

矿山机械用机架前座裂纹分析及解决措施

宋志起^{1, 2}, 刘健明^{1, 2}, 贾旭^{1, 2}, 邹寅^{1, 2}

(1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏常州 213011;

2. 江苏朗锐茂达铸造有限公司, 江苏江阴 214445)

摘要: 针对矿山机械用机架前座产生的裂纹, 采用光学显微镜、场发射扫描电镜和能谱仪, 对裂纹产生的原因进行分析。结果表明, 裂纹两侧存在脱碳层, 裂纹是铸件在凝固过程中产生的热裂纹, 包含氧化夹杂物 Fe_2O_3 、 MnO 、 Na_2O 、 CaO 的密集双层膜是裂纹源。分析原因可知, 在钢液凝固过程中, 裹携氧化夹杂物的双层膜从钢液表层渗入内部, 并汇聚在晶粒之间。枝晶骨架收缩时, 受到型芯的阻碍而产生收缩应力。在高温下, 当双层膜位置的集中应变无法满足合金收缩需求时, 便会在厚度微小的薄弱区域产生裂纹。结合显微组织及裂纹原因分析, 采取改善内浇道与冒口位置及分布、采用复合稀土脱氧、精炼合金、加强原材料质量管控、提高作业人员水平和加强炉渣控制等措施, 是减少热裂纹产生的有效途径。

关键词: 机架前座; 裂纹; 脱碳层; 氧化夹杂物

机架前座是用于矿山机械设备传动部分的重要零部件, 主要应用于露天矿山、港口码头、水利水电工地以及交通基础设施等大型施工现场, 承载着较大应力和冲击^[1-2]。机架前座毛坯质量约3.5 t, 材质为GS-25CrMo4合金钢, 主要壁厚50~65 mm。因此, 需要精心规划铸造工艺。根据其使用环境和铸件特点, 某钢厂制定了砂型铸造机架前座的生产工艺: 造型制芯—合箱—电弧炉熔炼—浇注—打箱清理—粗加工—热处理—半精加工—精加工—成品入库。GS-25CrMo4合金钢中含有较多合金元素, 且机架前座结构复杂, 各部位产生的应力存在差异, 在凝固成形过程中容易出现裂纹。所以, 对其铸造工艺和金属液的冶金质量都有严格要求。然而, 铸件在半精加工阶段, 发现机架前座法兰面存在裂纹, 位置如图1所示的圆框处。由于矿山设备使用的载重量较大, 道路状况复杂, 在运行过程中, 设备主机架受冲击载荷和交变力的影响, 裂纹会发生延伸并导致变形。这会使主机架面临较大的报废风险。为探明裂纹产生的原因, 对机架前座开裂部分进行了解剖检验, 并对裂纹产生的原因进行分析, 以便找到解决裂纹问题的方案。

1 取样与检测方法

图2是机架前座裂纹的宏观形貌, 表1为其材质GS-25CrMo4合金钢的化学成分。为获取铸件裂纹的更多信息, 对裂纹源进行取样, 将裂纹沿侧面打开, 并切割成尺寸为20 mm × 20 mm × 20 mm的金相试样送检, 如图3所示。试样先进行研磨、抛光, 然后用浓度为4%的硝酸酒精溶液腐蚀。采用Zeiss光学显微镜(OM)和Sigma-300型场发射电子扫描电

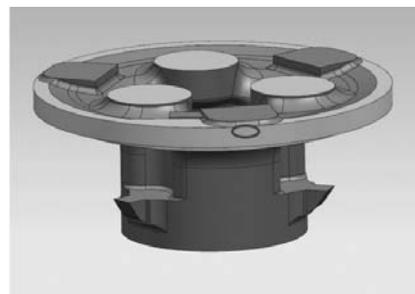


图1 机架前座裂纹位置

Fig. 1 Crack location of the front seat of the rack

作者简介:

宋志起(1995-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为钢铁合金铸造工艺技术及质量管理。电话: 19937189579, E-mail: 1670341030@qq.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)12-1606-05

