

阶梯浇注系统中从分配直浇道底端引入金属液的效果

周 洪

(攀枝花学院钒钛学院, 四川攀枝花 617000)

摘要: 用FLOW-3D软件分别对金属液从分配直浇道顶端引入以及底端引入两种阶梯浇注系统进行了充型数值模拟, 获得了各层内浇道充型顺序和流入金属液质量占比。结果表明, 底端引入式阶梯浇注系统可以实现自下而上的逐层充型目标, 底层内浇道充型金属液量可以降到45%以下。

关键词: 阶梯浇注系统; 分配直浇道; 底端引入式; 充型顺序; 质量百分比

1951年, 美国学者Hall在Foundry杂志上撰文介绍了阶梯式浇注系统, 他认为这种浇注系统适用于高大铸件的生产, 能实现金属液自下而上分层充型, 形成型腔中金属液下低上高的温度梯度, 有利于冒口的补缩^[1]。此后, 国内外铸造工作者对阶梯式浇注系统展开了研究。在20世纪五六十年代, 国外应用过一种每层内浇道分别通过不同的直浇道提供金属液的分层注入方案^[2]。20世纪90年代, 史鉴开又提出了用一套带有隔板的多直浇口杯在浇注的不同阶段为不同直浇道提供金属液的改进方案^[3]。这种各层内浇道分别由不同直浇道浇注的阶梯式浇注系统能非常可靠地实现分层充型, 但其结构复杂、占用砂型体积, 增加铸件成本, 只适合应用在极少数特别重要的大型铸件上^[2]。为此, 人们对阶梯式浇注系统的研究主要集中在适用于普通高大铸件的单直浇道浇注系统上。李魁盛^[2]、魏邦全^[4]、赵甫立^[5]、范善君^[6]、叶荣茂^[7]等人的研究证实, 直落式阶梯式浇注系统极易出现“乱浇”“逆流”问题, 同时绝大部分金属液是通过底层内浇道充型的, 很难实现自下而上的充型目标。此后, 人们研究的重点转移到带分配直浇道的浇注系统上, 这种浇注系统的特点是, 浇注过程中金属液通过直浇道、连接浇道被直接送到分配直浇道下部, 使金属液从下往上流动来进行充型。陆德平^[8]对比研究了金属液从底层内浇道下方引入及从底层与第二层内浇道之间引入两种情况, 发现无论是从控制各层浇道同时溢流的现象还是从各层浇道的流量分配方面考虑, 连接浇道位置处于底层内浇道下方的阶梯式浇注系统效果更好。李骏骋^[9]采用在直浇道上做出90度转弯结构改变液流方向和在直浇道末端设置消能段来消除浇包中流出的金属液动量的技术, 取得了较好的分层出流和层流量合理分配(底层和上层内浇道累计流量分别占总流量的60%和40%)的效果, 胡黎辉将这一技术运用到轧机机架阶梯式浇注系统的设计中^[10]。近年的生产中仍然有很多工艺采用的是直落式阶梯浇注系统^[11-14], 说明至今大家对阶梯式浇注系统的认识还存在不同见解。为此, 本文拟运用FLOW-3D软件数值模拟的方法, 对金属液通过直浇道从分配直浇道顶端引入(简称“顶端引入式”)及通过直浇道、连接浇道从分配直浇道底端引入(简称“底端引入式”)两种阶梯式浇注系统各层内浇道充型顺序、充型(入流)量等进行对比, 供阶梯浇注系统设计时参考。

作者简介:

周洪(1966-), 男, 高级工程师, 副教授, 研究方向为铸造工艺和铸造材料。
E-mail: pzhu_zhouhong@163.com; 电话: 13096093765

中图分类号: TG244+.4
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)06-0751-06

收稿日期:

