

动车组关键铸钢件质量控制

朱正锋, 曹健峰, 曹松

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213000)

摘要: 介绍了动车组关键铸钢件材料技术指标、表面质量以及内部质量要求。结合部分关键铸钢件超标磁痕缺陷、渣气孔缺陷以及侵入性气孔缺陷的防治过程, 阐述了保证铸件质量的工艺举措。

关键词: 动车组; 铸钢件; 铸件质量

随着轨道交通高速铁路的快速发展, 中国高铁“缺陷零容忍”和“零缺陷”的高铁意识, 对高速动车组各零部件特别是关键铸钢件的质量要求也在不断提升, 目前应用在高速动车组上的关键铸钢件主要有密接式车钩(图1a)和缓冲器、制动盘(图1b)、安装座(图1c)、轴箱体(图1d)等。对于常见的缩孔、裂纹等铸造缺陷, 通过常规工艺策划及质量管控手段, 均能有效控制缺陷发生率, 但动车组关键铸钢件对应的质量要求更加严苛, 显微缩松、针孔型气孔等更加微小的缺陷也可能触发铸件报废或返修, 通过工艺措施和质量控制方法来预防该类缺陷的产生, 具有十分重大的意义。本文首先阐述了关键铸钢件的各项技术要求, 随后从关键铸钢件钢液质量、表面质量以及内部质量三个方面剖析了其质量保证举措。

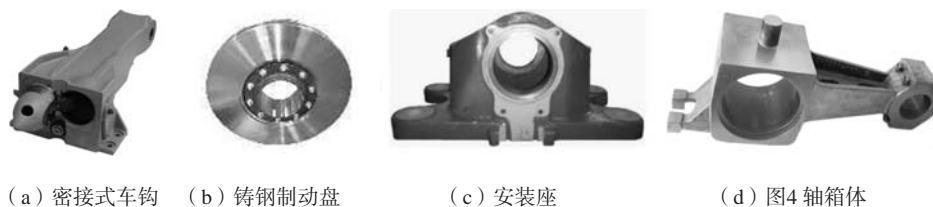


图1 高速动车组上的关键铸钢件

Fig. 1 Key steel castings on high-speed EMUs

1 关键铸钢件技术要求

1.1 材料技术指标要求

材料技术指标关系到铸钢件的各项综合性能, 如铸钢制动盘在制动工况下会受到巨大的制动热能作用, 其抵抗热冲击的能力完全取决于材料本身的性能, 同时也需要具备良好的高温稳定性。这样的工作条件对材料的要求, 不再仅仅局限于常规化学成分的控制, 更需要对钢中气体含量提出明确的严格要求, 如, 氧含量 $\leq 0.010\%$, 氢含量 $\leq 0.000 05\%$, 氮含量 $\leq 0.015\%$; 相应地, 对力学性能也提出了更高的要求, 如抗拉强度 $\geq 1 050 \text{ MPa}$, 断后伸长率 $\geq 8\%$; 另外对非金属夹杂物也提出Ⅱ型夹杂物、Ⅳ型夹杂物不大于1级的要求。

1.2 表面质量要求

动车组关键铸钢件的技术条件无一例外地对产品外观质量提出了很高的要求, 一方面是为了产品的美观, 另一方面被保留下来的铸造原始表面也有益于保持铸

作者简介:

朱正锋(1978-), 男, 正高级工程师, 硕士生, 从事材料工艺研究工作。电话: 13815052480, E-mail: zhuzhengfeng.qs@crrecg.cc

中图分类号: TG26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)03-0410-05

收稿日期:

2023-07-31 收到初稿,
2023-12-24 收到修订稿。

件的耐蚀和耐疲劳等性能，从而提高铸钢件的使用寿命。如需承受疲劳载荷的转向架——轴箱体铸件，从下图2中轴箱体正常运营工况下的应力云图来看，虽然强度设计存在一定的安全裕度，但是轴箱体铸件筋板结构区域在动车组运行过程中持续承受交变应力载荷，表面铸造缺陷的存在，将会极大影响铸件本质安全，因而对外观质量提出了非常高的要求：铸件毛坯表面允许存在直径不大于 $\Phi 1.5$ mm，深度不大于2 mm的分散性非裂纹缺陷，在每100 cm²上不多于3个，距离边缘或孔边不小于10 mm，间距不小于20 mm。为了减少铸钢制动盘摩擦面热疲劳裂纹的产生机率，技术条件中约定了缺陷等级需满足GB/T 9444—2019中规定的壁厚不大于16 mm的1级缺陷磁粉探伤要求。另外，部分关键铸钢件不允许任何形式的焊补，这对铸钢件的质量稳定性提出了非常高的要求。