收稿日期:

2025-04-21 收到初稿,

2025-06-28 收到修订稿。

表1 GS-25CrMo4合金钢名义化学成分
Tab. 1 Nominal chemical composition of GS-25CrMo4 alloy

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.22~0.29	≤0.60	0.5~0.8	≤0.020	≤0.015	0.8~1.2	0.2~0.3	其他



图2 铸件裂纹宏观形貌

Fig. 2 Macromorphologies of casting cracks

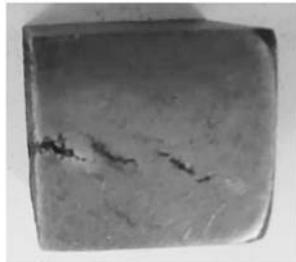


图3 铸件裂纹处金相试样

Fig. 3 Metallographical specimen at the crack position of the casting

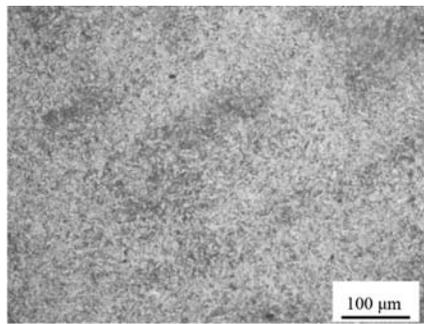
镜 (FESEM) 观察裂纹处的微观组织, 采用JED-2300T 能谱仪 (EDS) 对裂纹处氧化夹杂物元素进行检测。

2 试验结果与分析

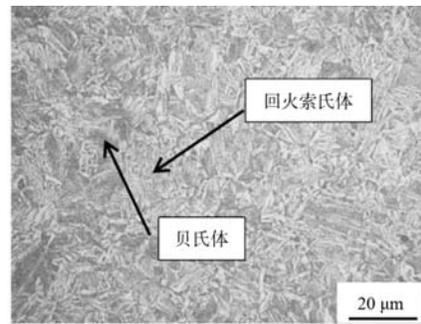
2.1 金相组织分析

图4 (a) 和 (b) 分别是铸件试样正常部位 $100\times$ 与 $500\times$ 的金相组织照片。从图4 (b) 可以看出, 铸件正常部位金相组织主要由取向不同的等轴状铁素体、细粒状碳化物构成的回火索氏体, 以及条片状的贝氏体组成, 晶粒度等级为7.0级。

图5 (a) 和 (b) 分别为铸件试样裂纹部位抛光态 $100\times$ 和 $500\times$ 的金相组织照片。从这两张照片中可以看出, 裂纹两侧存在明显的高温氧化质点, 且裂纹缝隙宽、形状曲折, 缝内呈现被氧化后的黑褐色。图6 (a) 和 (b) 分别为铸件试样裂纹部位腐蚀态 $25\times$ 和 $100\times$ 的金相组织照片。根据文献[3]可知, 合金钢中脱碳层由于被氧化, 碳含量降低, 金相组织中碳化物较少, 硝酸腐蚀后在光学显微镜下呈银白色。从图6



