

## 离心机铸管缩孔缩松缺陷形成机理与防治研究

张国华 牟家辉 冯吉言

河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

[摘要] 离心铸造是生产铸管的主要方法, 但是缩孔和缩松问题大大降低铸管质量以及使用寿命。文章主要研究离心铸管中出现缩孔和缩松的原因, 在此基础上进一步分析影响这些缺陷形成的因素包括凝固收缩和补缩不足; 温度梯度及凝固顺序; 枝晶生长和液相补给被切断; 离心力场导致气泡析出等方面内容。同时对于如何进行缺陷检测也进行了阐述, 主要有超声波/射线无损检测以及 CT 三维重建的方法。最后提出工艺参数优化、离心力场控制、熔体净化除气以及利用数值模拟进行工艺改进的方法来预防上述缺陷。研究表明, 在离心力作用下保持补缩通道开放同时抑制气泡析出是防止缩孔缩松发生的重要因素。

[关键词] 离心铸造; 铸管; 缩孔缩松; 缺陷防治

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19545

中图分类号: TG255+3

文献标识码: A

### Research on the Formation Mechanism and Prevention of Shrinkage and Porosity Defects in Centrifugal Casting Pipes

ZHANG Guohua, MI Jiahui, FENG Jiyan

Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

**Abstract:** Centrifugal casting is the main method for producing cast pipes, but shrinkage and porosity problems greatly reduce the quality and service life of cast pipes. The article mainly studies the causes of shrinkage and porosity in centrifugal cast pipes, and further analyzes the factors that affect the formation of these defects, including solidification shrinkage and insufficient filling shrinkage; Temperature gradient and solidification sequence; Branch growth and liquid phase supply are cut off; The centrifugal force field causes bubble precipitation and other aspects. At the same time, the methods of defect detection were also elaborated, mainly including ultrasonic/radiographic non-destructive testing and CT three-dimensional reconstruction. Finally, methods for optimizing process parameters, controlling centrifugal force fields, purifying and degassing molten materials, and using numerical simulations for process improvement are proposed to prevent the above-mentioned defects. Research has shown that maintaining the opening of the contraction channel while suppressing bubble precipitation under centrifugal force is an important factor in preventing shrinkage porosity.

**Keywords:** centrifugal casting; cast iron pipe; shrinkage and looseness; defect prevention and control

### 引言

离心铸造由于其金属收得率高、组织致密性好以及生产率高等优点而被广泛应用于铸管领域。但是, 缩孔和缩松是离心铸管最常见也是最难解决的问题, 严重影响产品质量。这些缺陷不但降低机械强度, 而且容易造成应力集中以及腐蚀通道, 从而引起产品过早损坏。为了解决这些问题, 国内外学者对这些问题进行了大量的研究工作。离心力场使得金属凝固不同于重力铸造, 补缩更复杂。有文献报道, 高合金钢离心铸管中的缩孔主要取决于工艺条件, 特别是涂料成分及其厚度的影响较大; 而对于钛合金立式离心铸造而言, 则主要是由旋转速度、浇注温度以及铸型

温度决定。数值模拟技术的发展对缺陷预报以及工艺改进起到重要作用, 在气缸套、耐热钢管等离心铸件上已有所应用。而基于离心铸造管的实际生产情况, 本文主要介绍了缩孔缩松缺陷产生的原因、影响其的因素、检测及预防措施等方面内容, 以供参考。

### 1 缩孔与缩松缺陷形成机理分析

#### 1.1 凝固收缩与补缩不足机制

缩孔、缩松的原因是在金属凝固过程中由于液态金属体积减小而不能得到及时补充。液态金属在冷却凝固时要经过液态收缩、凝固收缩以及固态收缩三个过程, 而液态收缩及凝固收缩是造成缩孔、缩松的主要原因, 在离心铸

造时,液态金属在外力作用下从外向内逐步凝固,外部先凝固成致密层,内部继续凝固时如果补缩通道被堵住就会出现缩孔或者缩松现象,补缩不良主要是由两方面决定的:一方面要看液态收缩及凝固收缩所占比例;另一方面是补缩通道是否畅通,虽然离心力有利于补缩但是也会影响液体流动方式。研究发现,在立式离心铸造过程中,缩松产生的必要条件为孤立区内补缩压力小于枝晶间流动阻力。一旦孤立区出现,剩余液体不能进一步补缩,从而形成孔洞。而引入动态临界补缩固相率可以解释何以离心铸造能够实现重力铸造难以达到的效果。由于离心力的存在使得补缩固相率随着转速增加而增大,因此离心铸造比重力铸造有更好的补缩性能。

