

强化消失模浇注系统挡渣和除气能力的设计

刘祖仁 曹博海

摘要:

防止消失模铸造的铸件产生夹渣（含黑渣、白渣）、气孔等缺陷的重要措施之一是增强浇注系统的挡渣和排气能力。文中分析和提出了设计浇注系统时，可采取的方法

泡沫塑料在金属液的热作用下发生气化，其间历经变形、软化、解聚、裂解、燃烧等阶段。在解聚过程中，EPS 的固态液化；EPMMA 则产生大量气化物，裂解时，它们会产生固态碳及氢气、一氧化碳等气体。至燃烧阶段，固态的碳将燃烧掉。由于金属液前沿的塑料受热并不充分，铸型内又缺氧，气化的后几个阶段几乎同时存在⁽¹⁾。因此，在快速流动的金属液前沿，气化物、液化物及固态物三项均有，它们极可能被液流卷入。另外，如真空度过大或涂料层强度过低，涂料层可能在浇注后破裂，使填充砂进入金属液。以上被液流卷入的气化物、液化物和固态物均可能在铸件内形成气孔、夹渣（包括黑渣、白渣）及碳质缺陷。

为预防和减少以上缺陷的发生，可以从工艺设计入手，强化浇注系统的挡渣功能和减少气体卷入的能力。具体说：

1. 浇注系统应尽量减轻金属液的紊流程度，保证液流平稳有序的充型；
2. 浇注系统各组元均呈充满状态，能尽快建立足够的压头，防止气流对金属液的捣动及“反喷”；
3. 设立挡渣装置，强化挡渣功能；
4. 各组元结构（形状、尺寸、截面比等）合理，有利挡渣和除气。

一. 选择适当的浇道尺寸，尽量减轻紊流程度。

金属液属粘性液体。粘性液体有两种流动状态：一是层流，二是紊流。层流时，液体质点仅有轴向运动，而紊流时，液体质点不仅沿轴向前进，而且有横向运动，运动轨迹杂乱无章。当紊流严重时，金属液所夹带的熔渣及卷入的模样液化物不易去除，很易从内浇道进入铸型，增加了铸件产生缺陷乃至报废的可能性。

金属液在浇注系统中的运动状态由雷诺数 Re 判定。当 $Re < 2320$ 时，金属液属层流状态；当 $Re > 2320$ 时，则呈紊流状态， Re 越大，紊流越严重。

雷诺数 Re 由以下两式计算：

(1) 圆形浇道

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \dots \dots \dots (1)$$

(2) 非圆形浇道

$$Re = \frac{4ur}{\nu} \dots \dots \dots (2)$$

(1) (2) 两式中，

u …… 平均流速，cm/s

d …… 圆形管道内径，cm

r …… 非圆形管道的水力半径，cm

a …… 金属液流的截面积， cm^2

s …… 金属液流的湿周长，cm

γ …… 金属液的运动粘度， cm^2/s

铁水的 γ 粘度可取 $0.03 cm^2/s$ 。

由以上两式可知，在设计浇道尺寸时，最小截面积不能过小，浇注速度也不能过快。消失模铸造浇注系统的最小截面积宜选择在内浇道，其面积 A_3 可根据大孔出流理论⁽²⁾推荐的公式计算：

$$A_3 = \frac{G}{\mu_3 t \sqrt{2gh_p}} \dots \dots \dots (3)$$

式中， G …… 浇注总重量，kg
 p …… 金属液密度， kg/cm^3
 μ_3 …… 内浇道流量因素

消失模铸造时，推荐值为 μ_3 ：0.26~0.36

g …… 重力加速度， 981 cm/s^2

t …… 浇注时间，s

A_3 …… 内浇道截面积， cm^2

h_p …… 平均压头，按式（4）计算：

$$h_p = \frac{K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} \left(H - \frac{P^2}{2C} \right) \dots \dots \dots (4)$$

式中： H …… 内浇道中心线至浇口杯液面距离，cm

P …… 内浇道中心线以上铸件高度，cm

C …… 铸件高度

K_1 、 K_2 分别为直浇道与横浇道的有效截面比及直浇道与内浇道的有效截面比，其中：

$$K_1 = \frac{\mu_1 A_1}{\mu_2 A_2} \quad ; \quad K_2 = \frac{\mu_1 A_1}{\mu_3 A_3}$$

