

# Sn 对超大型缸套用灰铸铁组织及力学性能的影响

陈瑞润<sup>1</sup>, 李易励<sup>2</sup>, 王琪<sup>2</sup>, 王墅<sup>2</sup>, 王新秀<sup>2</sup>, 夏园<sup>3</sup>, 周国平<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 材料科学与工程学院, 山东青岛 266590; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 3. 扬州五亭桥缸套有限公司, 江苏扬州 225008)

**摘要:** 超大型缸套是大型柴油机的重要零件, 为了改善超大型缸套用灰铸铁的组织 and 力学性能, 加入不同含量的Sn进行合金化处理, 研究Sn含量对灰铸铁显微组织及力学性能的影响规律和机制。结果表明, 随着Sn含量增加, 灰铸铁内部石墨组织逐渐细化, 数量增多, 基体组织中珠光体含量也随之增多, 其力学性能也得到明显的提升。当Sn含量为0.08 wt.%时, 灰铸铁件的综合力学性能最优, 布氏硬度、抗压强度及抗拉强度分别达到HB 355、1 341 MPa及464 MPa, 较不加Sn时分别提高了50.4%、23.1%以及54.3%; 当Sn含量继续增加时, 布氏硬度及抗压强度性能恶化。Sn提高灰铸铁力学性能的机制为细化石墨组织和稳定珠光体组织。

**关键词:** 锡; 灰铸铁; 气缸套; 显微组织; 力学性能

作为发动机的重要零部件之一, 气缸套的性能将直接影响着发动机的整机性能。灰铸铁材料由于具有良好的耐磨性、铸造成形性、吸震性、可加工性以及成本低廉等特点, 已经成为制造缸体类等复杂铸件的首选材料<sup>[1-6]</sup>。但随着时代的不断进步, 发动机技术的不断提高, 现阶段传统的灰铸铁材料几乎难以承受日渐增大的机械载荷以及交变燃烧载荷, 导致气缸套材料的寿命不尽人意<sup>[7-8]</sup>, 因此就迫切地要求像气缸套这种复杂铸件的性能得到大幅度的提高, 尤其是对于超大型缸套这种在技术及销售上双重受限的零部件, 其性能的提高尤为重要。作为一种常用的技术手段, 合金化就成为了提高灰铸铁材料综合性能的首选方法之一。

灰铸铁的铸造已经具有着数百年的历史, 经过多年的铸造生产经验, 结果表明, Sn元素的加入能够使得奥氏体的临界转变温度降低<sup>[9-11]</sup>,  $A_1$ 线下移, 共析转变点也下移, 由S点移至S''点(图1)。由于Sn元素的加入, 使得共析转变温度降低, 因此C原子的扩散能力也就受到了影响, 从而使得形成粗大的块状石墨的倾向也就相应的得以降低, 对铸铁中的片状石墨起着显著的细化作用。除此之外, Sn元素还能够

作者简介:

陈瑞润(1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 NbSi 基高温合金、高熵合金及铸铁材料等。E-mail: ruirunchen@hit.edu.cn

中图分类号: TG143.8  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2022)05-0563-06

收稿日期:

2021-11-15 收到初稿,  
2021-12-28 收到修订稿。

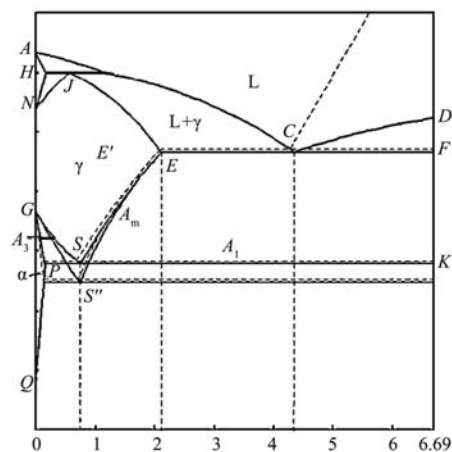


图1 Sn对Fe-C合金相图的影响

Fig. 1 Effect of Sn on the phase diagram of the Fe-C alloy

明显改善珠光体组织的形态,使珠光体组织的体积分数得以增加,继而提高材料的力学性能。

基于以上特点,本研究通过调整Sn元素在超大型缸套用灰铸铁材料中的含量,进而对基体组织中石墨组织及珠光体组织的形核及长大过程进行调控,通过对比分析不同含Sn量下灰铸铁材料显微组织及力学性能的变化,从而探究Sn元素对超大型缸套用灰铸铁材料组织性能的影响规律,以便提高超大型缸套的使用性能、延长其使用寿命,旨在为实际生产提供一定的理论依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试样制备

