

利用热分析技术降低球墨铸铁轮毂铸件废品率

张 军¹, 史江涛², 马洪亮^{2, 3}, 李海荣¹, 姜良良¹

(1. 山东浩信股份有限公司, 山东潍坊 261307; 2. 南京谱德仪器科技有限公司, 江苏南京 211300;

3. 上海铸铭冶金材料有限公司, 上海 201702)

摘要: 通过浇冒口系统工艺改进很难消除球墨铸铁轮毂铸件内部的缩松缺陷, 为此, 采用铸铁热分析仪对浇注前的铁液进行了检测, 发现了球化孕育处理后的铁液存在凝固前期石墨化膨胀过大、最后凝固区石墨化膨胀不足的问题。分析铁液球化孕育处理工艺后, 发现过度孕育是导致球墨铸铁凝固前期石墨析出过多的原因。通过降低包内孕育剂的加入量, 使轮毂铸件缩松缺陷的废品率由12%以上降低到2%以内。

关键词: 热分析; 缩松; 过度孕育; 球墨铸铁; 轮毂

自1931年热分析技术被应用于铸铁分析以来, 铸铁热分析在试验研究和工业应用方面均累计了丰富经验, 热分析的硬件和软件开发也取得了进展^[1]。PE Persson, A Udriou等人利用热分析对灰铸铁材质的玻璃模具铸件进行了铁液成分及孕育工艺优化^[2]。Mohd Nadeem Bhat, D. M. Afzal Khan等人利用热分析对几种孕育工艺生产的球墨铸铁差速齿轮铸件进行对比, 发现随着再辉温度值的增加, 铸件内部缩孔缩松缺陷也增加^[3]。铸铁件在批量生产过程中, 可能会出现白口、缩孔、缩松和石墨漂浮等缺陷, 铸件的废品率有时在1%以内, 但有时废品率又会上升到20%以上, 这种铸件废品率不稳定的情况往往与铸铁熔炼的炉料选择及各元素含量控制范围、球化处理工艺或孕育处理工艺存在很大关系。本研究采用南京谱德PD-GD型铸铁热分析设备对生产过程中的球墨铸铁轮毂铸件的铁液进行了检测, 获取到铁液凝固过程中的关键温度值及其对应的参数, 综合分析发现铁液的孕育处理工艺存在不合理之处, 为解决上述铸件废品率不稳定的问题提供了方向。

1 轮毂铸件的结构及技术要求

本研究选择的商用车2519型轮毂铸件是某款拖车的前轮毂, 结构如图1所示, 为回转体类铸件, 法兰盘直径332 mm, 端头外圆直径约152 mm, 总高度210 mm, 最小壁厚约为7.3 mm。用于与刹车系统连接的轮毂法兰盘下方有10个圆形凸台, 凸台中心位置后续将加工成连接孔。铸件材质为QT450-10, 轮毂第一道和第二道轴承连接处较厚, 约为24 mm, 两处热节的模数分别为1.15 cm和0.92 cm。由于轮毂是车用安全件, 具有承载车身、承担荷载的重要作用, 因此铸件内部不能出现缩孔缩松缺陷。分析该零件的结构特征后, 认为铸造难点在于热节点多并且分散、不易补缩。

2 轮毂铸件的生产工艺及存在问题

采用湿型砂HWS(静压造型线)全自动浇注生产线生产轮毂铸件。该铸铁件在浇冒口工艺设计时采用了均衡凝固技术。铸件单重 G 为18.68 kg, 轮毂第一道轴承连接处模数最大, 以该处代表铸件的模数, M_c 为1.15 cm。

作者简介:

张 军(1988-), 男, 高级工程师, 主要从事铸铁和铸钢熔炼材料研发及开发工作。电话: 17719608525, E-mail: 472482094@qq.com

中图分类号: TG115.25

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)

05-0695-06

收稿日期:

