球铁的缩松及QKS抗缩松孕育剂的应用

金永锡

(上海圣德曼铸造有限公司,上海 201805)

摘要:介绍球铁件抗缩孔、缩松专用孕育剂的作用机理:在孕育剂中加入一定浓度的非金属元素S和O,后者能与孕育剂中的金属元素产生较多数量的石墨核心。加入这种孕育剂能使球铁共晶凝固后期析出大量细小的石墨球,此时冒口的补缩作用早已停止,这种后期析出石墨产生的膨胀能有效地抵消球铁凝固后期的收缩。试验表明,这种孕育剂对复杂铸件热节部位的缩松缺陷消除尤其有效。

关键词:球铁;缩孔、缩松;专用孕育剂

中图分类号:TG255 **文献标识码**:B **文章编号**:1003-8345(2008)02-0030-07

Development and Application of QKS Inoculant for Reducing Shrinkage Tendency of Nodular Iron Castings

JIN Yong-xi

(Sentman Foundry Co. Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract: The shrinkage reducing mechanism of a new developed special inoculant used for reducing shrinkage tendency of nodular iron castings was described: Some concentration level of non-metal elements oxygen and sulphur was added into the inoculant. These two elements can combine with the metal elements contained in the inoculant and produce a large numbers of graphite nuclei. It is possible by adding this inoculant to promote precipitation of a large numbers of small graphite nodules in the later period of eutectic solidification of nodular iron. The feeding effect of the feeder has stopped before this period, the expansion produced by these graphite nodules precipitating in the later period can effectively compensate the later period contraction of nodular iron.

Key words: nodular iron; shrinkage cavity and porosity; special inoculant

球铁铸件的缩孔和缩松缺陷一直是令铸造工作者十分头疼的问题,而随着工业技术的发展,现今用户对铸件致密度和无缺陷的要求越来越高。以汽车球铁铸件为例,不仅对铸件的化学成分、材料性能、表面质量有严格的要求,而且对铸件内部致密度的要求也很严格。例如,对球铁曲轴内部致密度要求做本体解剖和X射线探伤,对加工后的表面进行100%磁粉探伤;又如,制动钳等安全件在认可前要进行纵向和横向的逐片解剖,然后进行X射线探伤,均不允许有缩孔和缩松缺陷。然而,这些球铁件由于材料、工艺和铸件结构等方面的原因,要达到这些要求比较困难。

收稿日期:2007-10-30 修定日期:2007-12-14

作者简介:金永锡(1943-),男,回族,教授级高工,总经理顾问,主要从事铸造工艺及材料的研究工作。

1 球墨铸铁的凝固特点和缩孔缩松倾向

为说明问题,首先对球墨铸铁的凝固特点进行分析。

(1)由于球化剂的作用,球铁共晶凝固方式是离异共晶凝固,球状石墨和奥氏体两个相的析出在时间和场合上都是分离的,石墨在先,奥氏体在后,两个相没有灰铁共晶凝固那样的共同结晶前沿。石墨球是在奥氏体外壳包围下长大,石墨长大的膨胀力全部通过奥氏体壳的接触传递到铸件的外壳,所以球铁的石墨化膨胀比灰铁大得多。据资料[1]介绍,在湿型铸造时,球铁的共晶膨胀力约为灰铁的5倍。而球铁共晶凝固的过冷度较大,共晶温度较低,共晶时间相对滞后。使共晶膨胀不能像灰铁那样充分抵销液态收缩和凝固收缩。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 球铁共晶凝固是容积凝固,内生生长方式使其在整个凝固过程中糊状外壳没有承载能力,故石墨化膨胀力几乎全作用在铸型上,若是湿型、壳型、紧实不够的树脂砂型等刚性较差的铸型,就会发生型壁位移使铸件尺寸胀大,若没有足够的铁液补充,必然产生缩孔和缩松。

(3) 球铁石墨形核和生长过程决定了其糊状凝固的特点,凝固后期未凝固的液相被相互搭接的晶粒或枝晶网络分割成许多孤立的小熔池,使液态补缩十分困难。而且,由于球铁的共晶团数是灰铁的 50~200 倍[2],这些小熔池比灰铁分散得多, 凝固收缩产生的体积亏损更加难以得到补偿,因而容易形成缩孔和缩松。