2022-08-29 收到初稿,
2022-10-12 收到修订稿。

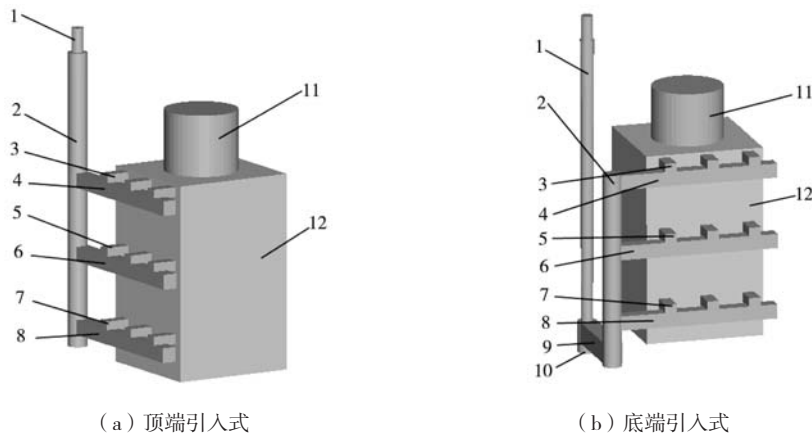
1 试验方法

1.1 几何模型

用于比较的顶端引入式和底端引入式阶梯浇注系统及铸件、冒口的几何模型如图1所示。

图1所示的这两种形式阶梯浇注系统的各层横浇道和内浇道形状和尺寸完全一样；分配直浇道直径也一样，但金属液引入分配直浇道的位置不同；底端引入

式中连接浇道的截面积大小与分配直浇道基本相同。相邻层横浇道间距300 mm，直浇道入口到分配直浇道底端距离为1 200 mm，底层横浇道底面距分配直浇道底端60 mm，底层横浇道底面距铸件底面150 mm。底端引入式中连接浇道、直浇道窝的上表面与分配直浇道底端平齐。



(a) 顶端引入式

(b) 底端引入式

1. 直浇道，下端（出口）直径50 mm；2. 分配直浇道，直径80 mm；3. 顶层内浇道，宽50 mm，高40 mm；4. 顶层横浇道，宽60 mm，高60 mm；5. 第二层内浇道，宽50 mm，高40 mm；6. 第二层横浇道，宽60 mm，高60 mm；7. 底层内浇道，宽50 mm，高40 mm；8. 底层横浇道，宽60 mm，高60 mm；9. 连接浇道，宽80 mm，高90 mm；10. 直浇道窝，直径80 mm，高130 mm；11. 冒口，直径300 mm，高300 mm；12. 铸件，为中间带纵向“井”字形隔板的倒扣方形箱体，长宽均为500 mm，高800 mm，外壁厚30 mm，隔板厚度20 mm

图1 比较用两种阶梯浇注系统

Fig. 1 Two types of the step gating systems for comparison

1.2 数值模拟试验参数

针对不同的浇注速度，模拟计算了直浇道入口速度（浇注速度）为0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s等几种情况，对应的浇注质量流量为7.5 kg/s、15 kg/s、22.5 kg/s、30 kg/s。

2 结果与分析

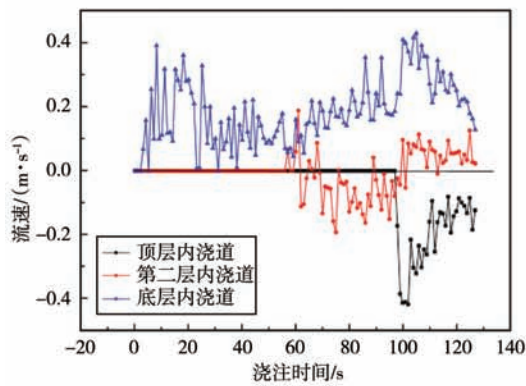
2.1 各层内浇道充型顺序

不同浇注速度下各层内浇道中金属液流动速度曲线如图2所示。图中速度为正，表示金属液通过内浇道流入铸件型腔（简称为“入流”），反之速度为负，表示金属液通过内浇道流出铸件型腔进入浇注系统（简称为“出流”），速度值的大小为金属液通过同一层三个内浇道的平均流动速率。

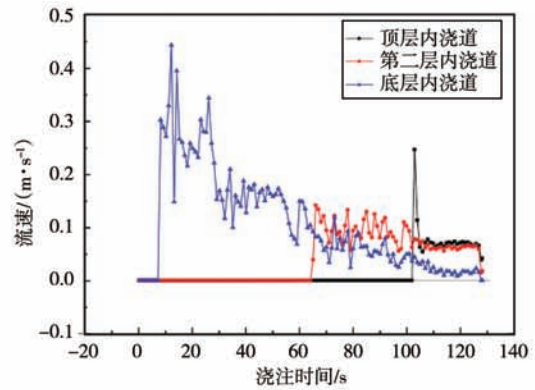
从图2可以看出，不论顶端引入式还是底端引入式，对计算的直浇道入口速度来说，金属液均自下而上依次从各层内浇道流过。但发现，顶端引入式阶梯浇注系统第二层内浇道在金属液“入流”之前存在一个较长时间的“出流”过程；同时还发现，当顶层内浇道中有金属液流动时，第二层内浇道中金属液开始“入流”过程；顶层内浇道中金属液始终是“出流”