A_1 、 A_2 、 A_3 分别为直浇道、横浇道、内浇道的截面积。 μ_1 、 μ_2 分别是直浇道和横浇道的流量系数。它们与 μ_3 一样，均与砂型铸造时的流量系数不同。据资料⁽³⁾介绍消失模铸造的充型速度比砂型铸造时慢，当直浇道高度为 150mm，用 EPS 作模样材料时，其速度损失为 63.2%。因此流量系数需作修正，推荐值为：

$$\mu_1: 0.30 \sim 0.39$$

$$\mu_2: 0.30 \sim 0.39$$

由式（3）计算可知，内浇道的截面积比普通砂型的大。这样，在保证一定浇注速度的前提下，可减缓液流在内浇道的流速，从而减轻紊流程度。

二. 选用封闭式或半封闭式浇注系统，设计时应保证金属液能充满各浇道

消失模铸造时，由于模样气化，铸型内气体压力较大，如果金属液没有足够的静压力，将产生反喷。反喷不仅使铸件报废，而且给车间安全带来隐患，所以要求正常浇注过程中，各浇道均能被金属液充满。但是浇道内能够充满金属液，不仅取决于各浇道的截面比，还受其他因素影响。这里以横浇道能否充满为例说明。

大孔出流理论提出的横浇道能否充满的判断式是：当 $h_3 < (h_{\text{横}} - h_{\text{内}/2})$ 时，横浇道不能为金属液充满；而当 $h_3 \geq (h_{\text{横}} - h_{\text{内}/2})$ 时，横浇道能注满，即浇道充满的条件是：

$$h_3 \geq h_{\text{横}} - \frac{1}{2} h_{\text{内}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

式中， $h_{\text{横}}$ …… 横浇道高度

$h_{\text{内}}$ …… 内浇道高度

h_3 …… 内浇道压头，其计算式为：

$$h_3 = \frac{K_2^2}{1+K_1^2+K_2^2} H \quad \dots \quad (6)$$

将式(6)代入(5), 则横浇道充满条件为:

$$\frac{K_2^2}{1+K_1^2+K_2^2} H \geq h_{\text{横}} - \frac{1}{2} h_{\text{内}} \quad \dots \quad (7)$$

由该式可知, 影响横浇道充满的因素有:

1. 直浇道有效高度 H

它对内浇道压力头的影响最大, 随着 H 的增加, h_3 增加, 对横浇道的充满有利。

2. 直浇道与横浇道的有效截面比 K_1 及直浇道与内浇道的有效截面比 K_2

图 1 是 K_1 对 h_3 的影响。随着 K_1 的增加 (横浇道截面减少), 内浇道压头下降, 显现出对横浇道充满的不利; 而 K_1 较小时, h_3 较大, 显然对横浇道充满有利。但横浇道面积过大, 将降低横浇道压头, 使直浇道内金属液流速增加, 不利渣和气在直浇道中的分离与上浮。

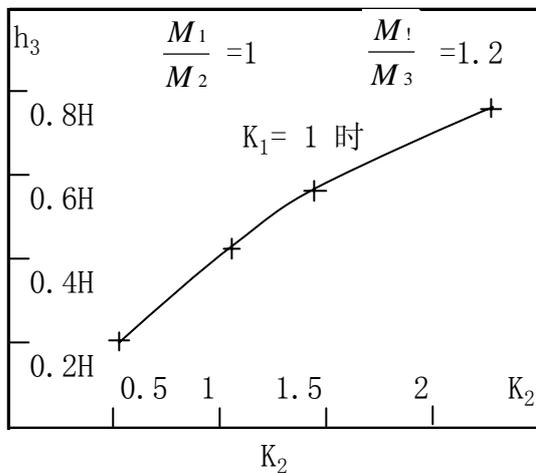


图2: K_2 内浇道压头的影响

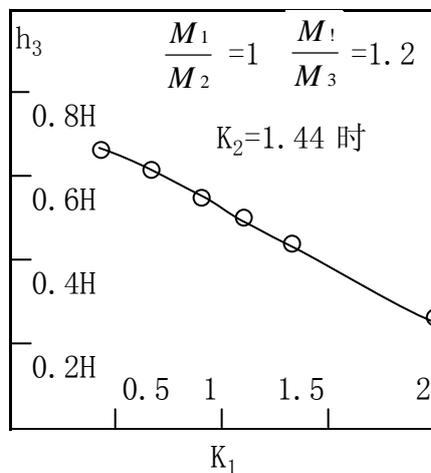


图1: K_1 对内浇道压头的影响

图 2 反映了内浇道截面积对横浇道能否充满的影响。随着内浇道面积的增加 (K_2 下降), 内浇道压头也下降, 从而对横浇道的充满产生不利影响。

但 K_1 、 K_2 是通过 H 影响 h_3 的, 横浇道能否充满金属液还要视式 (7) 中 $(h_{\text{横}} - \frac{1}{2} h_{\text{内}})$ 的大小。

