孕育对合金铸铁活塞铸件石墨分布的影响

潘多龙，杜天彬，封雪平，张俊新，廖治东
（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：试验研究了孕育剂种类、添加量以及孕育方法对高强度合金铸铁活塞石墨分布情况的影响。结果表明：含Sr孕育剂对于高强度合金铸铁活塞的石墨化有较好的促进作用，有效改善了石墨等级和分布的均匀性。选取适当的孕育量并采取倒包随流孕育，在高强度合金铸铁活塞上取得了良好的效果。

关键词：合金铸铁活塞；孕育处理；石墨分布

近年来，随着交通运输产业的高速发展，对于大功率柴油机用活塞铸铁件的要求也日渐提高。EMD系列高强度合金铸铁活塞是我公司与外商合作开发的重点项目之一，活塞属于高温耐磨部件，因此对于铸件技术要求特别高，活塞外轮廓尺寸为Φ230 mm×330 cm，产品重量为50 kg。本体性能和金相检验要求为：抗拉强度≥350 MPa，硬度HBW为220～270；基体组织：珠光体≥90%，石墨形态：A型≥90%，B型＋C型≤10%（尽量减少C型石墨）。允许在非加工面有少量D、E型石墨。石墨长度按ASTM标准：活塞头部端（Ⅰ区，取样区壁厚约25 mm），3～5级；活塞裙部（Ⅱ区，取样区壁厚约20 mm），4～6级；油环槽（Ⅲ区，取样区壁厚约30 mm）3～5级（图1、图2）。

合金铸铁中的石墨片数量越多、尺寸越大、分布越不均匀，对力学性能的影响就越大[1]。孕育的作用是使铸铁在凝固期间促进石墨化，细化晶粒，减少自由渗碳体的含量，均匀铸件不同壁厚位置的显微组织和性能，从而改善合金铸铁的性能。A型石墨是在铸铁石墨形核能力较强、冷却速率较低、过冷度很小的条件下发生共晶转变时形成的。高品质的结构铸件，都希望其具有中等长度的A型石墨。瑞典技术研究学院的 T. Jogren等人研究发现：对灰铸铁件，改进孕育工艺能增加68%的A型石墨，而优化化学成分只能增加34%的A型石墨数量[2]。因此如何获得较好的A型石墨成为了合金铸铁活塞的技术难点。

本文试验着重研究了75SiFe、Si-Ba、Ca-Ba、RE-Ca-Ba和Si-Sr这5种不同的孕育剂、优选出孕育剂的添加量以及孕育方法对合金铸铁活塞石墨分布的影响。

1 试验方法

试验方案：采用100 kg酸性中频感应电炉熔炼EMD系列活塞用合金铸铁，出铁温度1 500 ～1 510 ℃，分别采用5种不同孕育剂，采取倒包随流孕育结合浇注瞬时随流孕育，浇注温度（1 380±10）℃，每箱浇注重量约75 kg。优选出孕育效果最佳的孕育剂后，研究孕育剂加入量对EMD系列合金铸铁活塞金相组织（石墨形态）的影响。每个铸件均取OIL RING GROOVEZONE区域本体金相试块（该处壁厚较厚，为60 mm，较易出现碎块状石墨等石墨形态不佳的现象[3]），采用ASTM GRAPHITE FORM TYPES对试块的石墨形态进行分析。试验所用炉料配比为，生铁：废钢：回炉料=50：14：30，合金材料为铜、镍、钼铁、铬铁、高碳锰铁、硫化亚铁。铸件化学成分范围如表1所示。

试验所选用的孕育剂的化学成分如表2所示，添加量均为0.6%（质量分数，下

作者简介：
潘多龙（1987–），男，工程师，主要研究方向为材料成形。电话：18651981336，E-mail：panduolong@yeah.net

中图分类号：TG257
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2019）12-1350-05

收稿日期：
2019–05–05 收到初稿，
2019–07–25 收到修订稿。

同），孕育处理后停留2 min进行浇注（试验只浇注1件，停留2 min是尽可能与批量生产情况相符）。

2 试验结果与分析

2.1 孕育剂种类对合金铸铁活塞铸件石墨分布的影响

图3和表3是使用5种不同的孕育剂对EMD系列活塞的石墨金相组织影响情况。由图、表可见，五种不同的孕育剂均能使EMD系列活塞获得不低于90%的A型石墨，但A型石墨的占比由75Si-Fe、Si-Ba、高Ca-Ba、RE-Ca-Ba至Si-Sr依次增加，且在使用75Si-Fe孕育剂的EMD活塞金相显微组织中，仍有约10%的碎块状石墨，碎块状石墨具有同球状石墨相同的晶体构造特征，因此认为碎块状石墨是一种变态的球状[3]。使用另三种孕育剂的EMD活塞中也存在2%~5%的碎块状石墨，而使用Si-Sr孕育剂的EMD活塞中，A型石墨近99%，几乎无碎块状石墨存在。除常规的75Si-Fe孕育剂以外，其他几种孕育剂均使EMD系列活塞的石墨长度达到了四级。