2023-07-24 收到初稿,

2024-03-16 收到修订稿。

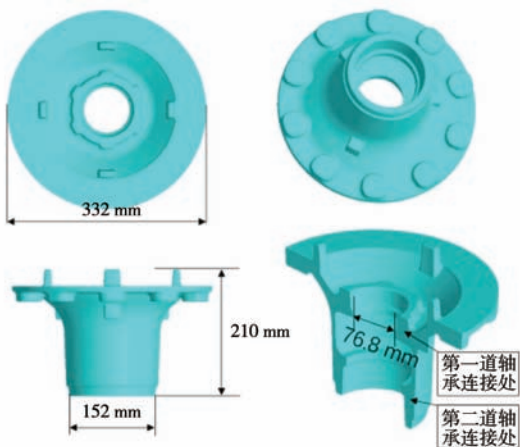


图1 2519型商用车轮毂铸件的结构图

Fig. 1 Structural diagram of 2519 type commercial vehicle wheel hub casting

根据均衡凝固计算公式和收缩模数法计算冒口, 冒口平衡系数 f_1 取1.2, 冒口压力系数 f_3 取1.3。

质量周界商:

$$Q_m = G / (M_c)^3 = 18.68 / (1.15)^3 = 12.28 \text{ kg/cm}^3 \quad (1)$$

收缩时间分数:

$$P_c = 1.0 / e^{(0.5M_c + 0.01Q_m)} = 0.37 \quad (2)$$

收缩模数系数:

$$f_2 = \sqrt{P_c} = \sqrt{0.37} = 0.61 \quad (3)$$

铸件收缩模数:

$$M_s = f_2 \times M_c = 0.61 \times 1.15 = 0.702 \quad (4)$$

冒口模数:

$$M_R = f_1 \times f_3 \times M_s = 1.2 \times 1.3 \times 0.702 = 1.095 \quad (5)$$

为了实现对铸件的补缩, 在每个铸件的中心位置放一只带有6/9型发热保温冒口套的侧冒口。6/9型发热冒口套的尺寸如图2所示, 内部空腔直径为60 mm, 高度为78 mm, 使用该冒口套, 冒口模数可以达到1.7 cm。冒口套直接如砂芯一样下入上型, 合箱后与下型中的砂芯接触(图3)。砂芯侧壁仅有一处长方形开口, 尺寸为30 mm × 22.8 mm, 充型时, 铁液由砂芯侧

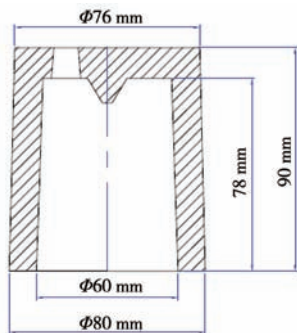


图2 6/9发热冒口套的尺寸

Fig. 2 Sizes of 6/9 exothermic feeder sleeve



图3 发热冒口套与砂芯连接结构的三维图

Fig. 3 3D diagram of the connection structure of the exothermic feeder sleeve and the sand core

壁开口流入, 再经过砂芯顶部开口流入到冒口套中, 冒口可以通过砂芯的侧壁开口对铸件中部进行补缩。铸件其他孤立热节部位, 质量周界商都大于 20 kg/cm^3 , 在凝固前期收缩时可以得到冒口的补缩, 在凝固后期补缩通道封闭时可以利用自身石墨化膨胀实现自补缩。采用开放式浇注系统, 一模四件, 直浇道截面积约为 13.2 cm^2 , 总的横浇道截面积约为 19 cm^2 , 总的内浇道截面积约为 26.8 cm^2 。 $\sum S_{\text{直浇道}} : \sum S_{\text{横浇道}} : \sum S_{\text{内浇道}} = 1 : 1.44 : 2$ 。横浇道上放置了两片 $75 \times 75 \times 22/10 \text{ ppi}$ 型的碳化硅泡沫陶瓷过滤片, 保证了液流充型过程平稳, 减轻了对法兰型腔的冲刷。铸件及浇冒系统总重约 111.8 kg , 工艺出品率约62%。重力方向为竖直向下, 此类浇冒系统工艺设计普遍用于粘土砂生产线上生产商用车球墨铸铁轮毂铸件(图4)。其优点在于工艺出品率高, 冒口颈部位设计了应力集中切口, 采用气锤去除冒口或者人工去除冒口都比较方便, 人工打磨即可清理掉冒口颈处的残留。



