

# 薄壁高强度灰铸铁件材质 及其孕育剂的研究\*

周世康 刘贤贵 向庭英 甘智勇 应 予 严启光

(北京农业工程大学)

(北京内燃机总厂)

**【摘要】** 本文根据80年代更新换代发动机的机体、缸盖等薄壁高强度灰铸铁件的结构特点和对材质的技术要求,结合我国国情,对稀土钙钡孕育剂及其应用条件和应用方法、铁水的五元素、碳当量、硅碳比、合金元素、氧化、冶金和工艺因素进行系统研究,完善了以“强化孕育为核心、较高碳当量为前提、铁水质量为基础、综合治理为保证”的一整套强化孕育方法,并在多厂家批量生产中应用,取得良好的技术经济效益。

**关键词** 薄壁 高强度 灰铸铁 孕育

我国引进80年代更新换代发动机的机体、缸套具有精化、强化和轻型化的特点,是典型的薄壁高强度灰铸铁件,其最小壁厚为3.5~4.5mm,强度和硬度要求高(常用HT250,铸件本体强度 $\geq 200\text{MPa}$ ,指定部位硬度 $\geq 170\text{HB}$ ),要求材质白口倾向小,断面均匀性好( $\Delta\text{HB} \leq 30$ ),工艺性能、抗热冲击热疲劳性能和耐磨耐蚀性好,弹性模量高,缩松渗漏倾向小等。

用 $\text{Re}-\text{Ca}-\text{Ba}$ 孕育剂及其强化孕育方法,冲天炉熔炼无合金批量生产从西德引进的具有80年代国际水平的最小壁厚4.5mm的FL913/912机体(HT250),四年共生产5100件。冲天炉-工频电炉双联熔炼批量试制从日本引进的具有80年代国际先进水平的最小壁厚为3.5mm的五十铃(B493)机体、缸盖(HT250)共1000件。

## 一、孕育剂的选择和研究

本研究经过筛选和系列对比试验<sup>[1]</sup>,在 $1^*\text{Re}$ 的基础上,通过“复合”和“调整成分”的途径改造,研究出稀土钙钡和低稀土两种符合我国国情的灰铸铁高效长效孕育剂。它们能同时提高强度、硬度和减少白口倾向,加入量少(0.1~0.2%),抗衰退能力强,断面均匀性好,共晶团恰当,能减少缩松渗漏倾向和改善切削加工性能。不但在较高碳当量,甚至在 $\text{C}_s \geq 4.2\%$ 的高碳当量铁水中都有良好的孕育效果。在较大的温度范围(1380~1460℃)和硫量

\* 本研究是机械电子工业部基金项目

范围(0.04~0.12%)都适用。

经测定,稀土钙钡熔点较低(1100~1180℃),比重较大(4.4~4.8g/cm<sup>3</sup>),但较Si75吸收率差,浮渣多,因此,稀土钙钡和低稀土孕育剂各有其使用条件和使用方法,且体现在铁水的质量以及冶金和工艺因素中。

## 二、关于铁水质量

优质铁水包括“高温、纯净和稳定”三方面意义,主要涉及下列的因素。

### 1. 碳当量和五元素的影响

统计分析用稀土钙钡孕育剂及其强化孕育方法批量生产机体、缸盖等灰铸铁件的数据,得下列数学模型和图1、图2的关系。

$$\sigma_s(\text{MPa}) = 980.4 - 172.5C_E + 87.1Mn - 486.15S - 898.9P$$

$$HB = 345 - 44.3C_E + 10.4P + 135S$$

$$(n = 98, S = 3.56, R = 0.923)$$

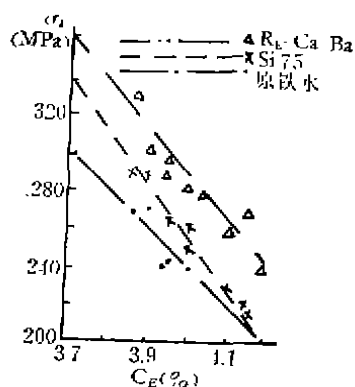


图1 碳当量对孕育前后抗拉强度的影响

Fig. 1 The effect of carbon equivalent on strength of extension before and after inoculation