本试验所采用的原材料为合金化灰铸铁及精锡,其中合金化灰铸铁由扬州五亭桥缸套有限公司所提供,所选用的孕育剂为硅钡孕育剂,其加入量为灰铸铁的0.42 wt.%,孕育方式为浇包内孕育,灰铸铁的化学成分设计要求见表1。

选用10 kg的中频感应电炉进行熔炼,熔炼之前按照所需的成分配比进行配料(要考虑到合金元素的烧损),保证原料干燥,待铁液完全熔化后,向铁液中加入合金元素进行成分的调整,铁液的出炉温度控制在1 450~1 500 °C,浇注试样为Y型试样。在浇注之前要注意将铁液充分搅拌,此外还需进行扒渣处理。

### 1.2 分析测试方法

在试样底部靠近中间的位置处截取10 mm × 10 mm × 10 mm的金相试块,选择不同目数的砂纸进行研磨与抛光,用于进行石墨组织形貌的观察。经4 vol%硝酸酒精腐蚀后,分别用金相显微镜及扫描电镜对基体组织进行观察与分析。用X射线衍射仪对试样进行相组成分析,扫描角度为10°~90°。用布氏硬度仪对试样进行布氏硬度的测试,测试中选用5 mm压头,加载750 kg载荷,保持30 s。在电子万能试验机上进行压缩及拉伸强度的测试,其压缩速度为0.5 mm/min,拉伸速度为1 mm/min。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 相组成

为了分析含Sn灰铸铁内部的相组成,对其进行XRD衍射分析,其测试结果如图2所示。图2表明,试

表1 灰铸铁的化学成分设计  
Table 1 Chemical composition of the gray cast iron  $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Sn
2.8~3.2	1.6~2.4	0.6~0.8	0.2~0.3	<0.070	≤0.10

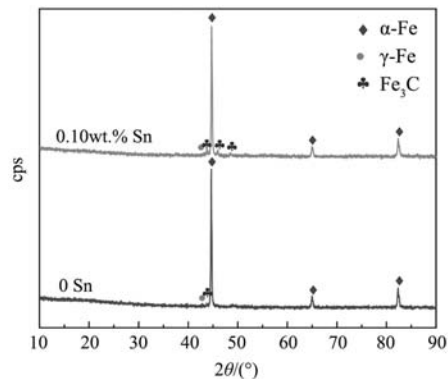


图2 两种Sn含量的灰铸铁铸件的X射线衍射分析

Fig. 2 X-ray diffraction analysis of the gray cast iron castings with two kinds of Sn contents

样中存在的组织除了铁素体之外,还含有一定量的残余奥氏体,此外还有渗碳体的存在。与不含Sn元素的灰铸铁试样进行对比,加入0.10 wt.% Sn元素后,碳化物含量增多。虽然铸件中加入了一定量的Sn元素,但从图中的衍射结果来看,并没有发现Sn元素的相关物质存在,推测可能由于其含量较低,且与衍射强度权重系数小有一定关系。