图4 轮毂铸件的初始浇冒口工艺

Fig. 4 The initial gating and feeding process of the wheel hub castings

利用MagmaSoft铸造模拟分析软件对工艺进行了验证, 铸件凝固的孤立液相区和缩孔缩松分布分别如图5和图6所示, 发现采用此方案铸造出的轮毂件, 在轮毂法兰盘加工孔处、第一道轴承连接处和第二道轴承连接处都可能产生缩孔缩松缺陷。



图5 铸件凝固后期的孤立液相区预测

Fig. 5 Prediction of the isolated liquid phase areas in the later period of casting solidification



图7 改进工艺方案后铸件缩孔缩松缺陷预测结果

Fig. 7 Prediction results of shrinkage cavity and shrinkage porosity defects in castings after improving process scheme



图6 铸件缩孔缩松缺陷预测

Fig. 6 Prediction of the shrinkage cavity and shrinkage porosity defects in castings

针对上述工艺进行数值模拟时，前处理过程中孕育效果以及石墨析出的参数选择分别为“好”和“8”；改进工艺方案后，调整了内浇口的位置，将每个铸件的四个内浇口位置都对准法兰盘下方的圆形凸台，前处理过程中孕育效果选项设置为“非常好”，石墨析出选项设定为“10”，数值模拟结果显示铸件内部没有缩孔缩松缺陷，如图7所示。因此，决定通过控制好碳当量以及加强孕育处理，用以提高铁液自补缩的能力，进而实现生产无缩孔缩松缺陷的轮毂铸件的目的。

按照改进方案加工出下模板如图8所示，图9为上模型板实物图，图10为砂芯下入下型的照片。铁液采用中频炉熔炼，配料为3.65%~3.75% C，1.95%~2.05% Si，0.4%~0.5% Mn，<0.05% P，<0.025% S。将1.2 t熔炼好的铁液倒入喂丝球化包，采用镁含量30%的球化包芯线进行球化处理，加入21.5 m；球化处理后进行倒包孕育，孕育包底部填入质量分数为0.4%的硅钙钡



图8 改进后的下模型板

Fig. 8 Improved lower mold plate



图9 改进后的上模型板

Fig. 9 Improved upper mold plate



图10 砂芯下入下型

Fig. 10 Sand cores inserted into the drag flask

孕育剂（钡含量为4%~6%，粒度3~8 mm）；铁液在浇注到型腔时，随浇注的液流添加质量分数为0.1%的硅钙钡随流孕育剂（粒度0.2~0.7 mm）。经过球化处理和孕育处理后的铁液化学成分为3.50%~3.60% C，2.50%~2.60% Si，0.4%~0.5% Mn，<0.05% P，<0.02% S，0.032%~0.042% Mg。最终铁液的碳当量范围控制在4.33%~4.47%，铁液从开始球化到浇注结束控制在9 min以内，浇注温度为1 350~1 400 ℃。

采用改进的浇冒系统工艺、前述熔炼配料工艺及球化和孕育工艺进行了产品试制，生产了9箱共36件轮毂铸件。分别取首箱及尾箱做了剖切，共计8件铸件，没有发现缩孔缩松问题。所有铸件均在法兰面下方10个凸台中心钻孔，对法兰面、第一道轴承连接处和第二道轴承连接处进行机加工，加工深度约3 mm，加工后的铸件表面没有发现缩孔缩松缺陷。采用6 t中频感应电炉熔炼了一炉铁液做小批量生产，出5包铁液，每包约1 200 kg，共计浇注35箱生产了140件轮毂铸件，对机械加工后的铸件做缩孔缩松缺陷的统计，发现了一件产品内部有缩孔缺陷，缩松废品率约为0.714%；但是在大批量生产时，因为第一道轴承连接处机加工后发现缩松缺陷的轮毂铸件数量较多，导致机加工后缩松的废品率达到了12%以上。图11为采用改进后的浇冒系统工艺大批量生产时，机加工后发现轮毂铸件第一道轴承连接处存在缩松缺陷，剖切截面可以看到缩松呈环形分布。

