

# 利用红外热像仪判断 21CrMo10 钢铸锭缺陷的研究

唐雯聃<sup>1</sup>, 宋书雅<sup>1</sup>, 赵俊学<sup>1</sup>, 陈远清<sup>2</sup>, 仇圣桃<sup>2</sup>, 李小明<sup>1</sup>

(1.西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055; 2.钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用红外热像仪直接观察与测定了钢锭凝固过程中铸模外表面的温度分布, 对几个关键部位的温度随时间变化的趋势及规律进行了对比和分析, 对可能存在的铸锭缺陷进行了判断。采用金相法和氧含量分析法对铸锭的显微结构进行分析, 并结合统计数据对结果进行确认。证明利用红外热像仪判断铸锭缺陷在一定程度上是可行的。

**关键词:** 红外热像仪; 铸锭缺陷; 铸模; 金相法; 氧含量分析法

**中图分类号:** TF771.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2013)10-0665-04

## Study on Judging Ingot Defects of 21CrMo10 Steel by Infrared Thermal Imager

TANG Wen-dan<sup>1</sup>, SONG Shu-ya<sup>1</sup>, ZHAO Jun-xue<sup>1</sup>, CHEN Yuan-qing<sup>2</sup>, QIU Sheng-tao<sup>2</sup>, LI Xiao-ming<sup>1</sup>

(1.School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2.National Engineering Research Centre of Continuous Casting Technology,

Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this article the temperature distribution of mold's surface in solidification process of the ingot was observed and measured by infrared thermal imager directly. We compared and analyzed the trend and regularity of the temperature change with time in several key points. And the possible ingot defects were speculated in correspondence. The microstructure of ingot was analyzed by the metallographic method and oxygen content analysis. The result was confirmed according to the statistical data. It is proved that judging ingot defects by infrared thermal imager is feasible to some extent.

**Key words:** infrared thermal imager, ingot defects, mold's surface, metallographic method, oxygen content analysis

## 0 引言

模铸在生产小批量、大尺寸、复杂断面、大压缩比的钢制产品方面有其独特优势<sup>[1]</sup>, 目前仍然在特钢生产企业, 尤其是为机械提供母材的冶炼企业使用。由于对铸锭内部质量缺乏有效的判断手段, 特别是在采用热送技术时, 只有锻后冷态无损检验才能确定产品是否合格。如果钢锭带有铸造缺陷, 将浪费大量的人力和物料, 并影响生产组织。为此, 探索采用模拟等间接手段对钢锭凝固过程进行检测分析具有重要意义。本文尝试采用红外热像仪观测铸模表面温度场的变化, 通过温度场数据的分析, 间接判断钢锭的凝固过程, 为钢锭质量控制提供依据<sup>[2]</sup>。而将红外技术应用用于无损检测已非少见, 例如: 利用脉冲红外热像

无损检测, 郭兴旺、许文浩对蜂窝结构积水进行传热分析<sup>[3]</sup>, 岳大皓、李晓丽等人对风电叶片的缺陷进行分析<sup>[4]</sup>, 黄明强、高俊山等人对玻璃钢内部缺陷的分析<sup>[5]</sup>。这些试验对红外无损探测的应用推广有重要意义, 但针对高温钢锭凝固的试验并不多见, 少量的类似试验也并未涉及对钢锭持续凝固过程的系统分析。

## 1 铸锭凝固原理与红外热像仪的简介

### 1.1 铸锭凝固原理

在采用模铸技术生产钢锭时, 其凝固过程缓慢、冷却强度小, 得到的产品拥有良好的组织结构、组织连续性和集中的夹杂物聚集。这些特性使得模铸钢锭性能良好, 易于加工<sup>[1]</sup>。但这些特性依赖于凝固过程的控制, 例如冷却速度、局部位置的凝固顺序等, 其中铸锭纵向的温度梯度是非

常重要的因素。钢锭的凝固顺序是由下向上，但垂直方向温度梯度的变化在研究中并不太被重视。下部组织先于上部凝固并不意味着凝固得越快越好，这会使夹杂物来不及上浮、脱氧剂反应不充分，造成夹杂物超标、疏松和缩孔等缺陷。所以控制铸锭纵向的温度梯度具有重要的意义，红外热像技术为此提供了合适的方法。