这三个凝固特点决定了球墨铸铁具有比灰铁大得多的缩孔、缩松倾向。

2 解决球墨铸铁件缩孔缩松缺陷的途径

众所周知,防止和消除球铁铸件的缩孔缩松主要有以下途径。

(1) 改进铸件的结构设计,尽可能考虑铸件的工艺性,尽量减少几何结构上的热节。或者使之位于容易补缩的位置,这对于形状结构复杂汽车铸件来说是很重要的。由于结构设计不尽合理,铸造工艺性很差的球铁铸件的缩孔、缩松常使铸造工作者头痛不已,往往要花费更多的时间和更大的成本才能解决。

(2) 进行合理的铸造工艺设计,计算和设置合理的浇注系统和补缩冒口。这一点周亘先生在球墨铸铁件应当如何补缩的系列文章中作了详细阐述,本人十分赞同其观点[3]。

(3) 提高铸型的刚度或选用刚性铸型。干型砂型、水泥砂型,经充分紧实和固化的树脂砂型可认为是能防止型壁移动的刚性铸型。在较低浇注温度和合理的浇冒口系统条件下能有效防止缩孔缩松缺陷产生。采用高比压湿砂型由于浇注后水分迁移层的存在, 刚度虽较一般湿型好,但仍然是非刚性弱砂型[4]。

(4) 提高铸件的冷却速度,对铸件的凝固方式有重要影响。冷却速度越快越易从容积凝固转变为逐层凝固,缩松易转变为集中的缩孔,从而通过补缩解决。因此,工艺上常采用冷铁加快热节冷却,配合冒口补缩解决缩松缩孔缺陷。

(5) 壳型背面填充钢丸紧固、铁型覆砂工艺、金属型工艺既是加快冷却速度又是在不同程度上提高铸型刚度来解决缩孔缩松缺陷的有效途径。

(6) 调整和控制球铁件的化学成分,如提高碳当量,控制残余镁量和残余稀土量,改进熔炼过程,提高铁液冶金质量等也是消除缩孔缩松缺陷重要的辅助手段。

虽然有以上途径来解决球铁件的体积亏损缺陷,但在实际球铁铸件生产中,有时仍感到不够和困难。如汽车球铁件,基本上是小模数、结构形状复杂的高性能薄壁小件,本身缩孔缩松倾向大;而且由于批量大,适合于采用高速湿型造型线生产,铸型刚度较低;有些部位由于几何位置和工艺局限,不能设冒口或补缩距离过大;下冷铁提高冷速的方法在高速造型线上亦难以采用;因此缩松问题往往难以被解决。

是否有另一种途径来帮助我们解决此类缩松问题呢?自 2002 年以来,在欧洲出现了抗缩孔缩松的孕育剂和球化剂,采用这种专利的新型孕育剂和球化剂进行球化或孕育处理,可以减少或消除球铁件的缩孔和缩松。

3 欧洲的专利抗缩松孕育剂

3.1 Ultroseed 抗缩孔缩松孕育剂[5]

在球铁生产的传统观念中,S 和 O 被看作是有害元素。S 是很强的反球化元素,一般要求原铁液 w(S) 量小于 0.02%;对要求高的球铁件,原铁液 w(S) 量要求小于 0.012%。球铁件希望采用电炉熔炼,铁液经过热静置后 w(O) 量小于 50 ppm。球化处理时,Mg 与铁液中的 S、O 反应生成 Mg 的硫化物和氧化物,即脱 O、脱 S,为球状石墨的形核和生产创造条件, 因此对 O、S 避之尤不及。

但新型孕育剂的发明者从另一角度看问题。从球铁石墨形核机理的研究出发,认为在球状石墨中心存在尺寸约 1 μm 的外来夹杂微粒,是球状石墨的晶核,这些微粒具有双层结构,晶核最中心部分是由 Mg 和 Ca 的硫化物组成, 其尺寸约0.05 μm, 晶核的外层则由 Mg、Si 的氧化物及其硅酸盐相组成,因此 O 和 S 是石墨球形核的重

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

要元素。使用含 Ce、Ca、Al 的孕育剂后，外层的镁硅酸盐被孕育剂中的活性元素 Ce、Ca、Al 等硅酸盐取代或覆盖。这些活性元素的硅酸盐相与石墨的适配度小，成为有效的石墨结晶核心，见图 1[5]。

