

埋管铸造成形油道孔的工艺试验

李育洛¹, 高占勇², 李瑞红², 杨清¹, 滕虹¹, 高海燕¹, 于大威¹, 武玉平¹

(1. 内蒙古第一机械集团有限公司第十分公司, 内蒙古包头 014032; 2. 内蒙古科技大学, 内蒙古包头 014032)

摘要: 针对砂型铸造中利用砂芯成形细长的油道孔容易出现断芯、烧结和清砂困难的问题, 研究了预埋空心油道管和预埋油道管内填充铬矿砂成形铸钢件中细长油道孔的两种工艺方案, 分析了预埋油道管与铸件界面结合状况、影响油道管熔合的因素以及油道管重量与热节部位重量的关系。结果表明: 对于20~100 kg的铸件, 采用预埋空心油道管可以有效解决断芯问题, 而对于100~300 kg的铸件, 采用预埋油道管内填充铬矿砂的工艺不仅可以解决预埋管熔穿的问题, 还可以提高铸件的品质。

关键词: 深孔铸造; 埋管铸造; 砂型铸造; 预埋油道管

为了提高特种车辆运行的稳定性和可靠性, 原采用机械加工成形的油道孔或外接润油管的铸件进行了油道内置铸造一体化成形的工艺改进。但由于油道孔的直径一般为 $\Phi 8$ mm~ $\Phi 12$ mm, 长径比大于20, 形状复杂, 利用覆膜砂或树脂砂作为油道型芯时, 在金属液浇注过程中, 长径比过大的砂芯在热冲击和热辐射作用下, 容易出现变形、烧结和断芯等问题, 导致浇注后清砂困难、油道堵塞, 甚至报废等问题^[1-2]; 而利用铬矿砂作为型芯材料时, 由于油道长径比和铬矿砂密度大($4\sim 4.8$ g/cm³), 导致型芯成形困难, 极易出现断芯, 虽然在型芯内部设计芯骨可以解决断芯问题, 但在浇注过程中, 由于金属液的作用, 型芯容易发生变形, 表面开裂, 导致粘砂的出现。同时, 油道孔直径小, 形状复杂, 芯骨取出也比较困难, 因此铸造油道的长径比一般都不能过大^[3-4], 特别是油道孔直径较小的情况下。

本研究针对砂芯成形大长径比油道存在的问题和难点, 研究了预埋空心油道钢管和预埋油道管内填充铬矿砂成形铸钢件中大长径比油道孔的两种工艺方案, 并分析预埋管与铸件之间的界面结合关系、影响油道管熔合的因素以及油道管重量与热节部位重量的关系, 为此类铸件的生产提供一定的借鉴。

1 试验材料及方法

以本企业铸件使用的两种主要材质ZG32CrMo和ZG32MnMo为研究对象, 其液相线温度为1 480 ℃, 浇注温度为1 530~1 550 ℃。考虑到铸件材质的浇注温度高, 结晶潜热大和使用性能高的要求, 镶铸材质选为20[#]无缝钢管, 其液相线温度为1 495 ℃, 抗拉强度为253~500 MPa, 伸长率 $\geq 24\%$ 。

本企业主要以生产特种车辆上使用的中小型铸钢件为主, 产品重量基本上分布在5~300 kg之间。通过对产品的热节尺寸进行统计分析, 结果表明, 铸件重量在20~100 kg时, 其最大热节部位重量在15 kg左右, 对于100~300 kg的铸件, 其最大热节部位重量在45 kg左右。因此, 依据对铸件热节尺寸和重量的统计结果, 再结合实际生产的浇注温度和生产经验, 设计了如表1所示的试验型腔。

作者简介:

李育洛(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事铸造工艺设计及过程数值模拟。E-mail:myliyuluo@163.com

通讯作者:

武玉平, 男, 研究员高级工程师。E-mail:nmyiwuyuping1@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)02-0198-05

收稿日期:

