

离心机铸管浇注速度对铸管致密度影响研究

冯吉言 张国华 牟家辉

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式, 而铸管致密度又决定着铸管力学性能以及寿命。浇注速度是离心铸造的一个重要工艺参数, 它不仅影响金属液充型过程、凝固过程, 还会进一步影响到最终形成铸件致密度。文中主要是探讨浇注速度对于离心铸管致密度的影响及其原因。通过改变浇注速度的不同值来进行比较实验, 测定铸管密度的变化情况, 观察铸管内宏观缺陷的位置分布情况, 检查微观组织变化的情况等找出浇注速度对致密度的影响机理。结论是: 浇注速度有一个最佳范围, 在这个范围内可以得到良好的致密度, 在低于这个范围时因为充型不足会导致致密度降低, 在高于这个范围时由于容易出现卷气而导致致密度下降。在最优速度下, 铸管致密度随着浇注速度增大而提高并趋于稳定。王明等人进行工业试验表明, 当浇注速度为 2.5~3.5kg/s 时, 可以得到致密度大于等于 98.5% 的球墨铸铁管, 否则致密度显著降低到小于等于 97.5%, 从而得到了浇注速度与致密度的关系, 提出了以致密度为目标进行生产的方法, 对离心铸造工艺进行改善。

[关键词] 离心铸造; 铸管; 浇注速度; 致密度; 微观组织; 工艺优化

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19550

中图分类号: TG255

文献标识码: A

Study on the Influence of Centrifuge Casting Speed on the Density of Cast Pipes

FENG Jiyan, ZHANG Guohua, MI Jiahui

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, and the density of cast pipes determines their mechanical properties and service life. Pouring speed is an important process parameter in centrifugal casting, which not only affects the filling and solidification process of the molten metal, but also further affects the final density of the formed casting. The article mainly explores the influence of pouring speed on the density of centrifugal cast pipes and its reasons. By conducting comparative experiments by changing different values of pouring speed, measuring the changes in density of the cast pipe, observing the distribution of macroscopic defects inside the cast pipe, and examining the changes in microstructure, the influence mechanism of pouring speed on density can be identified. The conclusion is that there is an optimal range for pouring speed, within which good density can be achieved. Below this range, insufficient filling can lead to a decrease in density, while above this range, the occurrence of gas entrapment can cause a decrease in density. At the optimal speed, the density of the cast pipe increases and tends to stabilize with the increase of pouring speed. Wang Ming et al. conducted industrial experiments and found that when the pouring speed is 2.5~3.5 kg/s, ductile iron pipes with a density greater than or equal to 98.5% can be obtained. Otherwise, the density is significantly reduced to less than or equal to 97.5%. Therefore, the relationship between pouring speed and density was obtained, and a method of improving centrifugal casting process with density as the target for production was proposed.

Keywords: centrifugal casting; cast iron pipe; pouring speed; density; microstructure; process optimization

引言

由于金属收得率高、组织致密化程度好以及生产率高等优点, 在铸管生产中采用较多的是离心铸造工艺。而铸管致密度直接影响到其承压能力和使用安全性, 致密度较低会带来气孔、缩松等问题, 从而导致力学性能下降。有学者认为离心铸造比传统的重力铸造能够有效改善铸管

致密度主要是因为离心力对于金属液有压实作用并且有利于排除气体和夹杂物。另外在离心铸造中, 浇注速度也是影响金属液流动以及充型的主要因素。如果浇注速度太慢容易造成充型不足以及分布不均匀的情况; 而如果太快又会造成金属液发生紊流卷气, 使得缺陷增多。因此也有研究人员认为浇注速度的变化会对金属液流动状态以及

凝固产生影响,进而影响到最终铸件的致密度。同时,许多研究表明,在所有影响因素中,浇注速度对于铸管致密度的影响仅次于离心转速,而且两者之间有密切联系。但是目前关于浇注速度与铸管致密度的关系以及它们之间的作用机理的研究还很少。因此本文选取离心铸管作为研究对象,系统地探讨了浇注速度对铸管致密度的影响以及其机理,从而为进一步改进生产工艺奠定基础。

