

(3) 在型砂跃起的瞬间, 马上开启气冲阀门进行气冲紧实。

如图16所示, 模样上表面紧实力 $P_1$ 达到最大值的瞬时, 与底座表面紧实力达到最大值的瞬时相重合。也就是说, 在这种条件下可获得不同高度上型砂的同时紧实。

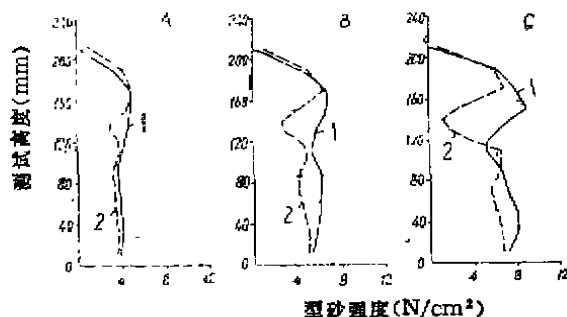


图 17 不同建压速度下通常气冲紧实与相对压力气冲紧实型砂强度分布的对比

A -  $(dp/dt) = 450 \times 10^5 \text{ Pa/s}$  B -  $(dp/dt) = 850 \times 10^5 \text{ Pa/s}$  C -  $(dp/dt) = 1500 \times 10^5 \text{ Pa/s}$

1. 相对压力气冲紧实 2. 通常气冲紧实

一系列实验结果表明, 在不同建压速度下有模样气冲紧实时产生的“桥”被克服了, 获得

了较均匀的型砂强度分布(图17)。

## 四、结 论

(1) 气冲造型紧实过程中, 由于较大的回弹造成型砂强度高度方向分布的不均匀性。

(2) 在有模样气冲紧实时, 模样对强度分布产生较大影响, 并产生强度薄弱区——“桥”。

(3) 利用相对压力气冲紧实的方法可以避免“桥”的产生, 获得均匀的型砂强度分布。

## 参 考 文 献

- 1 Boenisch, D. Daume, K. Giesserei, 1984(10): 381~393
- 2 Boenisch, D. Daume, K. Giesserei 1986(4): 783~794
- 3 Boenisch, D. Lorenz, V. Giesserei 1986(22): 643~650
- 4 Boenisch, D. Giesserei, 1982(21): 593~598
- 5 Boenisch, D. Giesserei, 1982(23): 664~669
- 6 Ekart Schaarschmidt, Horst Tillmanns, Giesserei, 1989(4): 99

(编辑: 唐彦斌)

# 高强度薄壁灰铸铁件的研制

上海工程技术大学 吴家立 柯 峰 严敏杰 蒋佩颖

**【提要】**在采用65%废钢屑, 余为废钢和回炉料, 不用新生铁且不加合金元素的条件下, 以碳硅及钢屑为孕育剂, 严格控制熔炼及孕育处理工艺, 制得了切削性能优良的高强度合成铸铁。当其CE为4.16~4.2%时,  $\sigma_b$ 平均可达 250MPa。用该铁水浇注的加工面最小壁厚仅3毫米的深井泵叶轮, 其叶片端部无白口, 可在铸态下切削加工。

**关键词:** 灰铸铁 合成铸铁

## Investigation on High-strength and Thin-walled Grey Iron Castings

Wu Jiali, Ke Lu, Yan Minjie, Jiang Peiying  
(Shanghai University of Engineering Science)

Abstract

The high-strength synthetical cast iron having good machinability has been produced by strictly controlling the melting and inoculation technology and by inoculating with C-Si and steel turning inoculant under the condition of using the charge materials consisting of 65% steel turning and 35% steel scrap and returns without addition of pig iron and alloys. When the carbon equivalent is 4.16~4.2%, the average tensile strength of this iron of up to 250 MPa can be obtained. The pump rotor with minimum wall thickness of 3mm was produced without chilling end. The rotors can be machined at as-cast state. In this paper, the production technique, the microstructure, mechanical properties and the test method for determining whether the chill present in the location of 3mm wall thickness or not by observing the microstructure of metallographic specimens cut from the test bars were given.