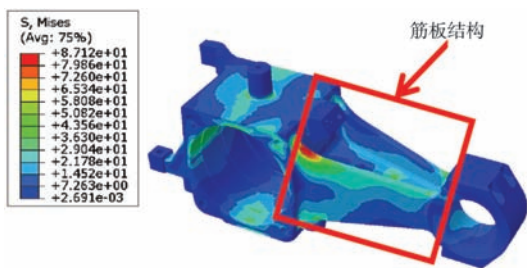


图2 轴箱体正常运营工况下的应力云图

Fig. 2 Stress cloud diagram of axle box under normal running conditions

1.3 内部质量要求

关键铸钢件的内在质量直接关系列车的运行安全，对其质量的控制方法主要通过射线探伤或超声波探伤实现。动车组用关键铸钢件大部分要求进行射线探伤，如轴箱体铸钢件射线探伤缺陷等级要求关键区域的缺陷不超过ASTM E446中规定A类、B类、C类的2级，不允许有D、E、F、G四类缺陷，首列车100%射线探伤，全部合格后才能降低检测频次；标准TB/T 2980—2014《机车车辆用制动盘》规定通过超声波探伤检测铸钢制动盘的内部质量，具体规定为：距离盘面摩擦面8 mm厚度范围内不应存在缩松缺陷，距离盘面摩擦面12 mm范围内不允许存在大于直径2 mm当量平底孔的缺陷。

2 关键铸钢件质量保证举措

关键铸钢件由于其较高的质量要求，在设计开发初期便利用MAGMA软件进行了全面的铸造模拟仿真分析，从充型过程、凝固过程再到应力变形的各个阶段，每种方案均进行了详尽的模拟分析，据此制定最佳的工艺方案。生产过程控制也需要仔细策划，从造

型制芯、熔炼浇注到清理打磨，每道工序均制定了详尽的质量控制计划。铸造工艺设计方面，采取多种工艺手段，如采用过滤技术以净化钢液质量，采用覆膜砂热成型砂芯工艺以有效提升铸件内腔质量。在原辅材料管控方面，针对原砂、冒口、涂料、过滤块等外购材料均制定详细的验收要求。下面从关键铸钢件钢液质量、表面质量与内部质量控制三个方面进行详细介绍。

2.1 钢液质量控制

在实际生产中，钢液熔炼存在着两个难以解决的关键问题，那就是钢液的终脱氧效果不佳和钢液的纯净度不够。钢液中的总氧量是评价钢液质量的指标之一，它直接决定钢液中非金属氧化夹杂物的多少，并且影响其大小、形状和分布形态^[1]。针对关键铸钢件，由于其较低的P、S含量以及较高的夹杂物控制要求，对于中频炉熔炼浇注方式提出了非常高的要求。首先，从原材料端选用优质的低P、S废钢，针对某些P、S含量要求非常低的产品，还必须采用添加工业纯铁的方式来保证。其次，通过底吹氩（图3）及喂线精炼技术极大的减少了钢液中的非金属夹杂物数量，降低了非金属夹杂物的大小；最后，对于原辅材料严格管控，如废钢、合金、炉衬材料、塞杆等影响产品质量的重要因素，严格按照技术要求进行采购、储存与使用。图4为某型铸钢件的非金属夹杂物图示，只有Ⅰ、Ⅲ型夹杂物细系级别1.5级。