3 利用热分析检测铁液凝固特性参数并优化

分析上述问题的原因，球墨铸铁凝固时发生体积膨胀的时刻和膨胀的大小难以计算，铸造模拟分析软件也无法准确模拟出不同熔炼配料和球化孕育工艺下



图11 轮毂铸件第一道轴承连接处截面上有缩松缺陷

Fig. 11 Dispersed shrinkage defects appeared on the section of the first bearing connection zone of the wheel hub casting

石墨化膨胀的效果，仅能通过如密度曲线法^[4]等方法近似预测铸铁件凝固时的石墨膨胀，这就导致了铸造模拟分析结果与实际铸造生产结果存在一定的不确定性。

为了研究铁液凝固过程中石墨析出膨胀的过程，采用PD-GD热分析仪检测了铁液凝固特征曲线。热分析设备将铁液分为四个阶段，初晶阶段（初生奥氏体或初生石墨）、共晶初期阶段、共晶石墨平稳析出阶段（二次石墨析出）和最后凝固阶段（热导率系数）。在大批量生产轮毂铸件的生产线上，铁液刚倒入浇注包时，取顶部铁液，浇注到加了0.1%硅钙钡0.2~0.7 mm粒度孕育剂的快速热分析样杯中，样杯中加入的小粒度孕育剂的目的是用来代替生产线上随流孕育的效果，使样杯中铁液的状态与浇注到铸件型腔中的铁液状态尽量保持一致。热分析检测结果如图12所示，铁液为共晶凝固，没有初生奥氏体，表明铸件不容易产生宏观缩孔，熔炼配料时碳硅成分的控制比较合理；再辉温度达到了9.2 ℃（理想值为2~7 ℃），表明共晶凝固初期石墨析出较多，铁液凝固初期石墨形核数量过多，消耗铁液内的硫和氧多，凝固后期硫氧浓度偏低而容易导致形核数量降低；热导率系数作为

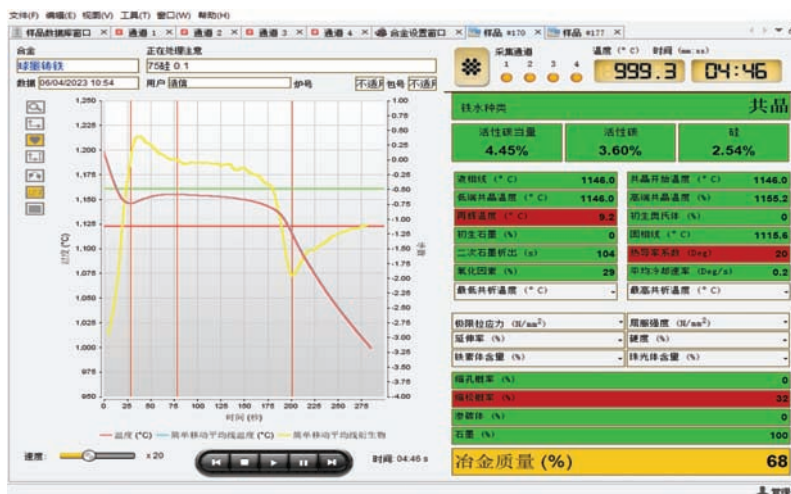


图12 大批量生产轮毂铸件的铁液在球化孕育过后的热分析检测结果

Fig. 12 Thermal analysis test results of molten iron for mass production of wheel hub castings after spheroidization treatment

所有缺陷铸件整体废品率约为3.91%。公司规定铸件缩孔缩松缺陷废品率控制在2%以内,机械加工后总体铸件废品率控制在5%以内,因此2519型轮毂铸件满足了公司大批量生产的要求。

