变速箱壳体铸件粘砂缺陷原因及改进措施

李保全，郑 锐，龚连金，杨莎莎
（合肥江淮铸造有限责任公司，安徽合肥 231137）

摘要：针对KW水平静压造型线生产的QT450-10变速箱壳体铸件内腔局部粘砂缺陷（发生比例50%），分析了缺陷成因并提出了改进措施。通过体视显微镜观察、砂粒孔隙检测及充型过程温度场数值模拟等，确认粘砂为铁液渗入砂粒孔隙形成的机械粘砂，粘砂部位局部温度约1 400 ℃。采取降低起浇温度（由1 410 ℃ ± 10 ℃降至1 390 ℃ ± 10 ℃）并喷涂醇基快干涂料的措施后，粘砂比例降至14.8%，但气孔缺陷风险增加。改用对砂芯粘砂部位局部浸涂醇基锆英粉涂料后，经1 200 ℃ × 2 min高温曝热抗裂性验证，涂层无剥离、无裂纹，达到Ⅰ级要求。原起浇温度下三批次共674件铸件中仅2件轻微粘砂，粘砂比例降至约0.3%，且未新增气孔缺陷。该工艺改进有效解决了变速箱壳体粘砂问题，节约了清理成本，可为同类砂芯局部过热导致的机械粘砂缺陷提供参考。

关键词：变速箱壳体；机械粘砂；锆英粉涂料；浇注温度；冷芯盒
中图分类号：TG242 **文献标识码：**B **文章编号：**1001-4977（2026）09-1053-05
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0134

Reasons and Improvement Measures for Sand Adhesion Defects in Gearbox Housing Castings

LI Bao-quan, ZHENG Rui, GONG Lian-jin, YANG Sha-sha
(Hefei Jianghuai Casting Co., Ltd., Hefei 231137, Anhui, China)

Abstract: Aiming at the local sand adhesion defects in the inner cavity of QT450-10 gearbox housing castings produced on a KW horizontal static pressure molding line, with a defect rate of 50%, the causes were analyzed and the improvement measures were proposed. Through stereomicroscopic observation, sand pore detection, and numerical simulation of mold filling temperature field, the sand adhesion was identified as metal penetration of molten iron into the sand pores, and the local temperatures of the sand adhesion position appeared reaching approximately 1 400 ℃. After reducing the pouring start temperature from 1 410 ℃±10 ℃ to 1 390 ℃±10 ℃ and spraying an alcohol-based quick-drying coating, the metal penetration rate decreased to 14.8%, but the risk of gas porosity defects increased. By locally dipping the sand core at metal penetration prone areas with zircon powder coating, the thermal cracking resistance was verified at 1 200 ℃ for 2 min, there was no surface peeling or cracking, reaching grade I requirement. Across the three batches totaling 674 castings under the original pouring start temperature, only 2 pieces exhibited slight sand adhesion, reducing the rate to about 0.3%, and no new gas porosity defects were introduced. This process improvement effectively resolves the sand adhesion problem in the gearbox housing castings, reduces cleaning costs, and provides a reference for similar metal penetration defects caused by local overheating of sand cores.

Key words: gearbox housing; metal penetration; zircon powder coating; pouring temperature; cold box

砂型铸造因其极强的适应性和相对较低的成本，适合生产复杂、多品种及大部分常规尺寸的铸件。随着装备性能的不断提升，所需铸件的加工性能和力学性能不仅要符合要求，铸件的表面质量和内腔质量也要满足更高的标准[1]。变速箱壳体是传动系统的核心部件，其结构复杂、壁厚不均，且产品要求较高，适合采用砂型铸造成形。笔者公司变速箱壳体产线为KW水平静压造型线，砂芯使用三乙胺冷芯盒制芯，制造过程中壳体出现粘砂缺陷，严重影响到表面和内腔质量。为此，针对变速箱壳体粘砂缺陷原因进行了分析，并制定出对应的改进措施。