采用不同的孕育剂，对石墨形态有一定的影响，除了75SiFe的孕育效果相对比较差以外，其他孕育剂的孕育效果相差不是很大，凡是Ba含量较高的孕育剂孕育之后，组织中总会出现一些碎块状石墨。造成这种情况的原因在于，钡与钙形成的氧化物能够有效地增加共晶团数量，在提高铸件的抗拉强度的同时，产生了过多的共晶团，使石墨生长过程中发生叠加，导致了金相照片中碎块状石墨的出现。Si-Sr孕育剂不含Ba，含有一定量的Sr元素，孕育剂中的Sr与含一定量氧化物杂质的生铁熔体作用后，形成一种具有六方晶系的含Sr硅酸盐相，这种硅酸盐相能够很好地成为石墨的形核质点，而且抗衰退性能优良，Si-Sr孕育剂还能延缓碳、硅的扩散，加强硅的孕育作用，Si-Sr孕育剂加入不会像Ba元素一样增加组织中的共晶团数[4]，避免

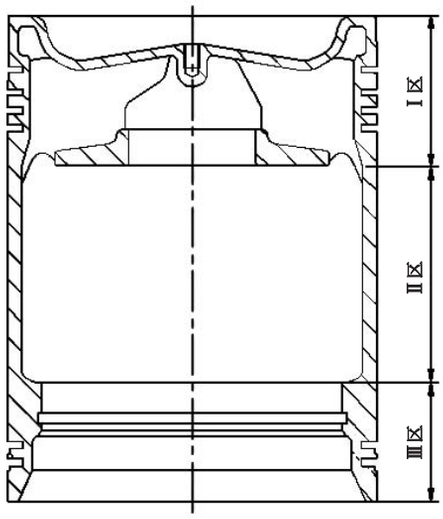


图1 EMD系列低合金铸铁活塞产品剖视图

Fig. 1 Section drawing of EMD series of low alloy cast iron piston

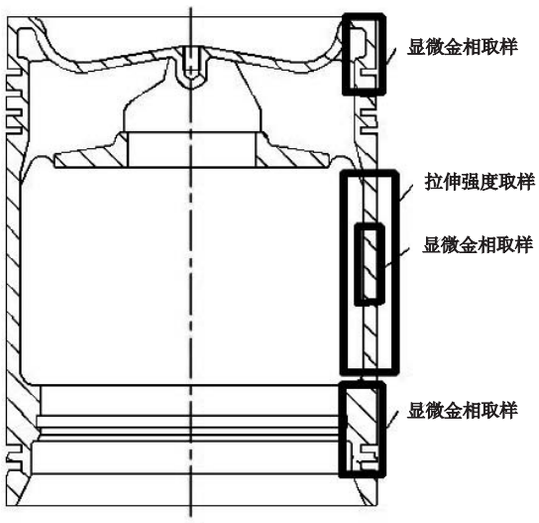


图2 EMD系列低合金铸铁活塞取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing sampling positions on piston