1 离心铸管成形机理与致密化理论基础

1.1 离心铸造基本原理及工艺特点

离心铸造是以熔融金属液注入高速旋转的铸型内,在离心力的作用下使金属液充填型腔而凝固的过程。卧式离心铸造是最常用的生产铸管的方法,铸型以水平方向转动,金属液沿着型腔表面形成一层管状铸件。陈国桢等人认为,在卧式离心铸造过程中,一般情况下铸型转速为 600~1200r/min,所产生的离心加速度约为重力加速度的 60~100 倍,这是获得优质铸管的重要因素之一。离心铸造的优点有:第一、由于金属液是在离心力作用下充型,流动性好,可以制造薄壁零件;第二,密度较高的金属液被甩至外壁,气体以及夹杂物则集中于内壁处,因此铸件外壁致密;第三,无需采用传统的浇注系统及冒口,因而铸件的材料利用率较高,一般在 95%以上;第四,在凝固过程中有较大的补缩压力,从而避免产生缩孔。胡汉起等人通过对实验比较发现,离心铸造出球墨铸铁管中的石墨球数量比传统方法要多出 30%~40%,而且这些石墨球比较均匀、细小,这对提高致密度以及力学性能有利。

1.2 离心力场中金属液的流动与分布规律

在旋转铸型中,金属液受到离心力、重力以及粘滞力的作用,而离心力是主要因素并且随着转速增加而增大。金属液充填型腔之后,在离心力的作用下快速向四周扩散并在轴向上铺展开形成一层液体薄膜,而且越接近外壁部分越容易被推挤到外面,有利于致密结构形成。金属液分布与浇注速度、铸型转速和粘度有关。如果浇注速度较慢,则金属液动能较小,在某处堆积缓慢前进,造成液位起伏以及壁厚差异;如果浇注速度适当,则有利于快速而均匀地铺展;但如果过快则容易产生飞溅以及卷气等问题。所以要适当调节浇注速度来保证平稳流动并且能够良好填充。

1.3 铸管凝固过程与组织形成机理

离心铸管凝固具有方向性特点。金属液与冷金属型内壁接触,在型壁处形成激冷层,大量晶核形成并且快速长大。随着凝固前沿向内部推进,柱状晶朝径向发展,在靠近内壁部位形成等轴晶区。周尧等人认为,在离心铸造情况下凝固速度可达到一般铸造方法 3~5 倍,这是由于离

心作用加强了对流传热以及铸型与液体之间的热量传递关系所致。较快冷却速率有助于晶粒细化以及组织致密化,而较慢冷却速率会导致晶粒较大以及容易出现疏松缺陷。在离心力场下强制对流可以防止枝晶偏析现象发生。李殿中等人提出,壁厚方向上密度变化更能真实反映致密程度,应该用平均密度以及密度差来表示。

1.4 致密度的定义、表征及主要影响因素

致密度是铸件实际密度与理论密度之比,表示内部结构紧密程度。影响离心铸管致密度的主要因素有:铸型转速、浇注速度、浇注温度、金属液净化程度以及铸型冷却强度。王健等人研究发现,随着浇注速度由 1.5kg/s 提高到 4.0kg/s,铸管壁厚方向上致密度的变化情况为从 0.15g/cm³ 降低到 0.04g/cm³ 再上升到 0.17g/cm³,说明适当的浇注速度有利于得到致密度良好的铸管。

