

# 孕育处理对高碳灰铸铁导热及抗拉强度的影响

王金国<sup>1</sup>, 王成刚<sup>2</sup>, 鲁天时<sup>1</sup>, 王建东<sup>2</sup>, 李峰<sup>2</sup>, 陈铁方<sup>1</sup>, 闫瑞芳<sup>1</sup>

(1. 吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130022; 2. 一汽铸造有限公司, 长春 130022)

**摘要:** 研究了不同孕育剂孕育处理对高碳灰铸铁导热及抗拉强度的影响。采用 DRPL-2C 导热系数测试仪测定试验灰铸铁常温条件下的导热系数, 采用 WAW-200 拉伸试验机测试其抗拉强度, 采用 XJG-0.5 光学显微镜、TESCAN 钨灯丝扫描电镜进行组织观察, 利用 Image-pro plus (IPP)、Photoshop 等软件进行石墨特征参数统计 (每种孕育剂孕育处理的灰铸铁组织统计 5~8 张照片)。研究结果表明: 不同孕育剂孕育处理对高碳灰铸铁的石墨组织特征 (石墨尖端形貌、石墨长度、石墨数量及石墨占比) 有不同程度的影响, 从而影响高碳灰铸铁的导热性能; 影响高碳灰铸铁导热性能的主要因素, 除灰铸铁中石墨的含量外, 石墨的长度以及石墨的数量也对高碳灰铸铁的导热性能及抗拉强度有重要影响; 对比传统孕育剂, 新型孕育剂能有效钝化石墨尖端, 减小灰铸铁组织中石墨的尺寸、增加石墨的数量, 协同提升灰铸铁的抗拉强度及导热性能, 为今后高碳灰铸铁在高强高导热材料领域的应用提供一定的理论指导。

**关键词:** 金属材料; 高碳灰铸铁; 孕育处理; 导热性能

**中图分类号:** TG143.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-1940-08

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230915

## Effect of inoculation treatment on thermal conductivity and tensile strength of high carbon gray cast iron

WANG Jin-guo<sup>1</sup>, WANG Cheng-gang<sup>2</sup>, LU Tian-shi<sup>1</sup>, WANG Jian-dong<sup>2</sup>, LI Feng<sup>2</sup>,  
CHENG Tie-fang<sup>1</sup>, YAN Rui-fang<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. FAW Casting Co., Ltd., Changchun 130022, China)

**Abstract:** The effects of different inoculants on the thermal conductivity of high carbon gray cast iron were studied. DRPL-2C thermal conductivity tester was used to determine the thermal conductivity of gray cast iron at room temperature, WAW-200 tensile testing machine was used to test the tensile strength, XJG-0.5 optical microscope, TESCAN tungsten filament scanning electron microscopy were used for tissue observation, and graphite characteristic parameter statistics (5-8 photos of gray cast iron with different inoculant treatment gray cast iron) were carried out by using Image-pro plus (IPP), Photoshop and other software. The results showed that different inoculants had different degrees of influence on the graphite microstructure characteristics (graphite tip morphology, graphite length, graphite quantity and graphite proportion) of high carbon ash cast iron, thereby affecting the thermal conductivity of high carbon ash cast

收稿日期: 2023-10-09.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20210201065GX).

作者简介: 王金国(1964-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 汽车轻量化结构材料设计. E-mail: jgwang@jlu.edu.cn

iron. In addition to the content of graphite in gray cast iron, the length of graphite and the amount of graphite also have an important impact on the thermal conductivity of high carbon gray cast iron. Compared with the traditional inoculant, the new inoculant can effectively passivate the tip of the graphite, reduce the size and increase the amount of graphite in the gray cast iron structure, and synergistically improve the tensile strength and thermal conductivity of the gray cast iron, which provides some theoretical guidance for the future application of high-carbon gray cast iron in the field of high-strength and high-thermal conductivity materials.

**Key words:** metallic materials; high carbon gray cast iron; inoculation; thermal conductivity

## 0 引言

制动盘作为汽车制动系统的重要部件,在汽车行驶安全中至关重要。灰铸铁因其具有一定的强度、良好的耐磨性和导热性,是构成制动盘的主要材料。制动盘的失效方式主要包括磨损以及因热疲劳产生的“龟裂”,尤其是因热疲劳产生的“龟裂”是影响制动盘安全性能的重要因素<sup>[1,2]</sup>。为了提高灰铸铁制动盘的抗热疲劳性能,研究者们<sup>[2,3]</sup>提出采用高碳灰铸铁作为制动盘的材质,期望通过提高碳含量,提高灰铸铁的导热性能,从而提高灰铸铁的抗热疲劳性能,但因灰铸铁中碳含量的提高,灰铸铁的力学性能明显降低,也影响了高碳灰铸铁材质在制动盘生产中的应用。铸铁中各主要组成相的热导率相差极大,导热机理也不尽相同,并受到多种因素的影响。关于灰铸铁的导热性能,目前认为石墨的含量是影响灰铸铁导热性能的主要因素,灰铸铁中石墨的含量高,则灰铸铁的导热性能高<sup>[2,3]</sup>,但关于灰铸铁中石墨的特征参数,如石墨的长度、数量以及弯曲程度等对灰铸铁导热性能的影响还缺少深入的研究<sup>[4,5]</sup>。