表1 EMD系列合金铸铁活塞铸件化学成分

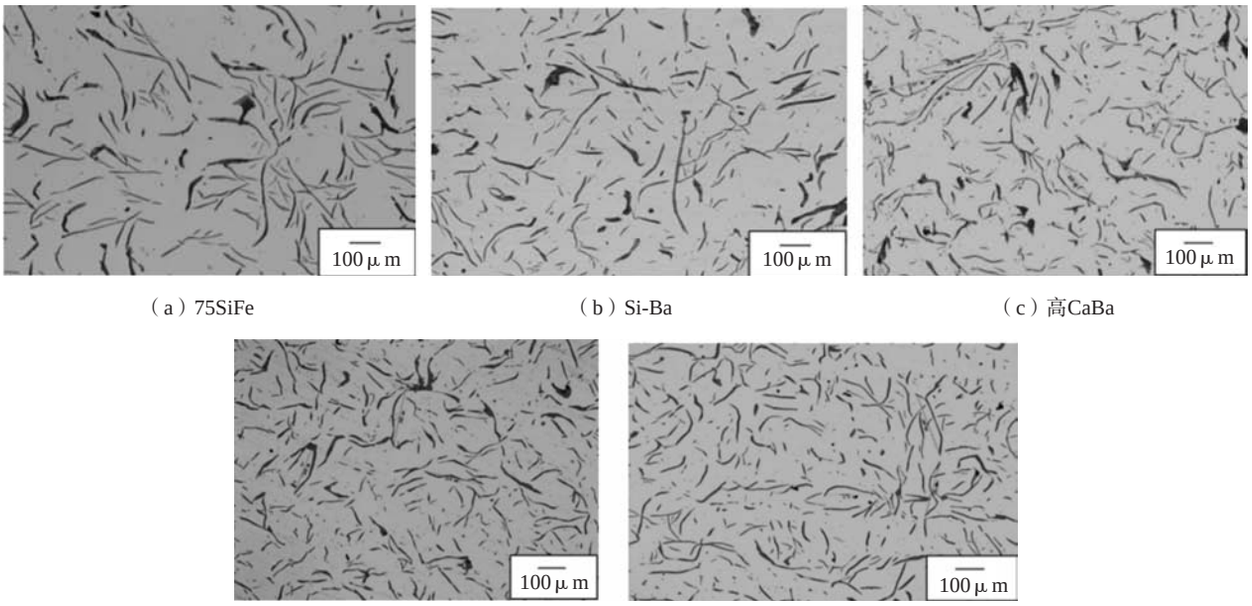
Table1 Chemical composition requirements of EMD series of alloy cast iron piston w_B/%

C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Cr	S	P
3.1~3.3	1.75~1.95	0.6~0.8	0.8~1.0	0.4~0.5	0.5~0.6	0.3~0.4	0.08~0.10	≤0.08

表2 试验用五种孕育剂成分

Table 2 Chemical composition of five kinds of compound inoculant w_B/%

孕育剂种类	Si	Al	Ca	Sr	Mn	Ba	Cr	Re	Fe
75SiFe	75	-	-	-	-	-	-	-	余量
Si-Ba	72.41	1.39	1.45	-	-	2.54	-	-	余量
Ca-Ba	64	1.24	1.45	-	-	10.5	-	-	余量
RE-Ca-Ba	42.18	1.47	1.27	-	9.07	5.45	4.31	5.76	余量
Si-Sr	74.5	0.34	0.066	0.96	-	-	-	-	余量



（a）75SiFe （b）Si-Ba （c）高CaBa

（d）RE-Ca-Ba （e）Si-Sr

图3 采用不同孕育剂得到的EMD系列活塞金相（石墨）图片

Fig. 3 Optical metallographic structures of EMD pistons inoculated by five kinds of inoculant

了碎块状石墨的出现，铸件线收缩敏感性小，消除白口倾向明显，在减少铸件缩松的同时，有效改善了石墨形态，可见，以上五种孕育剂中，Si-Sr孕育剂对于EMD系列合金铸铁活塞的孕育效果最佳。