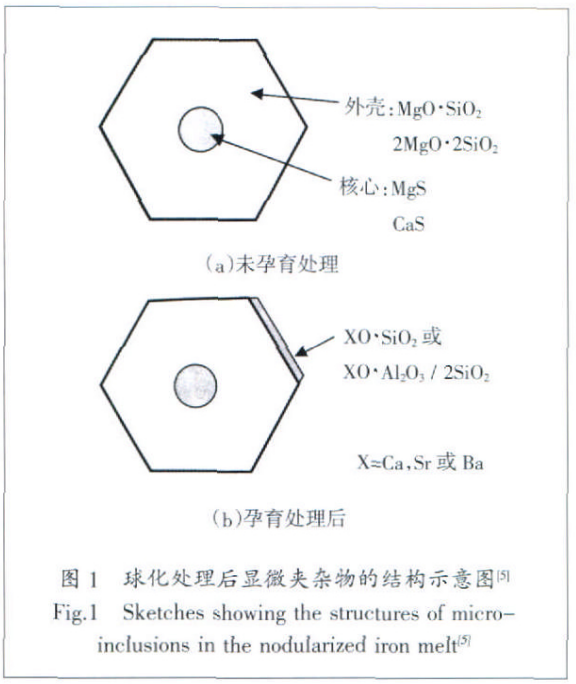


图 1　球化处理后显微夹杂物的结构示意图[5]
Fig.1　Sketches showing the structures of micro-inclusions in the nodularized iron melt[5]

球化处理后，铁液中的 S、O 大量损耗，进入熔渣，使铁液中 S 和 O 数量很有限，孕育处理的有效程度被可能形成的石墨核心数量所限制。因此新孕育剂思路是通过引入一定浓度的非金属元素 S 和 O，使之能与孕育剂中的金属元素产生更多数量的石墨核心。这就产生了含 Ca、Ce、S、O 的硅铁孕育剂- Ultroseed。

3.2　抗缩孔缩松孕育剂的作用机理

孕育剂中金属元素 Ca 在孕育时是主要的形核元素，Ce 与 S 及 O 有强的亲和力，能形成非常稳定的 Ce 的氧化物、硫化物和氧-硫化物，是球墨形核的重要物质，Ce 还能中和微量元素的有害作用。

这种孕育剂的直接效果是大大增加了细小的石墨球数，更重要的是这些细小的石墨球是在共晶凝固的后期析出，而后期产生的石墨化膨胀才能有效地抵消球铁的凝固收缩。

此时冒口的补缩作用早已停止，后期大量石墨球的析出和石墨化膨胀大大减少缩孔缩松的形成倾向，对复杂铸件热节部位的缩松缺陷消除尤其有效。

通过热分析仪冷却曲线的分析，以及石墨尺寸大小悬殊不均匀分布，可以证明大量细小石墨球是在共晶凝固后期产生的。

但是使用该孕育剂时，必须改变要求石墨大小均匀分布的传统观念，因为大小不同的石墨球提高球铁铸件的致密度和力学性能，是比尺寸较大均匀分布石墨球更好的石墨结构。

3.3　阶梯试块不同截面上石墨球数的试验结果

用该孕育剂与 Sr 孕育剂分别浇注的 5、10、20、40 mm的阶梯试块上比较石墨球数，见图 2[5]。

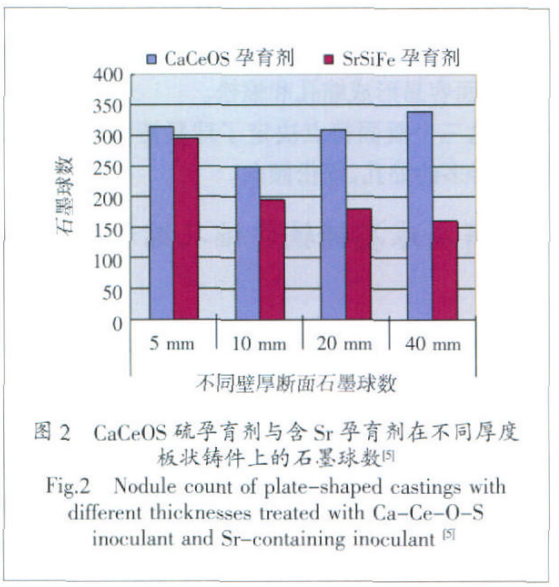


图 2　CaCeOS 硫孕育剂与含 Sr 孕育剂在不同厚度板状铸件上的石墨球数[5]
Fig.2　Nodule count of plate-shaped castings with different thicknesses treated with Ca-Ce-O-S inoculant and Sr-containing inoculant [5]