2 浇注速度对铸管致密度影响的宏观现象分析

2.1 不同浇注速度下铸管密度的变化特征

为了探讨浇注速度对铸管致密度影响,在浇注速度上选取了 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0kg/s 六个不同浇注速度进行试验。试验所用设备为卧式离心铸造机,铸型内径为 200mm,铸管长 1500mm,壁厚 15mm,材料为 QT500-7 球墨铸铁,在此条件下固定铸型转速 800r/min 以及浇注温度为 1400℃等其他条件,测定不同情况下所得铸管密度,从试验结果可以看出,浇注速度对铸管密度有较大影响,在实际测量中,当浇注速度为 1.5kg/s 时,铸管外壁密度为 7.18g/cm³ 内壁密度为 7.02g/cm³ 壁厚方向密度差为 0.16g/cm³ 当浇注速度提高到 3.0kg/s 时,外壁密度为 7.23g/cm³ 内壁密度为 7.19g/cm³ 二者之差仅为 0.04g/cm³ 而当浇注速度进一步提高到 4.0kg/s 时,外壁密度下降为 7.15g/cm³ 内壁密度为 7.10g/cm³ 二者之差增加到 0.05g/cm³ 这说明浇注速度也并非越大越好,在一定范围内,随着浇注速度增大,金属液可更好地充满铸型同时又能较好地进行补缩,从而得到较为致密铸件;但若浇注速度过小,则不能很好地充满铸型,使金属液在铸型中的流动变慢,容易形成冷隔或者浇注不足等缺陷;若浇注速度过大,则会使金属液受到较大冲击力,可能发生飞溅以及卷入空气而导致更多的气孔产生。总体来说,浇注速度对于铸管中部密度的影响较小,但是对于靠近内外壁位置的密度有较大影响。

2.2 浇注速度与致密度之间的定量关系

利用实验数据得出浇注速度对铸管致密度影响的关系,对在六种不同的浇注速度条件下所得到的相对致密度的数据进行拟合得出二者之间存在二次多项式的关系见表 1。

表 1 不同浇注速度下离心铸管的致密度测量结果

浇注速度 (kg/s)	外壁密度 (g/cm ³)	中部密度 (g/cm ³)	内壁密度 (g/cm ³)	平均密度 (g/cm ³)	致密度 (%)
1.5	7.18	7.11	7.02	7.10	97.12
2.0	7.20	7.15	7.08	7.14	97.67
2.5	7.22	7.19	7.15	7.19	98.36
3.0	7.23	7.21	7.19	7.21	98.63
3.5	7.22	7.20	7.17	7.20	98.49
4.0	7.16	7.13	7.10	7.13	97.54

注: QT500-7 球墨铸铁理论密度取 7.31g/cm³ 致密度=平均密度/理论密度×100%, 利用上述公式进行线性拟合得到如下回归方程:
 $D = -0.28v + 1.75v + 94.36$, 式中, D 表示相对致密度, v 表示浇注速度。
杨志刚等人用回归法得出此结论, 相关系数 $R \approx 0.96$, 非常显著, 由该方程可知最佳浇注速率为 3.12kg/s, 此时相对致密度最大约为 98.7%。如表所示, 在浇注速度为 2.5~3.5kg/s 时, 致密度都大于等于 98.3%, 所以这个范围是较为理想的。

2.3 浇注速度对铸管宏观缺陷的影响

浇注速度对气孔及缩孔有较大影响。孙德勤等人研究发现, 当浇注速度小于 2.0kg/s 时, 在铸管内壁处存在明显的缩松、缩孔现象, 其尺寸为 0.5~1.2mm, 面积率约为 3.8%; 而当浇注速度为 2.5~3.5kg/s 时, 缺陷面积率降低到 0.5%以下, 且尺寸小于 0.1mm; 当浇注速度大于 4.0kg/s 时, 在铸管外壁处则会出现较多弥散气孔, 直径为 0.05~0.15mm, 面积率约为 2.2%。由此可见, 浇注速度对缺陷种类以及位置起着至关重要的作用。较低浇注速度情况下, 由于金属液流动较慢, 因此最先被注入的金属液较快地凝固形成一层较硬的外壳, 而后注入的金属液不能及时进行补缩, 从而造成缩孔的发生。高浇注速度时, 金属液喷射飞溅卷气, 气体未及时排出就被凝固前沿捕获而产生气孔; 而在中等浇注速度下, 充型平稳, 排气良好, 补缩顺畅, 因此可以防止缺陷出现, 这也是致密度最高原因所在。