### 1.2 温度梯度与凝固顺序影响

温度梯度是决定凝固顺序的主要因素,对缩孔缩松的位置及形状有重要影响,在离心铸管中,热流由内壁向外部流动,铸型侧散热效果比自由表面侧好,因此出现自外而内的分层凝固方式,温度梯度越大,凝固前沿越平坦或者胞状生长,液相补给路径畅通;温度梯度越小,凝固前沿越发育的树枝晶,枝晶之间搭桥容易把剩余液相隔离开来成为孤立的小区域,从而产生分散的缩松。通过数值计算可知,离心铸造时铸件温度场受到转速、铸型温度和浇注温度的影响。合理调节这些因素可以在凝固前沿保持适当温差,一方面可以保证铸满型腔,另一方面也可以防止由于过热度不够造成晶粒粗大。而对于超长耐热钢管来说,调整最佳浇注温度以及铸型预热温度有利于温度场更趋均匀,从而大大降低缩松倾向。

### 1.3 枝晶生长与液相补给阻断机制

枝晶生长方式对缩松形状及位置有很大影响,在离心铸管凝固中,柱状晶从铸型壁面向内壁方向生长,形成辐射状组织,在枝晶生长过程中,一次枝晶臂、二次枝晶臂不断生长,枝晶之间剩余液体被逐渐分割开,在钛合金立式离心铸造中发现,缩松产生是由于枝晶间液相补缩。随着凝固发展到一定程度后,枝晶骨架具有足够的强度以承受来自枝晶间的液相压力,残余液相在毛细力以及离心力的作用下流动。如果枝晶间通道的流动阻力大于补缩驱动力,则缩松出现并且发展。而缩松数量可以通过计算温度场和压力场相结合来得到,利用孤立区搜索法找到补缩失效位置。枝晶搭桥是液相补给被中断的一种方式。当两个相邻枝晶臂相互连接在一起时,在它们之间液相就被封住,形成显微缩松。这类缩松尺寸较小而且较为分散,一般不易用无损检测方法发现,但却对材料力学性能有影响。

### 1.4 离心力场下气体析出与孔隙形成机制

离心力场对熔体中气体行为产生两种作用。一种是离心力使气体上浮有利除气;另一种是由于离心力造成气体溶解度的变化而引起局部析出。由热力学可知,在离心力场中有压力差,自由表面上的压力最小。如果这个位置的压力小于气体的饱和蒸汽压,则在这个位置就会有气体析出,即形成气孔。气孔和缩孔的区别在于气孔内壁光滑、平整、无树枝状结晶。而在立式离心铸造过程中,气泡的形核功以及临界形核半径都与离心加速度有关,离心加速度越大,越难以形核。熔体中的气体含量是产生孔隙的原因。氢、氧、氮等气体在金属液中溶解度随着温度下降而减少,在过量情况下不能溶解的部分就会形成气泡核心。另外,铸型涂料所含水分以及挥发性物质受热后发生气化也会产生气体。

## 2 缺陷影响因素分析

### 2.1 浇注温度与浇注速度影响

浇注温度是影响缩孔、缩松最敏感的工艺因素,在温度较高情况下,液态收缩较大,凝固时间较长,枝晶粗大,补缩距离增长;而在温度较低的情况下,则容易造成熔体流动性差、充型不良以及产生冷隔等缺陷。因此,应选择适当的浇注温度以满足充型要求的同时尽可能降低。

表1 浇注温度与浇注速度对缩孔缩松的影响

| 工艺参数 | 参数变化 | 对缩孔缩松的影响 | 推荐控制范围            | 影响机理    |
|------|------|----------|-------------------|---------|
| 浇注温度 | 过低   | 冷隔、充型不良  | 合金液相线以上<br>50~80℃ | 流动性不足   |
| 浇注温度 | 适宜   | 缩松最小化    | 根据合金成分确定          | 平衡收缩与补缩 |
| 浇注温度 | 过高   | 缩孔体积增大   | 避免过度过热            | 液态收缩增大  |
| 浇注速度 | 过低   | 分层、冷隔    | 快速平稳充型            | 充型时间过长  |
| 浇注速度 | 适宜   | 充型完整     | 根据管径调整            | 均匀充填    |
| 浇注速度 | 过高   | 卷气、紊流    | 避免喷射              | 气体卷入增多  |