基金项目：产品工艺优化与质量提升企业研发基金。
收稿日期：2026–06–05 收到初稿，2026–07–07 收到修订稿。
作者简介：李保全（1987–），男，工程师，本科，主要从事铸造工艺及质量控制相关工作。E-mail：513385469@qq.com
引用格式：李保全，郑锐，龚连金，等 . 变速箱壳体铸件粘砂缺陷原因及改进措施 [J]. 铸造，2026，75（9）：1053–1057.
Li Baoquan，Zheng Rui，Gong Lianjin，et al. Reasons and improvement measures for sand adhesion defects in gearbox housing castings [J]. Foundry，2026，75（9）：1053–1057.

1 变速箱壳体生产工艺及存在问题

1.1 变速箱壳体结构

变速箱壳体铸件结构见图1，其最大轮廓尺寸为650 mm×420 mm×400 mm，主体壁厚12 mm，质量59 kg。材料为QT450-10球墨铸铁，金相及性能要求如下[2]：球化等级为3级以上，抗拉强度不低于450 MPa，伸长率不低于10%，布氏硬度为HBW160~210。

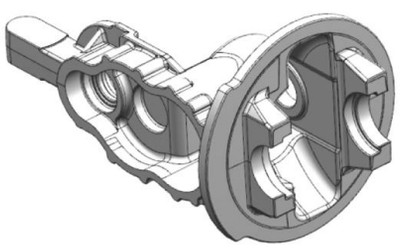

图1 变速箱壳体铸件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gearbox housing casting

1.2 生产工艺

采用KW水平静压造型（湿砂型）线进行生产，一箱两件。变速箱壳体内腔由砂芯成形。采用三乙胺冷芯盒制芯，砂芯质量为21 kg，最大轮廓尺寸为512 mm×392 mm×347 mm，如图2所示，其结构和形状较为复杂。铸件起浇温度为1 410 ℃±10 ℃。铸造工艺设计方案见图3，数值模拟[3]结果表明铸件内部无缩孔缩松缺陷，设计方案合理。

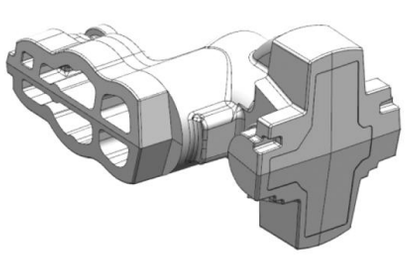

图2 砂芯示意图

Fig. 2 Sand core diagram

1.3 存在问题

变速箱壳体铸件自生产以来，内腔局部粘砂（图4）一直是影响该产品清理效率和产品合格率的主要问题[4]。铸件粘砂比例达50%，由于粘砂位置皆在内腔，人工打磨难度大，无法打磨的粘砂件只能报废处理，造成铸件清理成本上升和产品成品率下降。

