

灰铸铁水泵壳体铸件裂纹形成原因分析

李泽芝¹, 倪 钧¹, 赵 平^{1, 3}, 李小霞², 王 浩³, 朱香艳³

(1. 青岛科技大学材料科学与工程学院, 山东青岛 266042; 2. 龙口中宇热管理系统科技有限公司, 山东烟台 265716;
3. 龙口中宇机械有限公司, 山东烟台 265700)

摘要: 汽车水泵壳体是汽车发动机冷却系统的组成部件之一, 其质量对发动机冷却系统的正常运转有着重要的影响。某公司生产的汽车水泵壳体铸件材质为HT200, 铸件在生产过程中出现开裂现象, 为分析裂纹缺陷出现的原因, 利用金相显微镜和扫描电子显微镜表征了铸件的显微组织, 使用能谱分析仪、硬度计检测了铸件的物相成分和力学性能。结果表明: 该裂纹形貌呈宽窄不一的折线状, 裂纹断口氧化程度严重, 判断为热裂纹; 裂纹的形成原因是铸件的金相组织未满足设计要求, 断口中S元素含量过多, 存在氧化物夹渣以及铸造过程中出现应力集中区等几方面因素综合作用的结果。

关键词: HT200; 水泵壳体; 铸件; 裂纹

作者简介:

李泽芝(1999-), 男, 硕士生, 主要从事先进材料领域的研究开发工作。电话: 13563615768, E-mail: 1448205319@qq.com

通讯作者:

赵平, 男, 副教授, 硕士研究生导师。E-mail: zhaoping@qust.edu.cn

中图分类号: TG143.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)09-1254-08

基金项目:

山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME009); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC2246)。

收稿日期:

2023-09-18 收到初稿,
2023-11-23 收到修订稿。

我国的汽车制造行业现已进入高速发展阶段, 随着汽车产量的提高以及汽车制造技术的革新, 人们对汽车的动力与生产质量不断提出更高的要求。近年来, 我国大力推广高功率的、绿色新能源汽车发动机的设计与研究^[1], 汽车发动机不断升级换代, 发动机的冷却点随之升高。为了保证发动机整体系统运行的稳定性, 发动机冷却系统要有高的冷却效率, 这就对汽车水泵提出了更高的设计要求。

汽车水泵作为发动机冷却系统中重要零部件之一^[2], 其质量对发动机冷却系统的稳定运行有着重要的影响。汽车水泵通常由水泵壳体、轴承、水封、叶轮、法兰、皮带轮及其连接螺栓等零部件构成^[3]。其中, 水泵壳体是汽车水泵中重要的结构组成部分, 对轴承、叶轮等部件起到支撑作用。由于灰铸铁有较好的铸造、减磨、减震等性能, 成为汽车零部件如壳体、皮带轮等部位的首选材料^[4]。目前, 大型汽车上主要采用铸铁水泵, 但在实际生产过程中, 由于铸件结构和生产工艺的影响, 铸件在铸造过程中易出现裂纹缺陷, 直接导致铸件的报废^[5], 造成生产损失。某公司生产的汽车水泵壳体铸件, 材质为HT200, 该零部件设计时要求铸件表面平滑, 不得有毛刺飞边、结疤和裂纹等缺陷, 并且要有合适的硬度。在生产过程中, 发现水泵壳体铸件存在裂纹现象, 严重影响了铸件的安全使用性。为探究铸件裂纹出现的原因以及为提高水泵铸件的成品率, 利用金相显微镜、扫描电子显微镜等表征手段对铸件裂纹缺陷展开了检测与分析。

1 试验材料与方法

水泵壳体材质为灰铸铁, 牌号为HT200。化学成分要求如表1所示。铸件HB硬度要求155~180。熔炼采用中频电炉, 炉料配比为40%废钢+生铁和回炉料, 利用自动浇注机进行浇注, 浇注时间约为18~24 s, 浇注温度为1 420~1 450 ℃。铁液采用包内

表1 水泵壳体化学成分
Table 1 Chemical composition of water pump shell

					w _B /%
C	Si	Mn	P	S	
3.10~3.25	1.80~2.10	0.70~0.90	≤0.15	≤0.12	

孕育和随流孕育。

由图1a水泵壳体的原始形貌观察可知,水泵壳体铸件裂纹出现在壳体的边界位置,表面裂纹长约12 mm,裂纹约占铸件表面积的2%。其中,裂纹铸件

废品率约为4%~6%。为检验水泵壳体金相组织,研究裂纹缺陷出现的原因,对水泵壳体裂纹缺陷样品分为三部分进行取样。如图1b所示,利用DK7735型线切割机将水泵样品切成A、B、C(裂纹部分)三个试样。