3. 横浇道高度 $h_{\text{横}}$

横浇道高度越高, 对横浇道充满越不利。

4. 内浇道高度

增加内浇道高度有利横浇道的充满。在不影响铸件清理浇口和铸铁件补缩的前提下, 可选用圆形内浇道。

5. 流量系数 μ_1 、 μ_2 、 μ_3

影响流量系数大小的是模样材质、涂料透气性能、注入方式、浇道连接形状等。

综上所述, 影响横浇道充满的因素较多。在浇道设计后, 需按式 (5) 或式 (7) 计算, 检验横浇道能否充满。另外, 在浇注系统设计时, 最小截面积宜选择内浇道, 各截面比不必过大, A_1/A_2 可在 0.8~1.2 之间, A_1/A_3 大于 1 (K_2 在 1.2 左右) 即可, K_2 或 A_2 过大, 将影响工艺出品率。

三. 发挥浇道的挡渣作用

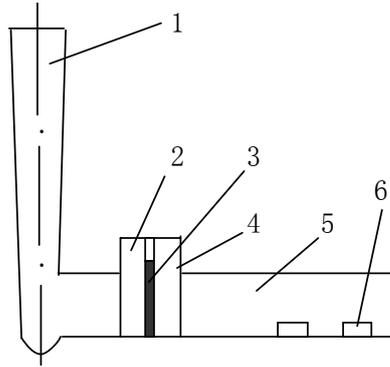
浇注系统具有挡渣功能的主要途径是防止金属液出现水平涡流和严重的紊流、横浇道结构合理及设立滤网等。

1. 外浇道采用池形浇杯

通常使用的漏斗形浇口杯内，金属液会出现严重的水平漩涡，容易卷入空气和熔渣，使之进入直浇道。而池形浇口杯在有条件的情况下可避免出现水平漩涡。条件为：浇注时不能让液流直冲直浇道，要让液流远离直浇道口，且浇注速度不能过慢，浇口杯中液面高度超约为直浇道上部直径的5~6倍。

2. 在浇注系统中设立过滤网，过滤片等挡渣装置

- (1) 在直浇道上端与外浇道之间设立过滤装置
- (2) 在横浇道的前段安放挡渣装置。



- 1、直浇道 2、4、集渣包 3、过滤片（网）
5、横浇道模样 6、内浇道塑料模样

图 3、横浇道内的挡渣装置

3. 横浇道设计合理

横浇道除起分送金属液至各内浇道的作用外，挡渣是其重要功能，但横浇道能否充分发挥其挡渣作用设计是关键。

(1)、横浇道内第一内浇道与直浇道之间要求足够的距离。浇注初期，进入横浇道的熔渣由两部分组成：一是金属液夹带的熔渣；二是直浇道的塑料模样未及气化的液化物。这种液化物正常浇注以后就没有了。熔渣以渣团的形式存在。由于渣团的密度 $\rho_{渣}$ 比金属液的密度 $\rho_{金}$ 小，所以出现了渣团在金属液中向上运动的浮力。这样，渣团在横浇道中一面前随金属液向前运动，一面上浮，其运动轨迹如图 4 所示。