### 1.2 红外热像仪工作原理

红外热像仪是基于红外辐射原理设计的一种操作简便、携带安全的温度场成像仪器。主要是利用红外探测器和光学成像物镜接受物体的红外辐射能量分布，以红外热像图推导相对应的表面热分布场<sup>[6-7]</sup>。

当钢锭潜热释放的时候，钢锭本身温度的突变会在内部产生热流传导，使铸模表面温度场产生变化。本试验方法正是通过捕捉、分析这样的变化，结合取样分析的结果，得出铸锭缺陷的可能成因。

### 1.3 红外热像仪的结构

红外热像仪整体轻巧灵便，主要由镜头、探测器、电路系统、成像系统和储存系统组成。结构示意图如图 1 所示。

## 2 试验方案

使用红外热像仪测试出的铸锭表面温度误差较大，修正比较困难。因此不能将测定值作为真实的温度值使用。但同一热像图上的相对温度是准确的，即铸锭纵向的温度梯度是可靠的。连续测得的温度场可以反应钢锭在冷却过程中潜热释放和热扩散过程等。本文使用红外热像仪对某特钢厂生产的 21CrMo10 铸锭进行试验，一共测试了 8 只 11 t 的钢锭。钢锭及钢锭模的剖面结构如图 2(a) 所示，钢锭截面形状如图 2(b) 所示。

其中钢锭锥度为 0.0416，全长 2400 mm，钢锭截面为对称的八边形结构。铸模上部厚度为 280 mm，下部为 320 mm，钢锭头部采用轻质绝热板保温。上下部耳轴距离顶部和底部均为 400 mm。

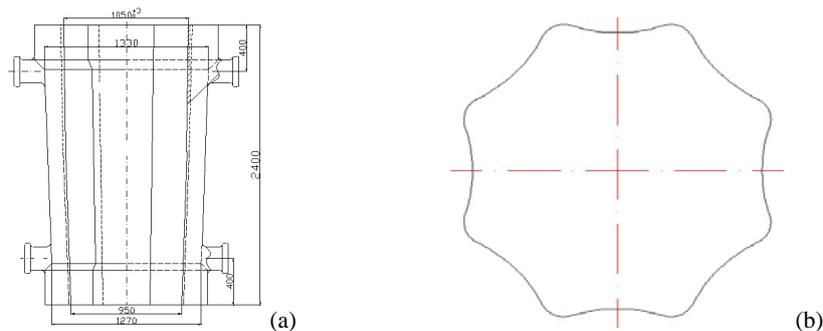


图 2 钢锭及钢锭模的垂直剖面图(a)和钢锭截面图(b)  
Fig. 2 The vertical-sections of ingot and ingot mold (a) the cross-sections of ingot (b)

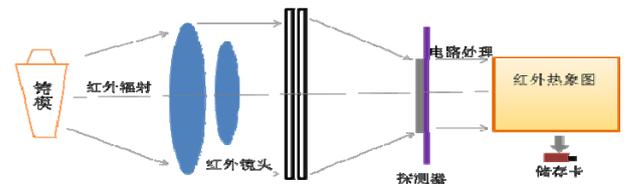


图 1 红外热像仪的结构示意图  
Fig. 1 The structure of infrared thermal imager

因耳轴部位的特殊性，在图 3 中取点需避开耳轴影响范围。由于一张热像图不能摄入整个铸锭，因此分两次取点，取点位置均在图 3 中所示的黑色垂直线上。第一张热像图为铸模下部，以图中耳轴中心为基点分别向上、向下间隔 200 mm 取 5 组点，每组 3 个点，在同一水平位置，依次标注为 1、2、3、4、5，3 和 4 两组点相距 400 mm。第 2 张图片为铸模上部，以耳轴中心为基点分别向下间隔 200 mm 取 3 组点，每组 2 个点，在同一水平位置，依次标注为 6、7、8。1 在 8 之上，两者相距 400 mm。使用热像仪记录这 21 个点在不同时间点上的温度。图 3 为编号为 3121982-2 钢锭凝固过程中铸模表面其红外热像照片，取点和取线的方法如上说明。