为了进一步发展高强度薄壁灰铸铁件的生产,有必要针对有代表性的铸件进行深入的研究。为此,我们选择了最小壁厚仅3毫米,且最小壁厚处于冷却速度最大的铸件叶片外缘的8JD深井泵叶轮(图1)为研制对象,以获得优良的力学性能、铸造性能和铸态下机加工性能为目标,试验研究了这种高强度薄壁铸件的生产技术。

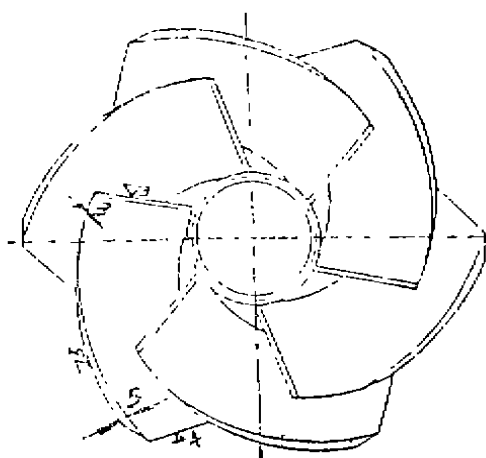


图1 8JD深井泵叶轮

## 一、试验条件和方法

试验在上海某机械厂铸造车间进行。熔炼设备为150kg中频感应炉。所用炉料的成分及配比列于表1。用电极石墨增碳,用75硅铁和65锰铁分别增硅和增锰,以石墨、硅铁及钢屑为孕育剂。用作孕育剂的钢屑应无油污无锈。

《铸造》1991. 11

铸件用湿砂型铸造,每箱一件。抗弯试棒尺寸为 $\phi 30 \times 340$ 毫米,由湿砂型底注而得,每箱二根。抗拉试棒尺寸为 $\phi 20$ 毫米,由弯断后的抗弯试棒加工获得。 $\phi 28 \times 8$ 毫米的金相试样取自抗弯试棒,叶轮叶片金相试样取自最小加工面厚度为3毫米的叶片端部。据不同情况对金相试样进行光镜、电镜及彩色金相分析。铁水过热温度为 $1450 \sim 1480^\circ\text{C}$ ,孕育处理温度为 $1420 \sim 1450^\circ\text{C}$ ,浇注温度为 $1390 \sim 1420^\circ\text{C}$ 。试制的铸件全部用作正式产品的毛坯,机加工成品率由车间质量检验记录获得。

表1 炉料成分及配比

炉料	用量 (kg)	配比 (%)	化学成分(%)				
			C	Si	Mn	P	S
钢切屑	98	65	0.35	0.25	0.45	0.015	0.023
铸铁切屑	23	15	3.60	2.00	0.71	0.12	0.15
废钢	15	10	0.35	0.25	0.45	0.015	0.023
回炉料	15	10	3.50	2.10	0.70	0.14	0.11
合计	151	100	—	—	—	—	—

## 二、试验结果

长期以来,在8JD叶轮生产中,当抗拉强度达到 $150 \sim 180\text{MPa}$ 时,因白口而发生叶轮叶缘机加工困难,致使强度无法提高。本试验结果,使166炉次的铸铁强度提高一级,即从HT150提高到HT200,且使叶轮能在铸态下很好地进行切削加工。在此基础上,又进行了20炉次的试验研究,使铸铁强度提高到HT250MPa