2018-08-06 收到初稿,
2018-10-21 收到修订稿。

2 试验结果及分析

2.1 预埋空心油道管试验结果及分析

铸件重量分布在20~100 kg之间时,由于热节尺寸相对较小,如果预埋管内填充铬矿砂,容易导致熔合不良和增加清理成本,所以采用预埋空心管相对比较经济和合理,同时,预埋管的重量相对较小,不会对铸件品质造成影响。所以根据表1所示的型腔尺寸、热节模数、浇注温度和生产经验,设计了如图1所示的一箱6组的工艺试验方案,此工艺方案也尝试了大热节部位预埋空心管的工艺方案。

在1 530~1 550 °C之间浇注ZG32CrMo,浇注速度控制在5 kg/s;浇注之后,自然冷却;冷却之后进行清砂处理;清砂处理之后,采用肉眼观察和解剖法分析了试验结果,如表2所示。

由表2的统计结果可知,1-3号型腔中的预埋管空心、完整,4-6号预埋管全部熔穿。对空心、完整的1-3号预埋进行了解剖,结果如图2所示。

由图2a可以看出,1号预埋管虽是空心、完整的,但其与铸件结合界面有明显的空洞,说明预埋管与铸件并没有形成冶金结合。由表1可知,在不考虑结晶潜热的前提下,1号型腔需浇注的金属液质量为1.4 kg,从浇注温度1 550 °C冷却到固相线温度1 445 °C释放的潜热 $[c=385.2 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})]$ 为56.6 kJ,如果释放的潜热全部被预埋管吸收,预埋管温度可升高到350 °C,所以出现了图2a所示的孔洞现象;由图2b可以看出,虽然在2号预埋管与铸件热节部位观察不到孔洞的现象,但是可以明显的看出结合界面。假设在不考虑结晶潜热的前提下,2号预埋管在凝固过程中释放的潜热为226.5 kJ,而预埋管升温到开始熔化温度1 450 °C左右,需要吸收的热量为231 kJ,假设再考虑铸型接触区型砂被加热到 $0.65T_{\text{液}}$ ($T_{\text{液}}$ 为合金液态温度)的吸热时,型腔表面加热层以1 mm计算,树脂砂的比热取 $c=1\ 500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$,需要消耗热量为75 kJ,共需消耗

表1 铸件热节分布范围
Table 1 Distribution of hot spot in castings

型腔编号	型腔尺寸/mm	热节模数/cm	钢液质量/kg
1	200 × 30 × 30	0.70	1.4
2	200 × 60 × 60	1.30	5.6
3	200 × 90 × 90	1.84	12.6
4	200 × 120 × 120	2.31	22.4
5	200 × 150 × 150	2.72	35.1
6	200 × 180 × 180	3.10	50.5

