

应用失效分析改善灰铸铁件金相组织

■ 杨涛, 王传永, 孙永功

摘要: 通过应用简单失效分析方法, 找出导致灰铸铁铸件石墨形态异常的原因, 并分析获得改善的途径, 最终获得金相组织良好的灰铸铁铸件。

关键词: 失效分析; 灰铸铁; 石墨形态; 金相组织

失效分析是一门发展中的新兴学科。根据失效模式和现象, 通过分析与验证, 模拟重现失效的现象, 找出失效的原因, 挖掘出失效的机理。在提高产品质量, 技术开发、改进, 以及产品修复等方面具有很强的实际意义, 其方法分为有损分析、无损分析、物理分析、化学分析等。

1. 日常应用的分析方法

(1) 粗视分析 用眼睛或者放大镜观察失效件, 粗略判断失效类型(性质)。

(2) 微观分析 用金相显微镜、电子显微镜观察失效件的微观形貌, 分析失效类型(性质)和原因。

(3) 成分分析 用光谱仪、能谱仪等现代分析仪器, 测定失效件材料的化学成分。

(4) 力学性能检测 用拉伸试验机、弯曲试验机、冲击试验机、硬度试验机等, 测定材料的抗拉强度、弯曲强度、冲击韧性、硬度等力学性能。

(5) 应力测试、测定 用X射线应力测定仪测定应力。

(6) 组成相分析 用X射线结构分析仪分析失效件材料的组成相。

2. 灰铸铁的分析

在铸造灰铸铁件的生产过程中, 一般要求金相组织为A型石墨加珠光体基体组织。但在生产过程中, 时常遇到部分铸件硬度偏低。对表层硬度偏低的铸件, 应用失效分析的方法进行分析, 发现铸件表层金相组织出现D型石墨伴随大量铁素体的问题。还经常遇到一炉铁液不同包次的铸件金相组织变化较大的问题, 即个别包次铸件A型石墨为主, 而出现不同数量的D型、E型石墨的现象, 如图1~图8所示。

对上述部位进行硬度检测, 铸件表层平均硬度值为174.5HBW, 而铸件心部正常组织形态部位平均硬度值为202.7HBW。通过检测结果可以看出, 铸件表层基体组织中异形

石墨周围伴随着铁素体的产生, 其平均硬度明显低于正常值。铸件内部的石墨形态、基体组织及硬度值均正常。本体抽取力学性能试棒检验发现, 抗拉强度并无异常。

查阅相关资料, D型和E型过冷石墨, 其形成原因均为铁液的形核条件差。D型石墨为点状、片状的枝晶间石墨, 呈无方向性分布。D型石墨铸件铁素体量高, 力学性能受影响。但D型石墨铸件奥氏体枝晶多, 石墨短小卷曲, 共晶团呈球团形, 所以与相同基体组织A型石墨铸件相比, 往往具有较高的强度。E型石墨是一种比A型石墨短小的片状石墨。与D型石墨一样位于枝晶间, 统称为枝晶石墨。E型石墨容易在碳当量低(亚共晶程度大)、奥氏体枝晶多而发达的铸件中产生。这时, 共晶团与枝晶交叉生长, 由于枝晶间共晶铁液数量较少, 析出的共晶石墨只有沿着枝晶方向分布, 具有明显的方向性。

3. 熔炼处理工艺对组织的影响

现有生产工艺采用中频电炉熔炼，并采取少生铁、多废钢，通过添加优质增碳剂增碳的熔炼工艺，同时加入适量的锰、铜、钼和铬等合金元素，提高其综合性能。炉前孕育一般采用出铁时加入适量硅铁粒（FeSi75），浇注时随流添加少量的硅锆孕育剂的方法。这种工艺方法是较常见的，但前述问题经常出现，是怎么产生的呢？我们认为这些问题，应与铁液冶金质量和孕育效果密切相关。

化学成分对石墨形态的影响主要是碳和硅含量。由于亚共晶倾向过大的成分有增加过冷石墨形成的倾向，尤其对于缸体、缸盖等薄壁灰铸铁件，如果碳当量偏低（如碳当量低于3.7%），就很容易在铸件主要壁厚部位产生较多D型、E型石墨，或者形成与A型石墨的混合分布形态。另外，硫含量对灰铸铁孕育效果有一定影响，对于电炉熔炼，较低的硫含量会降低孕育效果，如果硫含量（质量分数）低于0.06%时，孕育效果会很差，易产生异形石墨形态。