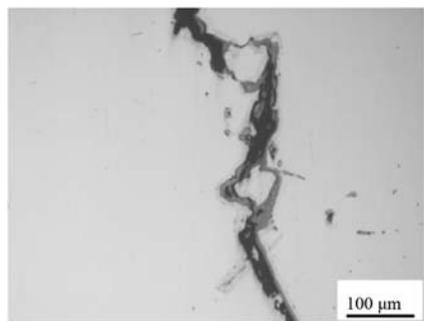
(a) 低倍



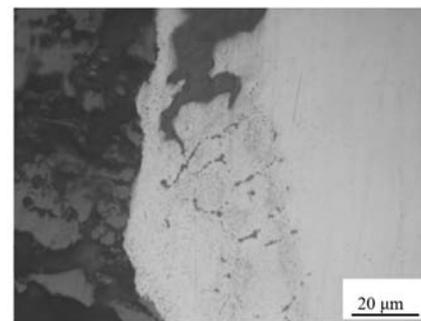
(b) 高倍

图4 铸件试样正常部位金相组织

Fig. 4 Metallographical structures of the casting sample at non-crack areas



(a) 低倍



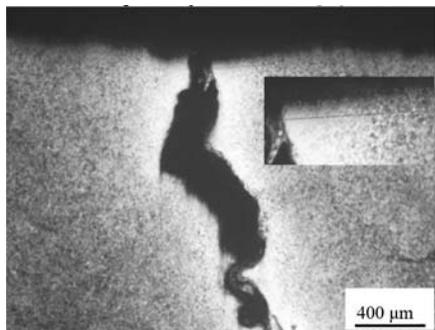
(b) 高倍

图5 铸件试样裂纹部位抛光态金相组织

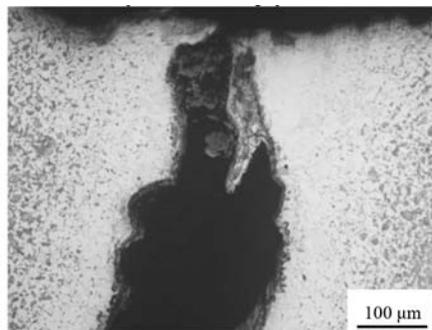
Fig. 5 The polished metallographical structures of the crack part of the casting specimen

(a)中可以看出,裂纹两侧存在银白色的脱碳层,且两侧最大的有效脱碳层深度为846.1 μm ;从图6(b)中可以看到,裂纹两侧表面碳被严重烧损,表层呈现全

部为铁素体晶粒的全脱碳层,以及合金表面碳部分烧损的半脱碳层,这表明裂纹两侧表层含碳量低于合金钢平均含碳量,且裂纹是沿铁素体晶界产生和发展的。



(a) 低倍



(b) 高倍

图6 铸件试样裂纹部位腐蚀态金相组织

Fig. 6 Corrosive metallographical structures of the crack site of the casting specimen

综上所述,裂纹沿晶开裂,裂缝内呈现氧化后的黑褐色,裂纹两侧具有明显的氧化脱碳现象,具备热裂纹的特征,所以裂纹是铸件在凝固过程中产生的热裂纹。

2.2 扫描组织与 EDS 能谱分析

图7是铸件试样裂纹部位在扫描电镜下的组织形貌照片。从图7中可以看到,裂纹周围有大量大小不等的亮灰色不规则块状氧化夹杂物,夹杂物的横向长度大小跨度较大,在20~400 μm 区间内。图8是对试样裂纹处A点氧化夹杂物的EDS能谱检测分析图,从图8中可以看出,氧化夹杂物由Fe、O、Na、Ca和Mn元素组成,质量分数分别为68.69%、28.65%、1.04%、1.01%和0.61%。其中,O元素占比较高,说明裂纹周围元素氧化严重,且可推断裂纹周围存在的氧化夹杂物有内生氧化夹杂物和外来氧化夹杂物两种。其中, Fe_2O_3 和MnO是钢液被氧化生成的内生氧化夹杂物, Na_2O 和CaO是卷入钢液的保护渣生成的外来氧化夹杂物^[4-5]。这两种夹杂物与基体在晶体结构上完全不同,在钢中

