

新型高强合金孕育剂对灰铸铁强化机制的研究

李孝艳，乔进国，彭业密，孙帆

摘要：研究了新型高强合金孕育剂对WP12气缸体力学性能及金相组织的影响。同时对比分析不同合金化工艺的WP12气缸体的力学性能。试验结果表明，高强合金孕育剂加入量达到0.5%时效果最佳，石墨形态均匀，珠光体片间距细小，WP12气缸体本体抗拉强度最高，较（Cu-Cr-Ni-Sn）合金化工艺稳定提高30MPa。

灰铸铁与其他合金铸铁相比具有熔点低、充型性好、成形过程简单以及成本低廉，同时具有耐热、耐磨及良好的减振性，被广泛用于发动机上。随着汽车工业的不断发展，发动机对功率的要求不断提高，发动机的爆发压力越来越高，因此对发动机上重要铸件气缸体提出更高的使用性能和工艺性能要求，要求在高碳当量条件下，具有高强度和良好的可加工性。随着我公司欧Ⅴ、Ⅵ发动机的不断推出，对灰铸铁件性能提出更高的要求，提高灰铸铁的强度成为我们追求的主要目标。而提高灰铸铁强度是通过控制石墨形态及基体组织的方法达到的，因此我们希望通过提高孕育效果并结合合金化处理达到预期要求。本文研究了新型高强合金孕育剂对灰铸铁WP12气缸体力学性能及金相组织的影响。

1. 背景

我公司生产的WP12气缸体技术要求：A型石墨片长4～6级，珠光体含量≥98%，铸件本体抗拉强度≥220MPa。由于WP12气缸体结构复杂，且取样位置壁厚49mm左右，属于高强度薄壁复杂铸件，连续生产中铸件本体性能不稳定，当铁液碳当量达到3.9%以上时，采用现有Cu-Cr-Ni-Sn合金化工艺的WP12气缸体本体金相组织石墨片长仅能达到3级，抗拉强度仅能达到200MPa，无法满足技术要求。图1为WP12气缸体。

2. 试验方法及过程

采用冲天炉和工频感应电炉双联熔炼，冲天炉用于熔化铁液，感应电炉用于保温和调质。冲天炉出铁温度1500～1530℃，电炉保温温度1430～1460℃。炉前处理试验用新型高强合金孕育剂加Cu-Cr-Sn合金化工艺。试验过程中采用同一炉铁液，其化学成分如表1所示。高强合金孕育剂、铬铁及锡粒在炉前随流加入浇包内，高强合金孕育剂加入量分别为0.3%、0.4%、0.5%、0.6%，根据硅含量要求补充相应的硅钡孕育剂，满足试验的铸件硅含量一致，并在浇包内加入电解铜进行合金化处理，铸件浇注温度1400～1410℃，每组浇注两台。高强合金孕育剂从长春南湖炉料有限公司购买，其化学成分如表2所示。

用SPECTRO MAXx直读光谱仪分析铁液化学成分，

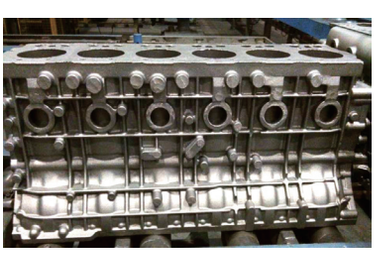


图1 WP12气缸体

表1 原铁液化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	S	P
3.30～3.35	1.5～1.7	0.6～0.7	≤0.1	≤0.06

OLYMBUS-GX51型金相显微镜对铸件本体石墨形态、基体组织、珠光体片间距等显微组织分析。采用SANS-XYB305C型微机控制电子万能拉伸试验机测试铸件本体抗拉强度，HB—3000型布氏硬度计检测硬度，抗拉强度检测按照JB/T7945—1999标准进行。

气缸体浇注完成清理后，取WP12气缸体第四瓦口做成拉伸试棒进行理化分析，如图2所示。因该处是气缸体强度最容易偏低的位置，该位置为最厚部位，且为内浇口位置，凝固冷却条件相对较差。试验WP12气缸体本体试样化学成分如表3所示。

3. 试验结果及分析

（1）铸件金相组织　由图3、图4金相组织分析，当高强合金孕育剂加入量<0.5%时，石墨形态为A型，金相组织中出现了一些粗大块状的石墨。加入量在0.5%时石墨较细小，且分布均匀，无方向性。各试样珠光体含量均在98%以上，500倍光学显微镜下观察，高强合金孕育剂加入量在0.5%时试样的珠光体更均匀，珠光体片间距细小。这说明随着高强合金孕育剂加入量的增加，有助于灰铸铁石墨形态及基体组织的改善，金相组织的改善能够提高铸件力学性能。