SrSiFe 孕育剂在 5 mm断面上石墨球数与 CaCeOS 孕育剂相近，为 300 个/mm²；但随着壁厚增加，其石墨球数明显减少，40 mm断面上仅为 150 个/mm²。BaSiFe、75SiFe 等大多数商业孕育剂都是如此。

而 CaCeOS 孕育剂显示出完全不同的变化，壁厚对石墨球数影响很小，几乎都在 300 个左右，在 40 mm断面上石墨球数量反而更多些，达 340 个/mm²。

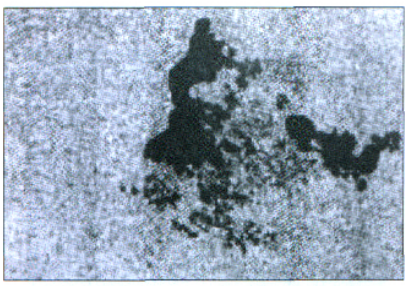
以上是文献[5]的报道，我们在试验工场多次浇注阶梯试块进行试验，得到了同样的结果。

3.4　在十字试块热节截面上收缩缺陷的试验结果

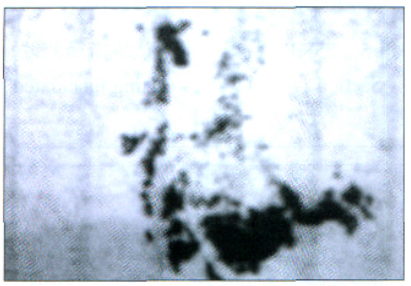
由于较厚断面上石墨球数的大量增多，能使铸件热节部位的缩孔和缩松缺陷大大减轻或消除。采用 3 种不同孕育剂浇注的十字试块断面收缩情况非常不同，见图 3[5]。

使用含 Ba 和含 Sr 孕育剂的十字试块热节

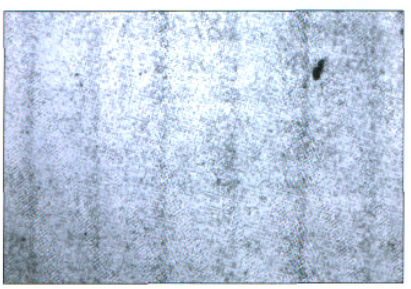
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



含 Ba 孕育剂



含 Sr 孕育剂



含 CaCeOS 孕育剂

图 3　用不同孕育剂处理的十字形断面铸件的缩孔对比[5]

Fig.3　Shrinkage comparison of cross-shaped castings treated with different inoculants[5]

断面有较大缩孔缩松，而 CaCeOS 孕育剂使缩孔基本消除。

前两者产生的石墨球数约 200~220 个/mm^2，而后者的球数高达 350 个/mm^2。

较厚断面后期活化的成核部位产生第二次石墨形核，这种后期的石墨化膨胀有效抵消了收缩。

我们在试验工场多次浇注的十字试块解剖亦证明以上试验结果。

利用 CaCeOS 孕育剂的抗缩松性能，我们在 EA111 曲轴和荣威 750 曲轴等铸件上使用该孕育剂，消除了在曲轴断面以及平衡块与曲拐颈交界处易出现的缩松。但该孕育剂为挪威 Elkem 公司的进口产品，价格 23 000~26 000 元/t，使用成本过高，迫切需要试制一种有自主知识产权的国产抗缩松孕育剂来代替。历时一年多，QKS 孕育剂取得了成功。

4　QKS 孕育剂的研制

4.1　QKS 孕育剂的研制思路

根据对 Ultraseed 的 CaCeOS 孕育剂的抗缩松机理的分析，新孕育剂中必须含有 S 和 O 是肯定的。

在孕育剂中可使用不同的稀土元素，如 Ce、混合稀土、La 等，要进行试验，以比较其对球铁凝固时石墨球数和缩松倾向的影响。

孕育剂中添加 Bi，并与稀土复合使用，已被证明能提高孕育效果，增加石墨球数，减小白口倾向，也是可考虑的孕育元素。

Si 是孕育剂的基本元素，其既是石墨晶核的主要元素，又是产生铁液中 C 活度起伏的重要因素。孕育剂中 Si 提供的 C 高活度微区为异质成核创造了必要的条件。因此孕育剂中含有较高 w(Si) 是必须的。