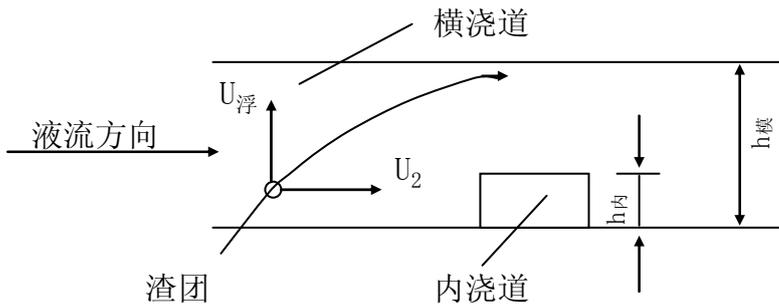


图 4 渣团的运动轨迹

图 4 中，虚线表示渣团的运动轨迹。它的轨迹是金属液流动速度 U_2 与渣团上浮速度 $U_{浮}$ 的合成。

横浇道内，同一截面的液流流速不等， $U_{浮}$ 也受阻力的影响，所以渣团的运动轨迹是曲线的。

由图可知，当液流速度较慢，而渣团上浮速度较大时，渣团很容易浮至横浇道上部。渣团上浮速度 $U_{浮}$ 受金属液与渣团的密度差 $(\rho_{金} - \rho_{渣})$ 、渣团大小 (D) 、金属液运动粘度 (γ) 等因素的影响，其关系式如式 (8) 所示：

$$U_{浮} \propto (\rho_{金} - \rho_{渣}) \cdot D / \gamma \dots \dots (8)$$

显然，渣团密度越小，渣团直径越大，越有利熔渣的上浮。若渣团尺寸很小，则因其

上浮速度过慢，很难浮至横浇道的上部，如要求浮出，液流速度应很慢。

图 4 也表明，如内浇道距离直浇道过近或内浇道高度 $h_{内}$ 过大或内浇道置于横浇道的上方，渣团均可能进入铸型。所以设计横浇道时，内浇道的高度不能过高，其位置尽可能置于横浇道的下部，而且第一个内浇道至直浇道应有一定的距离。

(2)、横浇道设延长段

为了发挥横浇道的挡渣及储存部分冷却的金属液作用，横浇道不应终止在最末一个内浇道处，宜有一定的延长段。

第一个内浇道至直浇道的距离及延长段的大小可根据铸件重量决定。当铸件小于 50 kg 时，其尺寸可在 100 ~ 150 mm 范围内选择，若铸件重量大于 50 kg 时，则所选择的尺寸应更大一些。

(3)、在保证金属液充满横浇道及一定的横浇道压头的前提下，可局部扩大横浇道的截面积。

在浇注系统中，横浇道是最适宜挡渣和除气的区段。当横浇道压头 h_3 与内浇道压头之差越小时，横浇道的挡渣、除气功能越明显

$$\text{由于 } h_2 = \frac{K_1^2 + K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} H$$

$$h_3 = \frac{K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} H$$

$$\therefore h_2 - h_3 = \frac{K_1^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} H$$

横浇道截面积 A_2 增大，可使 K_1 下降，从而使 $(h_2 - h_3)$ 变小。面积较大的横浇道若能充满金属液，其内的液流速度相对较慢，为熔渣及气泡的上浮创造了有利条件。但横浇道面积过大，将降低直浇道压头。为了不影响直浇道压头，可采用局部扩大横浇道面积的办法，即分段法，但扩大后的横浇道仍应满足“充满”的要求。

四. 防止金属液在浇道卷入气体和除气的措施

1. 采用池形外浇道，并注意浇注工艺，防止外浇道产生水平漩涡，卷入空气。
2. 将直浇道塑料模样制成壁厚 5 mm 左右的中空模样，以减少发气量。也可用耐火纤维或其他耐火材料制成的空腔模样取代塑料模。
3. 若以泡沫塑料制作直浇道，其形状应选择直径上大下小的圆锥体，不宜用圆柱体或直径上小下大的锥体，以避免直浇道浇注初期吸入气体。

这里，以圆柱体直浇道为例，说明浇注初期，直浇道上部周边因真空吸收气体。

图 5 中，a 面距内浇道中心线的范围内，为正压区域，其高度为横浇道压头 h_2 。

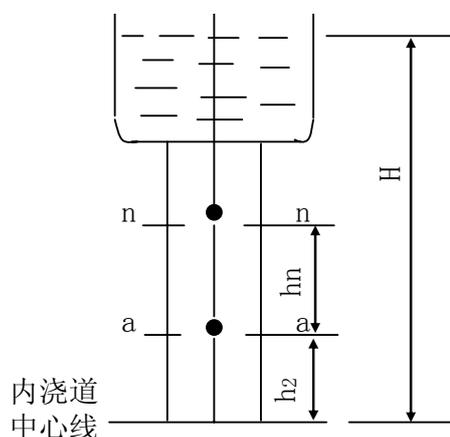
$$h_2 = \frac{K_1^2 + K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} H$$

n 为 a 面以上的任意一个面，根据柏努利方程，a 面与 n 面的总水头相等

$$\text{即: } \frac{Pa}{\rho} + \frac{Ua^2}{2g} + h_w = \frac{Pn}{\rho} + \frac{Un^2}{2g} + h_n \dots \dots$$