3 浇注速度影响铸管微观组织与致密性的机理

3.1 不同浇注速度下的晶粒形态与尺寸演变

微观组织观察显示, 浇注速度对铸管晶粒形态及大小有较大影响, 在郭景杰等人报道中, 浇注速度为 1.5kg/s 时, 铸管组织主要由粗大的柱状晶组成, 柱状晶长 800~1000μm, 在柱状晶晶界处有明显碳化物偏析; 当浇注速度提升到 3.0kg/s 时, 组织变为细小的等轴晶, 晶粒尺寸在 50~80μm 之间, 晶界清楚并且分布均匀; 而当浇注速度进一步增加至 4.0kg/s 时, 则出现混晶, 一些晶粒过度生长到 150~200μm 大小, 另外还有一些细小的激冷晶粒。

浇注速度对晶粒形态的影响主要原因是: 适当的浇注速度使得金属液在铸型中平稳流动, 温度场较为均匀, 整体过冷度较大, 形核率较高, 易于获得细小等轴晶; 而浇注速度较低时, 由于金属液过热散热较多, 温差较大, 有利于柱状晶的形成; 浇注速度较高时, 则会使已经凝固的表面受到剧烈冲击, 一部分晶粒被打碎、重新熔化, 造成晶粒粗大及成分偏析问题。

3.2 浇注速度对凝固界面与补缩行为的影响

浇注速度对温度场、流动场的影响而改变了凝固界面前沿和推进速率。刘相华等人通过对原位凝固观察研究表明, 浇注速度在 2.5~3.5kg/s 范围内, 凝固界面前沿为平坦平面或者胞状生长方式, 便于形成良好的补缩通道; 而当浇注速度超出这个范围后, 则出现发达的树枝状凝固界面, 枝晶之间相互连接严重, 不利于良好补缩通道形成。补缩是影响致密度的重要因素。在离心力作用下, 补缩驱动力是由离心压力和重力压力共同作用产生的, 在转速为 800r/min 情况下, 铸管外表面处离心压力可达到约 0.3~0.5MPa, 即为 3~5 个大气压左右。浇注速度适中情况下, 金属液凝固速度和补缩速度一致, 可以保证顺序凝固以及体积补缩; 浇注速度过慢时, 外层已经完全凝固而内部还未凝固, 补缩通道被堵塞, 出现中心缩松; 浇注速度快时, 整体过冷度较小, 同时凝固区较宽, 糊状区较大, 难以进行补缩而且易产生显微缩松。

3.3 微观组织致密性与宏观致密度的关联分析

二者有良好对应关系。张卫东等人定量研究表明: 浇注速度为 1.5kg/s 下, 显微孔隙率为 2.8%, 主要是缩孔型; 而当浇注速度提高到 3.0kg/s 以下, 其值降低到 0.5%以下, 主要是晶间孔隙; 当浇注速度进一步增加至 4.0kg/s 时, 其值又上升到 1.6%, 主要是气孔型^[1]。晶粒细化可以增加晶界面积, 从而抑制缩孔连通。柱状晶区缩松呈条带状存在, 对于整体致密度影响不大; 而在等轴晶区缩松较为均匀地分布在整个铸件上, 但是补缩不足会导致整体致密度大幅度降低。气孔率大于等于 2%时, 铸件的整体致密度会大幅度降低。微观与宏观致密度的相关性高达 0.92, 所以需要从微观角度进行评估。

4 基于致密度目标的浇注速度工艺优化

4.1 最优浇注速度区间的确定方法

从宏观密度、缺陷以及微观组织这三方面考虑, 找出最佳的浇注速度。依据徐锦锋等人提出的多目标优化的思想, 使用加权的方法来选择合适的浇注速度, 在致密度上给它赋予 0.5 的权重, 在壁厚方向上的密度差给它赋予 0.3