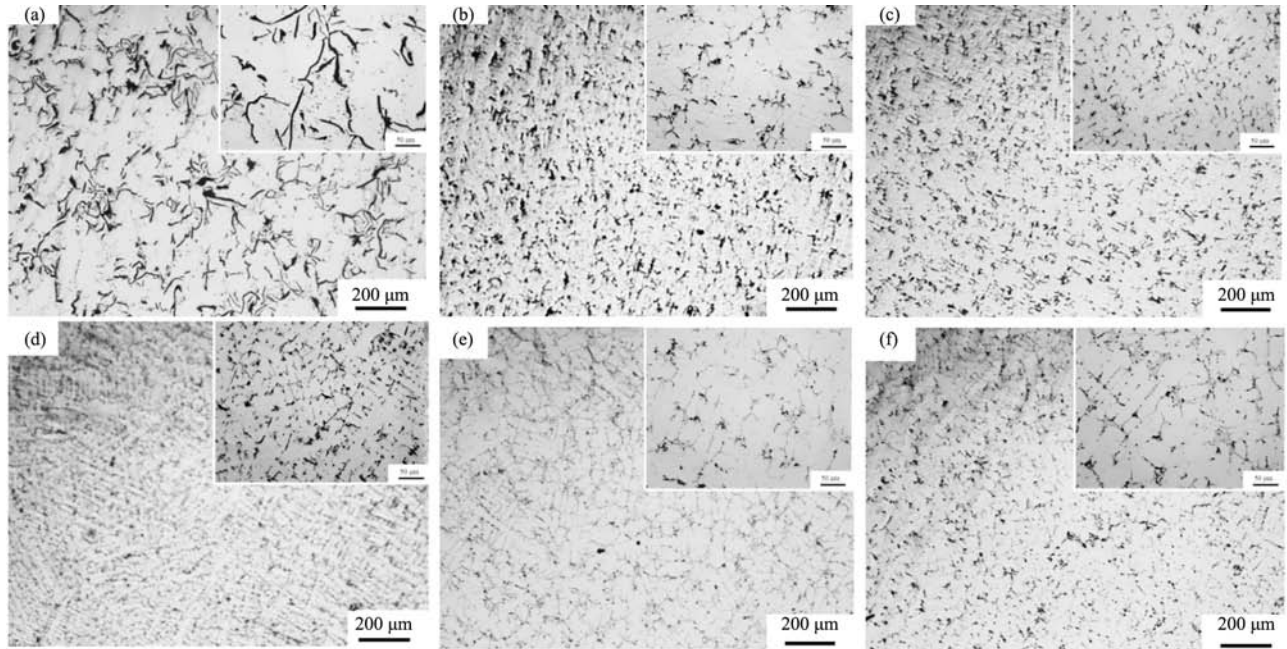
### 2.2 Sn对灰铸铁显微组织的影响

将抛光后的试样置于金相显微镜下进行石墨组织的观察,图3即为添加不同Sn含量的灰铸铁试样石墨组织的金相图片。

在低倍显微镜下观察发现,加入Sn元素后,石墨组织数量增多,放大至高倍下继续观察发现,石墨形态没有发生明显变化,无方向性,呈现出均匀分布的状态,90%以上都为片状石墨,其中大部分为典型的A型石墨组织,此外,还有部分D、E型石墨出现,这是因为铁液在熔炼过程中使用的是金属型模具,冷却速度快,过冷度大所导致的。此外,由于Sn元素对石墨起着一定的改善作用,因此,石墨级别由原先的3~4级提高至5~6级,石墨组织大部分细化为中等的片状A型石墨组织。由于Sn元素能够在石墨组织附近的基体中富集,阻碍了石墨的扩散,也在一定程度上影响石墨组织的长大过程<sup>[10-12]</sup>,因此,Sn元素的加入能够细化石墨,并增加石墨组织的数量,但对石墨形态影响不大。

将观察完石墨组织的试样用4 vol%的硝酸酒精进行腐蚀,用于观察含Sn灰铸铁铸件的基体组织,其形貌组织如图4所示,基体中片状石墨周围的白色区域即为铁素体组织,其余的灰色及深灰色区域则为珠光体组织。

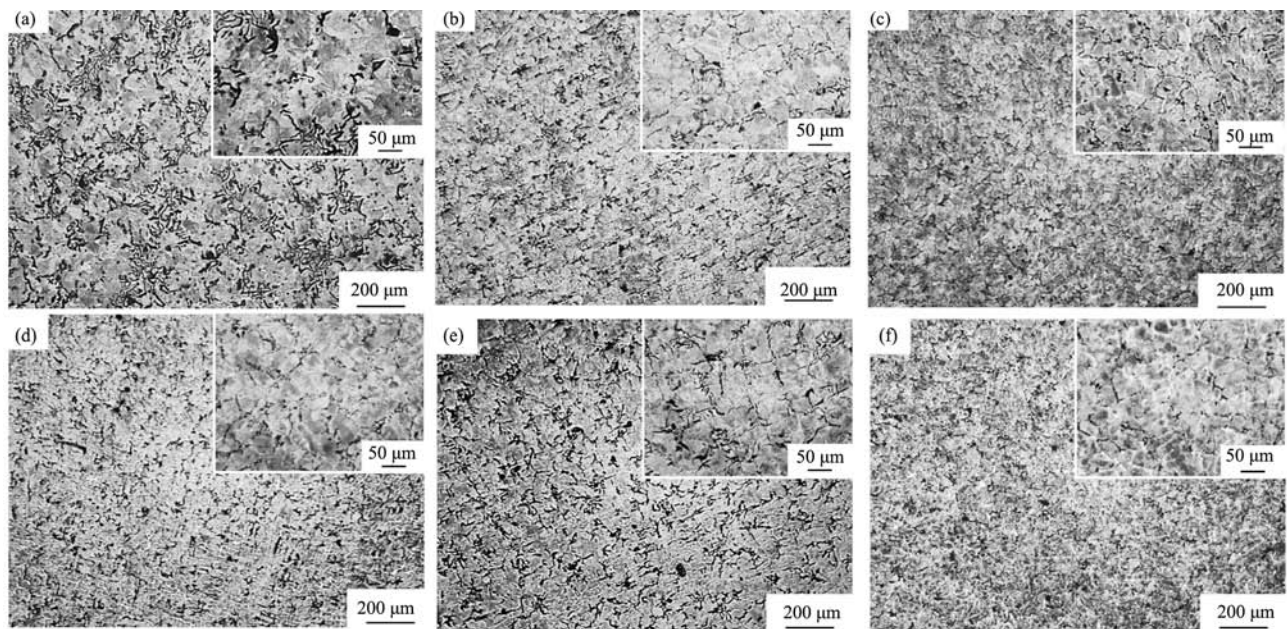
由图中低倍数状态下的金相照片能够发现,当灰铸铁中不含Sn元素时,珠光体含量大约在90%左右,随