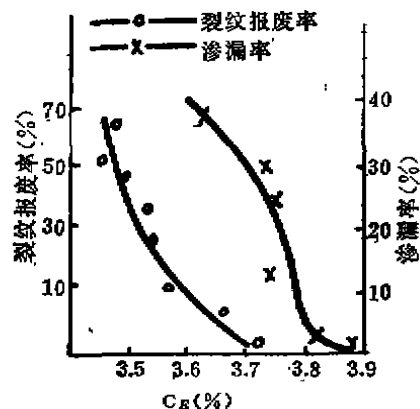


图2 碳当量对裂纹报废率和渗漏率的影响

Fig. 2 The effect of carbon equivalent on crack scrap and leakage rate

上述数学模型表明:

(1) 随 $C_E$ 提高, $\sigma_s$ 和HB都下降, $C_E$ 波动1%时, $\sigma_s$ 和HB的波动约17MPa和4.4HB,说明这种强化孕育方法有较好的生产稳定性。

(2) S、P都有显著降低 $\sigma_s$ 和增加HB的作用,虽然其含量低而影响有限,但说明适当降低其含量,却起到了提高铁水纯净度的作用。

图1进一步表明:

(1) 稀土钙钡孕育剂对碳当量的敏感性较小,而且在 $C_E \geq 4.2\%$ 的高碳当量铁水中仍有良好的孕育效果,而Si75没有,甚至起反作用。

(2) 随着 $C_E$ 提高,强度和孕育效果都降低(Si75更显著),但在常用的 $C_E$ 范围内( $C_E = 3.8 \sim 4.2\%$ )使用稀土钙钡较Si75可提高强度20~40MPa。

图2说明,当 $C_E \leq 3.6\% \sim 3.7\%$ 和 $C_E \leq 3.8\% \sim 3.85\%$ 时,裂纹和渗漏倾向分别急剧增加。

## 2. 硅碳比(Si/C)的作用

用出炉温度为 $1410 \sim 1430^\circ\text{C}$ 的冲天炉熔炼铁水,炉料中废钢固定为25%。用首钢Z14和Z18生铁和北内厂的HT200和HT250回炉料以及炉后加Si75调整Si/C。 $C_E = 3.95 \sim 4.05\%$ ,用稀土钙钡孕育,三分钟取样。试验结果如图3。

由图可见:

孕育前后随Si/C增加, $\sigma_t$ 增加(约5~15MPa),三角片白口宽减少。 $\sigma_t$ 在Si/C $\approx 0.65$ 时出现峰值,再增加Si/C便稍有下降,而白口宽仍继续减少,但逐渐缓和。HB在孕育前后都随Si/C增高而增高。

图4是实测不同的Si/C热分析曲线,它表明:

(1) 高Si/C铁水,液相凝固温度 $T_L$ 高,最低共晶温度 $T_{Eu}$ 低,即凝固温度范围和共晶过冷度大,奥氏体枝晶多,因此产生缩松渗漏和D、E型过冷石墨及其伴生的铁素体倾向大。

(2)  $R_E - \text{Ca} - \text{Ba}$ 孕育后都能同时提高 $T_L$ 和 $T_{Eu}$ ,但随Si/C增加凝固温度范围仍增加,共晶过冷度减少。Si/C越高,孕育后 $T_{Eu}$ 提高越小,而共晶回升温度 $\Delta T_E$ 基本不变,故孕育效果越差[2]。

用150kg中频电炉熔炼HT250,批量试产最小壁厚为4.5mm的X4115缸盖,用0.75~0.80的Si/C时,渗漏率达36%,改用0.58~0.67的Si/C时,仅为5~10%。用冲天炉熔炼,把Si/C从0.60~0.65提高到0.74~0.82,批量试制FL913/912和X4115机体,出炉温度为 $1410 \sim 1440^\circ\text{C}$ ,缩孔、缩松、气孔和冷隔报废率增加20%左右,铁水表面氧化膜较明显。这可用图4的热分析曲线解释:由于高Si/C铁水凝固温度范围增加,体积凝固倾向增大,补缩通道减少,且因石墨数量减少,共晶膨胀量减少,所以缩孔和缩松渗漏倾向增加。虽然Si或Si/C增加,铁水的含氧量下降,但 $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons \text{Si} + 2\text{CO}$ 反应的Si、C平衡温度提高,在冲天炉熔炼温度低(如小于 $1450^\circ\text{C}$ )的情况下,反应向左进行,铁水的含氧量和表面 $\text{SiO}_2$ 氧化膜增加,且因CO气体的缓慢沸腾净化作用难发生,气体和杂质难排除,故反应性气孔和析出性气孔形成倾向增大,冷隔缺陷也易产生。