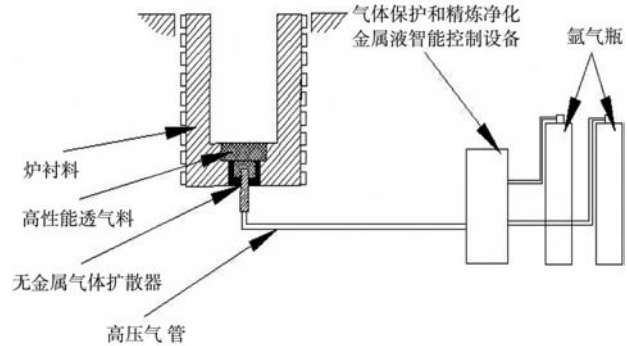


图3 中频熔炼炉底吹氩系统

Fig. 3 Intermediate frequency induction furnace argon bottom-blowing system

2.2 表面质量控制

动车组关键铸钢件对于铸件表面质量要求很高，既要外观一致性好，又不能存在较多的表面缺陷。对于允许焊补的关键铸钢件，生产中一般要求在最终热处理之前处理好所有的表面缺陷。对于某些不允许焊补的铸钢件，则主要从工艺设计以及过程操作上严加

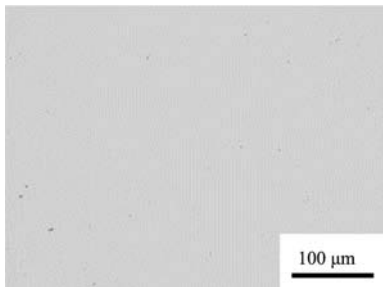


图4 某型铸钢件夹杂物图

Fig. 4 Non-metallic inclusion diagram of one model steel casting

管控。下面以某些关键铸钢件加工面磁痕缺陷以及渣气孔缺陷的防治为例进行说明。

2.2.1 加工面超标磁痕缺陷

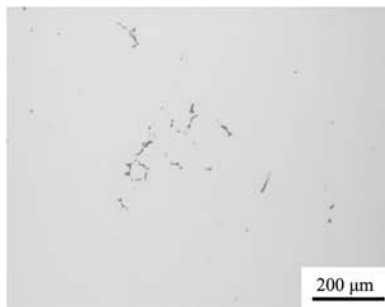
动车组关键铸钢件需要在成品交付前进行磁粉探伤检测，重要部位合格指标为满足GB/T 9444—2019质量等级规定的1级质量要求，对应磁痕检测标准为评定框内单条长度不能超过2 mm，累加长度不能超过4 mm。在前期开发过程中进行的磁粉探伤检测，经常会有超标磁痕出现，如图5a所示，其产生位置均集中

于冒口之间区域，通过金相分析知其为显微缩松缺陷（图5b）。

显微缩松^[2]是在钢液凝固过程中，晶粒之间形成的微小孔洞，要用显微镜才能观察出来。当钢液凝固时，先形成的枝晶会把金属液分割成许多互不相通的小熔池，这些小熔池在进一步冷却和凝固时得不到液体的补缩，从而形成晶间的微小孔洞。从该铸钢件材质来看，含有Cr、Ni、Mo等多种合金元素，同时含量较高，合金结晶温度范围很宽，其凝固方式趋向于糊状凝固，从超标磁痕出现的位置来看，其位于两个冒口之间，冒口之间间隔只有50 mm，该区域为两个冒口热影响区的重叠区，从而导致此区域过热，使得冒口之间区域与冒口中心区域的温度梯度减小，因此该区域更倾向于糊状凝固，从而使得凝固后出现较多显微缩松。为了解决这种显微缩松缺陷，工艺设计上首先必须严格遵守顺序凝固的原则，其次针对缺陷出现的区域需采取增大区域温度梯度的方式，如放置冷铁等，按此措施实施后，试制验证结果表明措施有效，加工面磁粉探伤再未发现超标磁痕缺陷（图5c）。