4.2　QKS 孕育剂试验

试验铁液在 150 kg 中频感应炉熔化，用冲入法进行球化处理。控制化学成分为：w(C) 3.7%~3.8%，w(Si) 2.6%~2.7%，w(Mn) 0.4%~0.5%，w(P) <0.05%，w(S) <0.015%，w(Mg) 0.04%~0.05%。

浇注 5 mm、10 mm、20 mm、40 mm 阶梯试块和十字形缩孔(松)试块。

对阶梯试块各截面进行金相分析，统计石墨球数，并比较 40 mm 截面的缩松情况。

解剖十字试块评定缩孔缩松大小。

4.3　试验结果

用 3 种配方的孕育剂与进口 Ultraseed 孕育剂及 75SiFe 孕育剂进行对比试验。

石墨球数对比如表 1，石墨球大小及分布见图 4，十字试块缩孔缩松大小见图 5~7。

4.4　试验结果讨论

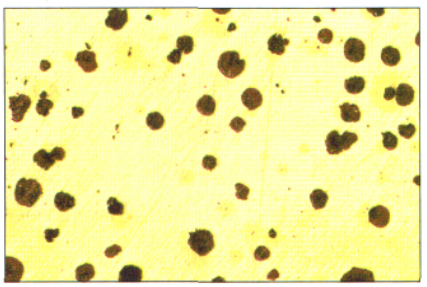
在石墨球数方面，75 SiFe 孕育剂最少，进口 Ultraseed 孕育剂次之，QKS 配方 3 孕育剂最多；尤其在 40 mm 截面上，进口孕育剂与 QKS 孕育剂石墨球数都能保持 300 个以上，且后者比前者

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

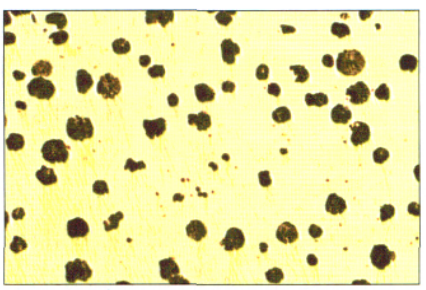
表 1　石墨球数对比

Tab.1　Graphite nodule count comparison

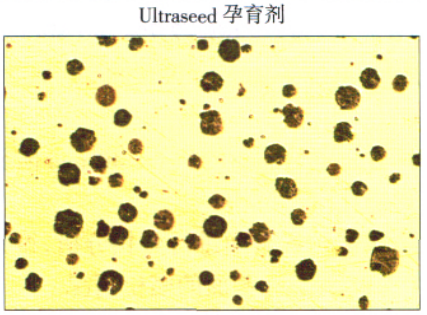
孕育剂种类	孕育量（包内加入）	阶梯试块各截面石墨球数 个/mm²			
		5 mm	10 mm	20 mm	40 mm
Ultraseed 孕育剂	0.3%	608	365	297	309
75 硅孕育剂	0.3%	416	220	210	210
QKS 孕育剂配方 1	0.3%	612	300	275	276
QKS 孕育剂配方 2	0.3%	544	334	305	319
QKS 孕育剂配方 3	0.3%	704	415	371	350