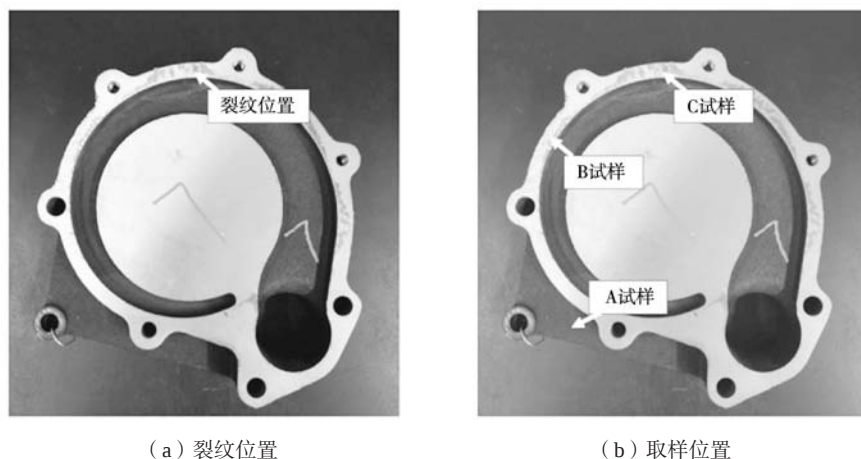


图1 水泵壳体样品原貌及取样位置

Fig. 1 Original appearance and sampling positions of pump shell sample

对切割后的试样使用500目、800目及1 200目粒度砂纸对A、B试样进行打磨,并使用抛光机抛光,将抛光后的试样置于无水酒精中进行超声波清洗,得到金相试样;后续利用4%硝酸溶液腐蚀,腐蚀时间为5~8 s,得到腐蚀试样。

为检验水泵壳体材料的微观组织以及力学性能是否符合铸件设计要求,利用XTL-16B型金相显微镜对A、B样品进行金相显微分析(包括石墨长度、石墨形态、珠光体含量百分比)、硬度测试、扫描电镜(SEM)与能谱仪(EDS)分析;同时对C试样(裂纹部分)进行金相显微观察、扫描电镜(SEM)观察和能谱仪(EDS)分析。

2 试验结果与分析

2.1 水泵壳体材料性能分析

石墨对灰铸铁铸件的性能有较大的影响,主要取决于石墨的长度、分布形状以及数量,其中石墨长度与分布形状对铸件影响最大。因此,在设计和制造灰铸铁产品时,必须充分考虑到石墨形状与大小对材料性能和负载能力的影响,并采取相应措施进行优化和改善,以确保产品的质量和性能。

如图2a、2c所示,A试样石墨类型多为B型与A型。B型石墨外围石墨片粗大,中间部分密集且细小,粗片状和细小片状的石墨聚集成菊花状分布。大量的粗大菊花状石墨分布在灰铸铁基体上,这会导致B型石墨的共晶团粗大,对铸件强度有较大的影响。B试样石墨类型多为A型、B型与小部分E型石墨。B型石墨聚

集成菊花状分布;E型石墨沿初生奥氏体枝晶的枝干有规律的方向性分布,呈分布紧密且为细小卷曲的粗片状石墨,容易对材料基体产生割裂,导致灰铸铁的力学性能降低。由图2b、2d可知,A、B试样材料基体为铁素体与珠光体混合基体,层片状珠光体数量较多,间距较为细小;试样上未观察到明显的铸造缺陷。由图2e、2f可知,裂纹附近石墨形状多为B型、E型与D型,三种石墨形状皆会对材料基体产生不利的影响;裂纹周围石墨呈端部尖锐的粗片状,其尖锐的边缘在承受负荷时很容易引起应力集中现象,导致铸件力学性能下降,增加裂纹倾向的产生;且该处石墨尺寸较大,数量较多,石墨会出现明显的缩减作用,这会导致铸件的强度和弹性模量降低,其塑性也会受到一定程度的影响。

根据国标(GB/T 7216—2009),对水泵A、B两个试样,分别取十个受检面,并且取具有代表性的视场(放大倍数为100倍),按其中最长的三条石墨的平均值,分八级进行评定。如表2所示,经测量评定,A试样评定结果为二级,B试样评定结果为三级。水泵壳体基体的石墨长度不均匀,但整体长度偏大,表明水泵壳体的铸造工艺存在问题;并且粗大片状的石墨的尖端容易对基体组织产生割裂作用,对基体性能不利。