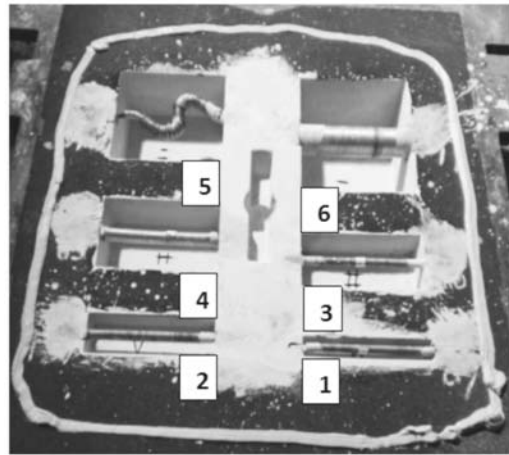


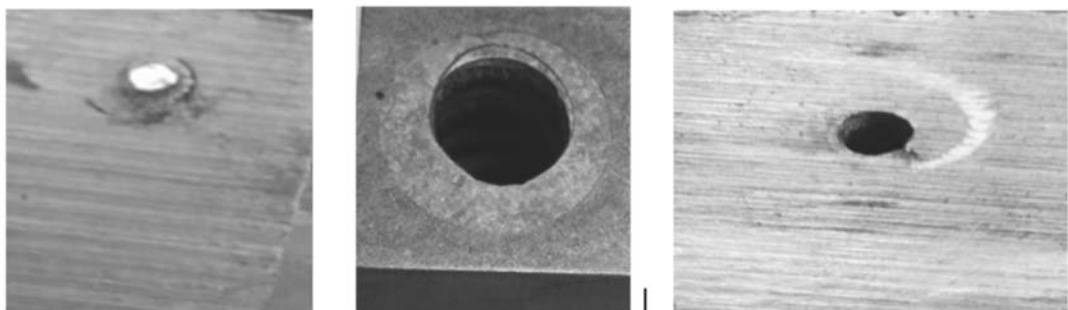
图1 预埋空心油道管的型腔

Fig. 1 Mould cavities with pre-embedded hollow oil duct

表2 预埋空心油道试验结果

Table 2 Test result of pre-embedded hollow oil duct

型腔编号	预埋管外径 × 内径/mm	预埋管质量/kg	预埋管完整性
1	Φ16 × 8	0.42	空心、完整
2	Φ16 × 8	0.42	空心、完整
3	Φ16 × 8	0.42	空心、完整
4	Φ20 × 8	0.53	熔穿、实心
5	Φ20 × 8	0.62	熔穿、实心
6	Φ24 × 8	0.89	熔穿、实心



(a) 1号预埋管横截面

(b) 2号预埋管横截面

(c) 3号预埋管横截面

图2 空心、完整预埋管解剖照片

Fig. 2 Dissectioned photographs of hollow and intact pre-embedded duct

热量为306 kJ, 就出现了如图2b所示的结果^[5-7]; 而由图2c可以看出, 3号预埋管与铸件热节部位形成了良好的界面结合关系。为了分析其冶金结合及界面过渡状况, 对其进行了显微金相组织分析, 结果如图3所示。

由图3可知, ZG32CrMo铸态金相组织中白色铁素体和黑色珠光体含量基本相同, 主要是由于Cr和Mo元素的添加导致共析点S向左移造成的。20#钢的金相显微组织主要是以白色铁素体为主。而在铸件ZG32CrMo材质和预埋20#钢管材质界面形成了主要以针状珠光体为主的过渡带, 证明两种材料之间形成了良好的冶金结合层, 形成珠光体过渡层的主要原因是由于金属液在凝固过程中溶质再分配导致在界面处形成了Cr和Mo元素的富集, 而合金元素Cr和Mo富集进一步使Fe-C相图中的共析点S向左移动, 致使最终出现了以珠光体为主的界面过渡层。

4-6号全部熔穿主要有以下两方面的原因: 第一, 预埋油道管壁厚选择不合理, 但如果壁厚继续增厚会导致此部位铸件材质发生大的波动, 影响铸件的品质和使用性能; 第二, 铸钢浇注温度高和结晶潜热大, 导致预埋油道管长时间处在金属液中, 最终熔穿。

2.2 预埋管重量与铸件热节部位重量的关系

当金属液浇入铸型之后, 预埋管可发生以下四个阶段的温度变化: 第一, 浇注后, 在很短的时间内, 预埋管吸热升温, 使靠近预埋管表面的金属液过冷, 凝固形成薄壳; 第二, 随着时间的推移, 预埋管外壁形成的薄壳快速融化, 预埋管开始升温, 达到固相线温度; 第三, 随着温度的继续升高, 预埋管表面开始融化; 第四, 预埋管继续吸热, 局部熔穿或完全融化, 预埋管堵死。由此可见如果要实现铸件凝固之后预埋管为空心、完整, 并与铸件形成良好的冶金结合关系, 应把预埋管的升温变化控制在第三阶段。

