地铁电机悬挂梁疲劳开裂分析及改进措施

徐贵宝
（中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司，江苏常州 213011）

摘要：从宏观特征、微观组织等方面，分析了地铁直线电机悬挂装置用关键薄壁铸钢件发生开裂的原因，发现孔洞和显微缩松是裂纹源，在震动交变载荷作用下，导致了裂纹的形成和扩展，使工件产生低应力高周疲劳失效开裂。基于工艺方案模拟的结构，优化了悬挂梁的铸造工艺，并通过提升材料性能、加强过程控制等改进措施，消除了关键部位的孔洞裂纹源，解决了疲劳开裂问题，提高了铸件质量与使用寿命，确保了行车安全。

关键词：薄壁铸钢件；疲劳裂纹；孔洞缺陷；显微缩松；方案改进

直线电机系统是介于磁悬浮和轮轨系统之间的一种轨道系统，区别于传统轨道交通牵引模式，它通过感应电流磁化的车载磁铁产生排斥和吸引，对车辆实现驱动和制动。悬挂梁是地铁直线电机悬挂装置上的一个关键零件（图1），对行车安全起着重要的作用。其主要作用是对直线电机的悬挂，在服役过程中整体呈三点弯曲受力特征（图2），主要承受拉、压及弯曲应力，并受到震动载荷，运行过程中容易产生疲劳裂纹。

悬挂梁属于薄壁铸钢件，铸件整体为筋板结构，主体为“工”字梁结构，轮廓尺寸为1 140 mm×310 mm×160 mm，厚薄不均，最厚处42 mm，主体筋板壁厚为12～16 mm。国外采用等温淬火球铁ADI铸件，其强韧性高（抗拉强度R_m≥1 200 MPa，屈服强度$R_{p0.2}$≥900 MPa，伸长率A≥10%，断裂韧性K_{1C}≥60 MPa·m$^{1/2}$）、吸振性和耐磨性好、弯曲疲劳和接触疲劳强度高[1]。而我国原先选用B级铸钢（ZG25MnNi）材质，执行TB/T 2942—1999《铁道用铸钢件采购与验收技术条件》等相关标准，强度指标相对要低得多（抗拉强度R_m≥485 MPa，屈服强度$R_{p0.2}$≥260 MPa）。国内几家工厂生产的铸件，在运行20多万公里后陆续产生开裂现象，主要发生在梁盖板中间段（图2*B*部位）和吊挂凸台根部（图2*A*部位）。通过对悬挂梁典型裂纹进行检测，分析其产生的原因，继而提出相应改进措施，最终解决了开裂问题，从而提高了产品的可靠性和使用寿命。

1 悬挂梁开裂分析

1.1 宏观形貌检查

根据悬挂梁的开裂失效情况，归纳为两种形式，一种是吊挂凸台根部，称为*A*部位，另一种是盖板边缘处，称为*B*部位。图3是悬挂梁*A*部位断口宏观形貌，断面存在大范围的黑色、氧化“熔渣”类缺陷，整个断口以“熔渣”处为裂纹源，见图中实线箭头处；扩展方向见图中虚线箭头，扩展区较为平坦，贝纹线依稀可见，呈疲劳断裂特征。图4是*B*部位断口宏观形貌，裂源位于梁板内侧，见图中虚线区域，裂源处表面粗糙，锈蚀严重，应为某种铸造缺陷；此外，裂源附近存在多个大的疲劳台阶（见图中小箭头处），具有多源疲劳特征；扩展方向如图中虚线箭头所示，扩展区平坦，贝纹线清晰可见，呈典型的疲劳断裂特征；边缘白亮区为人为打开断口形貌。

作者简介：
徐贵宝（1963–），男，硕士，教授级高工，主要从事铸造凝固模拟、材料与工艺的研究，以及铸造技术与质量管理工作。E-mail: gbxu921@126.com