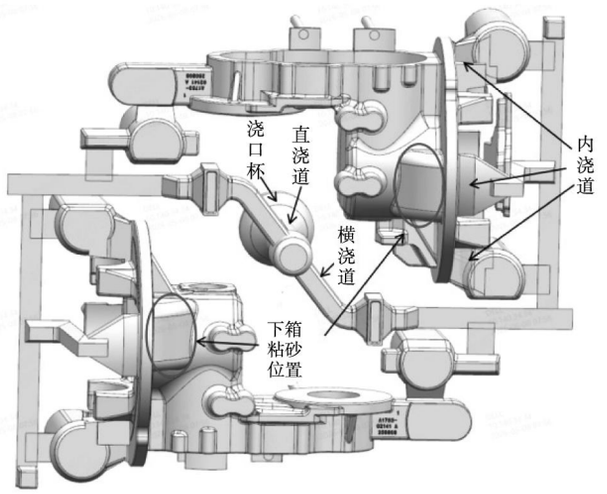

图3 铸造工艺方案

Fig. 3 Casting process plan

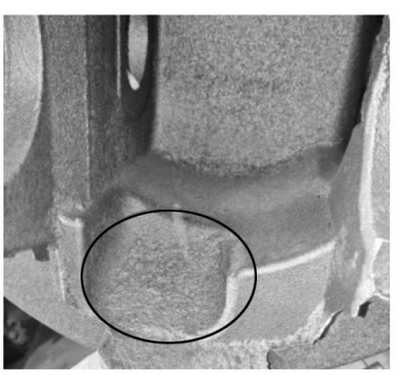

图4 铸件粘砂位置

Fig. 4 Sand adhesion position of the casting

2 粘砂缺陷类型分析

2.1 粘砂缺陷分类

国内外铸造行业一般将铸件粘砂缺陷分为两类：机械粘砂和化学粘砂。

机械粘砂是液态金属渗入到型（芯）表面孔隙中形成的。液态金属包覆部分砂粒，凝固以后便形成金属陶瓷状的粘砂层，它与铸件牢固结合，抗拉强度能达到1.8 MPa以上。因此，机械粘砂又被称为金属液渗透粘砂。

化学粘砂是金属氧化物与砂型（芯）材料、浇注气氛之间发生物理化学作用形成的。砂型（芯）在浇注金属液时，型腔表面被加热并发生一系列复杂变化。加热初期，砂型（芯）表面发生物理变化，如水分蒸发、粘结剂热分解及硅砂的多晶转变等，随后发生化学反应，生成硅酸盐。随着加热温度升高，型砂中的易熔组分和共晶体开始熔化。固态硅酸盐溶解在已形成的熔体中，然后固相和液态熔体之间发生高速

化学反应，在铸件表面形成粘砂层。在此过程中，造型材料颗粒在粘砂层中，既能与金属氧化物粘接，也能与易熔的硅酸盐等粘接[5]。

2.2 变速箱壳体粘砂缺陷类型确认

在粘砂缺陷对应的砂芯位置处取样，利用体视显微镜观察砂芯表面，如图5所示，可以看到明显的孔隙（箭头标识）。对铸件粘砂缺陷位置本体取样，在体式显微镜下观察，发现其有金属光泽，表面粗糙呈颗粒状，且存在明显的砂粒与金属混杂，见图6。使用万用表测量得到粘砂部位的电阻为0.7 Ω，同时取原砂进行电阻测试，万用表显示其电阻超过200 MΩ。综上可判断该粘砂缺陷为机械粘砂。

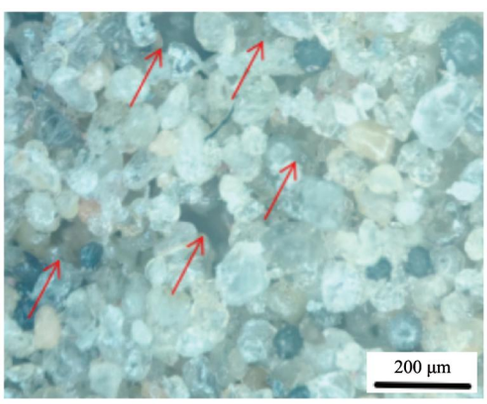

图5 砂芯表面的砂粒孔隙

Fig. 5 Pores between sand particles on the sand core surface

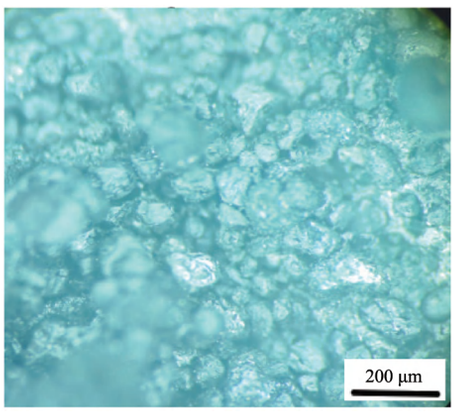

图6 铸件粘砂缺陷微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of sand adhesion defect of the casting