以上,并使铸件保持了较好的切削性能。主要试验结果概述如下。

### 1. 强度

当CE 平均为4.16%时,  $\sigma_b$  平均可达 267

MPa。用该铁水浇注 1200 只叶轮,用一般刀具可在铸态下加工,因叶片折断造成的废品率显著下降。其中10个炉次的有关数据列于表 2。

表 2 试验灰铸铁的成分及力学性能

试样号	化学成分 (%)					力学性能		CE	RG	RH	GZ
	C	Mn	Si	P	S	$\sigma_b$ (MPa)	HB				
26'-1	3.43	0.62	2.10	0.080	0.103	265	236	4.166	1.106	1.103	1.002
29'-1	3.35	0.60	2.40	0.080	0.085	267	265	4.176	1.119	1.187	0.943
31'-2	3.30	0.64	2.58	0.048	0.073	279	218	4.175	1.161	0.991	1.171
37'-3'	3.34	0.68	2.44	0.100	0.079	250	226	4.186	1.055	1.089	0.969
40'-2'	3.41	0.73	2.44	0.096	0.102	261	217	4.255	1.183	1.022	1.157
46'-1	3.40	0.76	2.62	0.063	0.062	282	241	4.294	1.325	1.089	1.216
53'-2'	3.12	0.70	2.62	0.068	0.113	285	219	4.015	1.021	0.984	1.038
63'-1'	3.24	0.69	2.54	0.074	0.110	261	197	4.111	0.982	0.947	1.037
63'-2'	3.30	0.65	2.54	0.092	0.088	261	204	4.177	1.087	0.961	1.131
64'-2'	3.29	0.72	2.27	0.114	0.128	269	187	4.054	1.013	0.867	1.168

从表 2 可见,在不加合金且碳当量较高的情况下,  $\sigma_b$  大于 250MPa。试验证明,用这铸铁可以生产铸态下可加工的壁厚仅 3 毫米的铸件。与资料〔5〕介绍的壁厚 6 毫米的 CKT 活塞合金铸铁比,有了较大的提高。

图 2 为普通灰铸铁与本试验研制的灰铸铁的碳当量与抗拉强度的关系曲线。显见后者的强度较高。

### 2. 组织与性能

图 3 至图 5 为不同条件下浇注的叶轮叶片翼缘及试棒金相试样的显微组织。B 型石墨可按其中心铁素体的分布状况分为紧密型混合型、开放型和松散型四种〔3〕(图 6 至图 9 图 10 为 A 型石墨)。从图 3 可以看出,当试样边缘出现

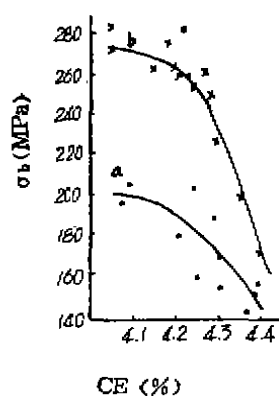
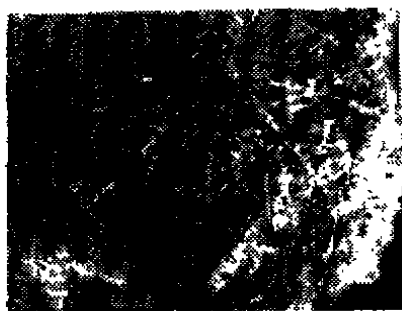


图 2 两种灰铸铁的CE与 $\sigma_b$ 的关系  
a—普通灰铸铁  
b—本试验研制的灰铸铁

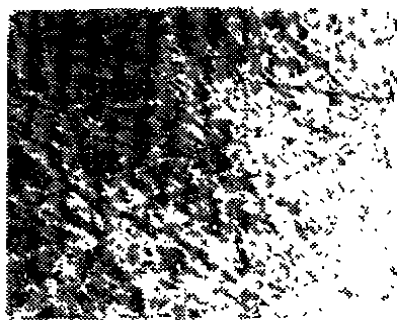
紧密型 B 型石墨时,用该铁水浇注的叶轮,其翼缘表面布满了较厚的白口层。当试样边缘出现开放型 B 型石墨时,用该铁水浇注的叶轮翼缘,其白口深度较前一种小,且叶片表面白口消失(图 4),碳化物间的珠光体量显著增加。用本试验研制的高强灰铸铁铁