中图分类号：TG142.1
文献标识码：B
文章编号：1001-4977（2019）12-1411-06

收稿日期：
2019–09–06 收到初稿，
2019–10–20 收到修订稿。

1.2 微观形貌检查

图5和图6是用扫描电镜观察裂纹断口的微观形貌。从*A*部位断面扩展区微观形貌及局部放大图可见，裂源表面粗糙不平，氧化特征明显，有严重的缩孔缩松，并且存在气孔类缺陷；裂纹扩展区疲劳辉纹清晰可见，辉纹间距密集，属于低应力高周疲劳断裂。从*B*部位断面扩展区微观形貌及局部放大图可见，裂源枝晶形貌明显，具有气缩松类缺陷特征；扩展区疲劳辉纹细密、连续，为典型的低应力疲劳断裂特征。

1.3 金相检查

在铸件裂源附近取样进行金相检查。图7的*A*部位裂源处氧化特征明显，存在较大的孔洞缺陷。图8是*B*部位裂源处抛光态形貌，裂源处存在多个孔洞类缺陷，有些已露头于表面，这与微观形貌吻合。孔洞缺陷周围大多存在脱碳现象，如图9所示。孔洞周围组织粗大，主要为铁素体，基体组织为铁素体+珠光体，一般为堆垛正火组织3~5级。裂源附近大多存在明显的焊补特征（图10），焊补区自表面向心部依次为柱状晶

图1 地铁转向架直线电机悬挂结构

Fig. 1 Suspension structure for subway bogie linear motor

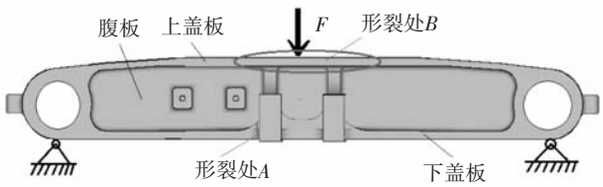


图2 悬挂梁受力示意图及其典型开裂部位

Fig. 2 Force analytical graph of suspension beam and its typical cracking positions

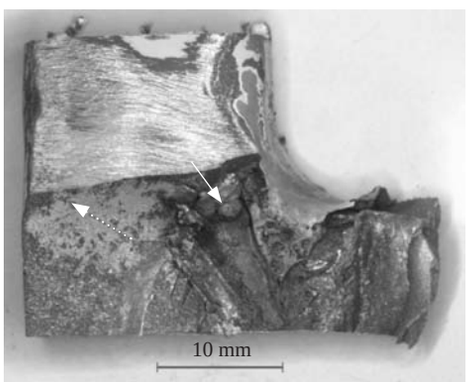


图3 *A*部位开裂处断口宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of fracture at cracking position *A* in Fig. 2

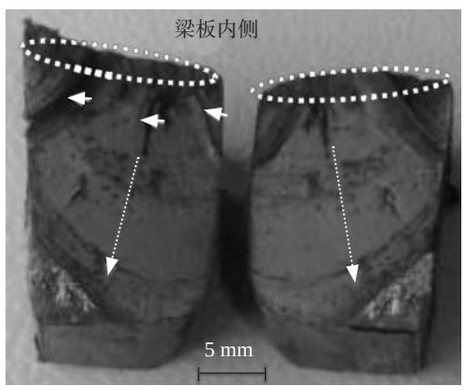
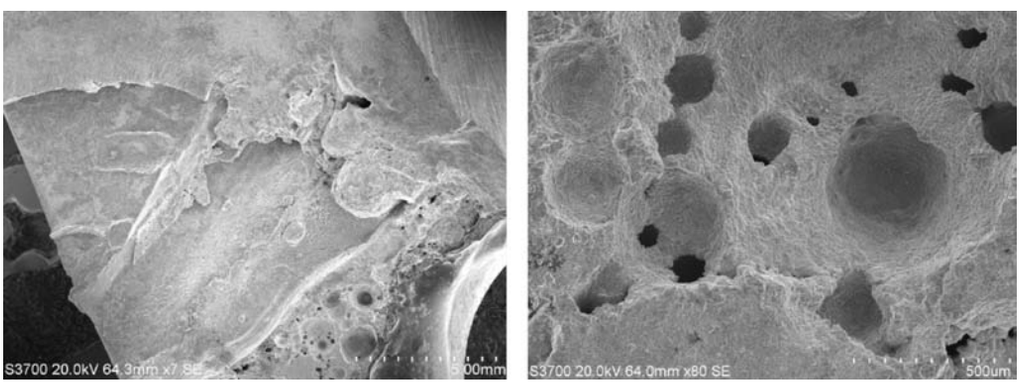