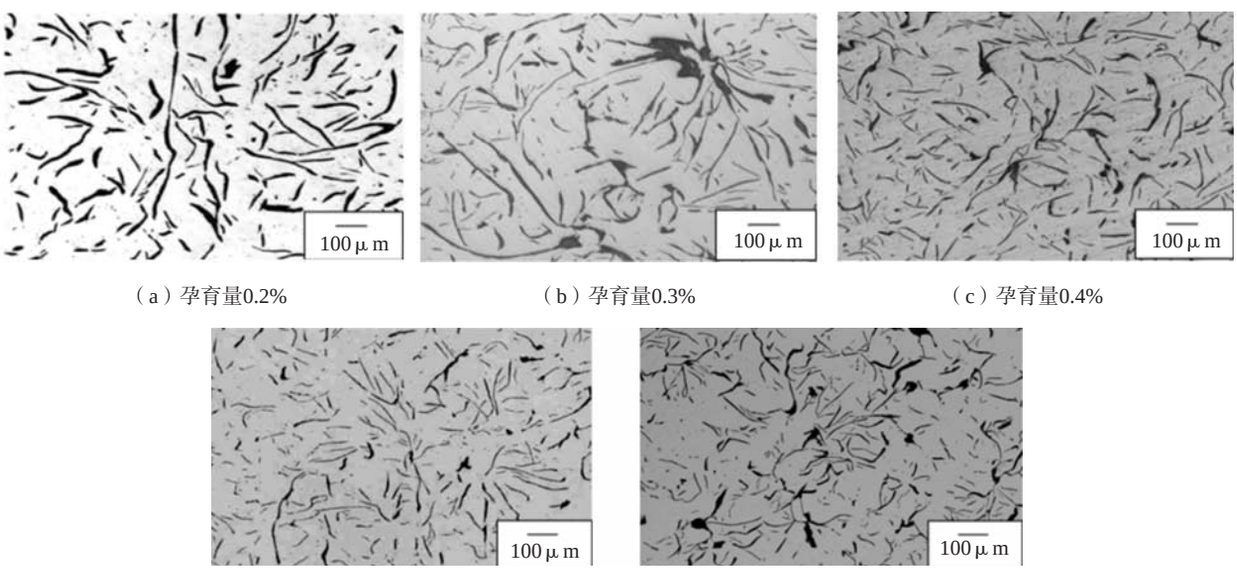
2.2 孕育量对合金铸铁活塞铸件石墨情况的影响

图4和表4为优选出的Si-Sr孕育剂的不同的添加量，对EMD系列活塞金相石墨影响情况。由结果可见，当孕育量只有0.2%~0.3%的时候，EMD系列活塞

表3 不同孕育剂种类条件下的EMD系列活塞石墨情况

Table 3 The shape and amount of graphite in EMD pistons inoculated by different inoculants

孕育剂种类	石墨形态		石墨长度/μm
75SiFe	90% A	10%块状石墨	2~3
Si-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~4
高Ca-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~5
RE-Ca-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~5
Si-Sr	99% A	几乎无块状石墨	4~5



（a）孕育量0.2% （b）孕育量0.3% （c）孕育量0.4%

（d）孕育量0.6% （e）孕育量0.8%

图4 Si-Sr孕育剂的添加量对EMD系列活塞石墨形态的影响

Fig. 4 Optical metallographic structures of EMD pistons inoculated by different amounts of Si-Sr inoculant

的金相组织中，石墨形态分布较不均匀，局部出现碎块状石墨（类C型石墨），长度等级在2~3级，或是D型、E型石墨（图4a、b）。当孕育量增加之后，石墨形态得到明显改善，组织中石墨的不均匀性得到改善，D型和E型石墨逐渐消除，石墨的长度也有所减小。当孕育量增加到0.6%，石墨形态较好，分布均匀，长度等级以4级为主，铸件整个横断面未出现D、E型石墨。继续增加孕育量后，石墨的形态并没有继续改善，反而碎块状石墨的数量开始增加。可见，EMD系列高强度灰铸铁合适的孕育量为0.6%左右，实际生产中可在此含量之间视孕育效果进行调节。

2.3 孕育方法对合金铸铁活塞铸件石墨分布的影响

图5和表5是确定最佳的孕育量后，分别采用常规孕育和倒包随流孕育两种不同的孕育方法，Si-Sr孕育剂对合金铸铁活塞石墨分布情况的影响情况。

常规孕育工艺为：包底预先放上0.2%左右的孕育剂，剩余的0.4%在出完2/3铁液后倒入浇包中，出完剩余铁液，然后搅拌，浇注。倒包随流孕育工艺为：先将铁液倒在中间包中做净化处理，然后由中间包倒入浇注包中，在这个过程中将0.6%全部孕育剂随铁液流加入，然后直接浇注。

由试验结果可见，倒包随流孕育法获得的石墨显微组织要明显优于常规孕育。这是因为倒包随流孕育与常规孕育方式相比，有以下优势。

（1）降低孕育温度。常规孕育直接从熔炼炉中出铁液，孕育温度一般在1 470～1 500 ℃之间，而倒包随流孕育结束之后可以直接进行浇注，孕育温度更加接近浇注温度，一般在1 420～1 450 ℃之间，从而减缓了孕育衰退。

（2）提高孕育的均匀性。倒包随流孕育提高了整个浇包内铁液孕育的均匀性，而常规的冲入、机械搅拌方式很难达到。

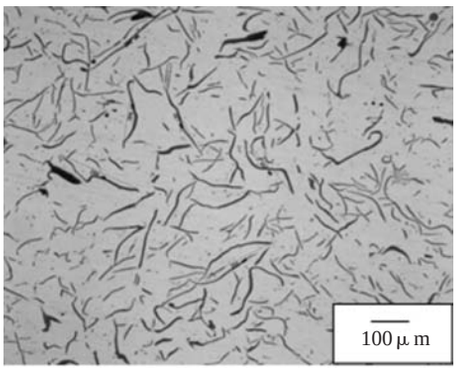
（3）缩短孕育至浇注时间间隔。批量生产时，倒包随流孕育至开始浇注的时间一般要比常规孕育节省2 min左右。