为了获得性能优异的灰铸铁铸件,除了要控制石墨的长度、分布形状和数量之外,还应尽量获得层片间距细小的珠光体组织。铸件表面珠光体含量低会降低抗拉强度,使铸件易形成裂纹^[6]。交错分布、层片

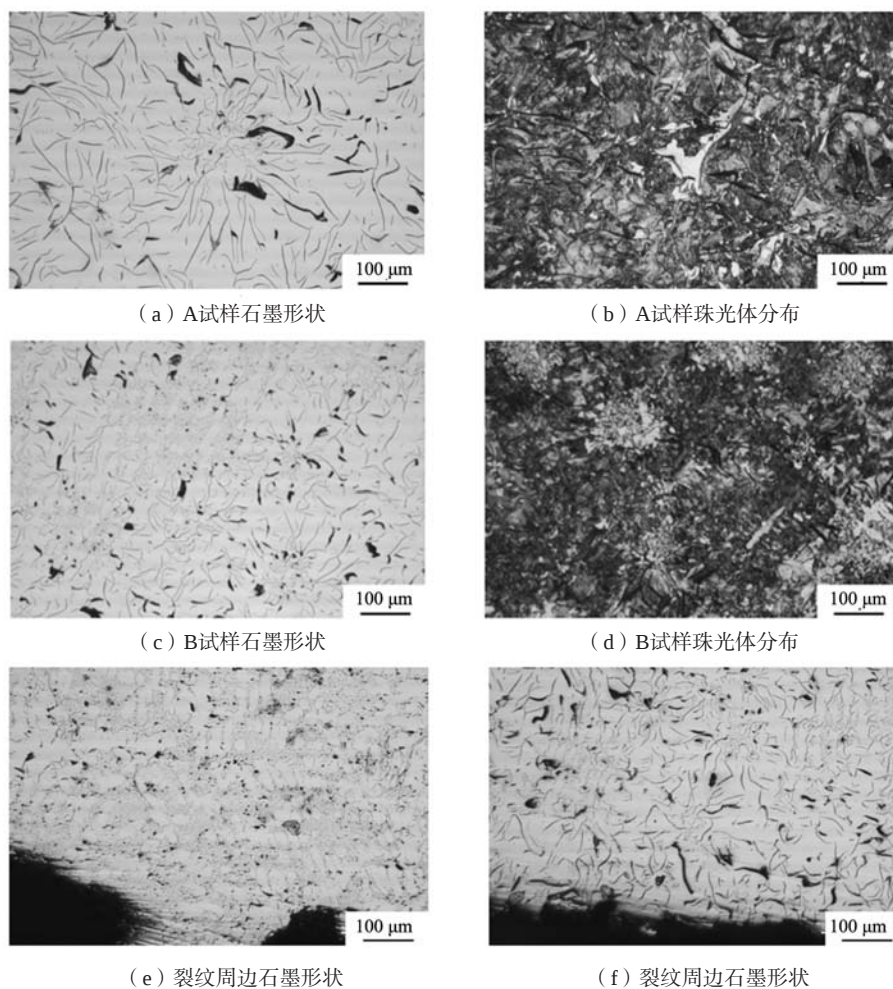


图2 水泵壳体试样金相图片

Fig. 2 Metallographical photos of samples of water pump shell

表2 水泵壳体石墨长度评定
Table 2 Graphite length assessment for the water pump shell

视场编号	A试样石墨长度/mm	B试样石墨长度/mm
1	0.837 7	0.367 6
2	0.649 1	0.488
3	0.737 3	0.469
4	0.899 3	0.453
5	0.791 8	0.454
6	0.799 0	0.538
7	0.844 2	0.449
8	0.925 3	0.503
9	0.842 9	0.381
10	0.804 0	0.347
平均长度	0.813 06	0.444 96
评级	二级	三级

间距细小的珠光体组织更有利于防止裂纹的产生和扩展，能够有效提高灰铸铁的抗拉强度。

根据国标（GB/T 7216—2009），对水泵A、B试样各取十个视场（放大倍数为100倍），分别经4%硝酸酒精溶液浸蚀后检验珠光体数量百分比（珠光体+铁素体=100%）。如表3所示，经测量评定，A试样评级为三级（珠光体90%），B试样评级为四级（珠光体80%），B试样未满足水泵壳体的珠光体含量要求，使得水泵壳体边缘位置抗拉强度较低，容易形成裂纹缺陷。

