

灰铸铁制动鼓石墨钝化生产工艺探讨

李 建¹, 汤 森¹, 闫启栋², 秦鹏鹏¹, 谢文博¹

(1. 驻马店中集华骏铸造有限公司, 河南驻马店 463000; 2. 禹州市恒利来新材料股份有限公司, 河南禹州 452570)

摘要: 针对商用车在反复刹车时频繁的冷热循环易造成制动鼓开裂失效的问题, 提出一种利用稀土元素、氮元素及钝化处理工艺钝化片状石墨端部的方法。在高碳当量成分条件下 ($CE \geq 3.9\%$), 探讨灰铸铁制动鼓石墨钝化材质及生产工艺, 提高制动鼓的常规力学性能和抗热疲劳性能, 为商用车耐热及抗热疲劳制动鼓铸件的生产提供技术支持。

关键词: 灰铸铁; 制动鼓; 抗热疲劳性能; 石墨端部钝化; 金相组织

灰铸铁是工业领域不可或缺的一种Fe-C-Si多元合金材料, 具有耐磨、耐热、抗氧化、耐腐蚀、耐酸碱及良好的减震和减摩性能, 同时, 与其他合金材料相比具有熔点低、加工性好、生产设施和成形过程简单以及成本低廉的优越性^[1], 广泛应用于汽车、工程机械制动系统的制动鼓关键部件, 其力学性能和金相组织是影响制动系统服役寿命和安全运行的重要因素。

近年来, 随着对灰铸铁制动鼓性能的要求越来越高, 人们将目光投向了高碳当量灰铸铁 ($CE \geq 3.9\%$), 随着碳当量的提高, 石墨析出数量增多, 片状石墨对基体的缩减和切割作用逐渐增大, 特别是片墨端部尖锐如锥, 应力集中系数高, 强度指标降低, 但减摩性能和导热性能趋于提高和改善^[2-3]。因此, 高碳当量高强度灰铸铁制动鼓的开发一直是研究方向。

为了改善灰铸铁制动鼓的力学性能, 提高服役寿命, 通常需要选择合理的材料配比、化学成分、孕育处理, 微合金化处理等。有些生产厂家采用高强度制动鼓、高碳当量制动鼓、复合制动鼓等方案, 以上方案均可不同程度地提高制动鼓力学性能和抗热疲劳性能, 但存在生产成本高, 工艺难度大等问题^[4-5]。

本研究利用灰铸铁片状石墨端部发生钝化的稀土元素、氮元素及钝化处理工艺, 对铁液进行钝化处理, 以实现片状石墨生长过程及端部形态的有效控制, 从而达到提高灰铸铁的常规力学性能和抗热裂性能的目的。

1 石墨钝化

1.1 定义

灰铸铁中的石墨是碳的一种结晶形式, 力学性能很低, 在20 MPa左右, 存在于基体中, 相当于裂缝。灰铸铁中的石墨呈叶片状, 端部尖锐, 易造成应力集中。石墨钝化使石墨片的端部呈圆钝状、无尖锐边缘的片状石墨形态。

1.2 钝化石墨的形态

钝化石墨的形态分为四类, 其中 I、II 类属于完全钝化的石墨, III、IV 类属于钝化不完全石墨, 说明如表1所示, 其形态如图1所示。

1.3 钝化率的判定

评定石墨钝化率时, 在试样抛光状态下检验石墨的钝化率, 放大200倍, 视场直

作者简介:

李建 (1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为铸铁熔炼、铸造材料及铸造工艺。电话, 13525329399, E-mail: jian.li_zmd@cimc.com

通讯作者:

汤森, 男, 助理工程师。E-mail: sen.tang@cimc.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

08-1171-06

收稿日期:

2024-04-01 收到初稿,
2024-05-06 收到修订稿。

表1 石墨形态说明表
Table 1 Graphite form description table

级别	石墨形态
I类	石墨片两端均圆钝, 长宽比较小, 石墨短粗
II类	石墨片两端比较圆钝, 无尖锐边缘, 长宽比较大
III类	石墨片一端比较圆钝, 一端尖锐, 长宽比较大
IV类	石墨片两端均呈尖锐形状