a) 试样边缘的紧密型 B 型石墨 125×

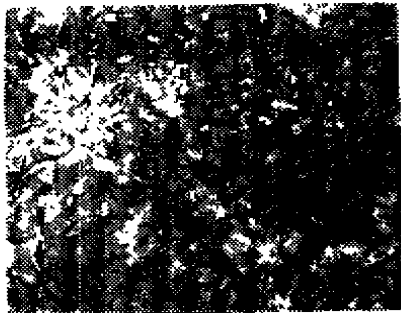


b) 叶片翼缘的白口 60×

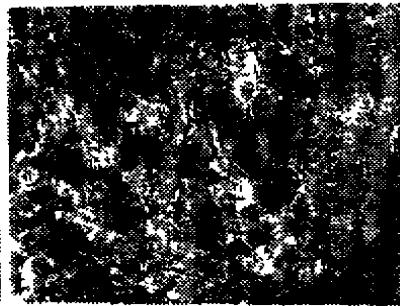


c) b 面片所示的组织放大 200×

图 3 以可锻铸铁屑为原料熔炼的铸铁金相



a) 试样边缘的开放型B型石墨 150×

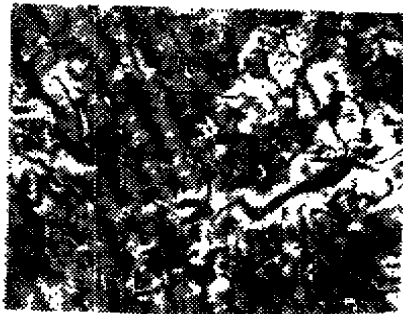


b) 叶片翼缘的少量白口 50×



c) b图片所示的组织放大 200×

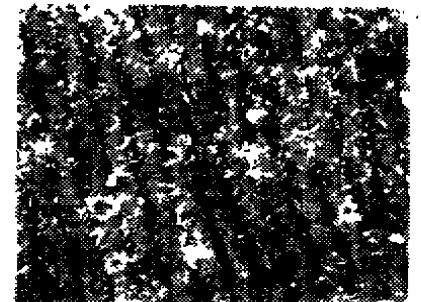
图4 冲天炉熔炼的灰铸铁金相



a) 试样边缘的A型石墨 125×

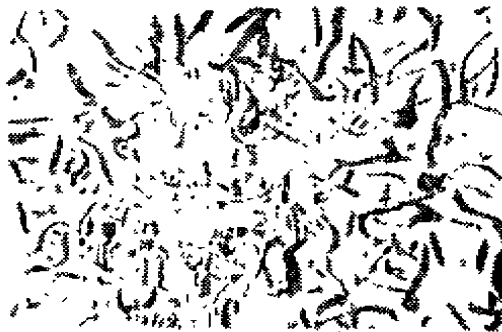


b) 叶片边缘无白口 60×

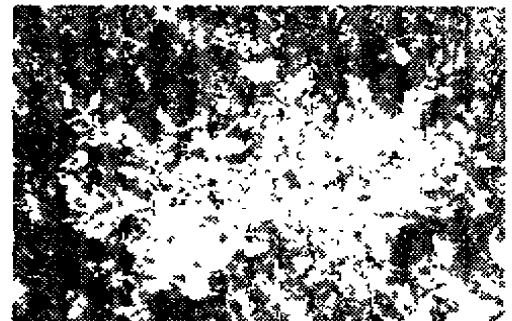


c) b图片所示的金相放大 200×

图5 本试验研制的灰铸铁金相

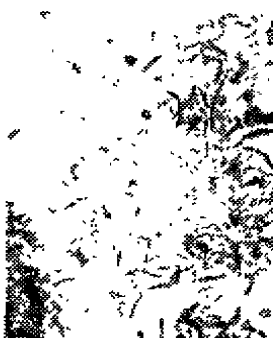


a) 未腐蚀 280×



b) 4%硝酸酒精腐蚀 280×

图6 混合型B型石墨



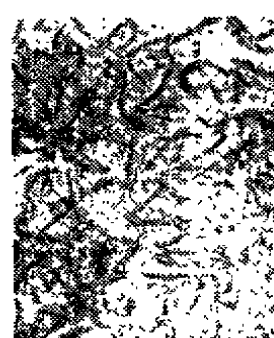
未腐蚀 280×

图7 紧密型B型石墨



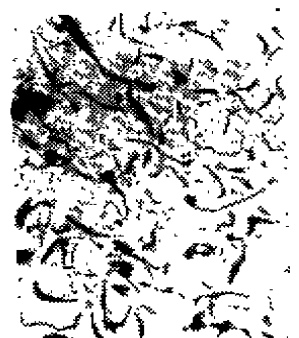
未腐蚀 280×

图8 开放型B型石墨



未腐蚀 280×

图9 松散型B型石墨



未腐蚀 280×

图10 A型石墨

水浇注的试样,其试样边缘未见B型石墨。用同炉铁水浇的叶轮,翼缘未见白口,其叶片端部激冷层,即在普通灰铸铁叶片上易出现纯白口的部位,基本都是珠光体基体的E、D型石墨,只有极少数碳化物,而且这种E、D型石墨片较前两者厚,其间分布着球状和蠕虫状石墨。在资料〔8〕中,将上述四种B型石墨依次设定石墨紧密系数为4、3、2、1,设A型石墨的紧密系数为0,则叶轮加工成品率与石墨紧密系数关系可用图11表示。