借助扫描电子显微镜（型号：JSM-7900F）对A、B试样基体组织进行观察。由图3a、3b可观察到A试样基体组织均匀，层片状珠光体分布均匀，且间距细小；B试样层片状珠光体间距较大，呈现出撕裂状，表明材料基体受到了一定的损伤。由图3c、3d可观察到，石墨粗大，端部尖锐；石墨尖端穿过珠光体组织，使得珠光体组织成破碎的块状，且间距偏大，粗大的石墨尖端严重破坏了水泵壳体基体的连续性与稳定性。

对水泵壳体A、B试样进行EDS能谱检测，检测结

表3 水泵壳体珠光体含量百分比评定
Table 3 Pearlite content percentage assessment for the water pump shell

视场编号	A试样珠光体含量/%	B试样珠光体含量/%
1	89.10	75.76
2	92.58	82.89
3	90.77	74.96
4	90.21	81.31
5	91.71	85.61
6	89.26	78.05
7	87.70	80.51
8	89.15	79.17
9	90.35	70.63
10	92.57	77.34
平均百分比	90.34	78.623
评级	三级	四级

果如图4所示。A试样Si含量为1.5wt%，B试样Si含量为1.6wt%，铸件的Si元素含量较低，材料基体组织中铁素体占比增高^[7]；且Si元素促进石墨化能力变弱，石墨核心减少，导致只有少部分碳原子在初生奥氏体周围以石墨析出，并成长为细小粗片状的E型石墨，割裂材料基体，破坏铸件的力学性能。该水泵壳体铸件要求Mn元素含量为0.70wt%~0.90wt%，其中A、B试样Mn元素含量分别为0.70wt%与0.60wt%，B试样未满足设计要求。水泵铸件中Mn元素含量总体偏低，导致Mn元素对S元素给铸件带来的有害作用中和效果减弱；同时，Mn元素含量偏低会使其促进珠光体形成的能力降低，导致Mn强化铸件基体的作用减弱。

2.2 材料力学性能分析

选择试样光滑的表面，对水泵A、B两个试样分别进行HB硬度测试。对A、B试样各取10个点测量，对测

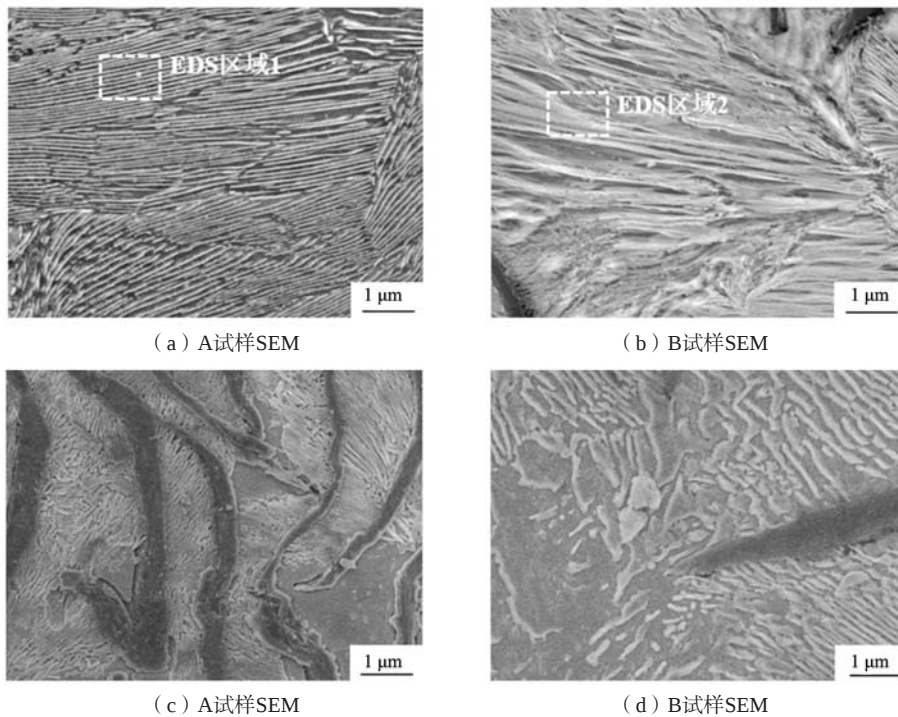


图3 水泵壳体SEM图

Fig. 3 SEM diagrams of water pump shell

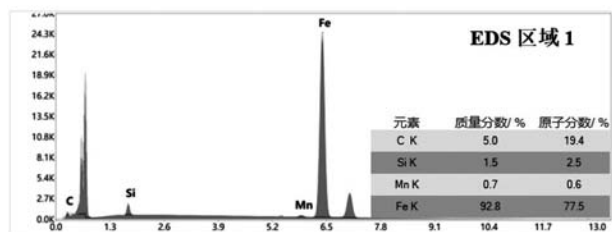
试结果取平均值。测试结果如表4所示，A、B两个试样硬度均匀，A试样平均硬度优于b试样。但B试样硬度低于水泵壳体设计硬度的要求，结合上述金相分析，水泵壳体铸件中B型、E型与D型石墨已经对该铸件力学性能造成了极为不利的影响。