的。顶端引入式阶梯浇注系统浇注过程中，第二层和顶层内浇道的“出流”现象与马鹏飞、赵甫立等人的水模拟实验观察到的现象一致^[1, 5]，从图3a1和图3a2所示的浇注速度为2 m/s的顶端引入式仿真结果3D截图可以明显看到上述现象。毫无疑问，当顶端引入式的直浇道入口金属液速度加快到一定程度，分配直浇道中液面会远远高出型腔内液面，此时极有可能出现“乱浇”现象，因此，顶端引入式阶梯浇注系统不论浇注速度大还是小，都不能实现自下而上分层充型的目标。

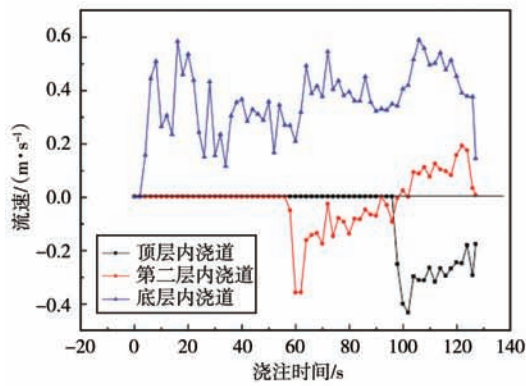
从图2还可以看出，底端引入式中，金属液自下而上地通过各层内浇道的流动都是“入流”过程，没有出现“出流”的现象。分析认为，因底端引入式阶梯浇注系统中金属液通过连接浇道从分配直浇道的底层横浇道之下一段距离（本模拟实验中为60 mm）引入，由于惯性的存在，金属液在进入分配直浇道之后从下往上流动，因此，在分配直浇道中液面没有上升到顶之前，分配直浇道液面始终高于型腔中液面，因而不会出现“出流”现象。图3b1和图3b2为浇注速度为2 m/s的底端引入式仿真结果3D截图，从图中可以明显看到，分配直浇道中液面高于型腔内液面，分析认



