

# 球墨铸铁件表面恶化层的研究

肖恭林, 邓 晗, 封雪平, 陈凯敏

(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:** 研究了三种因素(硫含量、湿环境、铸件结构及铸造工艺)对球墨铸铁件表面恶化层的影响。通过在涂料中加入不同含量的硫, 定量分析了硫元素与球墨铸铁件表面恶化层深度的关系; 研究了在高湿度条件下, 酚醛树脂砂型放置时间与恶化层的关系; 通过分析某铸件特定位置出现的贯穿性恶化层, 研究了铸件结构及铸造工艺对恶化层的影响。研究表明: 硫含量越高, 其恶化层的平均厚度越厚, 且厚度不均匀, 采用涂料可有效降低恶化层深度; 在高湿环境下, 砂型表面吸湿会增加恶化层的深度, 但恶化层厚度比较均匀; 在铁液交汇处易形成较深的恶化层, 铸造工艺设计应避免前端铁液交汇及卷气, 确保铸件表面铁液中有效残镁量, 防止出现贯穿性恶化层。

**关键词:** 涂料; 渗硫; 恶化层

我国球墨铸铁的生产中, 材料力学性能波动大, 因此提高和保持球墨铸铁铸件质量的稳定性和一致性是必须要重视的问题<sup>[1]</sup>。球墨铸铁铸件表面出现的片状石墨层或蠕变层又称为表面恶化层。在球墨铸铁生产中有时会出现断面组织不均匀, 尤其是表面出现不同深度的恶化层。恶化层的存在, 严重降低零件的疲劳强度和使用寿命, 对铸件的使用有巨大的安全隐患<sup>[2]</sup>。在球墨铸铁的生产中, 呋喃树脂砂是应用范围最广的造型材料之一。一般认为呋喃树脂砂中的固化剂苯磺酸含有硫元素, 高温铁液进入铸型型腔后, 苯磺酸受热分解, 释放出含硫气体, 含硫气体扩散到铸型表面铁液中并与铁液中的镁发生反应, 使铸型表面铁液中的有效镁含量降低, 导致表面层出现以片状石墨和蠕虫状石墨为主的恶化层, 降低铸件表面的力学性能<sup>[3-4]</sup>。

本研究通过在铸型上涂刷不同含硫量的涂料, 定量分析了造型材料中硫对铸件恶化层深度的影响; 不含硫型砂在一定湿度条件下放置时间不同而吸湿对恶化层深度的影响; 浇注工艺不当可能造成的卷气对恶化层深度的影响等方面进行研究, 为改善球墨铸铁表面恶化层状况提供依据。

## 1 涂料含硫量对铸件表面恶化层的影响

### 1.1 试验条件

在醇基氧化铝涂料中加入纯度为99%硫粉, 加入质量分数为0.5%、1.0%和1.5%, 分别涂刷在浇注试样砂型表面, 确定硫对球墨铸铁恶化层深度的影响。试验熔炼设备为中频感应电炉, 主要原材料采用普通Q10生铁, 废钢采用普通碳素钢, 熔炼温度 $1\ 510\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ , 浇注温度 $1\ 400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ , 球化方式采用包内冲入法, 球化剂采用南京宁坂的6-3型, 加入量为1.2%。试验材料统一选取QT450-10材料进行相关试验, 主要化学成分如表1所示。

树脂采用无氮树脂, 固化剂采用对甲苯磺酸, 树脂加入量为砂重量的1%, 固化剂加入量为树脂的30%~60%, 固化剂中的总酸度为28.0%~33.0%, 铸型为标准Y试块。试验采用小型碗形混砂机配制型砂并在千分度电子秤上按比例称量一定量的新砂制样。每组方案浇注3个试块, 共计浇注18个试块。由于醇基涂料在点火干燥时温度较高, 可能造成涂料中加入硫粉燃烧损失, 影响试验结果。因此, 试样砂型表面

作者简介:

肖恭林(1971-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为铸造及热处理工艺。电话: 13813678556, E-mail: xiaogonglin@sina.com

中图分类号: TG143.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

04-0427-04

收稿日期:

2020-05-25 收到初稿,

2021-01-04 收到修订稿。

刷含硫涂料不能直接点火干燥，须自然干燥后用表干炉进行烘干处理。

## 1.2 结果分析

试样浇注完成后，截取试块中部同一位置进行分析，试验结果如图1所示。从图中可以看出，涂料中的硫含量对材料表面恶化层有直接影响，随着涂料中含硫量的升高，恶化层厚度最大值、最小值以及平均值均越来越大，测量值如表2所示。随着硫含量增加，恶化层的厚度显著增加，其厚度最大值和最小值的差异越来越大，当涂料硫含量达到1.0%以上时，其恶化层最大深度到达了4.2 mm，且D、E型石墨增多，足以对材料性能产生较大影响。因此生产球墨铸铁件时，应降低粘结剂中含硫组分比例并在砂型表面刷涂料，控制恶化层深度。

## 2 砂芯吸湿对表面恶化层影响

### 2.1 试验条件

砂型采用覆膜砂制作，粘结剂为酚醛树脂，固化剂为乌洛托品，两种组分均不含硫。采用射芯机制作Y型试块砂型，射砂压力设定为0.5 MPa，固化温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，固化时间100 s，在试验前将砂型放入同一表干炉中，加热至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温2 h，采用QT450-10材料浇注试样。试验条件为：相对空气湿度95%，在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下，分别将砂型放置12 h、24 h、36 h。

表1 试验材料主要成分控制范围

C	Si	Mn	S	P	Mg	RE
3.60~3.80	2.70~2.90	0.20~0.30	$\leq 0.15$	$\leq 0.25$	0.03~0.05	0.5~0.7

表2 试样表面恶化层测量值

编号	处理方式	最大值	最小值	平均值
1	不刷涂料	2.3	1.2	1.7
2	氧化铝涂料+0.5%	3.1	2.3	2.7
3	氧化铝涂料+1.0%	4.2	2.7	3.5
4	氧化铝涂料+1.5%	7.0	2.5	3.6

### 2.2 结果分析

覆膜砂试验结果如图2所示。从图中可以看出，砂型在干燥条件下所浇注试样未出现恶化层，材料表面质量较好。随着砂型在潮湿环境中放置时间的延长，砂型表面含水量升高，恶化层越来越深，表面恶化层的测量值如表3所示。

由于砂芯吸湿影响形成的恶化层边界清晰，而且厚度均匀，石墨形态主要为E型石墨和D型石墨。这与含硫气体侵入铁液造成的恶化层形态有着明显的区别，如图2所示。由该组试验结果可知，对于覆膜砂型，其粘结剂和固化剂均不含硫，说明环境中的水分与球墨铸铁表面恶化层有一定的相关性，而且随砂型

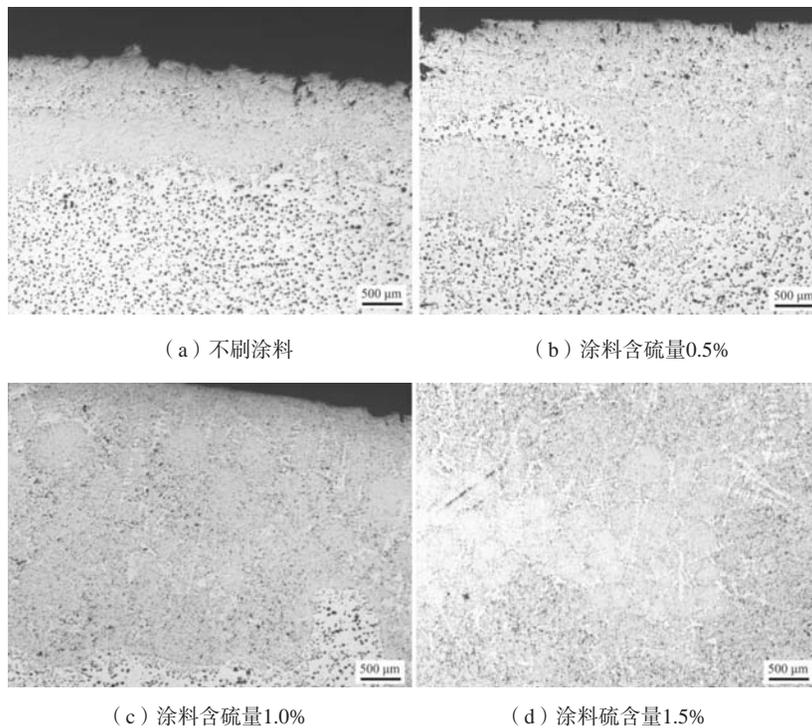


图1 不同硫含量涂料对表面恶化层形貌的影响

Fig. 1 Effect of coatings containing varying sulfur content on morphology of surface deterioration layer