2.3 水泵壳体裂纹分析

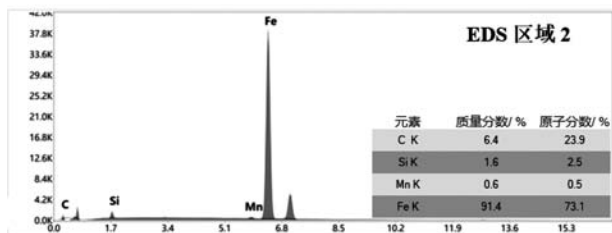
如图5所示，对裂纹宏观形貌进行观察，可知裂纹

位于水泵壳体边界，且裂纹位置处的水泵基体厚度较薄，属于结构薄弱处。观察到裂纹呈曲折的折线状，开裂方向由水泵壳体边界向内部延伸，且裂纹的开裂程度由外向内逐渐减小。在金相显微镜下，未观察到裂纹周围有砂眼、缩孔等铸造缺陷。

为更深一步研究水泵壳体裂纹形成的原因，将C试样从裂纹处打开，以观察裂纹的断口形貌。在打开裂纹断口的过程中，裂纹试样被轻松打开，说明裂纹已



(a) 水泵壳体A试样EDS能谱图



(b) 水泵壳体B试样EDS能谱图

图4 水泵壳体EDS能谱图

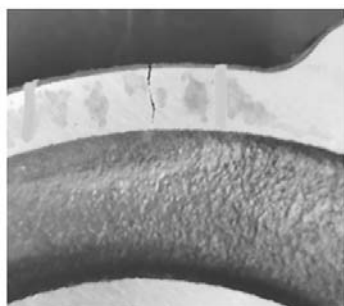
Fig. 4 EDS diagrams of water pump shell

经贯穿整个断口截面，裂纹开裂程度较深。裂纹已对水泵壳体产生了极大的负面影响。

表4 水泵壳体试样硬度评定

Table 4 Hardness evaluation of water pump shell sample

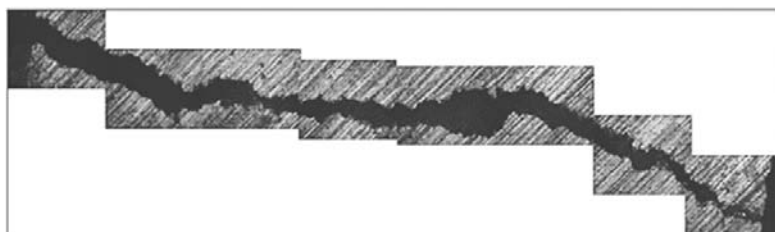
编号	A试样硬度HB	B试样硬度HB
1	155	135
2	159	149
3	162	147
4	167	148
5	169	146
6	161	142
7	164	140
8	167	143
9	168	144
10	171	145
平均硬度	164.3	143.9



(a) 裂纹原始宏观形貌



(b) 裂纹试样



(c) 裂纹金相照片

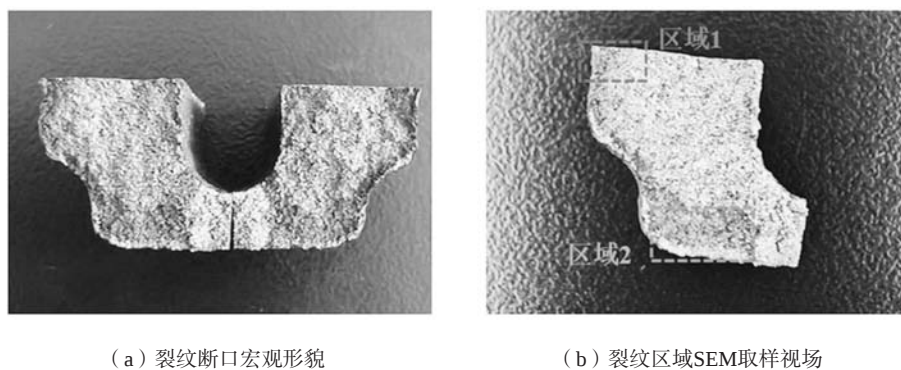
图5 水泵壳体裂纹宏观形貌图

Fig. 5 Macroscopic morphology diagrams of water pump shell cracks

如图6a所示为裂纹打开后的断口形貌照片。从图中可以看出，断口呈对称状，整个断口区域表面凹凸不平，材料基体金属光泽不均匀；如图6b中区域2所示，该区域材料基体颜色较深，呈现灰黑色，没有金属光泽，氧化程度严重；区域1为裂纹开口处，颜色呈深灰色，氧化程度适中；并且发现沿水泵壳体边界位置有狭窄的灰黑色区域连接区域2与区域1，而断口中间区域带有少量的金属光泽。根据断口表面形貌特征以及裂纹的开裂形状，初步判断水泵壳体的裂纹源位于断口下方的区域2，裂纹扩展方向为区域2沿水泵壳