为验证红外热像仪用于分析钢锭缺陷的可行性，本文结合铸锭的宏观统计数据 and 显微结构分析的结果来说明。显微结构分析采用金相法统计铸锭的夹杂物状况和氧分析法分析铸锭的氧含量。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 垂直方向温度变化

图 4 为 3121982-2 号铸锭不同位置随时间变化的温度分布图。图中 1~8 号位置为热像图对应 8 组点的水平位置，其温度值为同水平位置上多个点温度的均值。

图 4 所示为钢锭浇注过程铸模表面不同高度 (1~8 号位置) 的温度分布图，时间记录起始点为浇注结束时。从图 4 看出，铸模表面的温度经历升高、保持、降低的过程。在 1.6 h 时，铸模表面温度进入保持状态，此为钢液凝固开始的时间点。至 4.1 h 后钢液温度逐步降低。

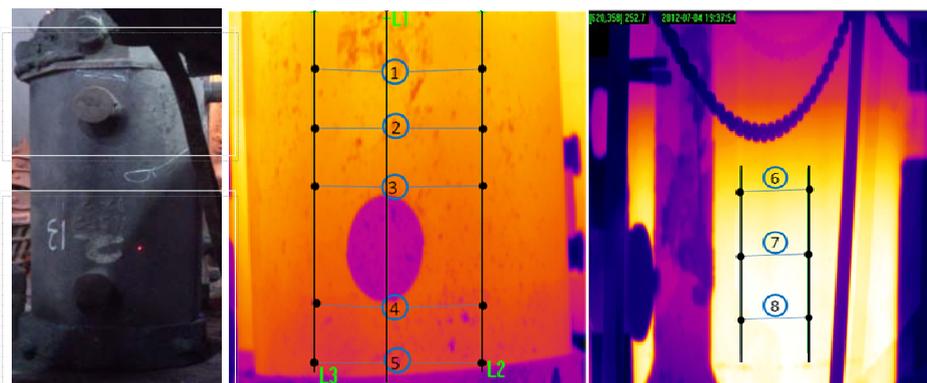


图 3 编号 3121982-2 铸模实体及其红外热像照片（中下部和上部）

Fig. 3 The 3121982-2 ingot mold and the infrared thermal images (the middle and lower part, the upper part)

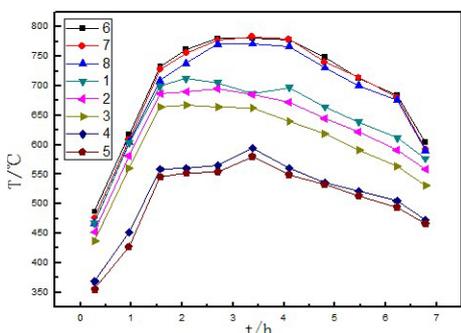


图 4 不同高度（1~8号位置）的温度分布图

Fig.4 The temperature distribution of different heights(position 1~8)

在整个冷却过程，铸模温度下低上高，符合下注模式钢液的冷却规律。铸模下部直接与铸铁底盘接触，冷却强度大，所以铸锭下部和与钢锭模接触部分最先凝固。曲线 2~5 在 4.1 h 之前就开始下滑，表明凝固已经完成。8 条曲线覆盖的区域可按上中下分为 3 组，分别为 6-7-8-1、1-2-3、3-4-5。针对覆盖区域的温度梯度进行计算，分别取得该区域温度梯度的平均值。要进一步分析需要做出 3 部分的温度梯度变化曲线，如图 5 所示。

图 5 体现了垂直方向温度梯度随时间变化的整体规律。可以看到，在钢锭开始冷却到钢锭初步凝固（2.7 h），温度梯度大小的排序是：下部 > 中部 > 上部，能满足下部钢水先凝固的要求。但这样会使下部钢水过快凝固，收缩形成的空隙来不及补充。这将造成两种影响：第一，减少夹杂物上浮的时间，使夹杂物在底部聚集；第二，形成缩孔和疏松，造成钢锭的利用率低。当进入凝固后期，铸模下部的温度梯度迅速下降，但仍然高于其他部位，此时上部的温度梯度大于中部。上部钢水的凝固速度大于中部会形成较强的“结晶雨”，造成上浮的夹杂物和气泡被迟滞，从而加重铸锭的尾部缺陷。