图4 *B*部位开裂处断口宏观形貌

Fig. 4 Macroscopic morphology of fracture at cracking position *B* in Fig. 2



（a）*A*部位裂源处微观形貌 （b）局部放大图

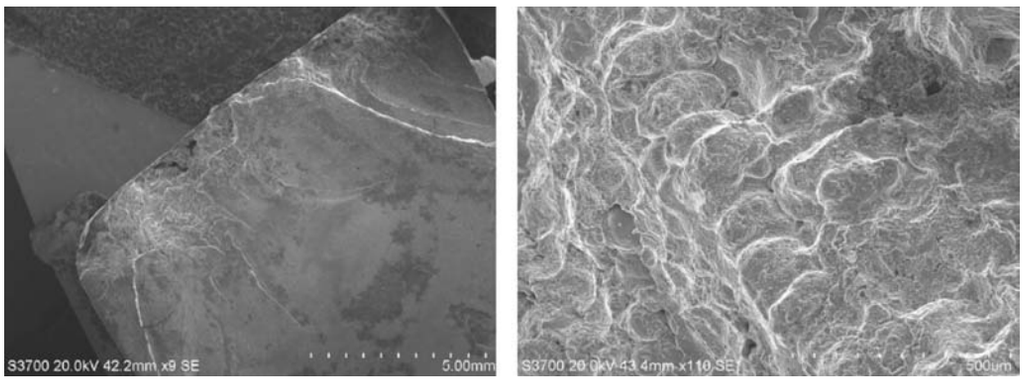
图5 *A*部位裂源处微观形貌及局部放大图

Fig. 5 Micro-morphology of fracture at cracking position *A* in Fig. 2（left）and its local area enlarged image（right）

区（熔合区）、粗晶区（过热区）、细晶区（重结晶区）、部分相变区、母材，可判定焊接实施于整个铸件正火处理之后，且补焊后局部未受到高温处理。

1.4 失效分析

对所有开裂铸件的检测结果表明，其化学成分、力学性能均符合技术要求；夹杂物含量虽然较高，但未超标准要求；金相组织为堆垛正火组织，虽然不是最佳组织，但也符合技术规范，因此，这些都不是导致开裂的主要原因。依据失效检测情况，分析认为该铸件发生疲劳失效的主要原因是裂纹源附近存在孔洞和缩松缺陷，这些缺陷减小了铸件有效承力面积，在承受交变载荷时产生缺口效应，造成较大的局部应力集中，使材料在较小应力水平下发生局部塑性变形，



（a）*B*部位裂源处微观形貌　　（b）局部放大图

图6　*B*部位裂源处微观形貌及局部放大图

Fig. 6 Micro-morphology of fracture at cracking position *B* in Fig. 2（left）and its local area enlarged image（right）