（2）铸件力学性能　表4为不同高强合金孕育剂加入量时，WP12气缸体本体的力学性能，我公司WP12气缸体浇注工艺为卧浇，导致气缸体下瓦口的冷却速度较上瓦口慢，性能较上瓦口低，我们仅取下瓦口的性能进行

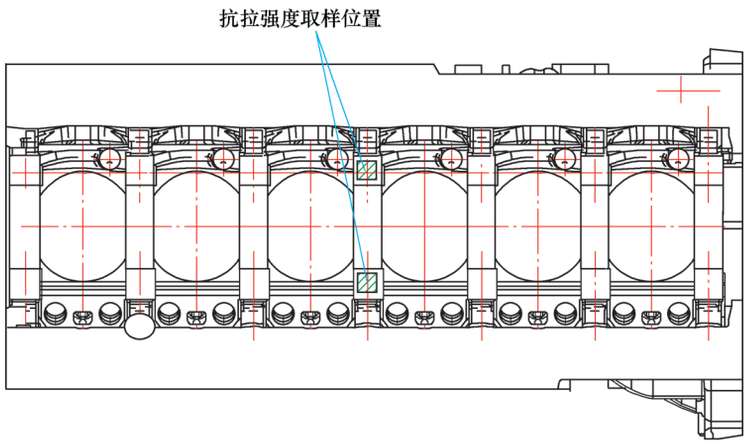
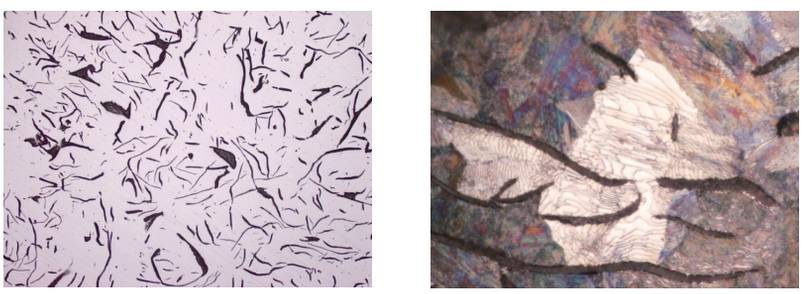
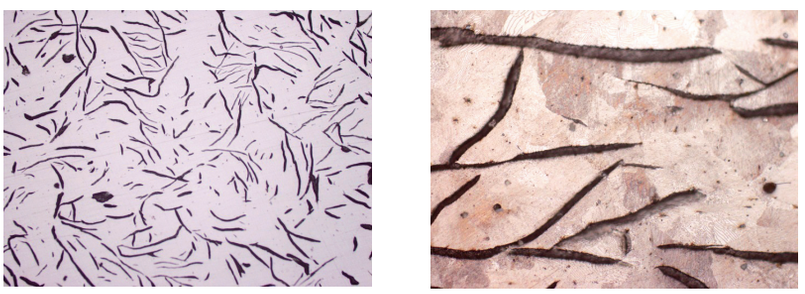


图2　WP12气缸体取样位置



（a）A型石墨，存在粗大石墨　　（b）珠光体基体

图3　高强合金孕育剂加入量0.5%以下的铸件本体金相组织



（a）A型石墨，石墨均匀　　（b）珠光体基体

图4　高强合金孕育剂加入量0.5%的铸件本体金相组织

表2　高强合金孕育剂化学成分（质量分数）　　（%）

Si	V	Zr	RE	Ca
40～45	8～12	0.5～3	2～4	1～3

表3　WP12气缸体铸件本体检测结果

组别	孕育剂加入量（%）	化学成分（质量分数，%）								
		Si	Mn	P	Cu	Cr	Sn	V	Ce	La
1	0.30	1.87	0.73	0.03	0.67	0.29	0.056	0.0180	0.0046	0.0021
2	0.40	1.85	0.70	0.035	0.66	0.27	0.059	0.0220	0.0058	0.0026
3	0.50	1.85	0.74	0.037	0.68	0.30	0.060	0.0327	0.0075	0.0034
4	0.6	1.86	0.69	0.032	0.68	0.29	0.062	0.0435	0.0090	0.0042