## 3. 合金元素的作用

用150kg中频电炉熔炼C3.44, Si1.91, Mn0.71, P0.078, S0.083(%)的铁水。分别向炉内加入微量Cr、Cu和Sn。用0.30% $R_E - \text{Ca} - \text{Ba}$ 孕育。依次取样并测相应的热分析曲线

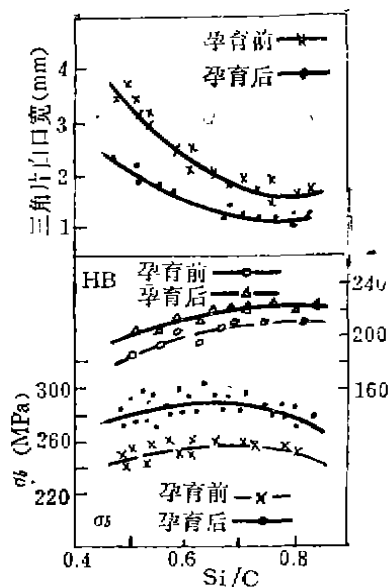


图3 Si/C对 $\sigma_t$ 、HB、白口宽的影响  
Fig. 3 The effect of Si/C on  $\sigma_t$ , HB, and chill width

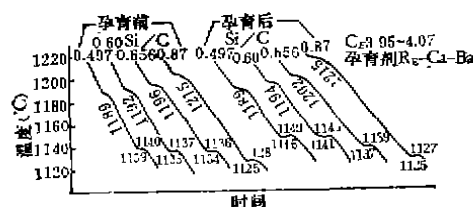


图4 孕育前后不同Si/C的热分析曲线  
Fig. 4 Thermal analysis curve of different Si/C before and after inoculation

如图5。该图表明:

(1) Cr虽有众所周知的强烈促进珠光体形成和细化珠光体及石墨的作用,但副作用也明显,即较大降低 $T_{EU}$ ,使铁水过冷,扩大凝固温度范围,因此,D、E型过冷石墨和碳化物形成以及缩孔、缩松渗漏倾向增大,切削加工性能也恶化,故Cr用量需控制。

(2) 适量的Cu和Sn能较好地抑制Cr的副作用,即提高 $T_{EU}$ ,减少过冷,抑制D、E型过冷石墨和碳化物的形成,同时也促进珠光体的形成。

(3) 对比图5曲线①和⑥与④和⑤可知,Cr、Cu、Sn均使孕育后 $\Delta T_E$ 减少、 $T_{EU}$ 提高,说明它们有促进 $R_E$ -Ca-Ba孕育效果的作用[2]。

此外,Cr、Cu、Sn还能提高灰铸铁的强度、硬度和改善断面均匀性[3]。

#### 4. 铁水氧化的影响

试验用清华大学研制的测氧浓差电池测铁水活性氧量。以 $Fe_2O_3$ 粉增氧, $R_E$ -Ca-Ba孕育。得出 $Fe_2O_3$ 加入量与活性氧量以及三角试片白口宽关系如图6。重复试验 $Fe_2O_3$ 加入量对 $R_E$ -Ca-Ba孕育前后的强度和自口倾向的影响如图7。

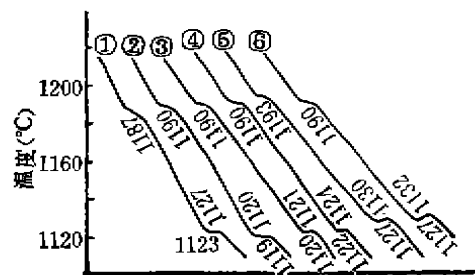


图5 加合金及孕育前后的热分析曲线

Fig. 5 Adding alloy and thermal analysis curve before and after in oculation

①原铁水(C3.44, Si1.91) ②加Cr ③加Cr、Cu ④加Cr、Cu、Sn ⑤加Cr、Cu、Sn后 $R_E$ -Ca-Ba孕育 ⑥原铁水加 $R_E$ -Ca-Ba孕育

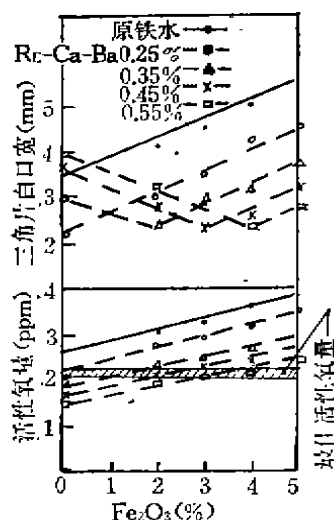


图6  $Fe_2O_3$ 量与铁水中活性氧量  
和白口宽关系

Fig. 6 Relations between amount of  $Fe_2O_3$  and both amount of active oxygen in iron melt and chill width