孕育处理作为灰铸铁生产的一个重要环节,能够有效改善灰铸铁的组织,提高其性能。一般而言,灰铸铁的孕育处理主要用于改善灰铸铁组织中石墨的形态、尺寸,以及共晶团尺寸或数量。有些孕育处理时,因为某些微量元素的作用,对灰铸铁的基体组织也有一定的影响,而这些影响都直接影响灰铸铁的各方面性能。Fe-Si孕育剂在增加共晶团数量、细化晶粒、促进A型石墨方面作用明显,被广泛使用<sup>[6]</sup>。

本文探讨了不同孕育剂组成对灰铸铁组织的影响,获得不同特征参数的石墨,探讨了石墨特征参数对灰铸铁导热性能的影响,以期获得高导热性能灰铸铁奠定试验基础。

## 1 材料及方法

### 1.1 原材料及金属熔炼

试验用原材料有高纯生铁、硅铁、锰铁、铬铁、纯铜、纯锡、硫化亚铁及增碳剂,孕育剂(硅铁、硅钡、硅钙及硅锆),造型材料(覆膜砂、粘芯胶)及除渣剂。采用10 kg的中频感应炉熔炼配置好的金属原材料,铁水出炉温度为1 500~1 520 ℃,采用“冲入法”进行浇包内孕育处理,加入孕育剂的质量分数为0.7%,将孕育剂置于浇包底部,铁液出炉后直接浇入包中,使用除渣剂除去包内铁液表面浮渣,将铁液浇入预先制备好的树脂砂“Y形试样”砂型中和做化学成分检测试样的金属模具中。试验时控制每包浇注时间为2 min内,浇注温度为1 350~1 380 ℃。浇注完毕空冷至室温,砂型打箱后将Y形铸件编号备用。

### 1.2 试样的制备和检测

如图1(a)所示,化学成分检测试样由浇入金属模具中快速冷却的铁液获得,经砂纸打磨,使用ARL4460光谱仪测定其化学成分;在Y形试样底

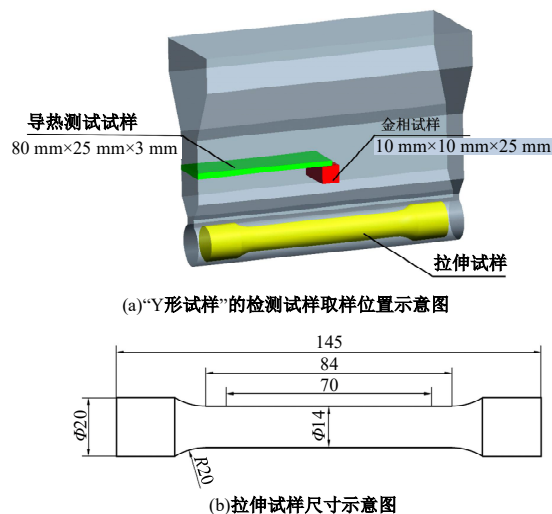


图1 试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimen

部切取拉伸试样、导热性能检测试样和金相试样。抗拉强度采用 WAW-200 拉伸试验机测试,拉伸试样尺寸如图 1(b)所示。每种成分灰铸铁的抗拉强度试棒数量为 3 根,导热性能测试采用 DRPL-2C 导热系数测试仪测定试验灰铸铁常温条件下的导热系数,每种成分灰铸铁的导热系数试样数量为 3 片,试样尺寸为 80 mm×25 mm×3 mm;金相试样制备后,经浓度为 4% 的硝酸酒精腐蚀,采用 XJG-0.5 光学显微镜、TESCAN 钨灯丝扫描电镜进行组织观察,根据灰铸铁的金相检验标准,利用 Image-pro plus (IPP) 和 Photoshop 软件进行石墨特征参数统计。

## 2 结果及讨论

### 2.1 化学成分

表 1 为灰铸铁中加入不同种类孕育剂的灰铸铁试样化学成分,1#和 2#试样加入 Si-Fe 孕育剂;3#试样加入 Ca-Si 孕育剂;4#试样加入 Ba-Si 孕育剂;5#试样加入 Sr-Si 孕育剂,孕育剂的质量分数为 0.7%,新型孕育剂主要包含 Si、Ba、N 和 Ca 元素,孕育剂的质量分数为 0.7%。

表 1 灰铸铁试样的质量分数

试样编号	合金成分						
	C	Si	Mn	Cu	Cr	Sn	S
1#(Si-Fe)	3.67	1.26	0.78	0.35	0.23	0.09	0.12
2#(Si-Fe)	3.79	1.31	0.79	0.35	0.22	0.09	0.12
3#(Ca-Si)	3.67	1.04	0.71	0.44	0.22	0.10	0.12
4#(Ba-Si)	3.76	1.19	0.73	0.45	0.22	0.10	0.13
5#(Sr-Si)	3.80	1.13	0.73	0.43	0.22	0.09	0.14