由图可见,试样边缘B型石墨紧密系数越大,则该试样对应的叶轮切削性越差。可见,用于壁厚仅3毫米的薄壁铸件的铸铁,其切削性能与石墨紧密系数有密切关系。因此,铁水石墨化能力与铸件切削性能优劣,可以通过检验试棒的边缘有无B型石墨及B型石墨的紧密系数来鉴别。

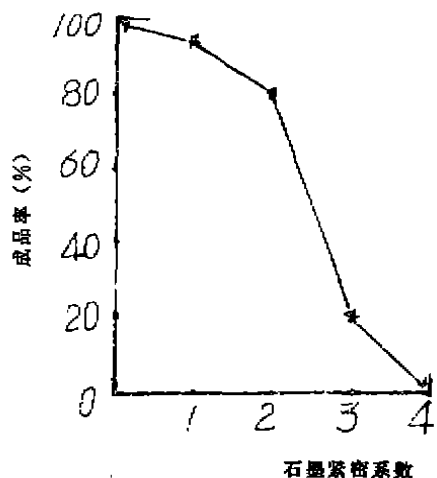
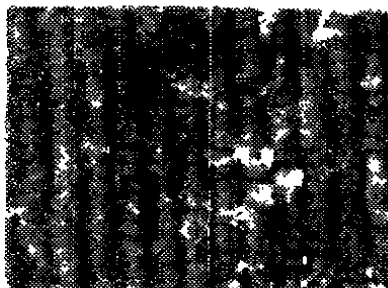


图11 石墨紧密系数与叶轮加工成品率关系

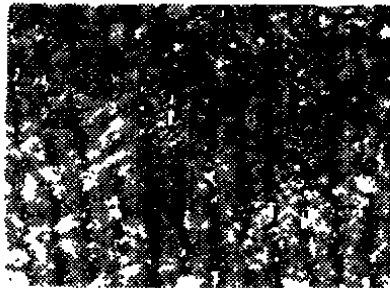
### 三、分析和讨论

上述试验结果表明,所研制的这种适于浇注壁厚为3毫米的高强度灰铸铁,具有白口倾向小和切削性能好的优点,其原因在于,

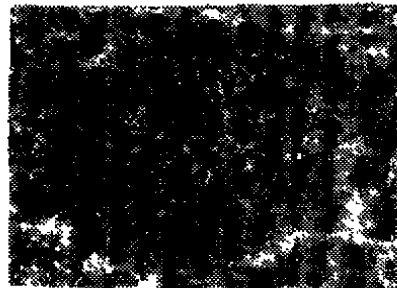
这种灰铸铁在熔炼时加入了大量废钢。因此,铁水中存在大量低碳微区  $LCmXn^{[8]}$  以及由此微区形成的先共晶奥氏体预存晶核,使先共晶奥氏体枝晶易于形成和发展,从而使所在的共晶团边界的珠光体得以强化,亦即使珠光体片层细密,晶粒细化而提高了抗拉强度。在叶轮3毫米厚的叶片上出现了密集的,由先共晶奥氏体枝晶转变成的组织为基体的E、D型石墨网络,包围着其中的A型石墨共晶团(图12)。从而使叶片有较高强度。从金相试样上可见到E型石墨组织伸展很长,强度却不低。该E型石墨以一定角度形成网状(图13)。显然,D型石墨多说明先共晶奥氏体网络发达、结构细密。该情况下,E型石墨组织伸展长度较短,而A型石墨共晶团则细小且均匀。有时,虽在平面金相组织中会出现伸展长度较长的E型石墨组织,只是由于先共晶奥氏体枝晶轴线重合于金相试样的侧视平面所致。须指出,铸铁强度并不主要取决于是否存在E、D型石墨,而决定于E、D石墨组织的基体,特别是其中游离的铁素体量和珠光体强化程度。与上述铸铁相反,图4所示的铸铁中加入废钢很少,叶片上只出现少量E、D型石墨组织,该铸铁中共晶团边界明显是由铁素体含量高的粗片状珠光体或游离铁素体及磷共晶构成(图14),故叶片强度低易折断或出现裂纹而报废。