(a) 有超标磁痕



(b) 金相分析



(c) 无磁痕缺陷

图5 某型铸钢件加工面

Fig. 5 Machining surface of one model steel casting

2.2.2 渣气孔缺陷

渣气孔缺陷是铸造生产中比较常见的一种铸造缺陷，常出现于铸件浇注位置的上表面、型芯下方的铸件表面或者铸件的死角处，通常表现为渣孔与气孔共存，为了防止渣气孔缺陷，工艺设计与生产制造过程均需要严格管控。首先，从工艺设计上来说，浇注系统设计非常关键，既要保证充型平稳，同时也要结合MAGMA软件模拟仿真充型过程进行优化，防止发生紊流和飞溅，要合理选择分型面、设置冒口与集渣槽，以利于夹渣的上浮。其次，从生产制造过程来说，浇注系统中的直浇道必须采用耐火砖管，同时要设置过滤系统，以起到挡渣与稳流的作用，另外，也要控制好钢液质量，合理控制浇注前钢液静置时间，以利于氧化渣类与夹杂物的上浮、聚集。

2.3 内部质量控制

关键铸钢件内部缺陷主要有缩孔缩松和气孔两大类，针对缩孔缩松类缺陷，主要从工艺设计方面来保证，工艺设计时要建立良好的补缩条件，促使铸件按顺序凝固，采用发热保温冒口，同时结合MAGMA软件的铸造模拟仿真结果选择最优的铸造工艺方案，以减少和避免缩孔缩松的发生。针对气孔类缺陷，按气体来源不同，可分为侵入性气孔、析出性气孔和反应性气孔。析出性气孔和反应性气孔由于钢液精炼有着严格的管控以及铸型较多的排气措施，在关键铸钢件生产过程中极少出现。下面分别以密接式车钩缩孔缩松缺陷以及制动盘外圆面缺陷为例进行说明。

2.3.1 密接式车钩缩孔缩松缺陷

图6所示为密接式车钩MAGMA软件模拟的充型状态图与凝固温度场图。密接式车钩铸件为薄壁空腔结构，且厚薄不均匀，容易产生裂纹缺陷。通过MAGMA软件进行流场、温度场和应力场的模拟计

算，改进了冒口、冷铁补缩系统，采用多个保温小冒口补缩策略、使用铬铁矿砂预埋芯、设置防裂筋等措施，解决了裂纹和缩孔问题，保证了铸件内在质量，通过工艺优化使铸件成品率达到97%。