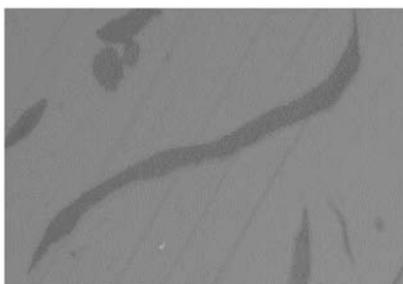
(a) I类



(b) II类



(c) III类



(d) IV类

图1 灰铸铁片状石墨端部钝化等级

Fig. 1 Passivation grades of gray cast iron flake graphite ends

墨数量的比值。

石墨钝化率的计算公式如下:

$$\text{钝化率} = \frac{\sum \text{I类数量} + \sum \text{II类数量} + \sum \text{III类数量} \times 50\%}{\sum \text{石墨总数量}} \times 100\% \quad (1)$$

2 试验方法

2.1 产品选择

商用车常用制动鼓三维几何实体如图2所示, 直径 $460 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, 高度 $300 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, 毛坯质量70 kg左右, 成品质量55 kg左右。

2.2 材料设计

高碳当量灰铸铁有着良好的铸造性能、减摩和导热性, 但其抗拉强度较低, 因此如何在保持高碳当量铸铁良好铸造性能、减摩和导热性的同时, 使其强度性能得到一定程度的提高, 在实际生产中具有重要的意义。从生产成本的角度出发, 利用稀土元素和

径为 $\Phi 70 \text{ mm}$ 或不小于此面积, 被视场周界切割的石墨不计; 放大200倍时, 少量 $< 10 \text{ mm}$ (实际尺寸 $50 \mu\text{m}$)的石墨不计。

产品判定石墨钝化率时, 随机取至少5个视场结果的平均值作为检验结果。

石墨钝化率为完全钝化的I类、II类石墨数量及III类不完全钝化石墨数量的50%之和与该视场下所有石

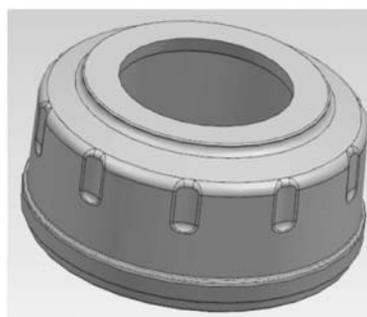


图2 商用车制动鼓三维示意图

Fig. 2 3D diagram of brake drum of commercial vehicle

氮元素对片状石墨端部钝化作用进行了分析。

稀土元素细化珠光体基体组织, 使得组织界面多, 阻碍位错的移动。同时, 当稀土含量 $< 0.1\%$ 时, 使石墨细化, 分布均匀, 端部变钝, 圆钝状的片状石墨能减少对基体的割裂作用, 降低产生微裂纹的倾向, 从而提高灰铸铁的抗拉强度^[6]。

氮元素对灰铸铁组织的影响主要包括对石墨形

态和基体组织两个方面。有研究表明铁液凝固过程中氮原子不断吸附在石墨长大前沿，并固溶于石墨中，阻碍片状石墨的生长，减小片状石墨的长宽比，增加石墨弯曲程度，钝化石墨端部，增加石墨分枝，细化石墨组织，从而减少石墨对基体的切割作用，同时增加、细化珠光体。但氮元素在一定合适的范围内才能发挥其作用，氮元素含量高有害，含量低无用，一般要求氮含量控制在 $90 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ 。氮含量过高会形成氮气孔，造成铸件报废^[7]。

通过在灰铸铁铁液中加入一定量的含有稀土元素的变质处理剂，钝化包芯线（表2）和含有氮元素的氮化锰，采用具有自动化精准加入功能的喂线设备添加，氮化锰采用包内冲入的方法添加，同时配合微合金化，细化金属基体组织，石墨变细、变曲且端部变钝，以此来提高灰铸铁的常规力学性能和抗热裂性能。

表3 原铁液化学成分

Table 3 Chemical composition of raw iron melt

									$w_B / \%$
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	N	Fe	
3.40~3.50	1.10~1.30	0.55~0.75	≤ 0.05	0.06~0.012	0.3~0.6	0.4~0.6	0.005~0.007	余量	