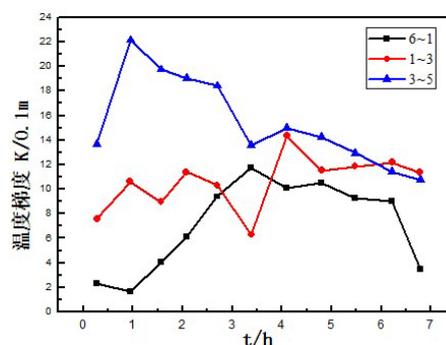


图 5 铸模表面垂直方向的温度梯度变化曲线  
Fig.5 The curves of temperature gradient in vertical direction on mold's surface

凝固完成之后（4.1 h），中部的梯度迅速上升再次大于上部。之后随着热扩散的进行，温度降低趋于一致，上部的温度梯度也降低到一个较低的值。这有利于上部钢水缓缓向下的补缩，但尾部的缺陷在凝固之时就已经形成，因此补缩不能起到作用<sup>[8-10]</sup>。

铸锭在垂直方向温度梯度随时间的变化趋势也可以从传热学的角度进行分析。先假设铸锭为一个均匀热体，底盘和空气中的某一个点为距离热体最近的常温点。底盘与铸锭之间的传热性能良好，散热较快；加之铸锭底部的钢水先一步进入铸模，冷却的时间较长，因此造成底部的温度会高于上部。其次，铸锭顶部的保温帽和覆盖渣会阻止热量散失，再加上铸模与空气直接的对流散热效果远不及铸模与铸铁底盘之间的传热效果。因此，铸锭下部的温度梯度大于上部即可解释。在热体的整体温度降低到一定水平之后，上下温度梯度的差值会变小，并容易受到其它因素的影响。因此可以解释在 6.5 h 之后中部的温度梯度大于上部。在凝固过程中，关于垂直方向温度梯度的讨论在文献中不易见到，即使存在也比较零星。通常所讨论的也仅是温度的高低，而非进一步的温度梯度。

### 3.2 现场统计数据

生产中不合格钢锭缺陷类型的统计结果见图 6。可看出，中心疏松是造成质量的主要原因。前节认为是垂直方向温度梯度不合理会造成锭尾出现疏松和夹杂聚集等缺陷；进一步推测可认为其也是造成此统计结果的原因。要确认最终原因需要解剖红外热像仪所测试的钢锭。

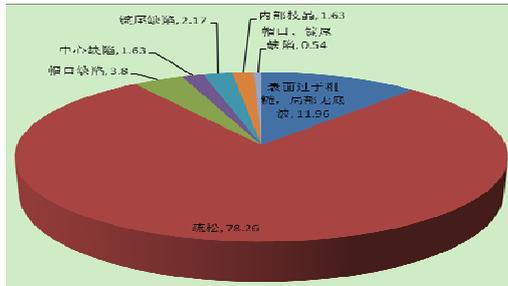


图 6 一月份不合格钢锭缺陷类型的统计

Fig.6 The type statistics of the unqualified ingot defect in January

### 3.3 取样分析

钢中氧含量与非金属夹杂的形成有一定的关系，分析夹杂物时可用氧含量作为参照<sup>[1]</sup>。在测定总氧的时候，发现铸锭中部的氧含量比帽口和尾部高，分别为 434 ppm、244 ppm 和 34 ppm。间接显示钢锭中部、尾部的夹杂物数量比帽口多，而中部最高。铸锭中夹杂物的平均数量分布如图 7 所示。

铸锭中部的夹杂物数量虽然最多，但尺寸均集中在 1~20 μm 之间，超过 50 μm 的大颗粒夹杂物较少。尾部的夹杂物数量次于中部，但该部位大颗粒夹杂物数量最多。折算成质量，尾部的夹杂物含量是最多的，这表明铸锭尾部是夹杂物聚集最多的地方，帽口的夹杂物数量相对最少。这其中，铸锭中心部位的夹杂物多外层，主要集中在以到中心 1/4~3/4 半径的范围内。