(a) 0; (b) 0.02 wt.%; (c) 0.04 wt.%; (d) 0.06 wt.%; (e) 0.08 wt.%; (f) 0.10 wt.%

图3 不同Sn含量对灰铸铁石墨的影响

Fig. 3 OM images of the graphite structure of the gray cast irons with different Sn contents



(a) 0; (b) 0.02 wt.%; (c) 0.04 wt.%; (d) 0.06 wt.%; (e) 0.08 wt.%; (f) 0.10 wt.%

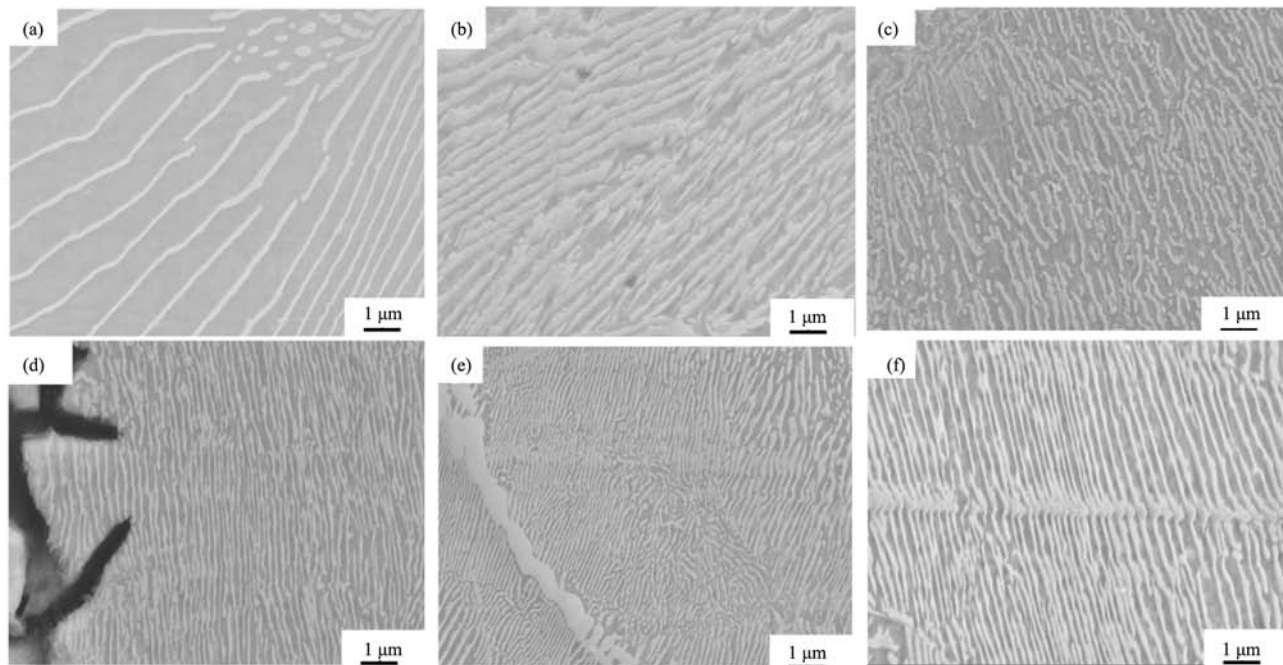
图4 不同Sn含量的灰铸铁基体组织的影响

Fig. 4 OM images of the matrix structure of the gray cast irons with different Sn contents