浇注速度对充型影响较大。过慢容易出现分层、冷隔等问题;而过快会造成紊流以及卷气等现象。对于超长耐热钢管而言,适当减小浇注速度有利于提高充型质量,降低卷气。

### 2.2 转速与离心加速度影响

转速是离心铸造最重要的工艺因素,它决定了离心力场的大小以及分布情况。如果转速较低,则由于离心力不能克服重力的作用而造成金属液不能均匀充满型腔,补缩不足;如果转速较高则会造成金属液强烈冲击到型壁上,使内外壁温差加大,从而导致内壁凝固不良。研究发现,

在所有工艺因素中它们对于铸件缩孔、缩松体积的影响由大到小排列顺序为：铸型温度>浇注温度>离心转速，即铸型预热条件的重要性大于转速及浇注温度。而对铝合金气缸套进行的离心铸造正交实验结果表明，在一定范围内提高转速有利于减小缩松体积，但是也有一个最优转速范围，在此之上进一步增加并不能起到明显的效果，而且还要根据铸管直径和壁厚来选择合适的离心加速度。大直径薄壁管要达到较高转速使金属液贴附铸型，而小直径厚壁管适当降低转速以免外壁晶粒过大。

### 2.3 合金成分与熔体纯净度影响

合金成分对凝固区间、结晶温度以及收缩特性的影响进而影响缩孔缩松形成。共晶成分合金凝固区间窄，糊状区窄，补缩通道畅通，缩松倾向小；而亚共晶或过共晶成分合金凝固区间宽，枝晶发达，易产生弥散缩松。在高合金钢离心铸管中使用 TF2 型发热精炼剂可以降低缩孔缩松的产生，发热精炼剂起到延长补缩时间，改善补缩条件的作用，同时还具有脱氧除气的效果，这说明熔体处理和合金成分优化是预防缺陷的有效措施。熔体纯净度对缩孔缩松的影响主要有两个方面，一是夹杂物是气泡析出的异相中心从而促进孔隙形成；氧化物膜阻碍枝晶间液相流动，造成补缩不良。因此，在熔炼中提高精炼程度、严格脱氧是防止缩孔缩松的有效手段。

### 2.4 铸型结构与冷却条件影响

铸型结构决定散热条件以及温度场分布。铸型材料的热导率、壁厚及表面涂层等因素都会影响其冷却速度。如果冷却太快容易造成裂纹或者应力集中；而冷却太慢会增加凝固的时间，从而增大体积收缩量。在离心铸造过程中，涂料成分及其厚度对于缩孔有着很大影响。涂料的作用主要是改变铸型与金属液之间的接触换热量。厚涂层可以减慢冷却过程，有利于气体逸出以及补缩，但是涂层太厚容易脱落；薄涂层冷却迅速，晶粒细腻均匀，但是也有可能由于冷却太快而不利于补缩。因此，在保证晶粒细小的同时又要考虑到足够的补缩，这就要求合理的设计涂层。另外，铸型预热温度也是影响冷却的一个因素。预热温度越高越有利于凝固推迟，延长补缩时间，但是预热温度过高会影响生产率并且会使模具老化加快。

## 3 缩孔缩松缺陷检测与评价方法

### 3.1 无损检测技术应用（超声/射线检测）

超声检测是根据声波在缺陷处反射情况进行判断内部孔隙大小。缩孔较大时反射较强容易被发现而弥散缩松由于声波散射衰减难以进行量化评估。这种方法速度快、

成本低适合现场大批量检测。射线检测是依据缺陷和基体对于射线吸收程度不同形成图像。缩孔以及缩松在底片上表现为黑色区域并且缩孔边界呈树枝状而气孔边界平滑圆润，从而可以辨别出它们。基于工业 CT 图像进行缺陷检测能够准确地区分出气孔、缩孔、夹杂等并且通过对图像进行处理获得相关参数进而实现自动识别以及定量分析，大幅度提高了检测速度以及精度。

### 3.2 CT 三维重构检测技术

计算机断层扫描能够得到缺陷在三维空间上的分布情况。而对 CT 扫描切片进行重建之后就可以清晰看到缩孔缩松形状、大小、所在部位以及是否相连等情况，在不同的工艺条件下对铸管进行 CT 扫描可以得到缺陷体积分数、最大孔隙直径等参数和工艺之间的关系，有利于进一步分析原因并改善生产工艺。