孕育工艺对石墨形态影响大。孕育工艺主要包含两个方面：

（1）孕育剂的选择 最常用的孕育剂为FeSi75，其特点是价格相对便宜，但孕育衰退较快，造成铸件石墨形态不稳定，容易出现过冷石墨。为获得高品质的铸件，需要采用含钙、钡等微量元素复合孕育剂，有利于A型石墨的形成。另外，孕育剂的粒

度对孕育效果也有影响，在生产实践中孕育剂粒度小于3mm的粉末应尽量避免，其含量过多将会导致孕育出现问题。

（2）孕育方法 常用的孕育方法有包底孕育、出铁槽随流孕育。前者经常会出现包内剩余铁

液时，加入的孕育剂与铁液、渣子粘在一起，出铁后部分孕育剂浮在铁液表面，没有熔化掉，这样就会造成孕育量不足，从而产生异形石墨形态。而出铁槽随流孕育则会取得较好的孕育效果。

在一定工艺范围内提高铁液

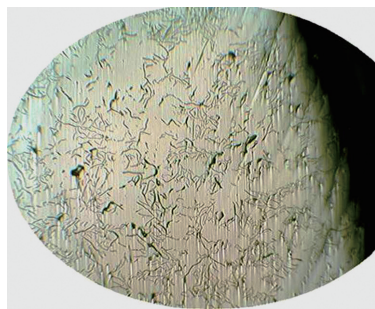


图1 铸件表面石墨

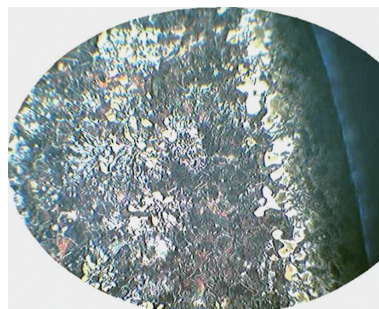


图2 铸件表面基体组织

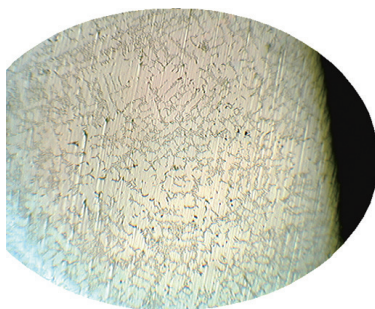


图3 铸件表面石墨

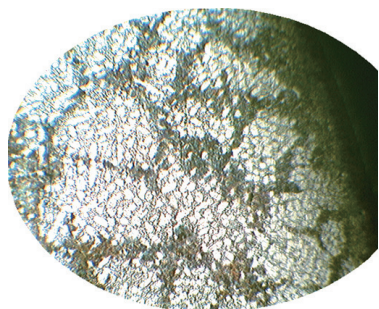


图4 铸件表面基体组织

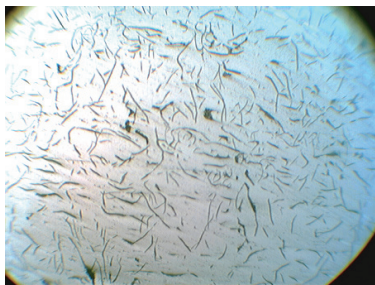


图5 铸件心部石墨



图6 铸件心部基体组织

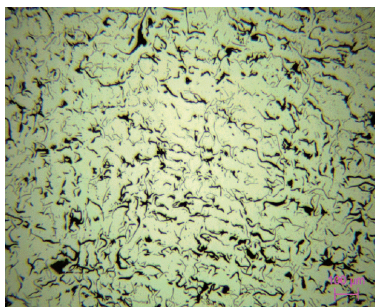


图7 铸件局部石墨

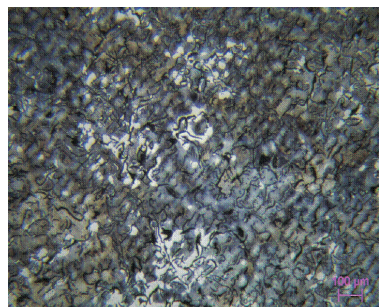


图8 铸件局部基体组织

的过热温度，将不但有利于石墨的细化，还有利于提高铁液的纯净度。但是铁液在较高温度过热以及长时间保温会使过冷度增大，降低铁液形核能力，提高枝晶生长速度，使枝晶变长，方向性更明显，造成石墨形态恶化，易产生D型、E型石墨。