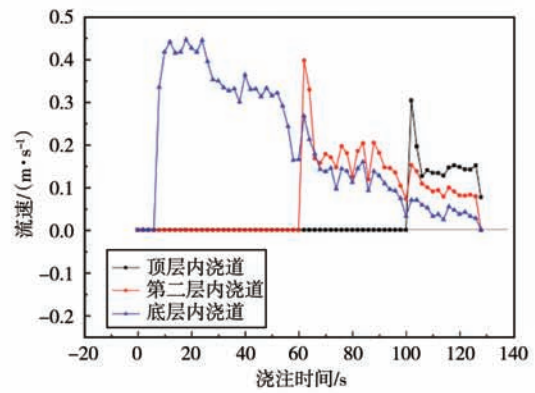
(a1) 顶端引入式直浇道入口速度0.5 m/s



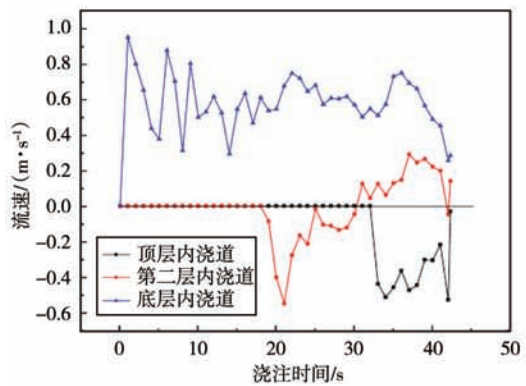
(b1) 底端引入式直浇道入口速度0.5 m/s



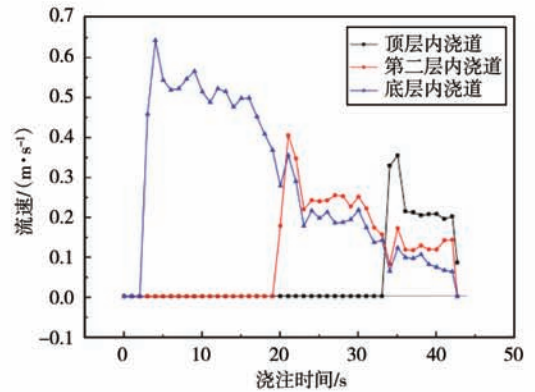
(a2) 顶端引入式直浇道入口速度1 m/s



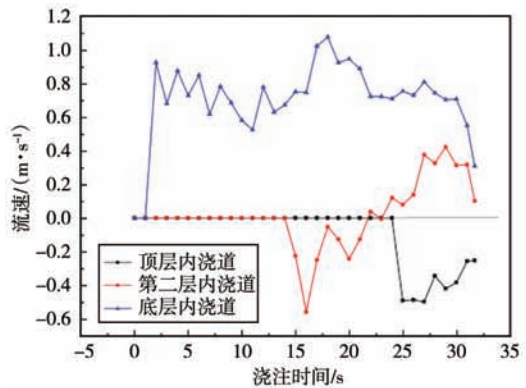
(b2) 底端引入式直浇道入口速度1 m/s



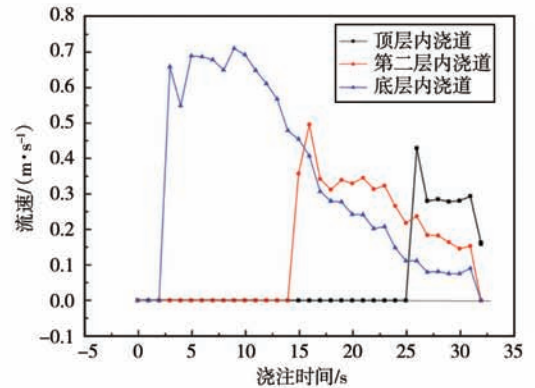
(a3) 顶端引入式直浇道入口速度1.5 m/s



(b3) 底端引入式直浇道入口速度1.5 m/s



(a4) 顶端引入式直浇道入口速度2 m/s



(b4) 底端引入式直浇道入口速度2 m/s

图2 不同浇注速度下各层内浇道中金属液流动速度曲线

Fig. 2 Flow velocity curves of the molten metal in the ingate of each layer at different pouring speeds

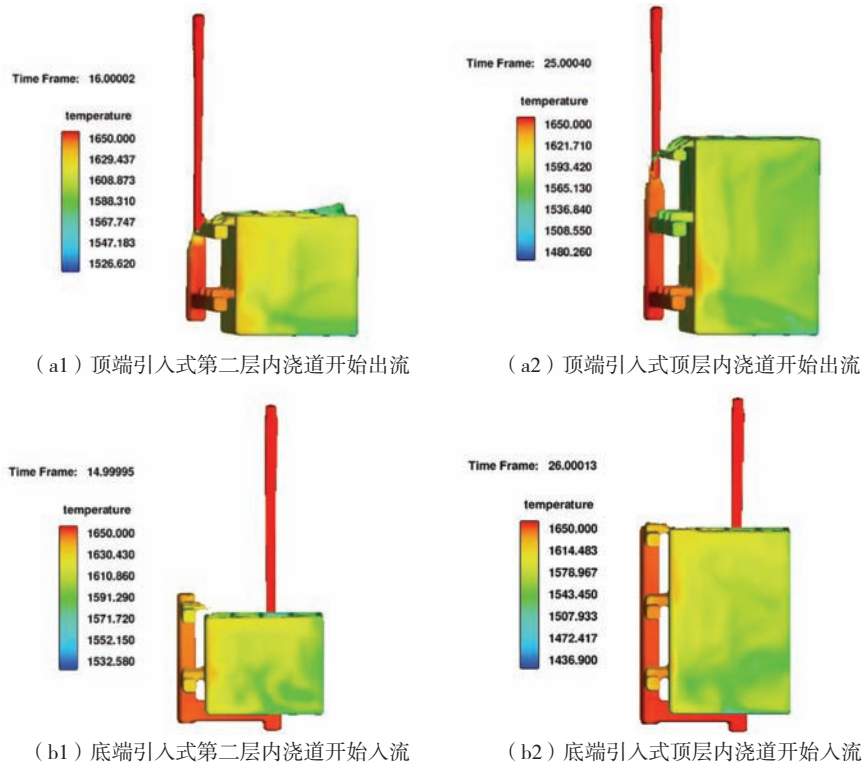


图3 不同引入式阶梯浇注系统的分配直浇道与型腔中金属液面高度对比

Fig. 3 Comparison of the molten metal surface altitude in distribution sprue and cavity in different entry step gating systems

为，直浇道入口金属液速度越快，分配直浇道中液面高出型腔内液面的程度越大，当直浇道入口金属液速度大到一定程度时，也有可能“乱浇”现象，因此，底端引入式阶梯浇注系统的浇注速度还是应控制在一定范围内。