比较。由表4可看出，随高强合金孕育剂加入量的增加，铸件本体抗拉强度提高，硬度相应提高（在技术要求范围内）。当孕育剂加入量为0.5%时，铸件抗拉强度达到245MPa，相同条件下Cu-Cr-Ni-Sn合金化工艺的WP12气缸体本体抗拉强度下瓦口为210MPa，高强合金孕育剂工艺铸件性能提高30MPa以上。当孕育剂加入量为0.6%时，加入量过高，孕育剂量过剩，会对铁液产生不良影响（降低铁液温度，形成铸件夹渣缺陷等），导致铸件力学性能下降。

对比分析不同炉前处理的WP12气缸体抗拉强度趋势（如图5所示），发现采用（Cu-Cr-Mo-Sn）合金化工艺和0.5%高强合金孕育工艺的WP12气缸体本体抗拉强度较（Cu-Cr-Ni-Sn）合金化工艺的高，但采用（Cu-Cr-Mo-Sn）合金化工艺的铸件抗拉强度虽然高，但波动较大，影响铸件的可加工性，而采用高强合金孕育剂的铸件抗拉强度波动小，所以采用高强合金孕育剂能够稳定提高铸件本体力学性能。

高强合金孕育剂工艺较Cu-Cr-Ni-Sn合金化工艺的区别在于应用中去掉了合金Ni，但高强合金孕育剂中钒的强化作用优于镍，且高强合金孕育剂中添加了稀土、锆、钙，降低孕育剂的衰退，孕育性增强。当灰铸铁中钒的加入量在0.3%以下时，钒的作用为可以有效地使石墨细小并使珠光体增多，对于厚大截面的铸件，加入钒可使整个截面上的组织较为均匀，从而提高铸铁的强度。

灰铸铁中加入合金元素来提高强度的主要机理表现在：①细化石墨和共晶团。②增加基体中珠光体的含量，并使珠光体的片间距细化。③提高渗碳体的热稳定性，防止珠光体在高温下分解。④生成碳化物或含合金元素的硬化相。图6为各种常用合金元素与灰铸铁抗拉强度之间的关系，由图可见，灰铸铁中加入少量的钒即可显著提高铸件性能。

4. 高强合金孕育剂的作用机理

高强合金孕育剂中含稀土元素Ce，其孕育机理一般认为是由于稀土元素和铁液中的S、O反应生成稀土硫化物、氧化物和氮化物微粒，这些微粒可作为石墨的形核基底，由于这些微粒的熔点高于铁液温度，因此，稀土孕

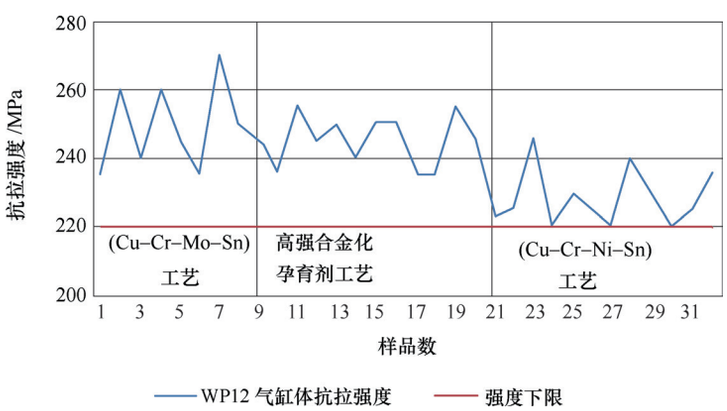


图5 不同合金化处理的WP12气缸体抗拉强度趋势

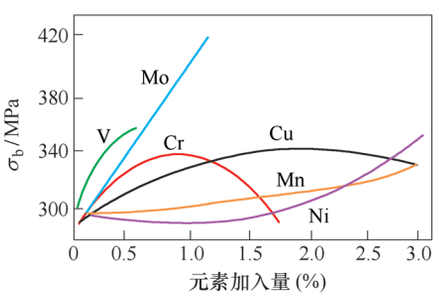


图6 合金元素对灰铸铁抗拉强度的影响

表4 不同高强合金孕育量的铸件力学性能

序号	孕育剂加入量(%)	抗拉强度/MPa	硬度HBW	技术标准要求	
				抗拉强度/MPa	硬度HBW
1	0.3	210	203	≥220	190～230
		205	207		
2	0.4	220	213		
		205	205		
3	0.5	245	210		
		235	198		
4	0.6	230	215		
		220	220		