体边界逐渐向区域1中扩展。

由于C试样断口打开之后为对称状，为进一步对裂纹的微观形貌进行分析，只对其中一半进行扫描电镜表征。图7a、7b、7c三图为裂纹断口宏观形貌中区域2，即灰黑色区域；图7d为裂纹断口宏观形貌中带有少量金属光泽的中间区域。由图7a、7b、7c可观察到，在试样断口存在着一些白色物质；并且断口表面附着一层氧化皮，断口表面氧化程度十分严重。由图7d观察可知，断口中间区域的形貌凹凸不平，为正常的铸件断口形貌，未有明显的氧化痕迹。

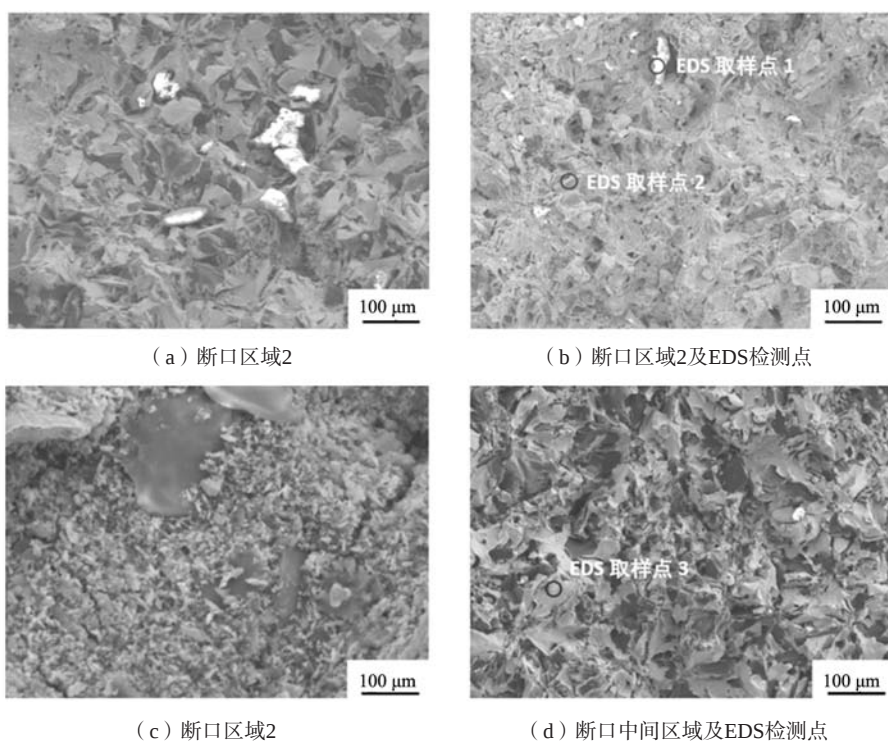


(a) 裂纹断口宏观形貌

(b) 裂纹区域SEM取样视场

图6 裂纹断口宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of the crack fracture



(a) 断口区域2

(b) 断口区域2及EDS检测点

(c) 断口区域2

(d) 断口中间区域及EDS检测点

图7 水泵壳体C试样SEM图片

Fig. 7 SEM pictures of C samples for the water pump shell

对断口区域进行EDS分析, 结果如图8所示。EDS取样点1为图7b视场中的白色物质, 其氧含量高达39.6wt%, 且含有Ca、Mg、Si、S等元素。其中, S元素含量为1.0wt%, 超过水泵铸件的设计要求(要求为S元素 $\leq 0.12\text{wt}\%$)。S元素含量过高, 在水泵壳体铸造过程中, 较多的S元素会富集在共晶团的边界处, 形成富硫薄膜, 阻碍碳原子扩散, 导致过冷度增大, 促进过冷石墨的增长, 容易生成D型石墨, 降低铸件的力学性能; 并且在铸造过程中S元素易与Mg、Mn等元素形成MgS、MnS等残渣, 容易促进形成夹渣缺陷。推测白色物质应为铸造过程中形成的氧化物与硫化物夹渣缺陷, 其存在破坏了水泵壳体基体组织的连续性与稳定性, 并且容易形成应力集中区, 导致应力过大, 易引