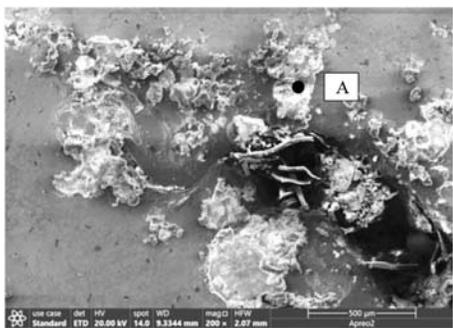


图7 铸件试样裂纹部位FESEM照片

Fig. 7 FESEM photo of the crack site of the casting sample

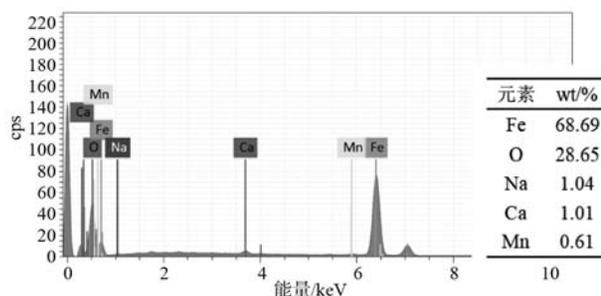


图8 铸件试样裂纹部位氧化夹杂物EDS分析

Fig. 8 EDS analysis of oxide inclusions in the crack site of the casting sample

也不能形成共格关系,破坏了合金基体的连续性。这些氧化夹杂物质硬而脆,容易导致应力集中,积聚在晶界成为裂纹源。

3 铸件产生裂纹的原因分析

过去的研究主要从经典金属学的角度^[6-8],提出热裂纹形成的热力学和动力学条件。研究认为,热裂的产生需经过裂纹的形核和发展两个阶段。裂纹的形核容易发生在固相晶粒相交的液相汇集部位。通过观察和分析热裂纹的微观形貌,研究者给出了多种热裂纹形成判据。然而,这些研究只回答了裂纹形成的内因,对裂纹形成的外因研究较少。在生产实践中,夹杂物的卷入以及钢液凝固过程的力学行为与热裂纹的产生密切相关,这为研究铸钢件热裂纹的产生提供了一个新的理论方向。

坎贝尔认为^[9],夹杂物的卷入与液体自由表面收缩和液面的飞溅波动有关。铸件在充型过程中,当液体表面收缩时,氧化物自身面积并不能收缩,因此,多余面积会发生折叠,卷入到金属液内部。另外,由于

液体表面飞溅或波动,也会造成氧化膜卷入的现象。因为卷入的氧化膜总是双层的,所以我们称之为双层膜。在生产实践中,双层膜往往裹挟着砂子、氧化渣和气孔等夹杂物,卷入到液体内部,如图9所示。

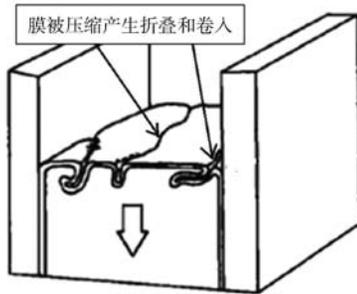


图9 双层膜形成示意图

Fig. 9 Schematic diagram of double layer film formation

结合钢液凝固过程的力学行为可知^[10-11],当钢液浇入铸型后,热量主要通过型壁散失,所以铸件表面先开始凝固。在凝固后期,大量枝晶出现并搭接成完整骨架时,合金开始具有强度。随着温度降低,骨架开始收缩。而当枝晶骨架收缩受到砂芯阻碍,不能自由收缩时,就会产生收缩应力。由于铸件各部位温度不同,各部位的强度也不同。在高温区,当该区域的合金强度接近收缩应力时,将产生集中变形。由于双层膜汇聚在晶粒之间,属于薄弱区域,且厚度非常微小,在高温下,当双层膜位置的集中应变不能满足合金收缩需求时,便会在在这个厚度微小的薄弱区域产生裂纹。本课题所研究的裂纹产生在铸件内浇道与冒口相邻位置,此处也是热节处。该部位的凝固和冷却速度都比较慢,强度较低,更容易产生应力集中和氧化双层膜聚集,形成热裂纹的倾向较大。