### 2.2 C、Si 含量对灰铸铁组织及性能的影响

对灰铸铁而言,C、Si 含量决定了灰铸铁组织中石墨的含量,尤其是 C 作为石墨的组成元素,C 的含量越高,则灰铸铁组织中石墨的含量越高。一方面石墨本身强度很低,相对于灰铸铁组织中存在的缺陷,灰铸铁件受力后很容易在石墨处产生裂纹,因此,一般而言,灰铸铁组织中石墨含量越高,其强度越低;另一方面,石墨本身的导热性能远远高于灰铸铁基体组织的导热性能,其含量的多少对灰铸铁的导热性能具有巨大影响,石墨含量越高,灰铸铁整体的导热性能也越高。

图 2 为灰铸铁中加入不同种类孕育剂的导热系数柱状图。由图 2 可以看出,4#试样的导热系数最高,达到 76.55 W/(m·K),其次为 2#、5#、

3#、1#。图 3 为灰铸铁中加入不同型号孕育剂的抗拉强度柱状图,其中,1#试样的抗拉强度最高,为 248 MPa,其次为 3#、5#、2#、4#。

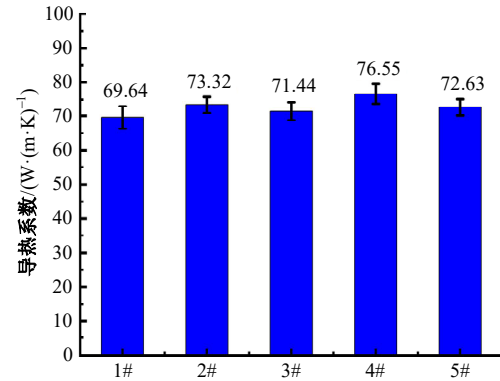


图 2 不同孕育处理灰铸铁的导热系数图

Fig. 2 Thermal conductivity diagram of gray cast iron with different inoculation treatment

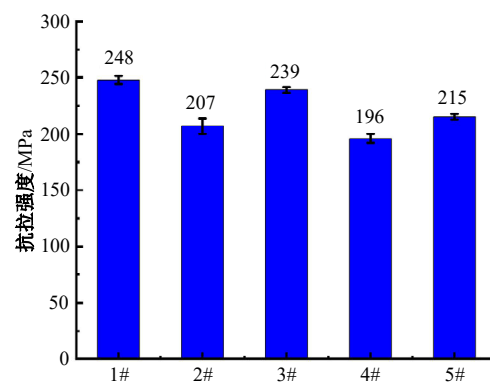


图 3 不同孕育处理灰铸铁的抗拉强度图

Fig. 3 Tensile strength diagram of gray cast iron with different inoculation treatment

根据表 1 的灰铸铁成分检测结果可以发现:1#试样与 2#试样相比较,C、Si 含量相对低,从抗拉强度和导热系数的检测结果看,1#试样的抗拉强度高,而导热系数低,这与前人研究结果“增加灰铸铁中 C 的含量,可以提高灰铸铁的导热性能,但会降低灰铸铁的抗拉强度<sup>[4,7]</sup>”相一致。

1#试样与 3#试样相比较,C 含量相同,但 1#试样的 Si 含量高,可以推断 1#试样的抗拉强度应低于 3#试样的抗拉强度,而导热系数应高于 3#试样的导热系数,但实测结果为 1#试样的抗拉强度高、导热系数低,与推断的结果相反。

2#试样与 4#试样相比较,2#试样的 C、Si 含量相对较高,则推断 2#试样的抗拉强度应该低、导热系数应该高,但检测结果显示同样是 2#试样的抗拉强度高、导热系数低,与推断的结果相反。

2#试样与 5#试样相比较,C 含量相接近,但

2#试样的 Si 含量稍高,推断 2#试样的抗拉强度应该高,导热系数应该低,但检测结果显示 2#试样的抗拉强度低、导热系数高。

综合上述分析可知:合金成分的不同对灰铸铁的抗拉强度和导热性能均有影响,在孕育处理相同条件下,C、Si 含量增加,灰铸铁的抗拉强度降低、导热系数提高,但使用不同的孕育剂孕育处理,依据 C、Si 含量的高低并不能评判灰铸铁抗拉强度和导热系数的高低。

孕育处理能改变灰铸铁中重要的组成相“石墨”的特征,如石墨的长度、数量、弯曲程度等,而石墨的这些特征参数既影响了灰铸铁的抗拉强度,又对灰铸铁的导热系数有重要影响。

灰铸铁中的石墨特征对灰铸铁抗拉强度的影响表现为:石墨的长度越长,则灰铸铁的抗拉强度越低;在相同石墨含量条件下,石墨的数量越多,则抗拉强度越高;石墨的弯曲程度越高,则灰铸铁的抗拉强度越高。但关于灰铸铁中的石墨特征,普遍观点认为石墨含量越高,灰铸铁的导热性能越高,而关于石墨的长度、数量、弯曲程度等对灰铸铁导热性能的影响研究还比较匮乏。