放置时间的延长这一不利影响会逐步加剧。为了减少恶化层组织对铸件的有害作用，砂型固化干燥后应尽可能减少放置时间。

### 3 铸造工艺对表面恶化层的影响

#### 3.1 铸件特定结构的恶化层

在球墨铸铁生产中，也常出现某铸件特定位置存

在不同程度表面恶化层现象。图3a是某公司生产制动系统中一个关键零部件，该零件材料为QT500-7，具有较高的强度和韧性，但在使用过程中部分零件在同一部位出现了疲劳裂纹。对这些失效的零件进行解剖分析发现，该断裂部位存在较深的恶化层，部分零件恶化层甚至已贯穿整个截面，如图3b所示。

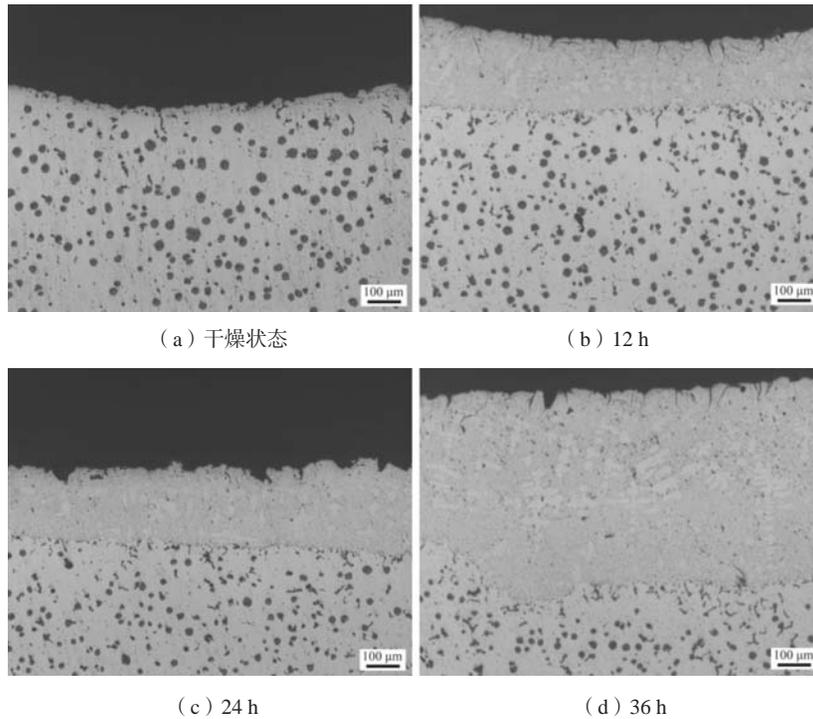
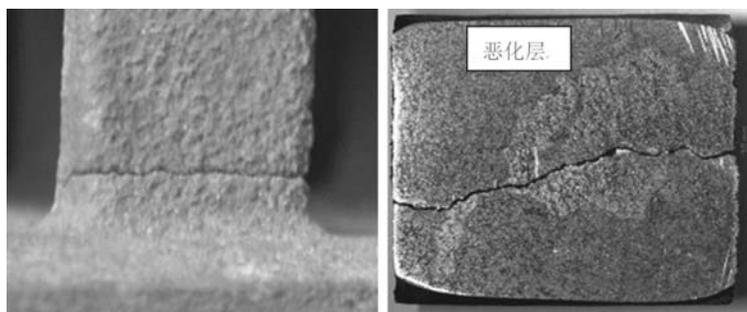


图2 相对湿度95%条件下不同时间表面恶化层的形貌

Fig. 2 Effect of mold setting time on morphology of surface deterioration layer under relative humidity of 95%

表3 表面恶化层深  
Table 3 The depth of surface deterioration layer

编号	处理方式	最大值	最小值	平均值
1	干燥条件	0	0	0
2	12 h	0.27	0.25	0.3
3	24 h	0.7	0.25	0.5
4	36 h	1.5	1.2	1.35



(a) 疲劳裂纹 (b) 恶化层贯穿截面

图3 恶化层导致零件疲劳断裂的宏观形貌

Fig. 3 Macro morphology of fatigue fracture, which resulted from the surface deterioration layer of parts