4 解决措施

4.1 优化铸造工艺

铸造工艺设计中,有利于减少裂纹的原则是设法使铸件顺序凝固,减少充型过程中产生的双层膜数量,并改善其分布。特别对于铸件应力集中部位,要使此局部区域的温度迅速降低至易开裂的敏感温度范围之下^[12],继而使材料在大量出现应变应力之前得到有效强化,从而抑制裂纹的产生。本文所述铸件的裂纹位置在浇道与冒口位置之间,如图10所示。此位置温度较高,属于最后凝固位置,更容易产生裂纹。由于该铸件在造型过程中不易放置冷铁,可采取在法兰面放置一定厚度的铬铁矿砂的方式,起到一定的激冷作用,以防止裂纹产生。此外,将图10所示铸件上方内浇道位置沿法兰外侧移动,避开冒口区;将腰冒口向内侧移动35 mm,并将腰冒口直径扩大到300 mm,以便更好地对法兰面进行补缩。这些措施可保证铸件

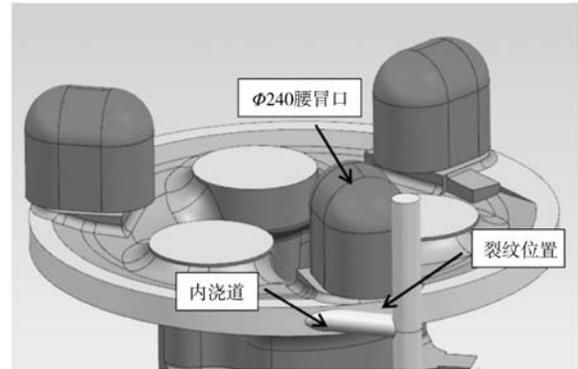


图10 铸件部分浇注和补缩系统

Fig. 10 Part of gating and feeding systems of the casting

温度场分布均匀,冒口和内浇道尺寸及分布合理,使得铸件法兰面部分能得到充分补缩,从而有效地解决裂纹问题。

4.2 减少氧化夹杂物

(1) 内生氧化夹杂物。钢在冶炼过程中,脱氧反应会产生氧化物等产物。若这些产物在钢液凝固前未浮出,就会留在钢中成为内生氧化夹杂物。这些夹杂物有时单独存在,有时两种或多种复合存在。内生夹杂物虽不可避免,但可通过正确的操作和合理的工艺措施减少其数量并改善其分布。通过优化脱氧工艺,选择合适的脱氧剂和脱氧温度,使脱氧产物从钢中迅速排除。可采用复合稀土进行脱氧、精炼合金,减少内生夹杂物的生成,防止钢液二次氧化^[13]。

(2) 外来氧化夹杂物。外来氧化夹杂物是由原材料、炉渣和耐火材料等引起的,由于出钢时钢液混渣,以及炉衬、中间包等耐火材料的侵蚀、冲刷剥离等形成。其特点是外形不规则,尺寸比较大,分布不均匀且不可预测。这类夹杂物通过正确的操作是可以避免的。由原材料带入的泥沙、熔渣等,这些夹杂物在高温下溶解于钢液中,但随着温度下降,它们会以独立相分离出来,聚集在晶界上,形成裂纹的潜在隐患。因此,我们要加强原料质量管控,确保原料干净、干燥,元素成分在标准范围内;另外,要提高操作人员作业水平,严格按照工艺文件进行脱氧工艺以及精炼处理;还应加强炉渣控制,提高精炼效果,严格控制耐火材料质量。

采用上述改进方案后,生产了180多件产品,再无类似情况出现,有效解决了铸件此位置的热裂纹缺陷,提升了铸件质量。

5 结论

(1) 试样裂纹两侧具有明显的氧化脱碳现象,且裂纹沿晶开裂,裂缝内呈现氧化后的黑褐色。裂纹是

铸件在凝固过程中产生的热裂纹。裂纹周围存在大量氧化夹杂物，这些夹杂物是裂纹源。其中， Fe_2O_3 和 MnO 是内生氧化夹杂物， Na_2O 和 CaO 是外来氧化夹杂物。

(2) 钢液凝固过程中，裹挟氧化夹杂物 Fe_2O_3 、 MnO 、 Na_2O 和 CaO 的双层膜从钢液表层渗入内部，汇聚在晶粒之间。枝晶骨架收缩时，受到型芯的阻碍而产生收缩应力。在高温下，当双层膜位置的集中应变