造型生产线为德国KW静压造型线，制动鼓铸造工艺布局为一型两件，底注式浇注系统，初始浇注温度 $1400 \sim 1420 \text{ }^\circ\text{C}$ ，浇注过程随流加入 $0.1\% \sim 0.2\%$ 的稀土孕育剂，单包铁液浇注时长控制在8 min之内，以减缓孕育衰退，并保证浇注过程熔体质量一致性。

为了验证不同稀土元素（钝化线）和氮（氮化锰）元素加入量对石墨形态和基体的影响，同时控制CE在 $3.9\% \sim 4.2\%$ 范围内，提升Si/C至 $0.5 \sim 0.6$ ，本次试验共计测试5包金属液，钝化丝和氮化锰配合使用，试样编号分别为1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]，如表4所示，其对应炉后铁液化学成分如表5所示。

2.4 力学性能测试

2.4.1 拉伸试验

试验采用GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试

表2 钝化包芯线化学成分

Table 2 Chemical composition of passivating core-wire

						$w_B / \%$
Si	Ba	Ca	RE	Al	Fe	
40~50	5~8	2~3	20~30	≤ 1.0	余量	

2.3 生产工艺

本试验采用6 t中频感应电炉，通过废钢加增碳剂的方式进行原铁液的熔炼，且返材专用。出炉温度 $1520 \sim 1540 \text{ }^\circ\text{C}$ ，单包铁液量 $1500 \text{ kg} \pm 15 \text{ kg}$ ，原铁液化学成分控制范围如表3所示；出炉在处理包内加入 $0.1\% \sim 0.4\%$ 的氮化锰冲入处理，之后通过喂线处理工艺对铁液进线钝化和孕育处理。钝化包芯线加入量为 $0.20\% \sim 0.70\%$ ；喂线处理后进行倒包二次孕育处理，孕育剂成分为Si 72.35%、Ca 0.89%、Al $\leq 1.0\%$ ，加入量 0.7% 。

表4 钝化丝和氮化锰加入量

Table 4 Added amount of passivated wire and manganese nitride

			$w_B / \%$
试样编号	钝化丝加入量	氮化锰加入量	
1 [#]	0.2	0.1	
2 [#]	0.3	0.2	
3 [#]	0.4	0.3	
4 [#]	0.5	0.35	
5 [#]	0.6	0.4	

验方法》；拉伸试样为 $\Phi 10 \text{ mm}$ 短比例试样，在制动鼓制动臂处取样。试验设备为万能力学试验机。

2.4.2 硬度试验

试验采用GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验第

表5 炉后化学成分

Table 5 Chemical composition after casting pouring

										$w_B / \%$
试样编号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	RE	N	
1 [#]	3.42	1.79	0.76	0.023	0.01	0.46	0.44	0.016	0.007 8	
2 [#]	3.42	1.81	0.83	0.023	0.011	0.46	0.45	0.024	0.009 6	
3 [#]	3.41	1.83	0.9	0.022	0.01	0.458	0.46	0.033	0.011 4	
4 [#]	3.42	1.85	1.01	0.023	0.009 8	0.46	0.45	0.042	0.012	
5 [#]	3.41	1.86	1.04	0.022	0.01	0.46	0.44	0.053	0.013 2	