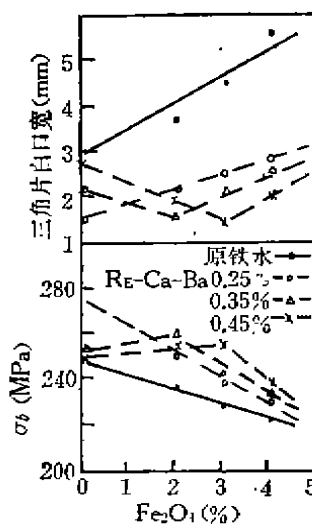


图7  $Fe_2O_3$ 量对孕育效果的影响  
Fig. 7 The effect of amount of  $Fe_2O_3$  on inoculation effect

综合分析图6和图7可以看到:

(1)  $Fe_2O_3$ 多, 活性氧量高, 白口倾向大, 说明了氧是强烈促进白口的元素。

(2) 孕育能降低活性氧量和白口倾向, 说明孕育与脱氧成正变关系, 但与白口倾向关系却不然, 只有脱氧后的活性氧量达到最佳范围(本试验条件下为1.8~2.2ppm)时, 白口才降到最小值, 强度才增到最大值, 此时孕育达到最佳状态, 其对应加入量为最佳加入量。铁水的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 量即活性氧量越高, 最佳加入量越大。

(3) 活性氧量高的氧化严重的铁水, 孕育后强度低, 此时要用孕育提高强度是困难的。

实测铁水不同含氧量的热分析曲线如图8, 表明了铁水氧化性增加,  $T_L$ 提高,  $T_{EU}$ 下降,  $\Delta T_F$ 减少, 即凝固温度范围和铁水过冷度增大, 产生缩松渗漏和过冷石墨倾向增加。

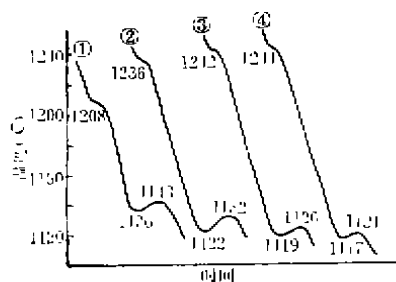


图8 加不同 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 量的铁水热分析曲线

Fig. 8 Thermal analysis curve of iron melt added different amount of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

①原铁水( $\text{C}3.25$ ,  $\text{Si}1.91$ ) ②加2% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  
③加3% $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ④加4% $\text{Fe}_2\text{O}_3$

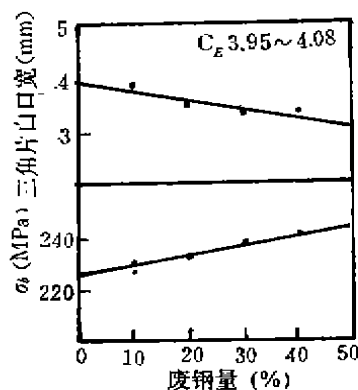


图9 废钢量对 $\sigma_s$ 和白口倾向的影响

Fig. 9 The effect of amount of waste steel on  $\sigma_s$  and chill tendency

### 5. 炉料配比的试验

用150kg中频电炉熔炼, 调整回炉料和废钢的比例考察废钢的影响。以废电极在炉内增碳, 使 $\text{C}_E$ 保持在3.95~4.08%的范围, 试验结果如图9, 表明了增碳时增加废钢量对强度和减少白口都有利, 这是因为废钢的纯净度高和含氮量多造成的[4]。

## 三、冶金和工艺因素对孕育效果的影响

试验用150kg中频电炉熔炼碳当量为4.05%的铁水, 以考察冶金和工艺因素对 $\text{R}_E$ -Ca-Ba孕育效果的影响, 结果如下:

(1) 氧化严重的铁水孕育后强度下降, 衰退加剧(图10a)。这是孕育剂中的 $\text{R}_E$ 、Ca、Ba和Si易产生氧化夹杂和损失的结果。

(2) 孕育温度适当提高, 孕育衰退慢,  $\sigma_s$ 峰值高, 且在前期(图10b)。这是因为 $\text{R}_E$ 、Ca、Ba和Si的氧化是放热反应, 所以高温时它们氧化作用减弱, 但孕育剂溶解速度加快, 故峰值前移。而形成孕育核心的 $\text{R}_E$ 、Ca和Ba等元素的氧、碳和硫化物熔点高, 高温稳定性好, 不致因适当提高温度而影响其孕育作用。

(3) 细粒度孕育剂孕育峰值效果高且在前期, 但衰退快(图10c)。所以铁水温度低或浇注时间短宜用细粒度孕育剂。

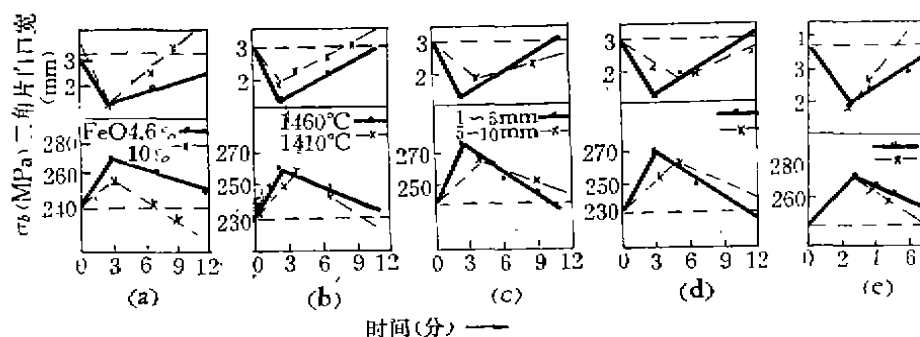


图10 冶金和工艺因素对孕育效果的影响

Fig. 10 The effect metallurgical and technical factors on inoculation effect

(4) 孕育剂加入量过大(本试验条件下最佳加入量约为0.15%),  $\sigma_s$  峰值低且后移(图10d), 即孕育的滞后作用大, 孕育的有效时间长。

(5) 孕育后的珍珠岩覆盖能起到保温和减少衰退的作用(图10e)。

#### 四、结 论

1. 稀土钙钡是适用于机体、缸盖等薄壁高强度灰铸铁件生产的一种高效、长效孕育剂。
2. 对碳当量为3.9~4.1%的薄壁高强度灰铸铁件, Si/C为0.65左右综合效果最佳。
3. Cr、Cu、Sn等元素有促进珠光体形成和提高强度、硬度以及断面均匀性的作用, 但Cr对渗漏率和切削加工性有不利影响, 故需控制其用量。Cr与Cu、Sn等联合应用更有利。
4. 铁水氧化对灰铸铁机械性能、铸造性能和孕育效果都有极不利影响。
5. 适当增加炉料中废钢量, 可获得同时提高强度和减少白口的效果。
6. 冶金和工艺因素对孕育效果有重要的影响。

#### 参 考 文 献

- 1 周世康 严启光等. 稀土钙钡和低稀土孕育剂的研究和应用. 北京第四届铸造年会, 1987.
- 2 周世康 严启光等. 高效长效孕育剂的评定和选择. 北京优秀铸造论文集, 北京机械工程师学会铸造分会, 1985.
- 3 张长隆等. 机体、缸盖等薄壁铸铁件的试制与生产. 北京第四届铸造年会, 1987.
- 4 鹿取一男等. 铸造工学. 机械工业出版社, 1983.

# A STUDY ON THE MATERIAL FOR THE GRAY IRON CASTINGS WITH THIN WALL AND HIGH STRENGTH AND ITS INOCULANT

Zhou Shikang    Liu Xiangui    Xiang Tingying

*(Beijing Agricultural Engineering University)*

Gan Zhiyong    Ying Yu    Yan Qiguang

*(Beijing Internal Combustion Engine Works)*

## Abstract

According to the structure characters to the gray iron castings with thin wall and high strength such as engine block and head replaced engine in 80's and the technical requirements of material, and the state situation of China, this paper study systematically the  $RE$ -Ca-Ba inoculant and its application conditions and methods, five elements in molten iron, carbon equivalent, silicon-carbon ration, alloy elements, oxidation, metallurgical and technical factors. A whole set of method about strengthening inoculation has been perfected, which is to take strengthening inoculation as nucleus, higher carbon equivalent as presupposition, the quality of molten iron as base, comprehensive management as guarantee. Also this method has been applied in batch production in many works. As a result, a good technical economic benefit has been obtained.