预埋空心油道管, 相当于在铸件热节部位增加了内冷铁, 所以预埋空心油道管重量与铸件热节部位重量的关系可以利用模数法计算内冷铁热平衡方程 ($W_d = f\rho V_0 (M_0 - M_1) / M_0$), 其中 W_d 为预埋管质量 (kg); f 为系数, 铸钢件浇注温度在1 530~1 550 °C时, 取 $f=0.1$, ρ 为预埋管密度 (kg/m^3); V_0 为热节部位体积 (m^3); M_0 为热节部位模数; M_1 为设置预埋管之后的热节部位模数, 或利用经验公式 $W_d = KG$ (K 为系数, 即预埋管占铸件热节部位重量的质量分数, 小铸件及质量要求高时, K 取2%~5%; G 为热节部位重量) 计算。采用模数法计算只考虑使预埋管能熔接, 并未涉及其他方面, 一般使用时得到的结果应用经验法进行对照, 所以, 本试验结果采用了经验法加以分析和讨论。根据经验公式, 计算3号预埋管的 K 系数为

3.3%, 在其取值范围之内, 说明利用内冷铁的计算公式设计预埋空心油道管是可行的。同时, 为了进一步分析试验结果的可靠性, 利用测温法测试得到了3号预埋管浇注过程中的升温曲线, 如图4所示^[8]。

由图4可知, 在浇注60 s后, 预埋管的温度达到峰值1 400 °C左右。根据Chvorinov公式 $\tau = R^2/K_1^2$ (K_1 为凝固系数, 砂型铸钢件取 $1.3 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1/2}$) 计算的凝固时间为60 s, 说明此时热节部位已完全凝固, 铸件的整体温度已经降低到固相线温度以下, 不会再造成预埋管升温 and 熔穿, 进一步说明了利用内冷铁的计算公式来设计预埋空心油道管的可行性。

利用经验公式计算得到未形成良好冶金结合界面的1号和2号预埋管, 其 K 系数分别为30%和7.5%, 熔穿的4-6号预埋管的 K 系数分别为2.36%、1.76%和1.76%。所以, 对于铸件重量在20~100 kg之间时, 预埋空心油道管的 K 系数优选3%~4%。

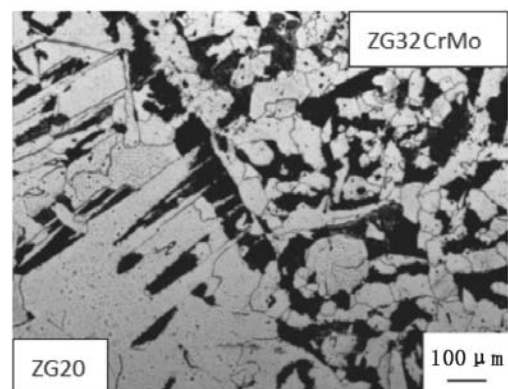


图3 3号预埋管与试样的显微组织照片

Fig. 3 Microstructure of No.3 casting with pre-embedded duct

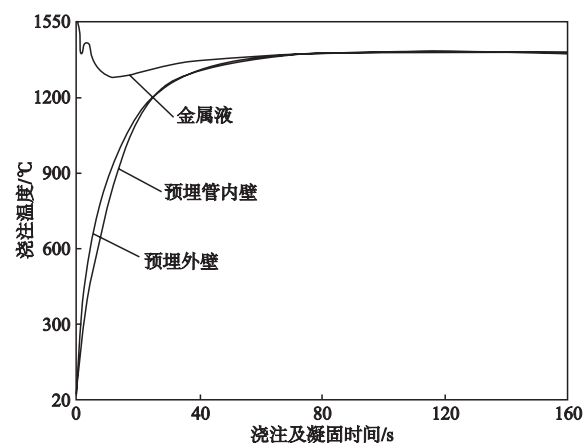


图4 预埋管在金属液中升温曲线

Fig. 4 Heating curves of pre-embedded duct in metal liquid

2.3 预制油道内填充铬矿砂试验结果及分析

对于热节尺寸较大、品质要求高的铸件，如果采用上述公式进行计算时，会造成热节部位成分和性能的波动，影响铸件的品质和使用性能，所以必须降低预埋管的重量，但是重量的降低会导致出现上述试验中4-6号预埋管熔穿的现象。所以试验了在4-6号预埋管内填充铬矿砂的工艺方案^[9]，具体如图5所示。