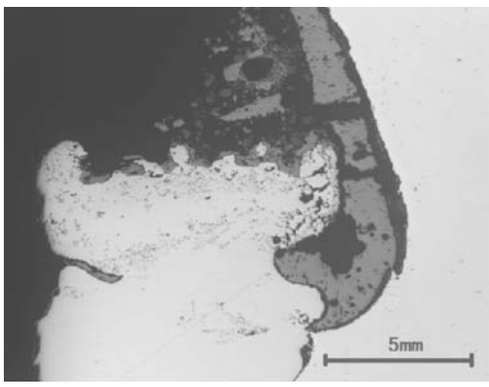


图7　*A*部位裂源处孔洞缺陷形貌

Fig. 7 Morphology of shrinkage holes at cracking position *A*

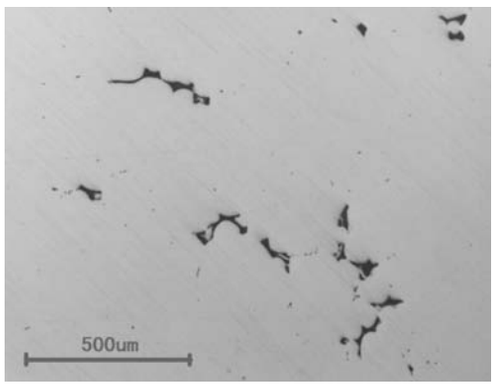


图8　*B*部位裂源处缩松形貌

Fig. 8 Morphology of shrinkage porosity at cracking position *B*

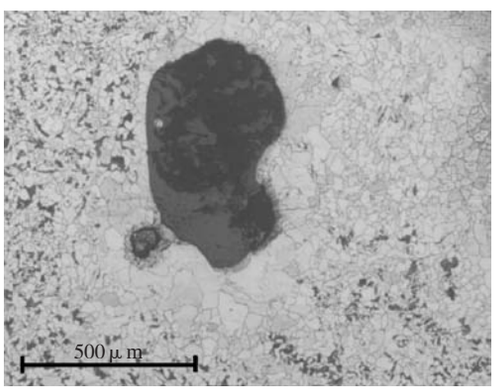


图9　裂源处孔洞周围脱碳组织

Fig. 9 Decarburization structure around shrinkage hole

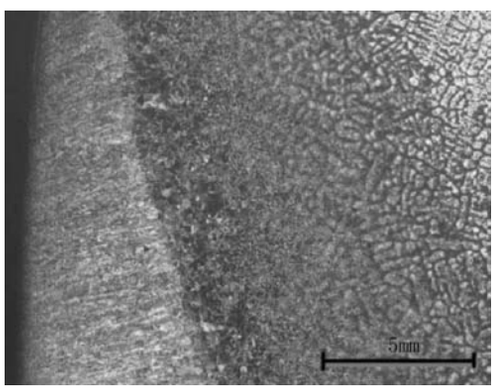


图10　裂源附近焊补组织形貌

Fig. 10 Weld repair microstructure near crack source

极易形成疲劳裂纹源，进而降低铸件长期服役条件下的疲劳性能[2-3]，导致低应力高周疲劳失效裂纹产生。同时，裂源处不规范的焊补行为，产生的回火马氏体和铁素体魏氏组织，严重影响了力学性能，并且加剧了孔洞缺陷处的应力集中，促使了裂纹的萌生和扩展。

1.4.1　孔洞缺陷对疲劳寿命的影响

当疲劳裂纹萌生于孔洞且孔洞尺寸较大时，裂纹萌生只影响一小部分疲劳寿命，裂纹扩展寿命则成为疲劳寿命的主要影响因素。对于长裂纹扩展机制，通常运用线弹性断裂力学建立裂纹宏观扩展速率与裂纹扩展驱动力的关系。根据Paris裂纹扩展速率dL/dN公式[4]以及裂纹扩展驱动力ΔK公式：

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}N}=C\Delta K^{m} \qquad (1)$$

$$\Delta K=F\sigma_a\sqrt{\pi d} \qquad (2)$$

式中：L为裂纹长度，N为循环周次数，C和m均为材料常数，d为引起裂纹萌生的孔洞尺寸，F为裂纹形状系数（表面缺陷F=0.65，内部缺陷F=0.5）[5]，σ_a为孔洞处应力大小。工件近表面孔洞尺寸d近似为裂纹初始长度L，对上式积分得裂纹寿命与孔洞大小之间的关系式：

$$N_f=\frac{2d}{C(m-2)(F\sigma_a\sqrt{\pi d})^{\mathrm{m}}}=\frac{A}{\sigma_a d^{(\frac{m}{2}-1)}} \qquad (3)$$

由（3）式可知，当m大于4时，在一定的加载应力下，疲劳寿命随着孔洞尺寸的增大而减小；在孔洞尺寸相同的情况下，随加载应力降低，疲劳寿命逐渐延长。因此，减小影响裂纹萌生的孔洞缺陷，可以提高铸件的疲劳寿命。

1.4.2　孔洞缺陷模拟分析

通过调查发现，原工艺方案为上下盖板平放，浇注系统为底注方式，分两道浇口从下板注入，出现疲劳裂纹的位置主要位于下箱和分型面附近。对此方案进行充型、凝固和冷却过程模拟计算，缩松的判定方法采用Niyama判据法[7-8]，评价依据是当铸件某点凝固固相率达到60%时，即温度低于1 483 ℃时，计算该处的$G/R^{1/2}$判据值，设定临界判据值为610 ℃$^{1/2}$·s$^{1/2}$·m^{-1}。模拟预测结果见图11所示，图中圆圈内深色中的浅色部分的区域表示缩松倾向较大。通过模拟分析得出如下结论：