2.3 孕育处理对灰铸铁组织及导热性能的影响

2.3.1 孕育处理对灰铸铁组织的影响

根据试验灰铸铁的石墨组织(见图 4)及其石墨特征统计结果(见表 2)可知,在 C、Si 含量接近的条件下,与 1#试样相比,含 Ca 孕育剂(3#试

表 2 灰铸铁中石墨特征及珠光体层片间距参数  
Table 2 Graphite characteristics and interlamellar spacing of pearlite of grey cast iron

试样编号	石墨长度/ μm	石墨数量/ 片	石墨面积 占比/%	珠光体层片 间距/nm
1#(Si-Fe)	46.98	749	10.28	648
2#(Si-Fe)	52.98	691	11.54	607
3#(Ca-Si)	64.60	512	8.57	370
4#(Ba-Si)	57.90	742	9.29	418
5#(Sr-Si)	40.66	1 131	10.29	396

样)使石墨的长度增加,石墨长度由 46.98 μm 增加为 64.60 μm,由图 4(a)(c)可知,含 Ca 孕育剂使石墨变得相对平直;含 Ba 孕育剂也增加了石墨的长度,石墨长度由 52.98 μm 增加为 57.90 μm,石墨的数量由 691 增加为 742;由表 2 中可知,含 Sr 孕育剂对增加石墨数量的作用明显,石墨数量增加为 1 131,降低了石墨的长度,石墨长度仅为 40.66 μm,从图 4(e)可知,石墨得到明显的细化。

图 5 为不同孕育处理的灰铸铁珠光体组织的 SEM 图,可见经 Ca、Ba、Sr 孕育剂处理的珠光体组织更为细小。通过对试验灰铸铁中多个视场中珠光体层片间距进行统计可知,采用含 Ca、Ba、Sr 孕育剂孕育处理的灰铸铁基体组织珠光体的层片间距相对较小。其原因是:一方面,采用含 Ca、Ba、Sr 孕育剂孕育处理的灰铸铁合金成分中 Cu 的含量相对较多,与采用 Si-Fe 孕育剂孕育处理的灰铸铁相

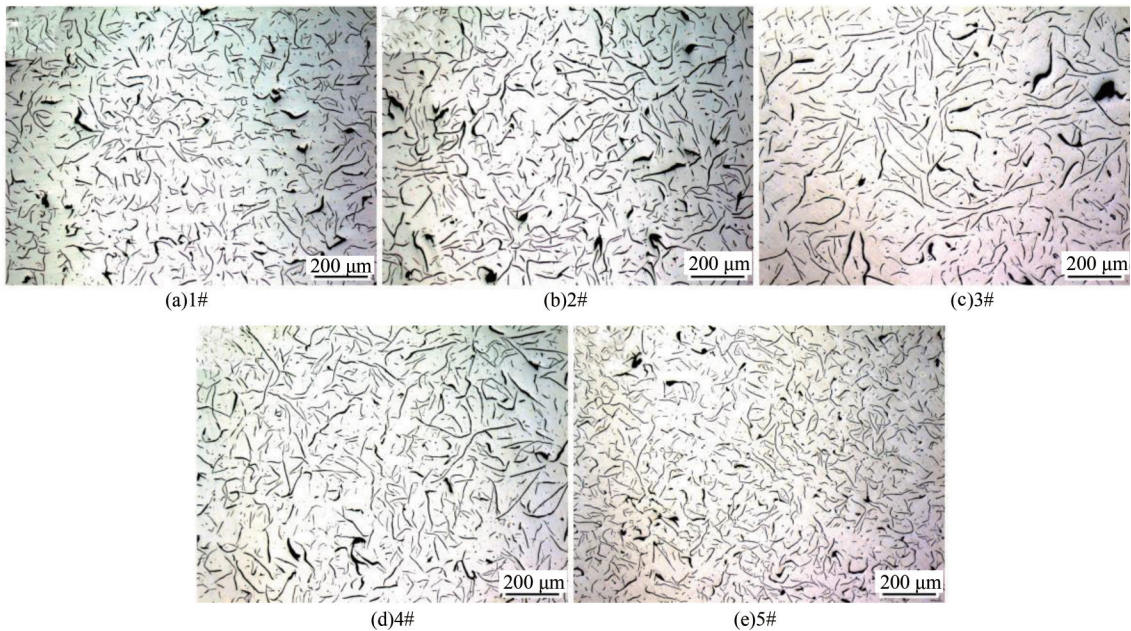


图 4 不同孕育处理的灰铸铁的石墨形貌图

Fig. 4 Graphite morphology of gray cast iron with different inoculation treatment