(9)

式中： U_a 、 U_n 分别为 a 面与 n 面金属液流动的平均速度；



$\frac{Ua^2}{2g}$ 、 $\frac{Un^2}{2g}$ 表示 a、n 两截面的速度水头；

h_n 表示 n 面金属液位置压头；

h_w 表示 a 面与 n 面之间的水头损失；

P_a 、 P_n 分别为 a 面、n 面的静压力；

ρ 为金属液的密度。

圆柱形浇道中，a、n 面的金属液流速相等。

$$\therefore \frac{Pa - Pn}{\rho} = h_n - h_w$$

由于金属液的位置压头 h_n 比 a—n 间的水头损失大，

$$\therefore P_a > P_n$$

a 面金属液的静压力 P_a 等于大气压，所以直浇道中，a 面以上任意截面上的压力都小于大气压，存在一定的真空度，而且越靠近浇口杯液面，真空度越大。

当浇道用泡沫塑料制作时，由于浇注初期，模样的液化物来不及迅速气化而粘附在涂料层上，除一部分被金属液卷走外，另一部分液化物在随后的气化过程中，一些气化物将因直浇道的真空现象而进入金属液。

为防止直浇道中产生真空现象，宜采直径上粗下细的圆锥体。

若直浇道用耐火材料制作，只要其干燥，不含水份，由于真空泵的作用，用圆柱形是可以的。

需要说明的是，当直浇道用泡沫塑料制作时，图 5 中 a-a 面以下至内浇道中心线相交处，由于真空度的作用及 h_2 的存在，涂料层将可能因强度不够而损坏，使填充砂进入金属液，使铸件产生白点（渣）缺陷。为防止这种夹渣缺陷的发生，可将泡沫材料制的直浇道改成空腔的耐火纤维或其它耐火材料制成成型直浇道⁽⁴⁾。

4. 在横浇道延长段的端部用针刺出密集小孔，增加涂料层的透气能力。该工艺在涂料干燥后实施。

5. 选择合适的注入方式，防止铸型内气化物侵入浇注系统或喷出。

不同的注入方式有各自的有缺点⁽⁵⁾。内浇道开设在模样上方（顶注）具有良好的补缩能力，工艺出品率也高，但排气能力较差，往往因静压头不够，产生金属液的反喷；底注时，金属液充型平稳，铸型内气体能够顺利溢出，而且挡渣能力强，对易产生气孔、夹渣、碳质缺陷的铸件，应优先选择底注方式或下三分之一侧注。

五. 结束语

综上所述，为防止消失模铸件出现气孔、夹渣等缺陷，在设计浇注系统时需注意以下几点：

1. 用池形外浇道，避免使用漏斗形外浇道；
2. 直浇道设计成上大下小的圆锥体，可选用耐火材料制成的空腔成型直浇道。直浇道应有一定高度。
3. 选用封闭或者半封闭式浇注系统，横浇道内设置档渣装置；可用分段式横浇道，

局部扩大其面积；横浇道应有一定距离的延长段，延长段端部的涂料层用针刺出密集小孔；横浇道内第一个内浇道距直浇道也要有足够的距离。

4. 内浇道开设在横浇道的底部，其尺寸比砂型铸造时大，计算时，应选择合理的流量系数等。

5. 根据铸件特点选择注入方式。

参考文献

1. 尹英杰，模样材料的热裂解对铸铁件表面质量的影响（J）
铸造技术，2007（1），91—93
2. 魏兵、袁森、张卫华 铸件均衡凝固技术及其应用（M）
北京，机械工业出版社 1998
3. 魏晓伟、曾明、郑仲嫦、曹新斧 金属液在消失模铸造中的充型速度及能量和质量平衡（J）
铸造 2001（4），191—194
李魁盛 编著
4. 曹博海、刘祖仁 可防止消失模铸件白点及黑点缺陷的浇注系统。中国消失模铸造生产关键性技术问题专题研讨会论文（C），桂林，中南铸冶材料研究所，2006，16—18
朱丽娟、杜德喜等
5. 朱丽娟、杜德喜、董秀奇、郭若东 消失模铸造浇注系统的选择（J）铸造，2006（12），1319—13