（1）盖板内部尤其是内浇道附近存在缩松缺陷，如图11（*B-B*）所示，这正是*B*部位开裂的原因。内浇道附近由于浇道过热形成了热节，所以产生了缩孔缩松；当浇注温度偏高或砂芯上浮时，缺陷产生倾向更大。盖板厚度只有16 mm，一般板形铸钢件的冒口有效补缩距离为2～4.5 *T*（*T*为壁厚）[6]，所以盖板容易产生缩松缺陷，见图11（*C-C*）；下箱底部薄板通过中间连接腹板形成补缩，但该腹板壁厚只有12 mm，难以形成补缩通道，因此缩松倾向更大。

（2）吊挂凸台与筋板之间存在缩孔缩松，如图11（*A-A*）所示，这正是*A*部位开裂的原因。凸台热节较大，冒口补缩不足而产生缩孔缺陷。如果冷铁放置不到位，或者冒口套保温性能差，或者冒口内金属液温度偏低，更容易在连接处产生缩孔缩松。

（3）钢液从盖板薄壁处进入，容易产生冲砂现象，同时盖板在平放状态下，充型过程排气和流动不畅，容易产生卷气和氧化现象，从而形成气孔、砂眼和夹杂物等缺陷，如图12所示圆圈部位。

因此，要解决悬挂梁的疲劳裂纹问题，应该从铸造工艺上进行优化，消除裂纹源的产生。当然，首先考虑的应是提高材料力学性能，这有利于阻止裂纹的形成和扩展。

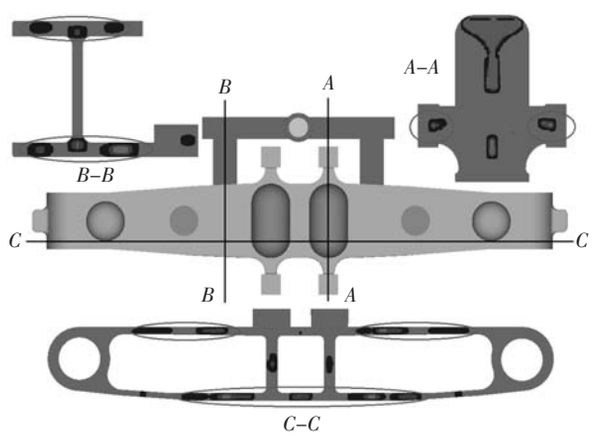


图11　模拟预测凝固过程的缩孔缩松

Fig. 11 Simulation results of shrinkage cavity and porosity

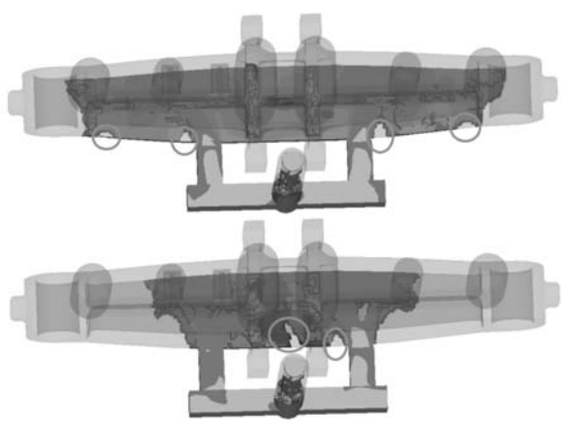


图12　模拟预测充型过程的卷气和夹杂

Fig. 12 Simulation results of air entrapment and inclusions during mold filling process

2 改进方案

2.1 提升材料性能

铸件原材质采用B级钢，该材料屈服强度最低限值为260 MPa，弯曲疲劳极限为245 MPa，相对较低，安全系数需进一步提升，在不减小塑韧性的前提下，选用抗拉和屈服强度更高的B+级钢ZG25MnCrNi[9]材料。两种铸钢材料的化学成分和力学性能对比见表1和表2。B+级铸钢主要添加了Cr元素，以提高强度指标，其夹杂元素P、S的含量控制较严，有利于减少夹杂物和热裂纹的产生，实际生产过程中将其控制在0.025%以下；屈服强度为不低于345 MPa，较B级钢提高了32%；弯曲疲劳极限为330 MPa，较B级钢提高近35%。