一部分试验方法》，在制动鼓法兰处取样。试验设备为HB3000型便携式布氏硬度计。

2.5 金相组织观察

在制动鼓筒体上截取小试样，并把试样制备成标准的光学观察试样。抛光、腐蚀抛光后在XJL-03型光学显微镜上观察石墨形态及基体组织并拍照。

3 试验结果及分析

3.1 力学性能测试结果

3.1.1 拉伸试验测试结果

对试样进行拉伸试验测试，其结果如表6所示。根据表6绘出灰铸铁抗拉强度与钝化丝和氮化锰加入量的对比关系如图3所示。

表6 试样抗拉强度
Table 6 Tensile strength of samples

试样编号	抗拉强度/MPa
1 [#]	239
2 [#]	263
3 [#]	284
4 [#]	292
5 [#]	280

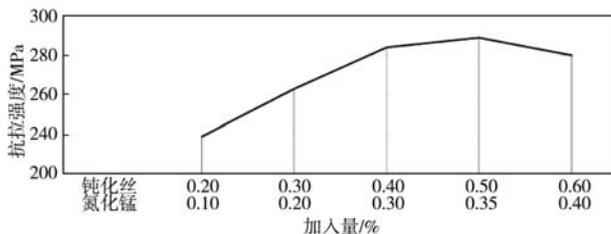


图3 钝化丝、钝化锰加入量与抗拉强度的关系

Fig. 3 Relationship between the amounts of passivated wire and passivated manganese and the tensile strengths

3.1.2 布氏硬度试验结果

对试样进行布氏硬度测试，其结果如表7所示。根据表7绘出灰铸铁布氏硬度与钝化丝和氮化锰加入量的对比曲线，如图4所示。

表7 试样布氏硬度 (HB)
Table 7 Brinell hardness of samples

试样编号	布氏硬度
1 [#]	195
2 [#]	202
3 [#]	213
4 [#]	223
5 [#]	200

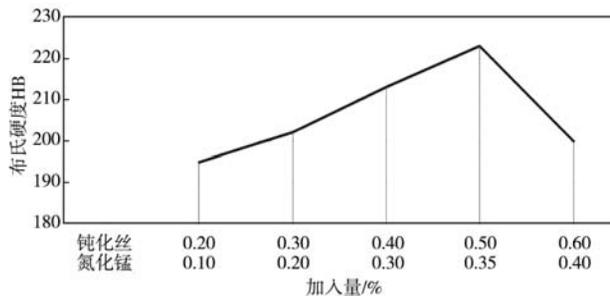


图4 钝化丝、氮化锰加入量与布氏硬度的关系

Fig. 4 Relationship between the amounts of passivated wire, manganese nitride and Brinell hardnesses

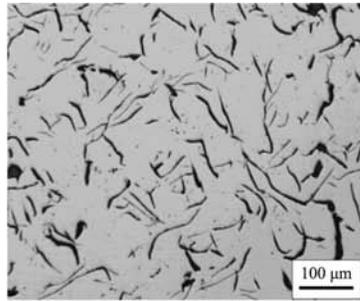
3.2 金相组织检测结果

如图5所示是不同钝化丝和氮化锰加入量的石墨形态和基体组织金相图片

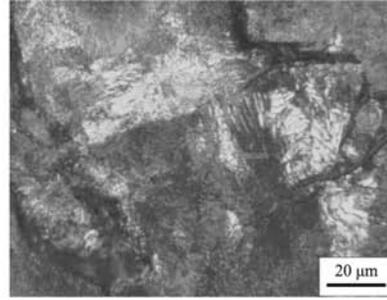
图5a1为钝化丝加入量为0.2%、氮化锰加入量0.1%的试样，石墨形态变化不明显，少量石墨尖端开始变钝，石墨钝化率约为20%。图5b1为钝化丝加入量0.3%、氮化锰加入量0.2%的试样，石墨轻微弯曲，石墨尖端变钝比例较钝化丝0.2%、氮化锰0.1%加入量增多，石墨钝化率约为30%。图5c1为钝化丝加入量0.4%、氮化锰加入量0.3%的试样，石墨进一步变短、变粗并轻微弯曲，石墨尖端钝化比例逐渐提升，石墨钝化率约为35%。图5d1为钝化丝加入量0.5%、氮化锰加入量0.35%的试样，石墨明显变短、变粗并明显弯曲，石墨钝化比例进一步提升，石墨钝化率约为40%。图5e1为钝化丝加入量0.6%、氮化锰加入量0.4%的试样，由于稀土元素和氮元素加入量过高，铁液变粘稠，流动性差，在浇注中后期已出现浇不足现象，石墨尖端钝化比例较钝化丝0.5%、氮化锰0.35%加入量时明显降低，石墨钝化率约为20%，铸件加工后表面开始出现气孔缺陷。