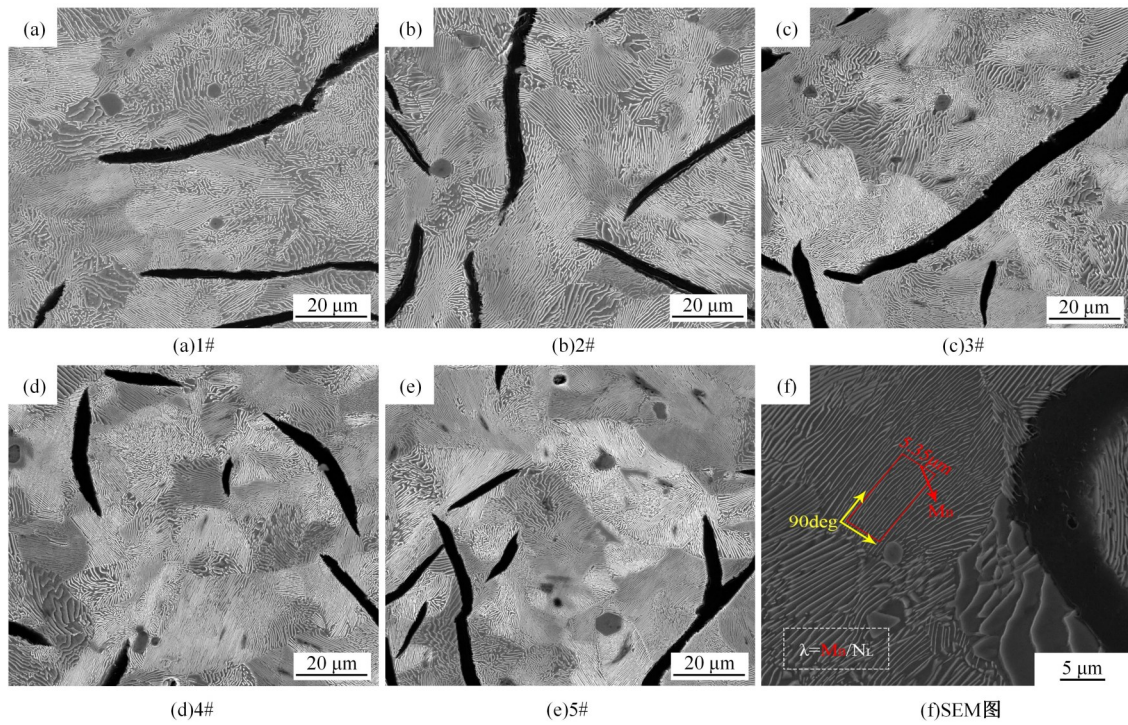


图 5 不同孕育处理的灰铸铁的珠光体组织 SEM 图

Fig. 5 Pearlitic structure of the gray cast iron with different inoculation treatment

比,Cu元素质量分数高出0.08~0.1%。而Cu元素具有促进珠光体形成,并具有细化珠光体的作用;另一方面,凝固开始时刻形成枝晶间距细小的等轴网络框架结构的初生奥氏体枝晶,并转变成等轴网络框架结构的细小层片厚度和间距的珠光体<sup>[8]</sup>。

图6为经不同孕育剂孕育处理的灰铸铁共晶

团组织OM图,表3为灰铸铁中共晶团特征参数,可见与传统孕育剂(Si-Fe)相比,硅钙孕育剂使共晶团数量提升46.5%,细化效果最好;硅钡孕育剂使共晶团数量增加11.6%,共晶团的尺寸变化与石墨的尺寸变化在一定程度上具有一致性,这是因为,共晶团是石墨与奥氏体共同生长形成的,由于孕育剂中引入的Ca、Ba、Sr元素均使石墨数

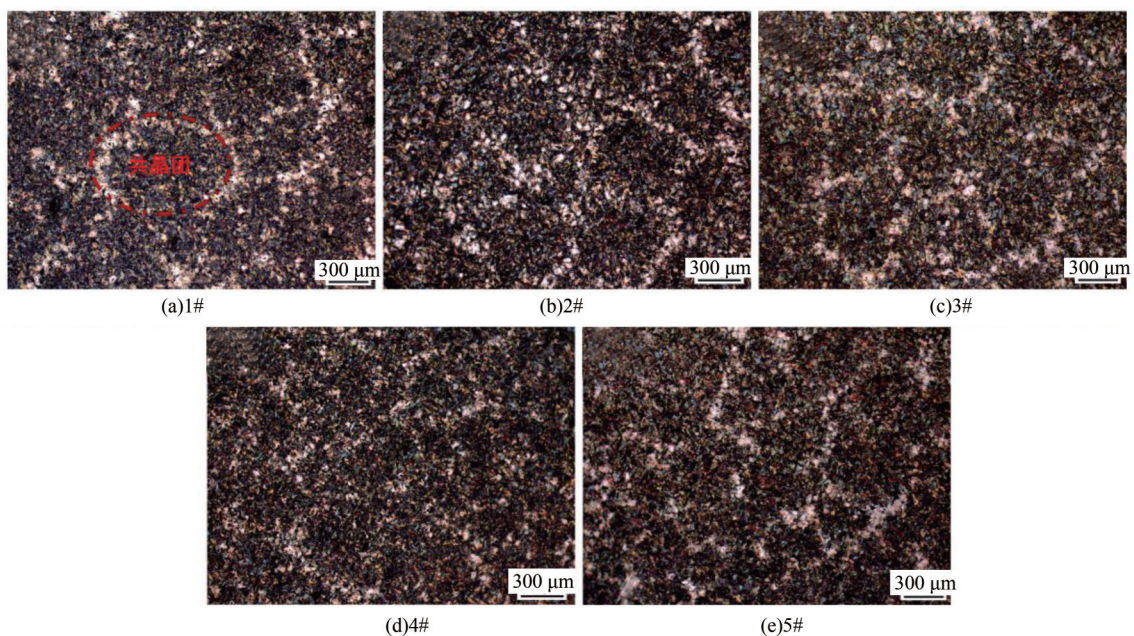


图 6 不同孕育处理的灰铸铁的共晶团组织 OM 图

Fig. 6 Eutectic cells diagram of grey cast iron with different inoculation treatment