75SiFe 孕育剂



Ultraseed 孕育剂



QKS 孕育剂

图 4　在 40 mm 截面上石墨照片　100×

Fig.4　Graphite size and distribution on the section of 40 mm　100×

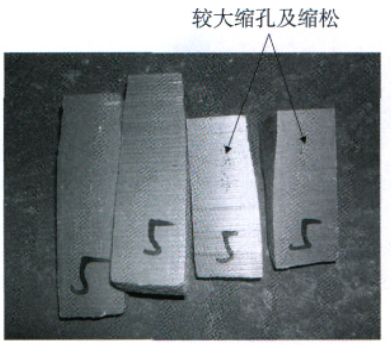


图 5　75SiFe 孕育剂十字试块断面照片

Fig.5　Section photo of cross casting inoculated with 75SiFe

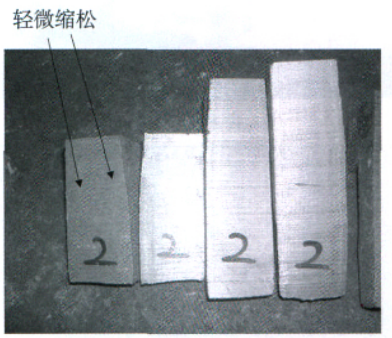


图 6　Ultraseed 孕育剂十字试块断面照片

Fig.6　Section photo of cross casting inoculated with Ultraseed

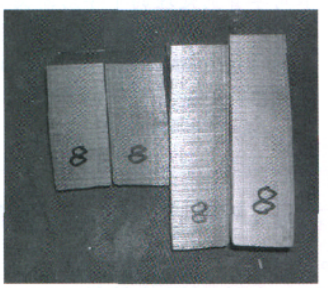


图 7　QKS 孕育剂十字试块断面照片

Fig.7　Section photo of cross casting inoculated with QKS

更多（见图 8）。

石墨球的大小分布对比：75SiFe 孕育剂尺寸较大且比较均匀，而进口孕育剂和 QKS 孕育剂分布情况是：少量较大石墨球和大量细小石墨球，石墨球大小不均。这是凝固后期析出大量石墨球的特征，是减少或消除缩孔缩松所希望得到的石墨分布形式。

由于存在大量来不及长大的细小石墨球，减少了石墨球长大时产生石墨球畸变的可能性，使球化率得到提高。

从十字试块解剖照片可见：75SiFe 孕育剂的缩孔缩松较大，进口孕育剂有轻微的缩松，而 QKS 孕育剂则完全消除了缩孔和缩松。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

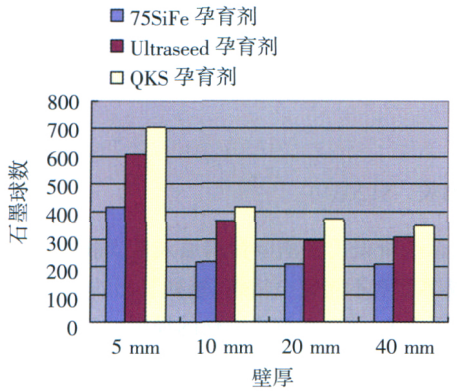


图 8 石墨球数对比

Fig.8 Graphite nodule count comparison

5 QKS 孕育剂的初步应用实例

实例之一：上海圣德曼铸造公司生产的 EA1111.6L **曲轴采用钢丸背壳型铸造，底注立浇工艺。试制时铸件经解剖发现在轴径中心部位有缩孔，经工艺改进和使用** 0.5%Ultraseed **孕育剂包内孕育后，缩孔消除。现改用** QKS **孕育剂** 0.12%**随流孕育来替代进口孕育剂，多次生产性试验，经解剖没有发现缩孔缩松。加工料废** 1%**以下。图** 9 **为曲轴纵剖面解剖照片。**

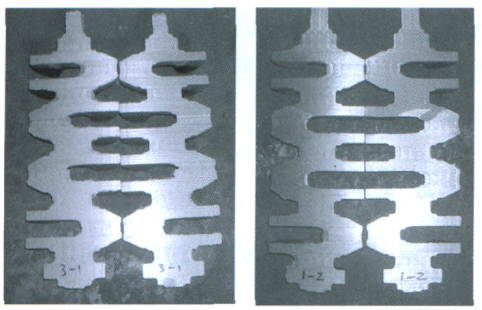


图 9 曲轴纵剖面解剖照片

Fig.9 Photos of dissected crankshafts

实例之二：上海圣德曼铸造公司生产荣威 750 **六缸曲轴，采用钢丸背壳型铸造，底注立浇工艺。精加工后** 100%**磁粉探伤时，曾在曲拐颈与平衡块交界处出现磁痕缺陷，报废量大。经反复分析，确定是表面轻微缩松所致，经工艺改进和采用** 0.5%Ultraseed **孕育剂包内孕育后得到解决。现改用** QKS **孕育剂** 0.12%**浇口杯孕育代替进口孕育剂也取得成功（见图** 10**）。**



图 10 荣威 750 六缸曲轴显微缩松位置

Fig.10 Micro-shrinkage porosity location of Rongwei 750 crankshaft with six cranks

实例之三：上海圣德曼公司生产的 CD345 **转向节，材料要求为** QT400-18，**由于在本体取样部位存在微量缩松（图** 11），**试棒力学性能中伸长率有时不能达标。为此改用** QKS **孕育剂随流孕育，有效地解决了显微缩松问题，使试棒力学性能稳定达到牌号要求。**