4%硝酸酒精腐蚀,400×  
图12 叶片上距翼缘约6毫米处A型共晶团边界上先共晶奥氏体枝晶痕迹



4%硝酸酒精腐蚀,400×  
图13 叶片距翼缘约3毫米处金相组织



4%硝酸酒精腐蚀,400×  
图14 叶片距翼缘6毫米处的金相组织

据资料<sup>[7,8]</sup>所述,不同炉料及熔炼条件下,铁水中存在的碳质聚集体 $CmXn$ 的种类和数量不同,决定了 $\phi 30mm$ 试棒边缘的B型石墨类型和3mm厚铸件激冷区的白口深度,也就决定了铸件的机加工性能。

图3至图5对应的铁水分别以可锻铸铁屑为炉料在电炉中熔炼、以生铁为炉料在冲天炉中熔炼、以废钢石墨硅铁为炉料在电炉中熔炼。铁水中存在的促使白口形成的 $HCmXn$ 聚集体微区依次减少,使铁水石墨化能力提高的过共晶高碳微区 $PCmXn$ 及预存石墨晶核 $GCm$ 微区依次增加,可供形成先共晶奥氏体的低碳微区 $LCmXn$ 亦依次增加,因此这三种铸铁的石墨化能力和基体珠光体化能力依次提高,所以 $\phi 30mm$ 试棒外沿处分别出现紧密型B型石墨、开放型或混合型B型石墨、A型石墨。由这些试棒的同炉次铁水浇的3mm厚铸件激冷区的白口层则依次变薄,莱氏体中的碳化物依次减少,珠光体依次增加,切削性能渐次改善。而这三种铸铁的碳当量渐次降低(分别为4.37%、4.34%、4.18%),切削性能依次改善。

铸铁性能改善是多因素综合作用的结果,试验中还考虑了 $Si/C$ 的作用。由资料<sup>[9]</sup>可知,可以作为判断铸件形成灰口还是白口的一个指标(K值)与碳、硅和冷却速度之间有如下关系:

$$K = \frac{4Si}{3} \left[ 1 - \frac{5}{3C + Si} \right]$$

同用砂型时,铸件出现渗碳体的K值随试棒直径减少而增大。当试棒直径(mm)分别为 $\phi 30$ 、 $\phi 20$ 、 $\phi 10$ 时,k值分别为0.85、1.10、1.5。从铸铁组织图(图15)<sup>[9]</sup>可知,相同碳当量下, $Si/C$ 提高则铸铁件的灰口区扩大,薄壁件K值大应特别注意控制 $Si/C$ 。故本试验在降