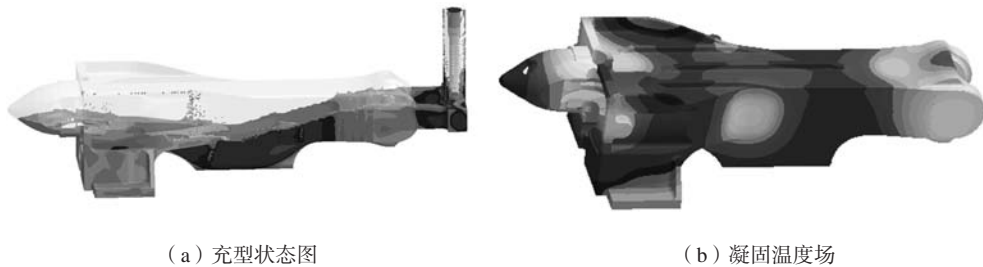


图6 密接式车钩
Fig. 6 Tight lock couplers

2.3.2 侵入性气孔缺陷

铸钢制动盘气孔缺陷主要出现在外圆面，具体如图7a所示，气孔主要分布在铸钢件表面下约2~10 mm

的位置，从铸件外观无法发现，加工后才会发现，经取样电镜（图7b）分析其为气孔缺陷，结合气孔缺陷特征及出现的位置，确认其为侵入性气孔。

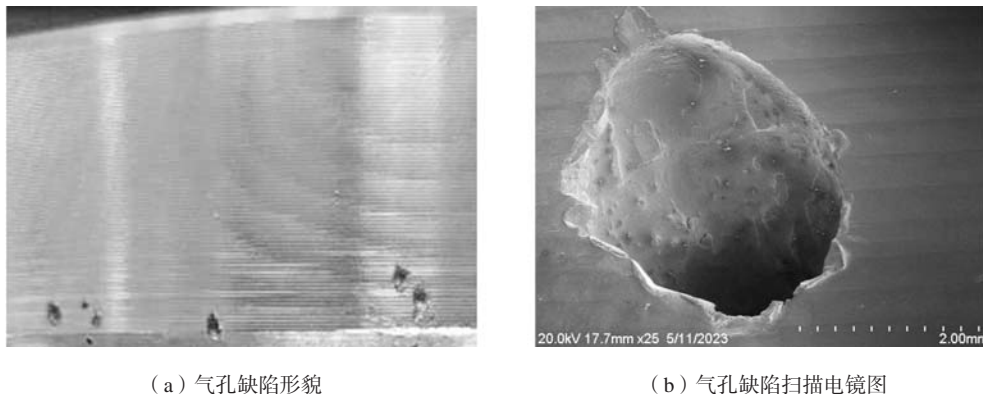


图7 制动盘外圆面气孔

Fig. 7 Gas hole on the outer circular surface of the brake disc

侵入性气孔^[3]是砂型和砂芯等在液态金属高温作用下产生的气体（无明显的化学反应），侵入金属内部所形成的气孔，称为侵入性气孔。其特征是数量较少、体积较大、孔壁光滑、表面有氧化色，常出现在铸件表层或近表层。形状多呈梨形、椭圆形或圆形，梨尖一般指向气体侵入的方向。

钢液在浇注时，铸型被急剧地加热，型腔表面层会达到接近钢液的温度，砂型中的水分将迅速地蒸发，某些有机物也会燃烧和挥发，这样形成大量的气体，这些气体随着温度的升高和气体量的增加，其压力会猛烈地增大，其中一部分通过砂型逸出进入空气中，而另一部分，在压力大于钢液表面层阻力时就会进入尚未凝固的铸件中，可能形成梨形的气孔。如果

此气体进入铸件时，铸件尚处于液态，该气体形成的气泡，则有可能随着钢液流动飘浮到铸件其他位置，形成圆孔形气孔^[4]。

针对侵入性气孔，笔者重点从三方面进行改善，首先就外模用砂改为面砂+背砂工艺，即面砂采用全新砂，背砂采用再生砂工艺，使用全新砂作为面砂，树脂加入量少，而且砂型强度好，较之前面背砂全部采用再生砂工艺的外模砂发气量有了较大减少。其次就覆膜砂型芯用砂优化其配方，调整发气量以及发气时机，同时调整其粒度分布以改善透气性，并且针对覆膜砂型芯结构进行优化，型芯厚大部位进行掏空处理，以减少整体型芯发气量；最后，针对铸型增加排气措施，以利于浇注后型芯与铸型中气体的顺利排出。

3 结束语

由于关键铸钢件较高的质量要求，使其工艺设计与生产过程管控难度大大增加。从工艺设计方面来说，需充分利用铸造凝固模拟软件优化铸造工艺，采用开放式浇注系统，充型过程要平稳，不出现紊流，冒口补缩需有一定的富余量，从而确保工艺的稳定性；从原辅材料端来说，要大胆应用新材料，如低发

气量的覆膜砂，高发热效率的冒口等；从生产制造端来说，多采用智能化、数字化的设备，以尽量减少手工操作因素的影响；从过程控制端来说，要加强过程的监督与检验，有条件的厂家可以将可视化技术应用于产品质量的检测与评估，以满足实时、在线、快速作业的需要。只有这样才能全面的提高关键铸钢件的产品质量，切实保障高速动车组的行车安全。

参考文献：

- [1] 杜建平. 精炼技术在提高钢水质量方面的研究 [J]. 甘肃科技, 2012 (2): 68-69.
- [2] 于文强, 陈宗民. 工程材料与热成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 166-166.
- [3] 范晓明. 金属凝固理论与技术 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2012: 245-245.
- [4] 沈猛, 铁金艳, 章舟. 铸钢生产实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 364-365.

Quality Control of Key Steel Castings for EMU Trains

ZHU Zheng-feng, CAO Jian-feng, CAO Song
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213000, Jiangsu, China)

Abstract:

The paper introduces the technical parameters, surface quality requirements, and internal quality requirements of key steel castings for the EMU trains. Combining with the prevention and control process of excessive magnetic mark defects, slag porosity defects, and invasive porosity defects in some key steel castings, it elaborates on the process measures to ensure the quality of castings.

Key words:

electric-multiple unit trains; steel casting; casting quality