2.2 优化铸造工艺

采用平浇方案的优点是造型、下芯及刷涂料较为方便，但缺点是由于盖板平放，关键部位容易产生缩松、砂眼、夹渣等缺陷，即便可以在砂芯中设置多个压边冒口进行补缩，但操作比较麻烦，出品率也会很低，且后续打磨工作量很大。

经过反复模拟比较论证，为保证失效部位内部质量，选择立浇工艺方案，这种方案盖板处于垂直状态，充型顺畅，有利于型腔排气，减少盖板内的卷气、氧化现象。采用预埋芯来保证尺寸精度，减小涂料涂刷难度。通过在两侧盖板设置补贴、冒口、冷铁和出气片，保证关键部位无缩孔、缩松和夹杂物等缺陷；在中间腹板上设置冷铁、冒口，减小腹板的缩孔缩松倾向；在内浇道上设置冒口，解决内浇道处的缩松和裂纹问题。图13所示是充型过程达到50%时的状态图，盖板内金属充型顺畅，卷气、氧化现象减少。改进方案的缩孔、缩松模拟结果如图14所示，内部质量良好，盖板边缘以及吊挂凸台连接处等关键部位无缺陷。虽然腹板与盖板相交部位仍存在局部轻微的缩松（如图14圆圈部位），但由于在盖板中部以及受腹板纵向力的作用，所以不容易产生开裂现象。经实物射线拍片和本体解剖验证，关键部位组织致密，如图15所示，证实了无缩孔、显微缩松缺陷。

2.3 加强过程控制

制定细致的造型、合箱、熔炼、浇注等所有工序的操作规程，严格按照作业指导书进行操作，确保冒口套、冷铁放置到位，浇注过程控制到位，实行巡检、互检制度，从源头上控制质量；严格按照焊补规范执行，要求关键部位在最终热处理后不允许焊补，防止组织的不均匀性，避免焊补部位产生应力；严格控制热处理过程，不允许采用密集堆垛装炉，进行吹风冷却，避免堆垛正火组织，获得吹风正火组织。

表1 B级钢与B+级钢两种材料的化学成分
Table 1 Chemical composition requirements of ZG25MnNi and ZG25MnCrNi w_B/%

牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
ZG25MnNi	≤0.28	≤0.40	≤1.00	≤0.040	≤0.040	≥0.30	
ZG25MnCrNi	≤0.29	≤0.50	≤1.00	≤0.030	≤0.030	≥0.30	≤0.030

表2 B级钢与B+级钢两种材料的力学性能
Table 2 Mechanical properties requirements of ZG25MnNi and ZG25MnCrNi

牌号	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	Z/%	A_{kv}（−7℃）/J
ZG25MnNi	≥485	≥260	≥24	≥36	≥20
ZG25MnCrNi	≥550	≥345	≥24	≥36	≥20

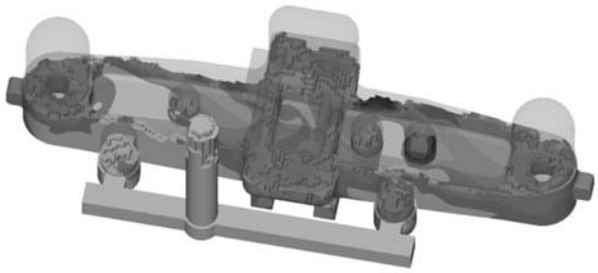


图13 改进工艺后充型过程模拟结果
Fig. 13 Simulation results of mold filling process for improved casting process

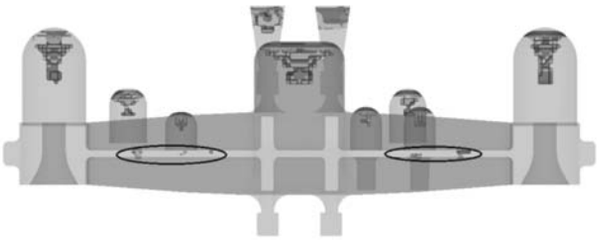


图14 改进工艺后缩孔缩松模拟结果
Fig. 14 Simulation results of shrinkage cavity and porosity for improved casting process