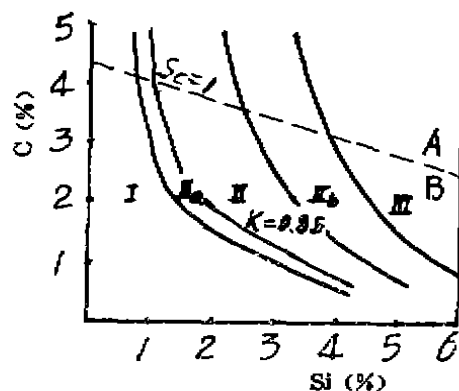


图15 铸铁组织图  
A—过共晶 B—亚共晶  $\phi = 30mm$

低碳当量同时提高 $Si/C$ ,这对提高强度和改善切削性能都有利。但是,当CE在4.05%以上时,即使合成铸铁,靠提高 $Si/C$ 使强度提到250MPa是困难的,通常靠加入合金来达到目的。但合金元素Cr等都有增加白口倾向。对壁厚仅3mm的铸件,若用这种办法提高强度会使铸件切削困难。为此,我们在提高 $Si/C$ 同时采用钢屑孕育,获得了不加合金元素情况下的明显好效果。我们曾在有关资料<sup>[6,8,7]</sup>中分析了先共晶奥氏体枝晶对铸铁的强化基体和孕育双重作用。钢屑能带入大量有助于先共晶奥氏体生长发展的低碳微区,而不带入易形成白口的微区。所以用钢屑作孕育剂具有一般孕育剂没有的孕育和强化基体双重作用。虽然在合成铸铁熔炼中加入大量废钢,但随熔炼增碳过程的进行,低碳微区会减少,先共晶奥氏体晶核随之衰退。因此,为保证凝固期间铁水中保存大量先共晶奥氏体晶核,加入钢屑是一种有效而经济的强化孕育措施,也是能在不加合金元素的条件下获得高碳当量的高强度而白口倾向小的薄壁铸铁件的重要因素。从表3可看出,由于提高 $Si/C$ 与钢屑孕育相结合,在保证切削性能的同时,强度得到显著提高。

表3 提高 $Si/C$ 及钢屑孕育对 $\sigma_b$ 的影响

	不加钢屑孕育					加钢屑孕育				
CE (%)	4.13	4.10	4.28	4.34	4.41	4.18	4.20	4.28	4.34	4.38
Si/C	0.62	0.68	0.85	0.62	0.80	0.70	0.74	0.74	0.74	0.76
$\sigma_b$ (MPa)	195	172	183	187	165	260	225	216	205	178

## 四、结 论

1. 用废钢屑和废钢为基本炉料, 按文中所述的熔炼及孕育处理工艺, 可获得 CE 为 4.16%  $\sigma_b$  高于 250MPa 的高强度合成铸铁, 可用于铸造加工面最小壁厚仅 3mm 的叶轮铸件, 该铸件铸态切削加工性能优良。

2. 检验文中所述试样的边缘是否有 B 型石墨及类型, 可判断铁水石墨化能力、壁厚 3mm 铸件表面白口情况以及机加工性能优劣。

3. 本试验获得的宜于浇注薄壁高强度灰铸铁, 其优良的抗拉强度来自于发达的先共晶奥氏体枝晶, 其良好的切削性能来自于由炉料高 Si/C 以及孕育处理工艺决定的强烈石墨化能

力。

4. 钢屑是用于获得薄壁高强度灰铸铁的经济而有效的强化孕育剂, 钢屑具有强化基体和提高石墨化能力的双重作用。

## 参 考 文 献

- 1 球铁, 1986(3): 1~7
- 2 铸造技术, 1987(1): 14
- 3 铸造, 1988(8): 11
- 4 球铁, 1988(2): 1
- 5 铸造, 1988(9): 9
- 6 球铁, 1989(1): 22
- 7 铸造, 1990(5): 1
- 8 现代铸铁, 1990(2): 49
- 9 王春祺. 铸铁孕育理论与实践, 天津: 天津大学出版社, 1991

(编辑: 田世江)

# 减 震 铸 铁

上海交通大学 施瑞鹤 沈嘉猷 林 凡 曾念波\*

**【提要】**论述了微量合金元素和其它合金元素对铸铁减震性能和力学性能的作用。试验研究表明, 铸铁中添加适量的合金元素 Zr、Cr、Mo、Cu 和 Al 等, 并且它们的加入量间配合适量, 能够获得减震性能优良的铸铁。其减震系数值  $\psi$  以可达 20% 上。抗拉强度性能  $\sigma_b$  达到 172~202MPa。

**关键词:** 铸铁 减震

## A Damping Cast Iron

Shi Ruihe, Shen Jiayou, Lin Fan, Zeng Nianbo

### Abstract

In this paper, the effects of microalloying elements and other alloying elements on damping capacity and mechanical properties of cast iron is described. The results of experiment showed that, when the additive level of Zr, Cr, Mo, Cu and Al are proper and well coordinated one another for microalloying elements and other alloying elements, the specific damping index of cast iron  $\psi$  may be increased by 20 per cent or more and the tensile strength of up to 172~202 MPa was achieved.

## 一、引 言

普通灰铸铁具有一定的减震性能, 其减震系数值约为 8%, 但是它与 Mn—Cu 等高减震合金的性能相比是相当低的。

\* 曾念波为 88 届硕士研究生。