### 3.3 缺陷定量评价指标体系

缺陷定量评价需有统一标准。一般而言，有以下几种评价指标：缩松体积分数、最大孔隙尺寸、孔隙数量密度、孔隙圆度以及分形维数等。而缩松体积分数是一个最直接的定量指标，在 CT 图像中可直接获取。使用 ProCAST 等软件进行仿真分析时，缩孔缩松体积是衡量工艺好坏的一个重要标准<sup>[1]</sup>。正交试验设计配合仿真结果可以较全面地考察不同工艺条件下的主要影响因素及其相互之间的影响关系，从而找到最佳工艺方案。

## 4 缩孔缩松缺陷防治技术与优化策略

### 4.1 工艺参数优化控制策略

工艺参数优化是预防缩孔缩松最有效也是最经济的方法。而优化工艺需满足如下条件：在保证充型完整情况下尽可能降低浇注温度；在保证金属液贴附铸型情况下尽可能降低转速；在保证组织性能情况下尽可能减小冷却速率<sup>[2]</sup>。对铝合金湿式气缸套进行工艺优化表明，影响因素大小关系为铸型温度>浇注温度>转速，即生产中首先考虑的是铸型预热温度，其次是浇注温度以及转速。而通过正交试验得到最佳工艺参数可以最小化缩孔缩松体积。

### 4.2 离心力场优化与转速控制

离心力场优化包括转速准确调节以及变转速工艺的应用，在传统的恒定转速条件下，由于金属液受到较大的离心力影响而很快紧贴模具表面，在内部开始凝固之前补缩通道基本被填满。而在变转速过程中，在浇注初期以较高的转速来保证铸件充分充满，在接下来的时间里逐渐减小转速从而延长补缩时间，有利于避免出现内壁缩松现象。



### 4.3 熔体净化与除气技术

熔体净化主要是减少气体含量以及夹杂物的数量。除气可以使用氩气旋转喷吹、真空脱气或者加入除气剂等方法<sup>[3]</sup>。而高合金钢离心铸管研究表明,发热精炼剂可以起到脱氧除气并延长补缩的作用。

### 4.4 基于数值模拟的工艺优化方法

数值模拟技术是离心铸造工艺优化的有效手段。基于计算机仿真气缸套离心铸造研究建立凝固过程数学及物理模型,计算出温度场、液固相分布以及缩孔缩松情况,计算结果与实验基本一致,说明该模型具有一定的正确性。使用数值模拟软件对超长耐热钢管进行模拟可全面考察浇注温度、浇注速度、铸型预热温度和转速对充型过程、温度场以及缩松影响。油膜轴承合金层离心铸造优化研究通过对铸造模型进行优化,发现优化后铸造模型可以加快充型速度,减慢凝固速度从而减少缩孔缩松。数值模拟使得工艺开发从经验试错到科学设计,大大节省开发时间。

## 5 结语

离心机铸管缩孔缩松缺陷产生原因主要是凝固收缩、补缩不足、枝晶阻塞以及气体析出等因素综合作用造成。离心力场的影响使得补缩过程更为复杂,动态临界补缩固相率的概念体现了它与重力铸造的区别。不同工艺因素对于缺陷影响具有主次之分并且互相之间也存在相互影响

的关系,在众多工艺因素中铸型温度、浇注温度以及转速是最重要的三种。目前先进的无损检测方法尤其是 CT 三维重构可以较好地缺陷进行量化分析,同时计算机辅助数值模拟也为工艺优化提供了一种新的途径。未来的研究工作可进一步开展在离心力场作用下的多场耦合作用下缩孔、缩松的定量描述以及利用机器学习进行工艺参数智能化优化,以达到对缩孔、缩松的有效预防。

### 【参考文献】

- [1]冉兴,陈义斯,高晓慧,等.离心精铸大型钛合金机匣铸造模拟及缩松缩孔缺陷分析[J].铸造,2025,74(3):344-349.
  - [2]彭博,李阳,罗许,等.电子束冷床熔炼 TA2 钛合金铸坯缩孔及凝固组织数值模拟[J].铸造技术,2025,46(9):855-864.
  - [3]邓伟,宋仲模,雷基林,等.铝合金缸体低压铸造浇注系统优化研究[J].特种铸造及有色合金,2025,45(10):1522-1528.
- 作者简介:张国华(1993.12—),毕业于三门峡职业技术学院建筑工程管理专业,现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司,班组长,助理工程师;牟家辉(1995.05—),毕业于吉林大学计算机科学与技术专业,现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司,离心机机手,助理工程师;冯吉言(1998.07—),毕业于大连理工大学电气工程及其自动化专业;现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司,离心机机手,助理工程师。