2.2 各层内浇道入流金属液质量比

从图2看出，顶端引入式中底层内浇道在开始浇注很短时间后就开始入流，并且一直保持较高入流速度直到浇注结束；底端引入式中底层内浇道也一直入流，直到浇注结束，但与顶端引入式不同，当第二层开始入流后，底层内浇道的入流速度降低到第二层入流速度之下，当顶层内浇道开始入流后，顶层入流速度最大，第二层、底层内浇道入流速度逐层减小。将图2b1-图2b4所示的底端引入式阶梯浇注系统各层内浇道中金属液流动速度曲线求积分计算金属液通过各层内浇道入流质量的结果为：在第二层开始入流到顶层入流之前这段时间，第二层与底层入流量分别为55%~60%和40%~45%；在顶层开始入流到充型结束这一阶段，顶层内浇道入流金属液量占53%、第二层占33%、底层只占14%。图2中各层内浇道在整个充型阶段入流金属液占总入流量的百分比如表1所示。

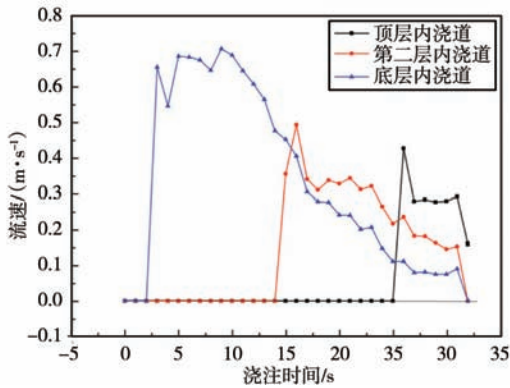
表1数据显示，在阶梯浇注系统各组元结构和尺寸

表1 各层内浇道入流金属液占比
Table 1 Inflow mass percentages of the molten metal in the ingate of each layer /%

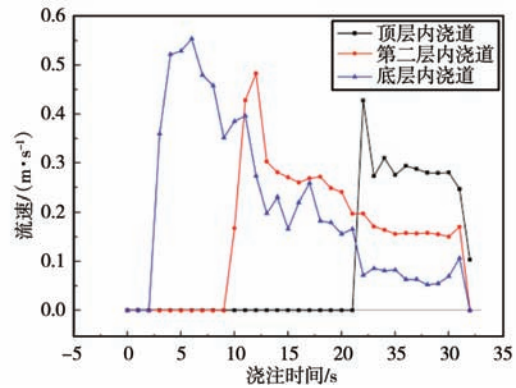
形式	内浇道位置	浇注速度 / (m · s ⁻¹)			
		0.5	1	1.5	2
顶端引入式	顶层	0	0	0	0
	第2层	7.86	5.48	6.73	8.45
	底层	92.14	94.53	93.28	91.56
底端引入式	顶层	9.36	10.72	11.24	10.99
	第2层	24.82	24.85	23.92	26.83
	底层	65.81	64.43	64.82	62.16

不变且直浇道入口速度在0.5~2 m/s情况下，浇注速度对各层内浇道金属液入流质量比的影响不大。

分析发现，在底端引入式阶梯浇注系统中，底层内浇道入流质量主要决定于第二层内浇道至铸件底部这一区域的铸件质量，顶层内浇道入流质量主要决定于顶层内浇道至铸件（含冒口）顶部这一区域的质量，中间层内浇道入流质量主要决定于该层内浇道与上一层内浇道之间区域的铸件质量。为了证实这一观点，保持浇注系统结构尺寸不变，整体降低浇注系统使底层内浇道与铸件底部平齐，浇注速度为2 m/s，各层内浇道中金属液流动速度曲线如图4b所示，为了便



(a) 底层内浇道在铸件150 mm高度处



(b) 底层内浇道与铸件底部平齐

图4 内浇道处于铸件不同高度下各层内浇道中金属液流动速度曲线

Fig. 4 Flow velocity curves of the molten metal in the ingate of each layer at different altitudes of the castings

于比较, 将图2b4所示曲线同列于图4a中。

从图4中可以看出, 浇注系统整体降低之后, 第二层和顶层内浇道的入流时间都提前了。计算图4中各层内浇道金属液入流质量比见表2。

从表2可以看出, 底端引入式浇注系统在铸件高度方向上的位置整体下降后, 可以有效降低底层内浇道的入流比例, 相应的, 第二及顶层内浇道入流质量比得以提高。

表2 底端引入式内浇道位置不同时各层内浇道入流质量比
Table 2 Inflow mass percentages of the molten metal in the ingate of each layer at different altitudes in bottom entry step gating system /%