随着Sn含量的增多，珠光体组织的含量也随之增多，当Sn元素的含量超过0.04 wt.%时，几乎就可以获得全部的珠光体组织，基体组织中98%以上都为珠光体组织。此时，将试样调至高倍数下进行观察发现，珠光体组织均为片层状珠光体，且随着Sn含量的增加，其片间距也随之变化，该现象与陈海军<sup>[13]</sup>等人的研究结果类似。借助于扫描电子显微镜对其珠光体组织片间距的

大小进行观察与分析。图5为经扫描电镜观察下不同含Sn量的灰铸铁珠光体组织图片。

当灰铸铁铸件中不含Sn元素时，珠光体的片间距较大，随着Sn含量的不断增多，珠光体片间距缩小，当含Sn量达到0.08 wt.%时，珠光体片间距达到最小值，此后珠光体片间距又有些许增大。这是因为Sn元素加入后，部分溶解于铁素体中，部分在晶界处形成



(a) 0; (b) 0.02 wt.%; (c) 0.04 wt.%; (d) 0.06 wt.%; (e) 0.08 wt.%; (f) 0.10 wt.%

图5 不同Sn含量对珠光体组织影响的SEM图

Fig. 5 SEM images of the pearlite structure of the gray cast iron castings with different Sn contents

FeSn<sub>2</sub>偏析化合物,从而阻碍碳原子的扩散,细化共晶组织,稳定珠光体。在共析转变过程中,在石墨组织周围富集起来的Sn元素能够阻碍奥氏体中的碳向石墨组织中发生沉积,从而促进了珠光体组织的生成<sup>[14]</sup>。此外,由于凝固过程中成分过冷的出现,增大了凝固过程的形核率,也在一定程度上起到了细化晶粒的效果。

在实际生产过程中,珠光体片间距不仅与过冷度有关,而且和珠光体的形核、长大速率也有着一定的关系,只有在形核速率增大且生长速率减小的时候,才能够确定珠光体的层片间距是一定会减小的。而随着灰铸铁铸件中Sn含量的不断增多以及在基体中的不断固溶,碳原子以及铁原子在奥氏体中的扩散速率就必然会受到一定程度的影响,从而导致形核速率以及长大速率在各自的方向上出现了各自的极值,由于二者的共同作用,因此就出现了珠光体片间距先减小再增大的现象<sup>[14]</sup>。

### 2.3 Sn含量对力学性能的影响

铸件的力学性能与其内部的微观组织密切相关,是衡量材料性能的一个十分重要的指标。基于上述研究的显微组织的变化规律,对经Sn元素处理过后的灰铸铁铸件的力学性能进行测试,图6即为不同Sn含量加入时对灰铸铁铸件力学性能的影响规律,其中图6a、b、c分别为铸件的布氏硬度、抗压强度及抗拉强度随Sn含量的变化情况。

#### 2.3.1 布氏硬度

从图6a中可以看出,随着Sn含量的增加,铸件的布氏硬度值也随之增加,当Sn含量达到0.08 wt.%时,其布氏硬度值最高,继续向灰铸铁中加入Sn元素,其布氏硬度值反而有些许下降。结合组织分析表明,Sn元素的加入,使得石墨细化,粗大石墨数量减少,且珠光体数量及其片间距都得到了明显的细化,珠光体组织的含量多,对应的铁素体含量就相应的减少,由于珠光体组织的硬度较高,因此使得灰铸铁材料的布氏硬度得以提升。当Sn含量达到0.10 wt.%时,由显微组织图可知,组织中出现了部分游离渗碳体,形状不规则且分布不均匀,对材料产生较大的割裂作用,从而使得铸件的布氏硬度有所下降。此外,当铸件中的Sn含量较多时,容易出现晶界偏析现象,进一步降低了铸件的力学性能<sup>[15-16]</sup>。Sn元素加入后,灰铸铁铸件的硬度变化主要体现了Sn对灰铸铁基体的固溶强化及强化效果。

#### 2.3.2 抗压强度

从图6b中可以清晰地看到,随着灰铸铁铸件中含Sn量的增多,其抗压强度值明显提升,增加Sn含量至0.06 wt.%,其抗压强度值最高,当灰铸铁中的Sn含量超过0.06 wt.%之后,其抗压强度则开始下降,但较不加入Sn元素时的灰铸铁铸件来说,其抗压强度仍有明显提升。因此,能够得出结论,加入Sn合金元素能够在一定程度上提高灰铸铁铸件的抗压强度。这是因为