### 3.2 结果与分析

铸件本体中较深的恶化层对于产品质量来说，是一个不可控的因素，除非对铸件进行破坏性分析，才能判断是否存在这一恶化层。因此，这一类恶化层需根据铸件结构和工艺特点进行分析，通过改进铸造工艺来消除。通过铸件充型、凝固过程的模拟分析，发现经常出现表面恶化层的部位存在紊流，并且是铁液交汇的部位。分析发现，该浇注系统为开放式浇注系统，充型速度较快，铁液进入型腔后从铸件一端流向另外一端，在远端交汇碰撞形成紊流。因此，在设计铸造工艺时，应尽量避免铁液在重要部位交汇，降低出现穿透性恶化层的风险。针对上述问题，可采用底注式浇注系统，使铸件充型平稳。前端与空气接触的铁液全部进入到顶部冒口中，避免铁液交汇，消除恶化层。

#### 参考文献:

- [1] 修坤, 王成刚, 吴景波, 等. 球墨铸铁件表面球化衰退的研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (6): 599-603.
- [2] 曾艺成, 李克锐, 张忠仇. 球墨铸铁生产技术的新进展 [J]. 黑龙江冶金, 2014, 34 (5): 3-13.
- [3] 宋军辉, 封雪平, 崔青勇. 提高球铁活塞裙铸件表面质量的研究 [J]. 机车车辆工艺, 2010 (3): 10-11.
- [4] 封雪平, 陈小华. 高性能球墨铸铁熔炼工艺 [J]. 机车车辆工艺, 2010 (1): 20-21.
- [5] 许建华, 李远才, 万鹏, 等. 球墨铸铁用呋喃树脂砂醇基阻硫涂料的研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (1): 32-34.
- [6] 许进. 磺酸自硬树脂砂引起球墨铸铁件表面层组织变异原因和防止措施研究 [J]. 广东广播电视大学学报, 2009 (4): 103-108.
- [7] 冯景兰. 球墨铸铁表面层形成机理的研究 [D]. 中国科学院大学, 2014.
- [8] 许建华. 球墨铸铁件用阻硫涂料的研究 [D]. 华中科技大学, 2012.

## 4 结论

(1) 硫含量越高，其恶化层的平均厚度越厚，且恶化层厚度不均匀；采用涂料可有效降低恶化层深度，铸造辅助材料中硫含量越高，表面恶化层深度越深。固化剂要严格控制游离硫酸的量；涂料严格控制硫含量。

(2) 砂型表面吸湿会增加恶化层的深度，但恶化层厚度分布均匀；在高湿度环境下，砂型放置时间越长，表面恶化层越厚，因此应严格控制砂芯的放置时间，砂芯烘干后在24 h内浇注为佳。

(3) 铸造工艺中存在铁液交汇的部位易产生贯穿性恶化层，会显著降低材料力学性能。因此，在进行工艺设计时，应保证充型平稳，防止紊流卷气，并避免铁液在重要部位交汇。

## Study on Surface Deterioration of Ductile Iron

XIAO Gong-lin, DENG Han, FENG Xue-ping, CHEN Kai-min

(CRRC Qishuyan Locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

#### Abstract:

The effects of three factors (sulfur content, high humidity environment, casting structure and casting process) on the surface deterioration layer of ductile iron castings were studied. By adding different amounts of sulfur into the coating, the relationship between the sulfur element and the depth of surface deterioration layer of ductile iron was quantitatively analyzed. The relationship between the setting time of phenolic resin sand mold and the deterioration layer under the condition of high humidity was studied. The influence of casting structure and casting process on the deteriorated layer was studied by analyzing the penetrability deteriorated layer of a casting at a specific position. The results show that the higher the sulfur content, the deeper the average thickness of the deteriorated layer, and the more uneven the thickness of the deteriorated layer. Coating can effectively reduce the depth of the deteriorated layer. In high humidity environment, sand mold surface moisture absorption will increase the depth of the deteriorated layer, but the thickness of the deteriorated layer is even. Deep deterioration layer is easy to form at the molten iron junction. Casting process design should avoid molten iron junction and entrainment at the front end as much as possible to ensure the effective residual magnesium content in molten iron on the casting surface and prevent penetration deterioration layer.

#### Key words:

coating; sulphurization; deteriorating layer