表3 灰铸铁中共晶团特征参数

Table 3 Characteristic parameters of gray cast iron eutectic clusters

试样编号	共晶团直径/ $\mu\text{m}$	共晶团数量/ $(\text{pcs}\cdot\text{cm}^{-2})$	共晶团级数
1#(Si-Fe)	447.22	637	3-4级
2#(Si-Fe)	622.76	328	5-6级
3#(Ca-Si)	369.55	933	2-3级
4#(Ba-Si)	590.12	366	5-6级
5#(Sr-Si)	619.31	332	5-6级

量增加、尺寸细化,共晶团也因此得到细化。每个共晶团内的石墨构成连续的一簇立体状,分布于金属基体中。无论共晶团内的石墨片有多少,这些石墨片都集中在一个共晶团中,在共晶团边界上是很少的,即它们以共晶团为单位相互隔离着。这样的共晶团越小,石墨的隔离效果越好,对受力断裂的削弱就越小。同时,共晶团的细化,增加了共晶团边界,使该处的低熔点杂质数量减少,并趋于分散。因此,这些杂质的脆性对铸铁性能影响较小,甚至其硬度大的特性反而有助于铸铁抗拉强度和耐磨性的提高。

孕育剂对高碳当量灰铸铁组织的影响规律及强化机制总体概况为:形成初生奥氏体枝晶,枝晶间距细小且呈三维网状分布,随着温度的降低,转变为细小层片厚度的珠光体;三维网状分布的初生奥氏体枝晶,使共晶转变的凝固空间缩小,石墨生长受到限制。石墨结晶核心增多,从而使石墨变得更加细小,弯曲、数量增多;共晶团尺寸减小,数量增加,细化的共晶奥氏体转变成尺寸、层片厚度和片间距细小的珠光体团簇且交错分布<sup>[9,10]</sup>。

### 2.3.2 石墨特征对灰铸铁导热性能的影响

灰铸铁中的片状石墨在凝固时是领先相,石墨尖端都始终突出伸向液相中,共晶团内部的石墨片互相连接,不同共晶团间的石墨彼此有一定的互相镶嵌和接触。

对5种灰铸铁中石墨的含量、长度、数量进行统计,结果如表2所示,并绘制柱状图。图7为灰铸铁中加入不同孕育剂的石墨长度及石墨面积占比图,图8为灰铸铁中加入不同孕育剂的灰铸铁石墨数量及珠光体层片间距图。

根据表2、图7和图8可以看出:相同孕育条件处理灰铸铁时,C、Si含量增加,石墨所占的面积增加、石墨的长度增加,因此灰铸铁的抗拉强度降低、导热性能提高(1#试样与2#试样相比较);

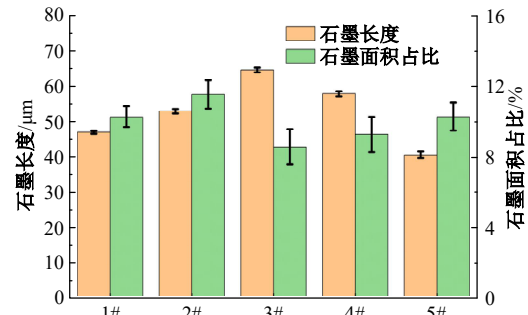


图7 不同孕育处理的灰铸铁试样的石墨长度及面积占比

Fig. 7 Graphite length and area fraction of grey cast iron with different inoculation treatment

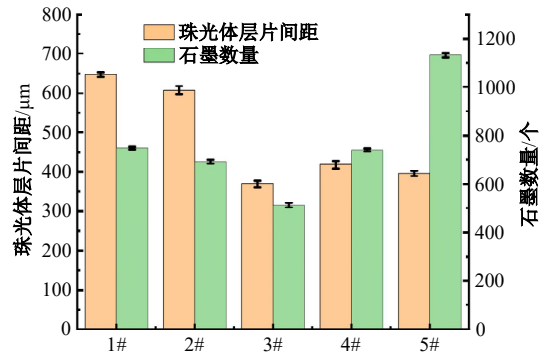


图8 不同孕育处理灰铸铁试样的珠光体片层间距及石墨数量

Fig. 8 Amount of graphite and interlamellar spacing of pearlite of grey cast iron with different inoculation treatment

不同孕育剂孕育处理灰铸铁时,1#试样与3#试样比较,C含量相同,Si含量减少,石墨所占面积减少,但石墨的长度增加,导致灰铸铁的导热性能提高;2#试样与4#试样相比较,4#试样的石墨所占面积减少,但石墨的长度增加,导致灰铸铁的导热性能提高;2#与5#试样比较,石墨所占的面积和石墨的长度均增加,但2#试样的导热性能并没有比5#试样的导热性能明显增加,5#试样的石墨数量远高于2#试样的石墨数量,可见,石墨的数量也是影响灰铸铁导热性能的一个重要因素。