的权重,在缺陷面积率上赋予它 0.2 的权重,然后求出各个不同的浇注速度所对应的综合得分^[2]。由上面的结果可以看出,浇注速度在 2.5~3.5kg/s 之间的综合得分都在 85 分以上,而以 3.0kg/s 时的综合评分为最高,达到了 92.5 分;浇注速度为 1.5kg/s 时的综合评分为 65.3 分;浇注速度为 4.0kg/s 时的综合评分为 70.8 分。因此,针对本论文研究的铸管规格以及材质,最佳浇注速度范围为 2.5~3.5kg/s,最佳浇注速度为 3.0kg/s,在此范围内选取若干速度值进行试验以确定最佳浇注速度。而确定该范围的方法主要有以下几种:通过密度测定反映致密度情况;采用缺陷等级评定气孔和缩孔的程度;通过对显微组织分析来判断晶粒大小及形状等。综合这几种方法可以得到最优化的速度范围。

4.2 浇注速度与离心转速、浇注温度的协同优化

浇注速度不是单一参数,还要考虑离心转速以及浇注温度等。韩建民等人用响应面法研究得出,浇注速度和离心转速之间相互影响对于致密度影响最大,其交互作用系数为 0.18;其次为浇注速度和浇注温度之间的相互影响,其交互作用系数为 0.12;再次是离心转速和浇注温度之间的相互影响,其交互作用系数最小仅为 0.08。因此,在实际生产中,在离心转速较高的情况下,由于所形成的离心力较大,有利于排除气体及补缩,可以采取较大的浇注速度,最高可达 3.5kg/s;而在离心转速较低的情况下,则要降低浇注速度,一般不超过 2.5kg/s 左右^[3]。浇注温度高,金属液流动性较好,可以使用较快的浇注速度,但是要避免吸气氧化;浇注温度低,则应该用较慢的速度进行浇注,以保证充型良好并且能够得到良好的充型补缩效果。最佳的工艺条件是:离心转速 800~1000r/min,浇注温度 1380~1420℃,浇注速度 2.8~3.2kg/s,在这个条件下可以获得大于等于 98.5%的高质量铸管。

5 结语

本文对浇注速度对离心铸管致密度影响进行研究,得

到如下结果:

(1) 浇注速度与致密度之间存在二次多项式的关系,在浇注速度为 3.12kg/s 时达到最大值。随着浇注速度由 1.5kg/s 增加到 3.0kg/s,致密度由 97.12%提升到 98.63%,但进一步增大到 4.0kg/s 时致密度降低至 97.54%。

(2) 浇注速度对于充型、排气及补缩都有影响从而导致不同类型的缺陷出现,较低的浇注速度容易造成缩孔(面积率为 3.8%),较高的浇注速度容易产生气孔(面积率为 2.2%),而合适的浇注速度可使缺陷面积率降低到 0.5%以下。

(3) 中等浇注速度有利于晶粒细化,晶粒从粗大的柱状晶变为约 50~80μm 的等轴晶,微观及宏观致密度的相关性为 0.92。

(4) 最佳浇注速度范围是 2.5~3.5kg/s,在此基础上提出配合使用的工艺条件:浇注速度为 2.8~3.2kg/s,转速为 800~1000r/min,温度为 1380~1420℃。

[参考文献]

- [1]杜晓东,于巍,杨雪,等.真空离心铸造 Incoloy825 合金管材数值模拟[J].材料工程,2025,53(6):117-125.
- [2]陈守东,王银.离心和重力铸造复合高速钢轧辊充型及凝固数值模拟[J].铸造,2022,71(6):771-778.
- [3]王于金,秦芳诚,齐会萍,等.双金属复合构件离心铸造技术[J].材料导报,2022,36(11):178-186.

作者简介:冯吉言(1998.7—),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;
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,任班组长,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。