在1 530~1 550 ℃下浇注ZG32CrMo，冷却、清理之后，试验统计结果如表3所示。

由表3可知，内填铬矿砂的预埋油道管都是空心、完整。此时，经验公式中的K系数可以取到1.5%~2%；相对中型铸件推荐使用的K系数取值6%~7%范围明显降低，说明此工艺方案可以有效解决因热节尺寸较大、铸件品质要求高时，导致的无法增加预埋管重量的问题。

虽然预埋管内填充铬矿砂可以有效防止因预埋管熔穿之后造成油道孔堵塞的问题，但是如果预埋管过快熔穿还会引起内表面粘砂问题，所以，为了分析预埋油道管内壁是否存在不易清理的粘砂问题，对试验中型腔热容量最大的6号预埋油道管落砂之后，进行解剖，其纵截面如图6所示。

由图6可以看出，预制油道管完整，内腔不存在不易清理的粘砂问题，说明K系数取1.5%~2%是合理的，同时，也解决了利用铬矿砂制芯时，因型芯长径比大和铬矿砂密度大导致的型芯不易成形和极易断裂的问题。

3 关键工序控制点

3.1 预埋管材料的选择和加工的工艺要点

第一，预埋管材料的熔点应高于铸件材质的熔点，防止快速熔穿；第二，预埋管表面不允许存在油污和氧化现象，防止夹渣和气孔；第三，预埋油道管内填充铬矿砂时，每间隔50 mm，需在油道管上侧开设 $\Phi 2.5$ mm的排气孔，防止因浇注过程中铬矿砂产生的气体排不出，造成气孔、呛火等问题^[10]。

3.2 铸造工艺设计要点

第一，在浇注过程中，钢管受热膨胀而伸长，如果两端都以芯座形式固定在铸型上，钢管必然会变形，容易造成型腔的破损和尺寸精度差的问题。试验结果表明，将镶铸管的一端固定，另一端为自由端，自由端与铸型之间设计伸缩间隙，使其在受热膨胀时能自由伸长，并在每条钢管的中部加装两个固定环，环与钢管之间留有间隙，既可以让钢管在受热膨胀时伸长，又可减少金属液的横向搅动而引

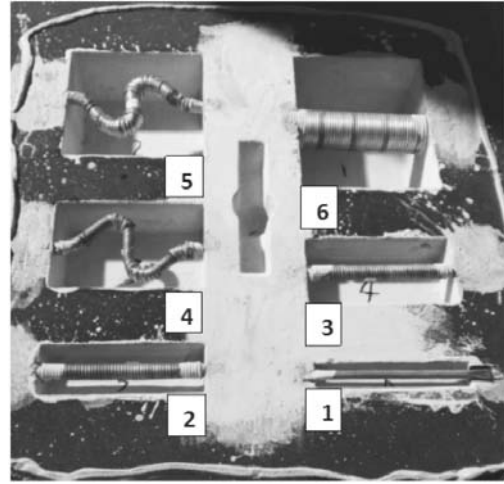


图5 预埋管内填充铬矿砂的型腔

Fig. 5 Mould cavity of pre-embedded steel tube filled with zircon in inside

表3 填充铬矿砂的预埋油道试验结果
Table 3 Test result of pre-embedded oil duct filled with zircon sand in inside

型腔 编号	预埋管外径× 内径/mm	缠绕铁丝 圈数	预埋管质量 /kg	预埋管 完整性
1	$\Phi 16 \times 8$	1	0.42	空心、完整
2	$\Phi 16 \times 8$	1	0.42	空心、完整
3	$\Phi 16 \times 8$	1	0.42	空心、完整
4	$\Phi 16 \times 8$	1	0.50	空心、完整
5	$\Phi 20 \times 8$	1	0.62	空心、完整
6	$\Phi 24 \times 8$	1	0.89	空心、完整



图6 6号预置油道管纵截面剖面

Fig. 6 Longitudinal dissection of No. 6 casting with pre-set oil duct

起钢管的变形，从而较好地解决钢管弯曲问题；第二，内浇道应设计在远离预埋管的位置，避免内浇口正对着钢管冲刷；第三，如果铸型为干型时，预埋油道管应在铸型烘烤干后再放入铸型中，若是湿型，放好预埋管后3~4 h内浇注，否则会因预埋管表面氧化或聚集水分而造成铸件气孔和界面结合不良现象^[11]。