起铸件裂纹源的萌生。EDS 取样点2测得该区域氧含量高达50.3wt%, 说明灰黑色区域氧化程度极为严重, 且该区域S元素含量为0.4wt%, 也超过铸件的设计要求; EDS 取样点3为图7d中带有金属光泽的中间区域, 由正常灰铸铁化学成分组成, 但其Si元素含量为1.3wt%, Mn元素含量为0.6wt%, 结果与A、B试样的测试结果相似。说明该水泵壳体铸件的Si元素与Mn元素总体含量偏低, 导致在水泵壳体铸造过程中Si元素促进石墨化能力偏弱, Mn元素对S元素的有害作用中和效果减弱, 对铸件的性能极为不利。

2.4 裂纹成因分析

对水泵壳体C试样分析可知: 水泵壳体裂纹断口

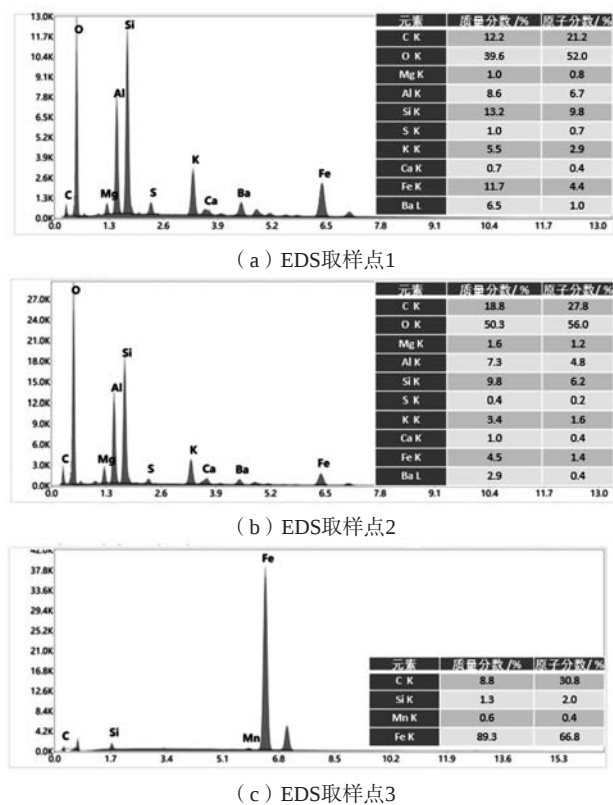


图8 水泵壳体C试样EDS图片

Fig. 8 EDS pictures of C samples for the water pump shell

区域颜色呈现灰黑色，断口氧化程度严重，无金属光泽。仅断口中间区域有部分呈现金属光泽，说明从灰黑色区域发生开裂，使该区域先暴露于空气中，导致水泵壳体基体发生氧化反应，因此判断灰黑色区域为裂纹开裂的起始部位；且灰黑色区域位于水泵壳体弧面连接处，此处水泵壳体结构较为薄弱，弧面弯曲程度较大，可能由于铸造生产工艺不合理，造成水泵铸件结构薄弱处受到较大的外力作用，导致该处应力超过水泵壳体材料的强度极限从而导致裂纹产生。

铸件裂纹可分为冷裂纹和热裂纹^[8]。其中，热裂纹是在铸件凝固后期，由于此时铸件的强度较低，固态收缩受到阻碍，而产生的裂纹。热裂纹沿晶界断裂，呈现为粗细不均的折线状，其断口氧化程度十分严重，呈现无金属光泽的暗色或黑色。并且，热裂纹经常出现在铸件的拐角处、截面厚度急剧变化处或局部凝固缓慢处，有撕裂状的特征。结合水泵壳体裂纹出现的位置，裂纹开裂形状和走向，以及裂纹断口的氧化程度其来看，该水泵壳体铸件裂纹为热裂纹，是铸件在冷却凝固过程中形成的裂纹。

同时，由于该铸件的铸造原料以及铸造工艺可能

存在问题，导致水泵壳体铸件的金相组织中，存在粗大片状的石墨，并且石墨形状多为B型、E型与D型，且铸件元素中S元素含量过多容易形成夹渣缺陷，这就极易对铸件基体产生应力集中、割裂等有害作用，当应力过大时，就会在夹渣缺陷处萌生裂纹源，对铸件的性能极为不利。因此，汽车水泵壳体裂纹形成的原因是以上几种因素综合作用的结果。