不同稀土和氮含量经过腐蚀后的基体组织金相如图5a2-图5e2所示，从不同金相图片可以看出，随着稀土含量和氮含量不断增加，珠光体数量增加、片间距减小、细化；共晶团数量同样增加、平均尺寸减小、细化。试样抗拉强度和布氏硬度都会逐渐提高，但是从试验结果来看稀土含量超过0.042%、氮含量超过 120×10^{-6} 时，钝化率明显下降，铸造性能变差，内部致密度降低，抗拉强度和布氏硬度开始下降。

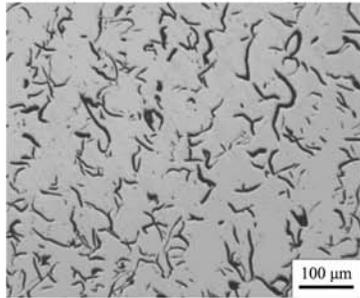
综上所述，稀土元素会与铁液中的硫、氧反应，生成稀土化合物，使石墨基面与铁液的界面能降低，使其低于棱面的界面能，能促使石墨以螺旋位错的方式沿基面法向生长，以及氮原子在铁液凝固过程中不断吸附在石墨长大前沿，并固溶于石墨中，阻碍片状石墨的生长，减小片状石墨的长宽比，增加石墨弯曲程度，钝化石墨端部，从而使石墨变细、弯曲、变