在以上三点优势的结合下，倒包随流孕育提高了孕育的均匀性、减缓了孕育衰退，从而有效改善了EMD合金铸铁活塞的石墨形态和显微组织的均匀性。

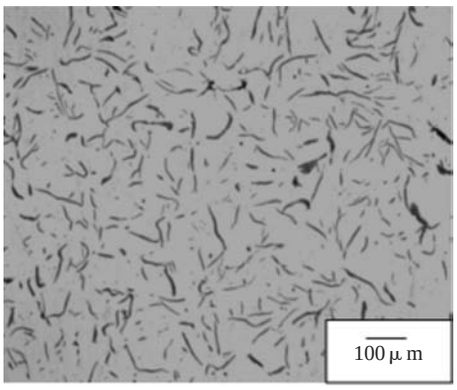
基于以上试验结果，选择了以Si-Sr为孕育剂，孕育剂加入量控制在0.6%，及倒包随流孕育的试验方案对EMD系列高强度合金铸铁活塞进行了试制生产，最终活塞铸件本体抗拉强度可达371 MPa，硬度HBW为263，珠光体（体积分数）为95%，石墨形态为99％A型，活塞头部端、裙部及油环槽三个区域的石墨长度均达到了5级，试制产品一次性通过了客户首件鉴定，

表4 Si-Sr孕育剂的添加量对EMD系列活塞石墨形态的影响
Table 4 Effect of added amount of Si-Sr inoculant on the shape and amount of graphite in EMD pistons

孕育剂种类	石墨形态		石墨长度/μm
75SiFe	90% A	10%块状石墨	2~3
Si-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~4
高Ca-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~5
RE-Ca-Ba	95% A	5%的块状石墨	3~5
Si-Sr	99% A	几乎无块状石墨	4~5



（a）常规孕育



（b）倒包随流孕育

图5 不同孕育方法对合金铸铁活塞铸件石墨分布的影响
Fig. 5 Optical metallographic structure of EMD pistons inoculated by Si-Sr inoculant and different inoculation methods

表5 Si-Sr孕育剂的添加量对EMD系列活塞石墨形态的影响
Table 5 Effect of inoculation method on the shape and amount of graphite in EMD pistons

孕育剂种类	石墨形态		石墨长度/μm
常规孕育	98% A	约2%碎块状石墨	3~5
倒包随流孕育	99% A	几乎无碎块状石墨	5~6

试制达到了预期目标，取得了良好效果。

3 结论

（1）在75Si-Fe、Si-Ba、高Ca-Ba、RE-Ca-Ba、和Si-Sr五种不同的孕育剂中，Si-Sr孕育剂对EMD系列高强度合金铸铁活塞孕育效果最佳，得到了ASTM 5级为主的A型石墨，且石墨均匀性很好，块状石墨明显减少，占比小于2%，满足客户技术要求，适用于EMD系列活塞的批量生产。

（2）过少的孕育量会导致部分区域出现D、E型石墨，孕育量过大则会增加成本并产生石墨叠加现象，出现碎块状石墨。EMD系列活塞中Si-Sr孕育剂的最佳添加量为0.6 %。

（3）使用倒包随流孕育的方法代替常规孕育方法，使得有效孕育时间延长、孕育的均匀性大大提高，最终能够获得更好的石墨分布。

参考文献：

[1] 陶令恒. 现代铸铁学 [M]. 北京：冶金工业出版社，1993.

[2] SJOGREN T，PERSSON P E，UDROIU A，et al. 灰口铸铁中石墨形态的优化 [J]. 铸造设备与工艺，2010（5）：42–45.

[3] 柳百成，卡尔·罗伯尔，基莫勒T，等. 用扫描电子显微镜研究铸铁中的石墨形态 [J].清华大学学报，1980，20（3）：25–41.

[4] 王奎，任凤章，王顺兴，等. 不同孕育剂对缸体用灰铸铁加工性能的影响 [J]. 拖拉机与农用运输车，2008，35（6）：110–113.

Effect of Inoculation on Graphite Distribution in Alloy Cast Iron Pistons

PAN Duo–long, DU Tian–bin, FENG Xue–ping, ZHANG Jun–xin，LIAO Zhi–dong
(CSR Qishuyan Locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:
The influence of the type and amount of inoculant, and inoculation method on the shape, amount and distribution of graphite in the alloy cast iron piston was investigated. The results show that the inoculant containing Sr has a better inoculating effect on the alloy cast iron with high strength. This inoculant can effectively improve the shape, and distribution uniformity of graphite in the alloy cast iron pistons via adding proper amount of inoculant in the alloy cast iron and choosing an effective stream inoculation process that pours iron melt from a ladle to another ladle before pouring into the molds.

Key words:
alloy cast iron piston; inoculation; graphite distribution

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）