### 2.3.3 灰铸铁组织特征对其导热性能的影响

表4为灰铸铁中不同微观组织对其导热性能的影响。由表4可见,灰铸铁组织中,石墨对其导热性能的影响最为明显,片状石墨沿基面方向有远高于其他组织的导热能力<sup>[2]</sup>。基体组织的类别及其含量虽然对灰铸铁的导热性能具有影响,但本试验中,得到的基体组织98%为珠光体基体,虽然根据对试验灰铸铁的基体组织珠光体层片间

距进行测定,得到采用含Ca、Ba、Sr孕育剂孕育处理的灰铸铁基体组织珠光体的层片间距相对小,即增加了传热热阻,但其影响程度远低于石墨对灰铸铁导热性能的影响。

表 4 灰铸铁中不同微观组织的导热系数<sup>[2]</sup>

Table 4 Thermal conductivity of different microstructures in gray cast iron<sup>[2]</sup>

微观组织	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]
片状石墨(沿基面)	293~419
片状石墨(沿C轴方向)	84
珠光体	50
铁素体	71~80
渗碳体	7

关于石墨对灰铸铁导热性能的影响,一方面石墨的含量是主要影响因素,另一方面,如果片状石墨的连通性好,热量可借由片状石墨连通形成的“快速通道”传递,能够提高灰铸铁的导热性能。因此,石墨的长度和数量同样对灰铸铁的导热性能具有重要影响。灰铸铁可以看作石墨与金属制备成的复合材料,施加一个外场,当石墨输运性能大于基体输运性能时,载流子穿越界面(即“越界迁移”),高导热石墨的导热性能远高于基体(珠光体、铁素体及渗碳体),故热量会优先在高导热石墨中传导<sup>[11,12]</sup>。越界迁移的产生必然涉及大量界面问题,而且对于各向异性的石墨特征,其尺寸、形状也会对复合材料热导率有明显的影

2.4 新型孕育剂协同提升灰铸铁导热性及力学性能的应用

众所周知,影响灰铸铁抗拉强度的因素,主要由石墨的含量、长度、弯曲程度、端部的钝化程度,以及基体组织的类别、珠光体基体的层片间距等决定。石墨的含量越多、长度越长、石墨越平直、石墨端部越尖锐,基体组织中珠光体的含量越低,以及珠光体基体的层片间距越大,则灰铸铁的抗拉强度越低;而石墨含量低、石墨细小、弯曲、端部钝化,以及基体组织中珠光体的含量高、珠光体的层片间距小,则能提高灰铸铁的抗拉强度<sup>[13]</sup>。

根据本研究结果,石墨的含量高、石墨的长度长、石墨的数量多,同时,基体组织中珠光体的含量低,以及珠光体基体的层片间距大,则灰铸铁的导热性能高。可见,影响灰铸铁抗拉强度和导热性能的因素多为相互矛盾,高的石墨含量带来灰铸铁的导热性能提高,但降低了灰铸铁的抗拉强

度;平直的石墨,提高了灰铸铁的导热性能,也降低了灰铸铁的抗拉强度,只有石墨细小、弯曲才有利于同时提升灰铸铁的抗拉强度和导热性能。

鉴于此,本文提出同时提升灰铸铁抗拉强度及导热性能的复合孕育剂,试验用灰铸铁合金成分如表 5 所示。

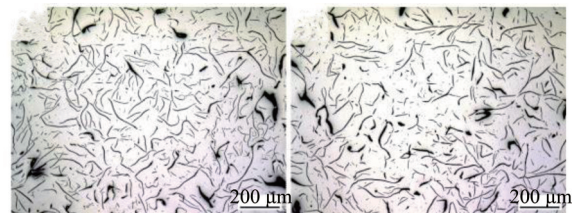
表 5 灰铸铁化学成分

Table 5 Chemical composition of gray cast iron samples

试样	C	Si	Mn	Cu	Cr	Sn	S	Mo
新型	3.77	1.06	0.71	0.37	0.30	0.10	0.05	0.17
Si-Fe	3.75	1.08	0.70	0.38	0.30	0.10	0.05	0.17

图 9 为采用新型孕育剂及 Fe-Si 孕育剂孕育处理的灰铸铁石墨形貌。由图 9 可知,使用了新型孕育剂后石墨组织发生明显变化:Fe-Si 孕育剂处理的石墨组织中石墨量较少,且大部分石墨片较粗长;经新型复合孕育剂处理后石墨数量明显提升,石墨厚度减少,呈现以较长石墨为骨架,较短石墨填补间隙的石墨组织形态,同时还形成了尖端钝化石墨,如图 10 所示。