4 结论

(1) 利用均衡凝固理论以及铸造模拟分析软件辅助球墨铸铁件的浇冒系统工艺设计是有意义的。熔炼配料、球化工艺以及孕育工艺对球墨铸件凝固时石墨析出的过程影响很大。控制石墨析出的过程平稳、且长时间持续,是铸件能够实现自补缩的关键因素,也是均衡凝固理论和铸造模拟分析结果与实际生产结果相一致的关键因素。

(2) 热分析设备能够准确地记录铁液凝固过程中的温度变化曲线,并根据曲线获取铁液凝固时放热的

关键阶段和相应参数,由此分析出球墨铸铁铁液的凝固特性。本文检测的球墨铸铁铁液为共晶铁液,没有初生奥氏体或初生石墨,热分析设备采集的曲线均为共晶曲线,因此只有三个阶段。通过采取降低共晶初期阶段石墨放热即再辉度的措施,降低铁液早期过多的石墨析出和体积膨胀,为此后的两个阶段保留了更多石墨形核质点,持续长时间的石墨析出提高了铁液自补缩的能力,实现了降低球墨铸铁轮毂铸件缩松废品率的目的。

(3) 加入过量的孕育剂不仅造成材料的浪费、提高了球墨铸铁件的生产成本,还可能会导致球墨铸铁件内部产生缩松缺陷。利用热分析设备对比不同孕育剂加入量的球墨铸铁铁液凝固曲线形态,可以迅速地判断出孕育剂的加入量是否合理。

参考文献:

- [1] STEFANESCU D M, SUAREZ R, KIM S B. 铸铁熔炼热分析技术发展九十年 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 231-247.
- [2] PERSSON P E, UDROIU A, VOMACKA P, et al. ATAS as a tool for analyzing, stabilizing and optimizing the graphite precipitation in grey cast iron [C]// Proceedings of The 69th World Foundry Congress, 2010.
- [3] MOHD Nadeem Bhat, AFZAL KHAN D M, SINGH K K. Effect of inoculation and nodularisation treatment temperature on recalescence and eutectic undercooling temperature in spheroidal graphite (SG) cast iron [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2018, 31 (5): 261-268.
- [4] 唐玉龙, 廖敦明, 陈涛, 等. 考虑石墨化膨胀自补缩的铸铁件凝固过程模拟 [J]. 现代铸铁, 2018 (3): 48-51.
- [5] 马洪亮. 比较几种孕育剂降低球铁缩孔缩松缺陷的效果 [J]. 铸造设备与工艺, 2022 (3): 28-32.
- [6] 马洪亮, 史江涛. 热分析检测球墨铸铁和灰铸铁凝固特性的实践 [J]. 铸造工程, 2023 (4): 64-70.

Reducing Rejection Rate of Ductile Iron Wheel Hub Castings by Thermal Analysis

ZHANG Jun¹, SHI Jiang-tao², MA Hong-liang^{2,3}, LI Hai-rong¹, JIANG Liang-liang¹

(1. Shandong Haoxin Co., Ltd., Weifang 261307, Shandong, China; 2. Nanjing Pude Instrument Technology Co., Ltd., Nanjing 211300, Jiangsu, China; 3. Shanghai Zhuming Metallurgical Materials Co., Ltd., Shanghai 201702, China)

Abstract:

It is difficult to eliminate the dispersed shrinkage defects in ductile iron wheel hub castings by improving the processes of gating and feeding systems. Therefore, the iron liquid before pouring was detected by using of the cast iron thermal analyzer. It was found that the problems of the iron liquid after spheroidizing inoculation having excessive graphitization expansion in the earlier solidification stage and insufficient graphitization expansion in the final solidification zone existed. After analyzing the nodularization and inoculation treatment processes for the molten iron, it was found that excessively inoculating is the cause of excessive graphite precipitation in the earlier solidification stage of molten ductile iron. Through reducing the quantity of inoculant added to the pouring ladle, the rejection rate of the wheel hub castings caused by dispersed shrinkage defects decreased from more than 12% to less than 2%.

Key words:

thermal analysis; dispersed shrinkage; over inoculation; ductile iron; wheel hub