4 结论

(1) 预埋油道管材质的熔点应高于铸件材质的熔点, 避免铸钢件浇注温度高和结晶潜热大导致镶铸油道管的快速熔化。

(2) 根据铸件结构的复杂程度, 浇注温度应控制在高于液相线50~80 °C; 若铸件重量在20~100 kg时, 预埋空心油道管重量计算时, K 系数优选3%~4%; 若铸件重量在100~300 kg, 并对铸件品质要求较高时, 可以使用预埋油道管内填充铬矿砂工艺, 此时, K 系数优选1.5%~2%之间。

(3) 浇注系统设计时应保证金属液充型平稳, 内浇道开设在远离预埋油道管的位置, 避免紊流和对冲导致油道管附近温度场的变化。

参考文献:

- [1] 张春永. 深孔铸造一例 [J]. 特种铸造及有色合金, 1995 (4): 42-43.
- [2] 梁学政, 陆魁朝, 韦东明. 大断面藕筒辊的埋管铸造 [J]. 铸造, 1997 (8): 41.
- [3] 郭跃广, 刘波, 刘秋荣. 扁状拐弯深盲孔消除粘砂的工艺实践 [J]. 铸造技术, 2012 (8): 125-127.
- [4] 朱丽娟, 王明娜, 张喻, 等. 消失模铸造中盲孔及细深孔粘砂问题的解决途径 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29 (11): 1040-1041.
- [5] 陈宗民, 于文强. 铸造金属凝固原理 [M]. 第二版. 北京: 北京大学出版社, 2016: 88-90.
- [6] Hwang Ho-Young, Nam Cheol-Hee, Choi Young-Sim, et al. A study on effects of ceramic foam filter on flow aspect through water modeling experiment [J]. China Foundry, 2017, 3 (3): 216-225.
- [7] Kwak S Y, Hwang H Y, Cho C. Thermal stress analysis method considering geometric effect of risers in sand mold casting process [J]. China Foundry, 2014, 6 (1): 531-536.
- [8] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 326-329.
- [9] 李维乔. 铸造深孔的经验 [J]. 机械工人, 1985 (1): 30-32.
- [10] 沈宏谋. 铸件深孔的铸造 [J]. 现代铸造, 2007 (6): 26-29.
- [11] 李晨希. 铸造工艺及工装设计 [M]. 第一版. 北京: 化学工业出版社, 2014: 230-231.

Process Experiment on Pre-Embedded Oil Duct in Steel Casting

LI Yu-luo¹, GAO Zhan-yong², LI Rui-hong², YANG Qing¹, TENG Hong¹, GAO Hai-yan¹, YU Da-wei¹, WU Yu-ping¹

(1. Tenth Company of Inner Mongolia First Machinery Group Co., Ltd., Baotou 014032, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014032, Inner Mongolia, China)

Abstract:

It's easy to cause blockage, core breaking, sintering and sand cleaning problem in sand mold casting by using sand core to form slender oil duct. In order to solve these problems, both casting processes were attempted. One was that the elongated oil hole in steel casting was formed by pre-embedded hollow oil duct, and the other was formed by the pre-embedded oil duct with chromite sand filled inside. The research also focused on studying the interface bonding between the pre-embedded oil duct and casting, the factors affecting the fusion of oil duct and the relationship between the pre-embedded oil duct weight and hot spot weight. The results indicate that the casting process of the pre-embedded hollow oil duct in sand mold can effectively solve the problem of core breaking for the castings with weight range from 20 kg to 100 kg; the casting process of the pre-embedded oil duct with chromite sand filled inside not only solve the problem of melt-through of pre-embedded oil duct, but also improve the quality of castings with weight range from 100 kg to 300 kg.

Key words:

deep hole casting; pre-embedded tube casting; sand casting; pre-embedded oil duct