形式	底层内浇道距铸件底部的距离/mm	
	150	0
顶层	11	21
第二层	27	34
底层	62	45

3 结论

(1) 从分配直浇道顶端直接引入金属液的顶端

引入式阶梯浇注系统不能达成自下而上逐层充型的目标。

(2) 通过直浇道、连接浇道将金属液从底层内浇道下方引入到分配直浇道底端的底端引入式阶梯浇注系统, 在本研究设置的浇口比条件下, 不会出现型腔中金属液通过内浇道流出到分配直浇道的“出流”现象, 在直浇道入口金属液流速不超过2 m/s时, 不会出现“乱浇”现象, 底层内浇道入流的金属液质量可以控制到整个充型质量的45%以下, 这种阶梯浇注系统可以达成自下而上逐层充型的目标。

(3) 在底端引入式阶梯浇注系统中, 直浇道入口金属液的注入流速对各层内浇道金属液入流质量比的影响不大。各层内浇道在铸件高度方向的位置高低基本决定了各层入流质量, 底层内浇道入流质量主要决定于第二层内浇道至铸件底部这一区域的铸件质量, 顶层内浇道入流质量主要决定于顶层内浇道至铸件(含冒口)顶部这一区域的质量, 中间层内浇道入流质量主要决定于该层内浇道与上一层内浇道之间区域的铸件质量; 在阶梯浇注系统设计时, 可以通过调整内浇道在铸件高度方向的位置来大致控制各层内浇道流入的金属液质量。

参考文献:

- [1] 马鹏飞. 阶梯式浇注系统分层注入功能的水模拟试验 [J]. 铸造技术, 2003, 24 (2): 122-123.
- [2] 李魁盛. 阶梯式浇注系统的设计原理和新算法 [J]. 铸工, 1979, 28 (3): 27-32.
- [3] 史鉴开, 李育恩. 阶梯式浇注系统的改进 [J]. 热加工工艺, 1993, 22 (4): 50.
- [4] 魏邦全, 陆初觉, 朱平顺, 等. 单柱式阶梯浇注系统的实验研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 1987, 13 (4): 53-61.
- [5] 赵甫立, 杨国潘, 王晓莉. 三层阶梯浇注系统的水模拟研究 [J]. 铸造, 1989, 38 (8): 16-19.
- [6] 范善君, 郑宗惠. 高大型铸件阶梯式浇注系统水力学模拟的研究 [J]. 铸造, 1990, 39 (6): 13-18.

- [7] 叶荣茂, 常庆明, 马振玫, 等. 阶梯式浇注系统流量分配计算的新方法—准伯努利方程 [J]. 材料科学与工艺, 1994, 2 (4): 65-70.
- [8] 陆德平, 杨恩长. 阶梯式浇注系统的合理结构 [J]. 江西科技, 1992, 10 (4): 214-219.
- [9] 李骏骋, 高永久, 张思涛, 等. 阶梯式浇注系统的优化设计 [J]. 大型铸锻件, 1996, 18 (2): 4-8.
- [10] 胡黎辉, 边敦亭. 轧机机架阶梯式浇注系统的有限元模拟研究 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (3): 615-616.
- [11] 谭建波. 大型铝合金箱体的铸造工艺 [J]. 铸造技术, 1999, 21 (2): 36-37.
- [12] 王振宇, 杜利峰. 6DL3缸体铸件的生产工艺 [J]. 现代铸铁, 2017, 37 (1): 43-47.
- [13] 陈宗民, 秦聪祥, 赵而团. 减速箱箱座砂型铸造工艺和金属模样设计 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 2741-2744.
- [14] 宋旸. 注射座阶梯式浇注系统工艺优化及仿真研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2019.

Effect of Introducing Molten Metal from the Bottom of Distributing Sprue in Step Gating System

ZHOU Hong

(Vanadium & Titanium College of Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract:

The filling process of two types of step gating systems in which molten metal introduced from the top or bottom of the distribution sprue was numerically simulated by FLOW-3D, the mold filling sequence and inflow mass percentage of the molten metal in the ingate of each layer were obtained. The results showed that the bottom entry step gating system can achieve the goal of bottom-up layer by layer inflow, and the mass percentage of the molten metal flowing from the bottom ingate can be reduced to less than 45%.

Key words:

step gating system; distribution sprue; bottom entry type; filling sequence; mass percentage