在生产条件未发生重大变化的情况下，铸件在凝固过程中，冷却条件取决于铸件壁厚，铸件厚壁部位冷却速度与薄壁处有较大差异。同一个铸件，壁厚相差较大的部位其石墨形态也会有差异。在实际金相检验过程中，发现铸件壁厚30~40mm处石墨形态全部为A型石墨，而在10mm薄壁部位石墨形态主要为E型石墨。

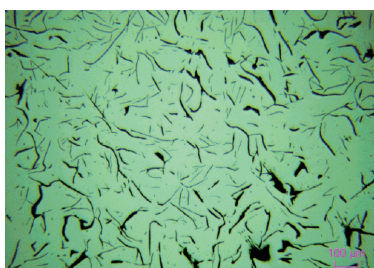
基于以上分析，同时考虑到感应电炉熔炼铁液的特点：形核率减少，白口倾向大，易于产生过冷石墨。相关资料也介绍到国外铸造厂电炉熔炼时通过加入碳化硅来降低以上不良影响。国内的外资铸造企业也长期使用碳化硅作添加剂。加入碳化硅的优点很多，碳化硅熔点2700℃，加入量一般为0.6%~1.0%。在熔化过程中按 $\text{SiC} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeSi} + \text{C}$ 反应熔融于铁液，在铁液中不熔化。其中C可作为石墨析出的核心。这种石墨有较高的活性，并且与碳的失配度为零，因此很容易吸附铁液中的碳，孕育效果优越。促进共晶凝固阶段C大量析出并形成石墨，促进石墨化；减小铁液过冷度，减少白口倾向；增加灰铸铁共晶团数。对于灰铸铁，熔炼时加入碳化硅，生成石墨核心，促进生成共晶团并减小相对过冷

度，有利于形成A型石墨；晶核数量增加，使片状石墨细小，提高石墨化程度减少白口倾向，从而提高力学性能。

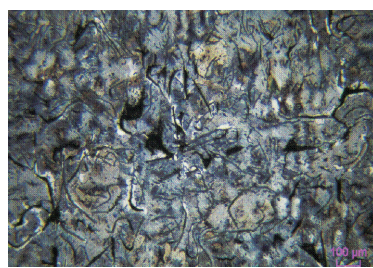
同时，碳化硅的脱氧作用，使得脱氧产物在铁液中有一系列冶金反应，可减轻锈蚀炉料中氧化物的有害影响，有效地

净化铁液。

使用碳化硅后，铸件金相组织明显改善，消除了D型、E型石墨，基体组织以珠光体为主（见图9），并且铸件本体硬度趋于稳定，偏差小，一般稳定在200~230HBW，本体试棒抗拉强度稳定在250~280MPa。



(a) 铸件心部石墨



(b) 铸件心部基体组织

图 9

4. 结语

综上所述，应用金相显微镜、直读光谱仪、拉伸试验机、硬度试验机，分别检测分析铸件微观金相、化学成分、抗拉强度、硬度等数据，分析导致异常形态石墨产生的原因。通过碳化硅的应用，有效地解决了灰铸铁件生产过程中出现的D型、E型过冷石墨，消除了异常金相组织，使铸件获得良好的金相组织、力学性能和加工性能。同时，碳化硅的脱氧作用，也可减轻锈蚀炉料的不良影响。碳化硅还可替代部分普通硅铁实现增硅，降低了由硅铁带入的铝元素的不利影响。

参考文献

[1] 周继扬. 铸铁彩色金相学[M].

北京：机械工业出版社，2002.

[2] 张文和. 铸铁的碳化硅孕育预处理[J]. 铸造，2009, 58(3): 279-281.

[3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 铸铁[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[4] 陆文华. 铸造合金及其熔炼[M]. 北京：机械工业出版社，1996.

[5] 赵鲁生. 灰铁熔炼中氮钛影响的经历[J/OL]. 百铸网，[2014-09-27].

[6] 黄志光. 铸件内在缺陷分析与防止[M]. 北京：机械工业出版社，2011.

[7] 杨川. 金属材料零部件失效分析案例[M]. 北京：国防工业出版社，2012.

作者简介：杨涛，工程师，中国重汽（香港）有限公司济南铸锻中心，主要从事铸造熔炼工艺技术工作。王传永，孙永功，中国重汽（香港）有限公司济南铸锻中心。

MW 20161008