al. Level meter for the electromagnetic continuous casting of steel billet [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(2): 224–229.
- [4] Katankin R A, Pokrovskiy A D. A study of the eddy-current method of testing the level of molten steel in the thin-slab crystallization process [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2009, 45(8): 542–548.
- [5] Katankin R A, Pokrovsky A D. An eddy-current probe for testing the level of molten steel [J]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46(3): 216–221.
- [6] Malmberg D, Bååth L. Slag level detection in EAFs using microwave technology [J]. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 1999, 28(6): 266–276.
- [7] van den Berg F, Yang H. Real-time meniscus level and slag thickness measurement by RADAR [C]// *Proceedings of the International Conference on Nondestructive Evaluation for Steel and Allied Industries*. Jamshedpur, India, 2011: 12–20.
- [8] Kim Y H, Lee D S, Hwang W H. Signal processing method of the molten steel height using CCD camera in the strip casting process [C]// *International Conference on Modeling Identification and Control*. Innsbruck, Austria, 2002: 102–108.
- [9] Hu Z, Ci Y, Xie Z. Molten steel level measurement in tundish with heat transfer analysis [J]. *ISIJ International*, 2011, 51(10): 1674–1681.
- [10] Hu Z, Xie Z, Ci Y, et al. Molten steel level measuring method by thermal image analysis in tundish [M]// *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 361–367.
- [11] Schmitt N, Burr A, Berthaud Y, et al. Micromechanics applied to the thermal shock behavior of refractory ceramics [J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(11): 725–747.
- [12] Irani M. Multi-frame optical flow estimation using subspace constraints [C]// *The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra, Greece, 1999: 626–633.