无法满足合金收缩需求时，便会在厚度微小的薄弱区域产生裂纹。此外，铸件裂纹位置容易产生应力集中，形成裂纹的倾向更大。

(3) 结合显微组织及裂纹原因分析，改善内浇道与冒口的位置及分布，采用复合稀土脱氧和精炼合金，加强原材料质量管控，提高作业人员水平，加强炉渣控制等措施，是减少热裂纹产生的有效途径。

参考文献:

- [1] 贾旭, 吕昌略, 徐贵宝. 矿用自卸车机架前座质量改进 [J]. 铸造, 2025, 74 (1): 119-123.
- [2] 王伟康, 段振中, 唐亮, 等. 基于GS-25CrMo4的激光淬火工艺研究 [J]. 露天采矿技术, 2022, 37 (2): 12-15.
- [3] 陈爽, 汪宙, 武聪聪, 等. 废钢预热过程中的氧化脱碳特性及其对熔化行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (8): 117-124.
- [4] 张国滨, 宁玫, 周欣欣. 钢中非金属夹杂物分析 [J]. 理化检验-物理分册, 2021, 57 (12): 1-7+17.
- [5] 段丽飞, 周海. 钢中非金属夹杂物与金相鉴定分析 [J]. 中国金属通报, 2019 (4): 236-237.
- [6] 王业双, 王渠东, 丁文江, 等. 合金的热裂机理及其研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2000 (2): 48-50.
- [7] 黄天佑. 我国砂型铸造工艺与造型材料技术发展回顾 [J]. 铸造, 2002 (5): 257-261.
- [8] 景丹, 黄乃瑜, 罗吉荣, 等. 用呋喃树脂砂生产薄壁铸钢件热裂纹成因的分析 [J]. 铸造, 2000 (2): 79-83.
- [9] 约翰·坎贝尔. 铸造原理 [M]. 李殿中, 译. 2版. 北京: 科学出版社, 2011: 68-70.
- [10] 王再友, 王泽华. 铸造工艺设计及应用分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 137-139.
- [11] 徐贵宝. 试论砂型铸钢件热裂纹的成因与对策 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (5): 4-10.
- [12] 傅骏, 吴代建, 赵怀昊, 等. 树脂砂铸造缺陷的成因分析与防止 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (9): 2292-2294.
- [13] 李伟, 姜伟航, 曹松, 等. 中频感应电炉脱氧工艺对非金属夹杂物的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (2): 172-174.

Crack Analysis and Solutions for the Front Seat of the Rack for Mining Machinery

SONG Zhi-qi^{1,2}, LIU Jian-ming^{1,2}, JIA Xu^{1,2}, ZOU Yin^{1,2}

(1. CRRC Qishuyan Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Langrui Maoda Casting Co., Ltd., Jiangyin 214445, Jiangsu, China)

Abstract:

Aiming for the cracks in the front seat of the rack for the mining machinery, the Zeiss microscope, field emission scanning electron microscope, and energy spectrometer are used to analyze the causes of the cracks. The results show that the decarburization layers exist on both sides of the crack. The crack is a hot tearing one produced during the solidification process of the casting and contains oxide inclusions. The dense bi-film with Fe_2O_3 , MnO , Na_2O , and CaO is the source of the crack. Analyzing the reason, it can be seen that during the solidification process of the steel liquid, the double-layer films wrapped with oxide inclusions penetrate from the surface layer into the interior of the steel liquid and converge between the grains. The contraction of the skeletons of dendrites are hindered by the sand cores or mold, resulting in shrinkage stress. At high temperature, when the concentrated strain at the position of the double-layer film cannot meet the shrinkage requirements of the alloy, cracks will occur in the weak areas with small thicknesses. Combined with the analysis of the microstructures and crack causes, improving the position and distribution of the ingates and feeders, deoxidizing by using of composite rare earth and refining alloys, strengthening the quality control of raw materials, improving the operators' skills, and strengthening slag control are effective ways to reduce the generation of hot tearing cracks.

Key words:

front seat of the rack; crack; decarburization layer; oxidation inclusions