图 11 CD345 转向节试棒取样部位及缩松位置

Fig.11 Sampling location and shrinkage location of CD345 knuckle

实例之四：戚墅堰某厂生产涡轮增压器壳，使用 SiBa **孕育剂随流孕育，废品率较高；试用** QKS **孕育剂后废品率大幅下降。对比试验中使用** SiBa **孕育剂的废品率为** 20%，**使用** QKS **孕育剂后，废品率下降为** 4.5%。

实例之五：无锡某厂生产电梯绳轮盘，在绳轮槽和法兰盘交界热节处加工后出现缩孔缩松，废品率高，使用 QKS **孕育剂后，生产** 8 **件经加工后没有缩孔缩松，全部合格。**

6 结束语

（1）**自行研制的** QKS **孕育剂在增加石墨球**

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

灰铸铁孕育的几个问题

肖　彬

（韶关金宝铸造有限公司，广东　韶关　512031）

摘要：为了使灰铸铁得到较好的孕育效果，进行了孕育量的生产试验，认为降低出铁槽孕育剂加入量，同时增加随流孕育加入量是解决孕育衰退的最好方法；为了避免随流孕育量过大造成孕育剂不能完全熔解，选择了出铁槽0.3%+随流0.18%的孕育方式。介绍了孕育剂的选择、使用和贮存方法，特别提出了含Sr孕育剂解决缩松的局限性问题，以及孕育不良或过量对铸件品质的影响。

关键词：灰铸铁；孕育；孕育剂；白口；随流孕育

中图分类号：TG223　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1003-8345(2008)02-0036-04

Some Problems with Inoculation of Gray Irons

XIAO Bin

(Cambo Foundry Co. Ltd., Shaoguan　512031, China)

Abstract: In order to improve the inoculation effect for gray irons, an experiment to find the proper inoculant addition amount was conducted under conditions of practical production. It was concluded that reducing inoculant amount added in tapping launder and increasing stream inoculant amount is the best way to avoid inoculation effect fading. In order to avoid that the stream inoculant couldn't be melted completely due to addition amount being too large, the inoculant addition amount of two inoculation steps was adopted as 'adding 0.3% in the launder+ adding 0.18% in pouring stream'. The selection, usage and storage of inoculant were described. It was specially pointed out that Sr-containing inoculant only has a little shrinkage porosity reducing effect, and the negative influence of insufficient inoculation on casting quality was also mentioned.

Key words: gray iron; inoculation; inoculant; chill; stream inoculation

我公司拥有1.5 t中频炉3台，1 t保温浇注炉1台，迪砂线主要以生产冰箱压缩机件和小型汽车零部件为主。自2000年投产以来，为改善和提高铁液质量，使用过的孕育剂不下十种，其间遇到过各种问题，走过不少弯路，现总结出来供同行参考。

收稿日期：2007-11-06　　**修定日期**：2008-01-05

作者简介：肖彬（1948.12-），男，汉族，广东英德人，1969年毕业于广东省机械学校（现广东工业大学），工程师，从事铸造工作四十余年，现主要从事铸造熔炼技术工作。

1　孕育量的确定

孕育量一般是根据产品的金相组织确定的，要考虑的金相组织主要有石墨形态及长短、是否

数和抗收缩缺陷方面已达到或超过了进口的Ultraseed孕育剂的水平，现已投入生产性试验或应用。

（2）由于球铁收缩的体积缺损不是光靠石墨化膨胀就能解决的，因此必须强调球铁件收缩缺陷主要还是要依靠浇冒口补缩工艺以及提高铸型的刚度、控制合理的材料成分等传统的办法来解决，抗缩松孕育剂只是当收缩缺陷较小而且冒口补缩、冷铁等办法使用有困难时的一种补充手段或辅助手段。

参　考　文　献

[1] 陈国桢. 铸件缺陷和对策手段 [M]. 北京：机械工业出版社 2004:155.
[2]钱立.铸铁的孕育[M]. 北京:北京科学技术出版社,1987:197.
[3]周亘.球铁件应当如何补缩[J]. 现代铸铁,2005,25(3):9.
[4]Rio Tinto Iron & Titanium Inc. Ductile Iron The essentials of gating and risering system design [R]. 2000.
[5]斯卡兰. 石墨成核、生长与球铁收缩的控制 [J].造型材料,2003(2):1.

（编辑：袁亚娟）

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net