3 改进措施

综合分析了水泵壳体裂纹缺陷产生的原因，为降低铸件的废品率，提出以下改进措施。

(1) 调整化学成分，通过加入优质增碳剂将铸件碳含量提高至3.25%~3.4%，严格控制S元素含量；同时提高Si、Mn元素的含量。

(2) 为防止存在氧化物夹渣，对预处理后的回炉料分批次均匀加入电炉中，铁液出炉前以及浇注前进行多次扒渣处理，清除表面氧化渣。

(3) 调整模具涂料厚度。减少水泵后盖铸件裂纹周围的涂料厚度，以此来调整铸件凝固过程冷却速率，减少铸件内部产生的应力集中。

采用上述改进措施试制铸件，消除了铸件裂纹缺陷，水泵壳体金相组织中A型石墨含量 $\geq 90\%$ ，B型、E型与D型石墨显著减少，珠光体含量稳定在90%~95%，验证了措施的有效性。

4 结论

(1) 水泵壳体裂纹曲折，宽度不一；裂纹断口部分区域呈灰黑色，氧化程度严重，无金属光泽，判断为热裂纹。

(2) 对A、B试样分析可得：水泵壳体的材料基体为铁素体与珠光体混合基体；石墨较为粗大，端部尖锐；石墨形状主要为A型。同时含有大量的B型、E型与D型，这对灰铸铁性能不利，生产中应加以控制。

(3) 对水泵壳体C试样分析可得：水泵裂纹断口部分区域氧化程度严重，该区域位于试样底部与水泵壳体弧面连接处，可能由于铸造生产工艺不合理，造成铸件结构薄弱处受到较大的外力作用导致该处应力超过材料强度极限从而而引起裂纹产生；同时EDS能谱分析发现，S元素含量超标，易形成夹渣缺陷，导致裂纹源的萌生。

(4) 采取严格控制铸件S元素含量、强化熔炼过程除渣、加强铸件局部冷却等工艺措施，可有效减小铸件产生裂纹的倾向。

参考文献:

- [1] 韩晓莹, 李乐, 杜艳阳. 浅谈高效率汽车水泵的设计研究 [J]. 山东工业技术, 2019 (9): 59-60.
- [2] 曹占龙, 李宏燕, 任柏林. 汽车水泵故障分析及改进 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2013, 27 (3): 65-68.
- [3] 蒋和团. 汽车水泵可靠性研究 [J]. 内燃机与配件, 2018 (20): 61-63.
- [4] 张宏, 杨忠, 陶栋, 等. 低碳当量对灰铸铁组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (1): 52-57.
- [5] 师亚洲, 逯广平, 雷超, 等. 汽车壳体铸件的铸造缺陷及成因分析 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (5): 87-90.
- [6] 李金武, 樊湘芳, 聂建隆, 等. 灰铁铸件表面珠光体含量低的原因分析与工艺改进 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (6): 1283-1284.
- [7] 齐笑冰, 董峰, 王鹏华, 等. 碳当量和硅碳比对灰铸铁力学性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (12): 1287-1289.
- [8] 曹学锋, 朱大智, 张少文, 等. 铝合金车轮铸造裂纹研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1178-1181.

Cause Analysis of Crack Formation in Gray Cast Iron Water Pump Shell Casting

LI Ze-zhi¹, NI Jun¹, ZHAO Ping^{1,3}, LI Xiao-xia², WANG Hao³, ZHU Xiang-yan³

(1. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, Shandong, China; 2. Longkou Zhongyu Thermal Management System Technology Co., Ltd., Yantai 265716, Shandong, China. 3. Longkou Zhongyu Machinery Co., Ltd., Yantai 265700, Shandong, China)

Abstract:

Automobile water pump shell is one of the components of automobile engine cooling system, and its quality has an important impact on the normal operation of engine cooling system. The casting material of the automobile water pump shell produced by a company is HT200. The cracking phenomenon occurs in the casting during the production process. In order to analyze the reasons for the crack defects, the microstructure of the casting is characterized by metallography microscope(OM)and scanning electron microscope(SEM), and the phase composition and mechanical properties of the casting are detected by energy Spectrum analyzer(EDS)and hardness tester. The experimental results show that the crack morphology is broken line with uneven width, and the oxidation degree of the crack fracture is serious, which is judged as a hot tearing. The crack forming is a composite effect of several causes including the metallographic structure of the casting does not meet the design requirements, the excessive content of S element in the fracture, the existence of oxide inclusion and the appearance of stress concentration area in the casting process, and so on.

Key words:

HT200; water pump shell; casting; crack