图15 实物本体关键部位解剖断面
Fig. 15 Dissection photo at a key location of suspension beam casting

射线探伤由原来抽检改为全检，确保关键部位内部质量100%符合要求；表面磁粉探伤每个铸件不少于3次的全表面磁粉探伤，热处理前必须进行100%磁粉探伤，机加工后要求对关键部位进行磁粉探伤。

3 结语

（1）悬挂梁铸件开裂的主要原因是铸件内部存在孔洞和显微缩松等裂纹源，不良焊补促使了裂纹的形成和扩展，工件在震动交变载荷作用下，产生低应力高周疲劳失效开裂。在一定的加载应力下，疲劳寿命随着孔洞尺寸的增大而减小，因此减小孔洞尺寸，可以提高疲劳寿命。

（2）通过工艺方案模拟分析，制定了改进的工艺，浇注位置由平浇改为立浇，优化补贴、冒口、冷铁和排气工艺，确保该铸件整体的内部质量和表面质量，从源头避免关键受力部位产生缩孔缩松缺陷，提高了铸件的使用可靠性和寿命，确保行车安全。

（3）采用B+级铸钢替代原来的B级铸钢，严格控制夹杂元素的含量，提高屈服强度和抗弯强度，从而提升了材料的抗疲劳性能。

（4）通过加强过程控制，优化造型、熔炼、焊补和热处理关键工序，减少了铸件夹杂物，消除了堆垛正火组织，杜绝了焊补粗大组织和焊接应力，确保了产品质量可靠性。

参考文献：

[1] PUTATUNDA S K，KESANI S，TACKETT R，et al. Development of austenite free ADI（austempered ductile cast iron）[J]. Materials Science & Engineering A，2006，435（11）：112–122.

[2] 张杰，陈继志，冯刚宪. 铸件中孔洞缺陷对疲劳性能影响的研究进展 [J]. 材料开发与应用，2011，26（5）：83–87.

[3] 康茂东，王俊，高海燕，等. 铸件显微疏松缺陷表征及其对疲劳性能影响研究进展 [J]. 铸造技术，2016，37（9）：1919–1923.

[4] 莫德锋，何国求，胡正飞，等. 孔洞对铸造铝合金疲劳性能的影响 [J]. 材料工程，2010（7）：92–96.

[5] MURAKAMI Y，ENDO M. Effect of defects inclusions and in homogeneities on fatigue strength [J]. International Journal of Fatigue，1994，16（3）：163–182.

[6] 吉晓霞，肖志霞，郭建政，等. 板状铸钢件冒口补缩距离的模拟计算 [J]. 一重技术，2013（6）：63–65.

[7] NIYAMA E，UCHIDA T，MORIKAWA M，et al. A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice [J]. Int. Cast Met. J.，1982，7（3）：52–63.

[8] YAN H，HU Z，SUAN T S. Application of numerical simulation technology on the design of camera shell during die casting process [J]. Advanced Materials Research，2007（26-28）：1041–1044.

[9] 朱正峰，董雯，张俊新. B+级铸钢材料的研制 [J]. 中国铸造装备与技术，2010（5）：32–35.

Analysis and Preventive Measures of Fatigue Cracking of Suspension Beam for Metro Motor

XU Gui–bao
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:
The cracking reasons of the key thin-walled steel castings for the suspension device of metro linear motor were analyzed from the aspects of macroscopic characteristics and microstructure. The shrinkage holes and porosity in the suspension beams were found to be responsible for fatigue cracking since these defects led to the initiation and propagation of cracks under the action of alternating vibration load and make the workpiece produce low stress and high cycle fatigue failure. Based on simulation results of shrinkage cavity and porosity during mold filling process, casting process was improved. In addition, other preventive measures such as improving material performance and strengthening process control were also taken. Finally, the shrinkage holes and porosity defects were eliminated or reduced. Therefore, the problem of fatigue cracking was solved. The improved casting quality and increased service life will ensure the driving safety of metro motor.

Key words:
thin-walled steel castings; fatigue crack; shrinkage hole defects; shrinkage porosity; casting process optimization

（编辑：张允华，zyh@foundryworld.com）