3 粘砂缺陷原因分析及工艺改进验证

3.1 粘砂缺陷原因分析

粘砂位置集中在铸件下箱的砂芯结合面处，冷芯砂粒度检测分布如表1所示，平均细度为51.3，从分布看，冷芯砂具有合理的粒度级配，粒度分布集中，含量可控。砂芯初始抗拉强度1.1 MPa，对于类似冷芯砂芯，强度已偏上限，故排除冷芯砂粒度分布不合理及砂芯强度不足导致铸件粘砂的因素[6]。

壳体粘砂部位位于浇注系统浇口附近，通过数值模拟可知此处温度较高，约为1 400 ℃，铸件壁厚12 mm，见图7。浇注过程中铁液将砂芯局部包裹，在高温下逐步渗入砂粒孔隙，导致变速箱壳体产生机械粘砂缺陷[7]。

表1 冷芯砂粒度分布

Tab. 1 Particle size distribution of the cold core sands

筛号	30	40	50	70	100	140	200	底盘
筛余百分数/%	0.06	2.97	18.64	16.13	9.03	2.79	0.16	0.12

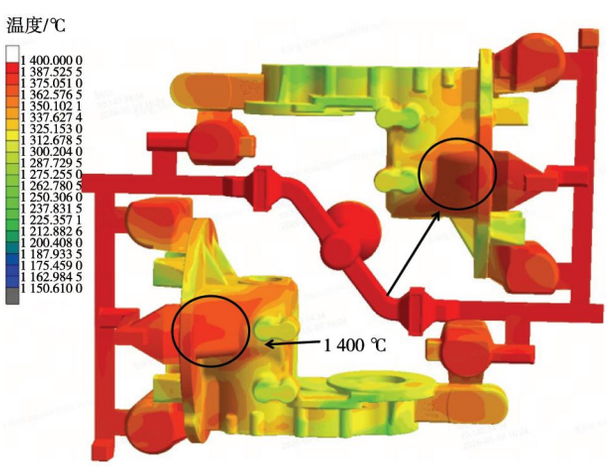

图7 充型过程温度场模拟

Fig. 7 Simulation of temperature field during mold filling process

3.2 工艺改进措施

结合上述分析可知，下箱砂芯局部受热温度高、时间长，高温铁液在型腔压力下渗入砂芯表面，从而导致了变速箱壳体内腔局部机械粘砂。因此，查阅相关文献资料，主要从浇注系统优化、降低浇注温度和增加涂覆涂料等方面验证解决内腔粘砂问题[8-12]。

3.2.1 调整浇注系统

目前铸件采用侧注+底注复合浇注系统。由于变速箱壳体外形尺寸大，浇注过程液位落差高，若单一采用侧注浇注，虽然能改变局部温度场，但是金属液

冲刷型腔壁剧烈，极易产生冲砂缺陷。增设底注浇道后，金属液自下而上平稳充型，充型流速缓和、液面上升均匀，可有效避免砂孔、夹砂类缺陷，铸件外观质量与内腔成形质量得到明显提升。该产品外观质量要求高，浇注系统设计合理[13]，综合考虑浇注系统暂不进行调整。

3.2.2 降低起浇温度

砂芯表面的致密度、砂芯原材料的耐火度以及原砂中SiO_2含量等因素都会影响铸件粘砂，适当降低起浇温度能在一定程度上改善砂芯受热环境，有利于减少粘砂缺陷的产生。

试验将起浇温度降低20 ℃，由1 410 ℃ ± 10 ℃调整至1 390 ℃ ± 10 ℃，验证3包铁液共计32件的成形效果。铸件抛丸处理后的粘砂统计结果见表2。共有12件变速箱壳体存在粘砂缺陷，粘砂比例达37.5%，虽然比例略有降低，但未能从根本上解决内腔粘砂缺陷。