因此，前文利用热像图对铸锭缺陷的分析是准确的。即是说采用红外热像仪对表面温度进行连续测定，可以得到铸模垂直方向温度梯度的变化情况，从而间接判断钢锭的凝固过程，为钢锭的质量分析及判断提供依据，也可为钢锭凝固模拟计算提供参考。下一步需简化温度读取和数据处理，有望实现利用红外成像直接判断钢锭内部质量。

## 4 结论

本文采用红外热成像仪对某厂 11 t 钢锭凝固过程中铸模表面的温度进行了连续测定，通过分析得到如下结论：

1) 钢锭凝固过程中，铸模表面温度经历快速升高、保持、逐步降低的过程，垂直方向局部温度的相对高低基本不发生变化。

2) 在铸模垂直方向上，下部的温度梯度一直大于其他部位，只是在完全凝固后逐渐降低最后小于中部。中部温度梯度最先是大于上部的，但在凝固过程中有两次反复，6 h 之后达到最大。这样的现象会造成夹杂物和疏松在铸锭尾部聚集，从而降低铸锭的利用率和合格率。

3) 取样分析表明，所测铸锭中部含氧量最高，夹杂物数量最多；尾部含氧量次之，夹杂物含量最高。相反帽口部位的含氧量和夹杂物最少，证明凝固过程中帽口并没有起到聚集铸锭缺陷的作用。

4) 通过红外成像，可以建立钢锭凝固质量与铸模表面之间的对应关系，为实现利用红外成像直接判断钢锭内部质量的目标奠定基础。

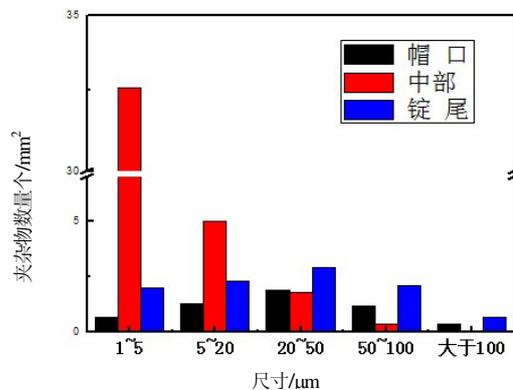


图 7 铸锭中夹杂物的平均数量分布图

Fig.7 The average number distribution of the inclusions in ingot

### 参考文献:

- [1] 杜亚伟, 文光华, 唐萍. 模铸在大钢锭及特殊钢生产方面的比较优势[J]. 金属世界, 2009(5): 48-52.
- [2] 杜亚伟. 钢锭头部保温性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [3] 郭兴旺, 许文浩. 蜂窝结构积水的脉冲红外热像无损检测的传热分析[J]. 红外技术, 2011, 33(5): 275-280.
- [4] 岳大皓, 李晓丽, 张浩军, 等. 风电叶片红外热波无损检测的实验探究[J]. 红外技术, 2011, 33(10):614-617.
- [5] 黄明强, 高俊山, 陈素敏, 等. 利用红外热成像技术检测玻璃钢内部缺陷, 红外技术, 1995(2): 47-48.
- [6] 鲍凯, 王俊涛, 吴东流. 新兴的无损检测技术——红外热波成像检测[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 393-398, 408.
- [7] 王迅, 金万平, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 497-501.
- [8] 赵彦灵. 钢锭疏松、缩孔的因素分析及对策[J]. 宽厚板, 2000, 6(3): 14-17.
- [9] Carlson K D, Lin Z, Hardin R., etc. Modeling of porosity formation and feeding flow in steel casting[C]//Proceedings of the 56<sup>th</sup> SFSA Technical and Operating Conference, Chicago: 2002: 1-24.
- [10] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [11] 刘建华, 包燕平, 王国宣, 等. 高压锅炉管钢P12 铸锭中夹杂物分布解剖研究[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(7): 769-774.