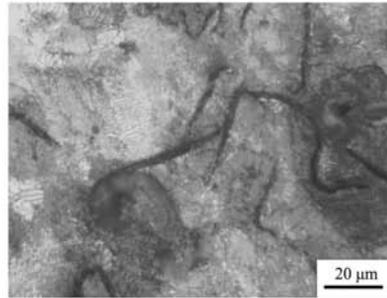
(a1) 钝化丝0.2%、氮化锰0.1%腐蚀前



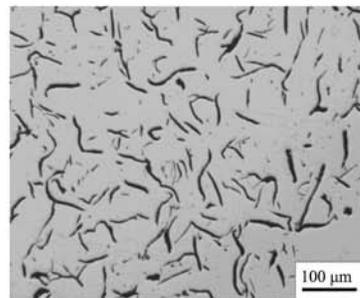
(a2) 钝化丝0.2%、氮化锰0.1%腐蚀后



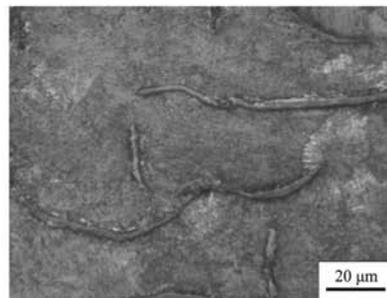
(b1) 钝化丝0.3%、氮化锰0.2%腐蚀前



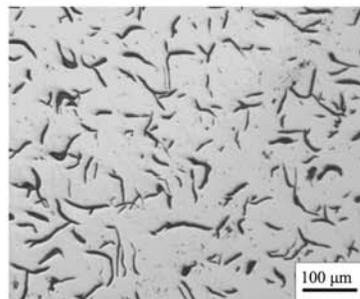
(b2) 钝化丝0.3%、氮化锰0.2%腐蚀后



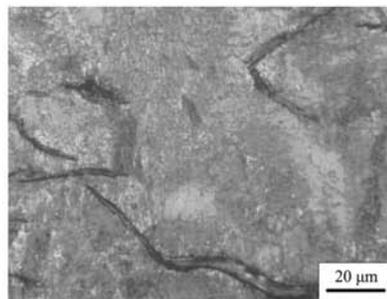
(c1) 钝化丝0.4%、氮化锰0.3%腐蚀前



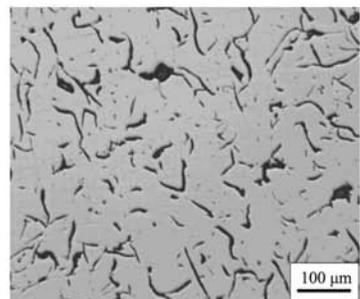
(c2) 钝化丝0.4%、氮化锰0.3%腐蚀后



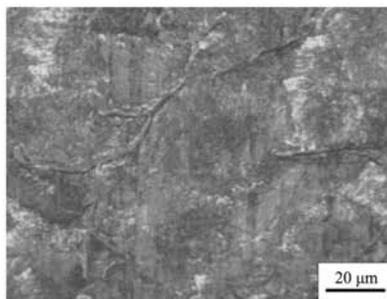
(d1) 钝化丝0.5%、氮化锰0.35%腐蚀前



(d2) 钝化丝0.5%、氮化锰0.35%腐蚀后



(e1) 钝化丝0.6%、氮化锰0.4%腐蚀前



(e2) 钝化丝0.6%、氮化锰0.4%腐蚀后

图5 不同钝化丝、氮化锰加入量的灰铸铁腐蚀前后石墨金相图片

Fig. 5 Graphite metallographies of gray cast iron before and after corrosion with different passivation wire and manganese nitride additions

钝。但是过多的稀土和氮元素加入量会导致灰铸铁铸造性能下降,铸件加工后表面出现气孔等缺陷,同时钝化率也会不同程度的降低,因此控制浇注温度、浇注时间、铁液处理量以及钝化丝和氮元素加入量以及处理时机尤为重要。

4 结论

(1) 在铁液中加入含有稀土元素的钝化丝和氮化锰,随着钝化丝和氮化锰的加入量的增多,灰铸铁的抗拉强度和布氏硬度呈升高趋势且在钝化丝加入量

0.5%、氮化锰加入量0.35%时达到最高值,加入量超过其值后呈明显的下降趋势。

(2) 随着钝化丝和氮化锰加入量的增多,灰铸铁片状石墨逐步变短、变粗,端部钝化,在钝化丝加入量达到0.5%、氮化锰加入量0.35%时钝化率达到最高值,约为40%,加入量超过其值后钝化率呈下降趋势。

(3) 过多的稀土元素和氮元素的加入会降低灰铸铁铁液流动性等铸造性能,同时铸件加工后表面出现气孔缺陷。

参考文献:

- [1] 李卫. 铸造手册: 第一卷 铸铁 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 李建, 刘鸣放, 李世杰, 等. 重型卡车铸铁制动鼓开裂失效分析的机理研究 [J]. 铸造技术, 2023, 44 (3): 186-290.
- [3] 李先芬, 丁厚福, 苏勇, 等. 汽车制动鼓的失效分析 [J]. 理化检验 (物理分册), 2004, 40 (10): 194-244.
- [4] 李建, 黎文强, 张伟伟, 等. 灰口铸铁制动鼓的热循环开裂分析及表面改性 [J]. 郑州大学学报, 2023, 44 (3): 320-463.
- [5] 李莉, 陈永泰, 张方. 重型载重车辆灰铸铁制动鼓力学性能研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (5): 323-420.
- [6] 王保东, 付大军, 单光圣. 稀土元素镧对灰口铸铁组织性能的影响 [J]. 金属铸锻焊技术, 2008 (7): 1291-1394.
- [7] 翟启杰, 胡汉起. 氮对灰口铸铁中石墨组织的作用 [J]. 金属学报, 1992, 28 (7): 1394-1606.

Investigation on Graphite Passivation Production Technology of Gray Cast Iron Brake Drum

LI Jian¹, TANG Sen¹, YAN Qi-dong², QIN Peng-peng¹, XIE Wen-bo¹

(1. Zhumadian CIMC Huajun Casting Co., Ltd., Zhumadian 463000, Henan, China; 2. Yuzhou New Materials Co., Ltd., Yuzhou 452570, Henan, China)

Abstract:

Aiming at the problem that the brake drum cracking failure is easily caused by frequent cold and hot cycles during repeated braking of commercial vehicles, a method of passivating the-flake graphite end by using of rare earth element, nitrogen element and passivation process is proposed. Under the condition of high carbon equivalent composition ($CE \geq 3.9\%$), the graphite passivation material and production process of the gray cast iron brake drum were investigated to improve the conventional mechanical properties and thermal fatigue resistance properties of the brake drum, and provided technical support for the production of heat-resistant and thermal fatigue resistance brake drum castings for commercial vehicles.

Key words:

gray cast iron; brake drum; thermal fatigue resistance property; graphite end passivation; metallographic structure