育的形核数量不仅多且抗衰退时间长，因而能确保孕育效果，使石墨更加细小，从而提高强度。当稀土元素加入量适中时，稀土表现出较强的孕育能力，促进石墨的析出。但稀土对灰铸铁的石墨化能力具有双重影响。稀土本身是反石墨化元素，它能使铸铁的共晶点右移，以降低铸铁的共晶转变温度，提高铁液的共晶转变的过冷度，促使铁液结晶。铁液冷却速度越快，其反石墨化作用越强烈。根据我公司WD615气缸体的生产经验，炉前处理稀土硅铁的加入量控制在0.05%～0.10%时，气缸体试棒抗拉强度最高，增加稀土硅铁的加入量，试棒抗拉强度降低。WP12气缸体加入0.05%～0.10%稀土硅铁，稀土含量在0.007,%～0.012%。高强合金孕育剂加入量0.5%时，稀土含量为0.0109%，在最佳控制比例内，孕育效果较好。

珠光体基体的改善是孕育剂中的合金钒起了重要作用，在凝固过程中，铸铁中的钒有相当一部分以碳化物、氮化物及碳氮化物状态析出。高熔点的碳化物、氮化物及碳氮化物等微小硬质相在铁素体相界面析出，有效地阻止了铁素体晶粒的长大，使基体中的珠光体细化。同时，厚大截面的铸件，加入钒可使整个截面上的组织较为均匀。

铸铁中钒的存在有以下三种状态：①固溶于α-Fe中。②二次碳化物析出相。③一次块状碳化物。相关研究表明，铸铁中钒分布在α-Fe、渗碳体、碳化物及氮化物中，氧化物中几乎不含钒。

钒与碳、氮具有很强的亲和力。铸铁中含碳量较高，在各温度范围内均可形成碳化物，同时，铸铁中存在一定的氮，在形成钒的碳化物的同时，也易形成氮化物和碳氮化物。在凝固过程中，铸铁中的钒有相当部分以块状碳化物、氮化物及碳氮化物状态析出。凝固结束后，随温度的降低，钒的溶解度逐渐下降，促使在冷却过程中不断有含钒碳化物析出，弥散分布在铸铁基体中，从而起到弥散强化作用，提高铸铁的强度。日本岩手大学的堀江浩等人的研究表明：加入1%钒时的灰铸铁抗拉强度高达400MPa。

5. 结语

（1）高强合金孕育剂加入量在0.5%以下与加入量在0.5%的铸件本体石墨形态大都为A型，基体组织为98%珠光体，孕育量0.5%以上时，石墨变得细小、均匀，珠光体组织的均匀性得到改善。高强合金孕育剂加入量在0.5%时WP12气缸体本体抗拉强度最高，相同条件下较Cu-Cr-Ni-Sn合金化工艺稳定提高30MPa。

（2）高强合金孕育剂中的稀土元素和钒元素在提高铸铁强度方面有重要作用，稀土元素能够改善铸铁中石墨数量、形态、分布，钒能够在灰铸铁中形成微小硬质相，细化珠光体，从而提高铸铁强度。

参考文献

[1] Batas CE. Effects of Alloy Elements on the Strength and Microstructure ofGray Cast Irons,AFS Trans,1984(92):923-946.

[2]胡开华，蔡启舟，等. 高强度厚壁合金灰铸铁压缩机气缸体材质的实验研究[J].现代铸铁．2001(3)：24-27.

[3]Aaronson H I,Precipitation at interphase boundaries,Metal Trans,1978(9):363-371.

[4] 宗俊峰.汽车发动机高强度灰铸铁铸件的研究[J].铸造，1993(3)：17-21.

[5] 曾大本，唐靖林.灰铸铁研究和生产的新进展与展望[J].现代铸铁，2005(1)：33-40.

[6] GLADMAN T. Effect of Second Phase Particles on the MechanicalProperties of Steels,The Iron and Steel Institute,1971(2):68-76.

[7] 袁锡爵，堀江浩.低合金稀土高强度灰口铸铁的研制[J].现代铸铁，1995(2)：23-28.

[8] 刘佑平.柴油机灰铸铁件化学成分的选择[J].中国铸造设备与技术，2002(1)：16-20.

作者简介：李孝艳、乔进国、彭业密、孙帆，潍柴动力（潍坊）铸锻有限公司。

MW 20151118

铸造征稿启事

《金属加工（热加工）》长期面向广大铸造工作者征集优秀稿件，凡涉及铸造工艺、设备、材料、熔炼、检测技术、缺陷分析，以及铸造节能环保技术和生产管理的文章均可向我刊投稿。

稿件一经录用，稿费从优（不收版面费）。《金属加工（热加工）》为国家级期刊，发表论文可用于技术职称评定。

投稿路径：1. 登录http：//tougao.mw1950.cn 网上投稿系统

2. 邮箱：rb1950@126.com

《金属加工》编辑部