3.2.3 喷涂醇基快干涂料

只通过降低浇注温度不能很好地解决变速箱壳体铸件粘砂问题，因此考虑在降低浇注温度的基础上喷涂醇基快干涂料进行试验[14]。该快干涂料的波美度为14°Bé至18°Bé，自然晾干时间不低于8 h。试验分为两组，粘砂统计结果见表3。对比可知，喷涂快干涂料后，起浇温度1 410 ℃和1 390 ℃下生产的铸件粘砂都大幅下降，粘砂缺陷程度减轻，但仍未能彻底解决粘砂问题，且增加了产品气孔缺陷风险。

3.2.4 局部浸涂醇基锆英粉涂料

由于粘砂位置温度较高，喷涂快干涂料后粘砂缺陷未能完全解决。笔者公司在生产发动机缸体毛坯时，由于水套砂芯过薄，存在内腔烧结问题，一但出现将难以处理，故对水套砂芯采用先局部浸涂醇基锆英粉涂料，再整体组芯浸涂的工艺，效果显著。锆英粉涂料耐火度高（≥1 700 ℃），热化学稳定性好，可耐高温铁液冲刷和侵蚀[15-17]，主要骨料尺寸集中在320目（约为46.9 μm），能很好覆盖砂芯表面砂粒孔隙。结合这一情况，在不改变原工艺的基础上，制芯后针对砂芯粘砂位置局部浸涂醇基锆英粉涂料，其波美度为30°Bé至35°Bé，浸涂后砂芯表面平整光滑、无孔隙，见图8。同时检测锆英粉涂料的高温曝热抗裂性，待马弗炉温度达到1 200 ℃，将浸涂好的砂芯放入马弗炉保温2 min，观察涂层状态，见图9。检测结果显示，

表2 降低浇注温度后铸件粘砂统计结果

Tab. 2 Statistical results of the castings with metal penetration defects after reducing pouring temperature

生产批次	起浇温度/℃	包尾温度/℃	生产数量/件	粘砂数量/件	粘砂比例/%
1	1 385	1 340	10	3	30
2	1 390	1 349	10	4	40
3	1 386	1 346	12	5（1件轻微）	41.7

表3 喷涂快干涂料后铸件粘砂统计结果

Tab. 3 Statistical results of the castings with metal penetration defects after spraying quick-drying coating

生产批次	起浇温度/℃	生产数量/件	粘砂数量/件	粘砂比例/%	备注
260114	1410 ± 10	106	19	17.9	
260115	1390 ± 10	108	16	14.8	2件气孔

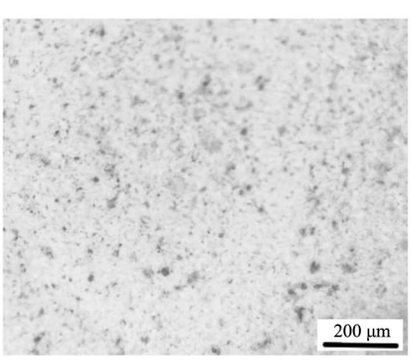

图8 浸涂锆英粉涂料砂芯表面状态

Fig. 8 Surface condition of the sand core dip-coated with zircon powder coating



图9 砂芯曝热抗裂性检测结果

Fig. 9 Thermal cracking resistance test result of the sand core

涂层与基体之间无剥离现象，表面无裂纹，可知涂料曝热抗裂性为Ⅰ级[18]。

由表4可知，浸涂锆英粉涂料后，原起浇温度下变速箱壳体粘砂比例大幅降低至约0.3%。说明砂芯局部浸涂锆英粉涂料后，变速箱壳体内腔粘砂基本得到解决，见图10。

表4 浸涂锆英粉涂料后铸件粘砂统计

Tab. 4 Statistics of the castings with metal penetration defects after dipping zircon powder coating

生产批次	起浇温度/℃	生产数量/件	粘砂数量/件	粘砂比例/%
260117	1 390 ± 10	118	1（轻微）	0.8
260118	1 410 ± 10	108	0	0
260120	1 410 ± 10	232	1（轻微）	0.4
260204	1 410 ± 10	334	1（轻微）	0.3