对比两种不同孕育剂孕育处理灰铸铁的组织特征及抗拉强度和导热性能,结果如表 6 所示,相



(a)新型孕育剂 (b)Si-Fe孕育剂

图 9 灰铸铁石墨形貌图

Fig. 9 Graphite morphology of the gray cast iron

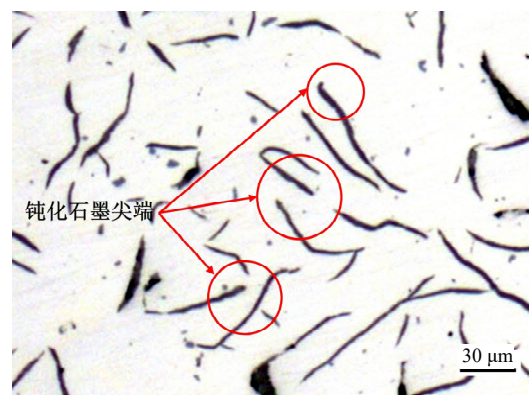


图 10 新型孕育剂处理后的钝化石墨 OM 图

Fig. 10 Passivated graphite treated with a new inoculant

表6 灰铸铁中石墨特征参数及性能

Table 6 Characteristic parameters and properties of graphite in gray cast iron

试样类型	石墨长度/ $\mu\text{m}$	石墨数量/片	石墨面积占比/%	抗拉强度/ $\text{MPa}$	导热系数/ $[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$
新型孕育剂	55.07	605	11.44	245	77.9
Si-Fe孕育剂	56.23	505	10.27	224	67.2

比传统Si-Fe孕育剂,经新型孕育剂处理后的灰铸铁抗拉强度提升了9%,导热系数提升了14%。抗拉强度的增加主要源于石墨钝化及石墨厚度降低;导热系数的提高则源于石墨数量和尺寸的增加。

### 3 结论

(1)不同孕育剂孕育处理,能够改变灰铸铁组织中石墨的数量、长度、弯曲程度等特征,从而对灰铸铁的导热性能产生影响。

(2)影响灰铸铁导热性能的主要因素包含灰铸铁中石墨的含量、长度及数量。石墨含量高及石墨平直、长度长、数量多,则能提高灰铸铁的导热性能。

(3)新型孕育剂孕育处理灰铸铁能够减小灰铸铁组织中石墨的尺寸、增加石墨的数量,同时能够钝化石墨的端部,使灰铸铁的抗拉强度及导热性能协同提升。

#### 参考文献:

- [1] Wang G Q, Liu Z L, Li Y X, et al. Different thermal fatigue behaviors between gray cast iron and vermicular graphite cast iron[J]. China Foundry, 2022, 19(3): 245-252.
- [2] Wang G H, Li Y X. Thermal conductivity of cast iron:a review[J]. China Foundry, 2020, 17(2): 85-95.
- [3] Holmgren D. Review of thermal conductivity of cast iron[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2005, 18(6): 331-345.
- [4] Wang G Q, Chen X, Li Y X. Fuzzy neural network analysis on gray cast iron with high tensile strength and thermal conductivity[J]. China Foundry, 2019, 16(3): 190-197.
- [5] Velichko A, Wiegmann A, Mucklich F. Estimation of the effective conductivities of complex cast iron microstructures using FIB-tomographic analysis[J]. Acta Materialia, 2009, 57(17): 5023-5035.
- [6] Lian X T, Zhu J N, Dong H, et al. Effects of micro-alloying elements on microstructure, element distribution and mechanical properties in gray irons[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14(4): 1025-1032.
- [7] Liu Y Z, Li Y F, Xing J D. Effect of graphite morphology on the tensile strength and thermal conductivity of cast iron[J]. Materials Characterization, 2018, 144: 155-165.
- [8] 王金国,黄恺,闫瑞芳,等.元胞自动机-有限元法模拟碳当量元素对亚共晶球墨铸铁流动性的影响[J].吉林大学学报:工学版,2021,51(3):855-865. Wang Jin-guo, Huang Kai, Yan Rui-fang, et al. Effect of cellular automaton-finite element method on the fluidity of subeutectic ductile iron[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(3): 855-865.
- [9] Ding X F, Huang H, Matthias W, et al. Development of high performance cast iron with combination of improved mechanical and thermal properties through Mo addition [J]. Metallurgical and Materials Transactions A—Physical Metallurgy and Materials Science, 2018, 49A(8): 3173-3177.
- [10] Maluf O, Angeloni M, Castro D B V, et al. Effect of alloying elements on thermal diffusivity of gray cast iron used in automotive brake disks[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(7): 980-984.
- [11] Wang G Q, Chen X, Li Y X, et al. Effects of inoculation on the pearlitic gray cast iron with high thermal conductivity and tensile strength[J]. Materials, 2018, 11(10): No. 1876.
- [12] 范洪远,李伟,唐正华,等.影响铸铁导热性的工艺因素[J].现代铸铁,2001(2):14-16. Fan Hong-yuan, Li Wei, Tang Zheng-hua, et al. Process factors affecting the thermal conductivity of cast iron[J]. Modern Cast Iron, 2001(2): 14-16.
- [13] Sun Y L. Effect of carbon content on microstructure and properties of gray cast iron[J]. Advanced Materials Research, 2014, 971-973: 44-48.