图10 铸件表面无粘砂缺陷

Fig. 10 Casting surface without the metal penetration defect

4 结论

（1）下箱砂芯因局部长时间受热，高温铁液在型腔压力下渗入砂芯表面，导致变速箱壳体内腔出现局部机械粘砂缺陷。降低浇注温度同时喷涂醇基快干涂料对粘砂有一定缓解作用，但效果不佳，且会增加气孔缺陷风险。

（2）对粘砂部位的砂芯局部浸涂锆英粉涂料，由于该涂料耐火度高，且能有效填充砂芯表面砂粒孔隙，物理阻隔了铁液渗入砂粒空隙，可防止机械粘砂形成，显著改善变速箱壳体的粘砂缺陷，在不降低起浇温度条件下粘砂比例降低至约0.3%。

参考文献：

[1] 宁显润，郑涛，黄鹏，等. 基于DOE优化的冷芯盒树脂砂铸件粘砂缺陷研究 [J]. 铸造，2025，74（12）：1616–1619.

[2] 侯俊波. 消失模铸造客车变速箱壳体铸件浇注系统设计 [J]. 铸造工程，2025，49（4）：38–43.

[3] 刘伟，孙成涛，胡平. 变速箱壳体铸造工艺模拟及优化 [J]. 铸造工程，2023，47（6）：58–62.

[4] 倪传庆，靳宪虎，邵文浩. 铁铸件铸造缺陷的成因分析与预防措施 [J]. 中国金属通报，2026（6）：43–45.

[5] 李远才. 铸造涂料及应用 [M]. 北京：机械工业出版社，2007：5–10.

[6] 贺关水. 商用车制动盘机械粘砂缺陷的分析及对策 [J]. 现代铸铁，2020，40（1）：45–49.

[7] 李帅平. 胺法冷芯树脂砂强度影响因素研究 [J]. 铸造工程，2025，49（增刊1）：71–74.

[8] 吴友坤，罗磊，胡平，等. 变矩器壳体粘砂缺陷的成因分析及防止措施 [J]. 现代铸铁，2020，40（4）：47–50.

[9] Li S S，Zang X M，Kong L Z，et al. Suppressing interfacial reactions and burn-on defects in sand casted 13Cr9Mo1VNb steel castings. Part I：a novel MgO-chromite hybrid material [J]. Ceramics International，2024，50（16）：27835–27845.

[10] 于见华，刘巍，刘大东，等. 湿砂型铸件表面缺陷及防止措施 [J]. 现代铸铁，2020，40（6）：25–27.

[11] Liu Q H. Analysis of common casting defects and process countermeasures [J]. Advanced Materials Science and Technology，2025，7（2）：13–17.

[12] Wu Y，Ma Y M，Chen S，et al. Integrated macro-micro-simulation of process parameter optimization and microstructure-determining factors in flywheel casting [J]. JOM，2026，78（4）：3476–3490.

[13] Brůna M，Galcik M，Pastircak R，et al. Effect of gating system design on the quality of aluminum alloy castings [J]. Metals，2024，14（3）：312.

[14] 余永哲，田学智，张东栓，等. 砂型铸造中醇基涂料的刷涂应用研究 [J]. 中国铸造装备与技术，2025，60（2）：44–46.

[15] 李帅平，杜利峰，刘忠强，等. 汽车发动机缸体内腔质量影响因素分析及工艺控制 [J]. 铸造，2024，73（4）：560–564.

[16] 周技，王鹭，韩虎，等. 防粘砂涂料在离合器壳体铸件油道芯上的应用 [J]. 铸造工程，2025，49（5）：56–60.

[17] 田志杰，赵亚芹，张之岭，等. 中小型联体缸盖内腔质量分析 [J]. 中国铸造装备与技术，2025，60（5）：89–93.

[18] 李远才，董选普. 铸造造型材料实用手册 [M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2015.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）