Sn元素在基体组织中固溶,在一定程度上对基体组织产生了固溶强化的作用,使材料的抗压强度提升。由于刚开始加入合金元素时,Sn元素能够明显增加并细化珠光体组织,此后随着Sn含量的增多,珠光体组织含量的变化量就越来越小,相应地就出现了铸件抗压强度增加量越来越小直至趋于平缓,而当Sn含量逐渐达到0.10 wt.%时,珠光体片间距增大且珠光体组织的含量逐渐达到饱和,珠光体化后,晶界偏析严重就会导致脆化,从而使得强度有所下降<sup>[17]</sup>。此外,由于Sn在奥氏体中的溶解度很小,在结晶过程中容易在残液中产生富集,促进渗碳体的生成。因此,当铸件中的Sn含量较高时,共晶团尺寸就会变得粗大,凝固速率也会减缓,当Sn含量达到一定值时,就会形成复合的网状物,或连续或断续,从而使铸件的抗压强度降低<sup>[18]</sup>。

### 2.3.3 抗拉强度

从图6c中能够明显看出,随着Sn合金元素含量的增多,灰铸铁铸件的抗拉强度随之提升,当Sn含量达

到0.08 wt.%时,铸件的抗拉强度值最高,继续增加Sn元素直至0.10 wt.%,其抗拉强度值无明显提高,基本保持不变,因此,向灰铸铁铸件中加入一定量的Sn元素,能够在一定程度上使铸件的抗拉强度提升,其抗拉强度的提升范围与Sn元素的含量有关。在铁液的共晶凝固的过程中,由于Sn元素的加入,铸件逐渐朝着液相偏析,最终在石墨片附近的奥氏体中富集起来,在共析转变时阻碍奥氏体中的碳朝着石墨的方向扩散,从而使珠光体组织增多,进而就起到了提高铸件抗拉强度的效果。此外,灰铸铁抗拉强度值的变化与其内部微观组织的变化是密切相关的,仅需微量的Sn元素就可以对珠光体组织起到显著的稳定作用<sup>[19]</sup>,结合显微组织图可知,随着Sn含量的增多,石墨组织细化,珠光体片间距缩小,石墨的尺寸越小,对于金属基体的割裂作用就会越弱<sup>[20]</sup>,这也是灰铸铁中加入Sn元素后其强度增大的原因之一。LYU等<sup>[21]</sup>的研究也表明,珠光体的片层间距越小,抗拉强度越高。

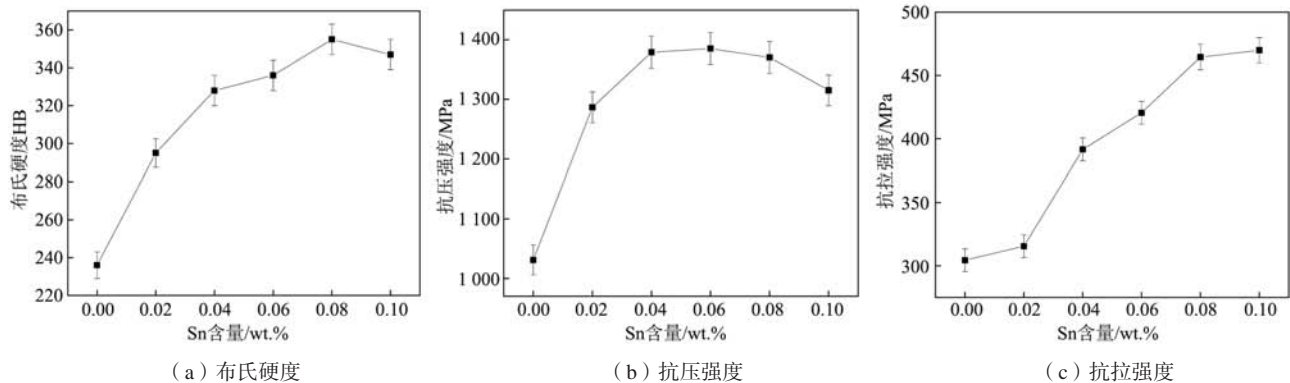


图6 灰铸铁Sn含量与其力学性能之间的关系

Fig. 6 Relationship between Sn content and mechanical properties of the gray cast iron

## 3 结论

(1) Sn元素对超大型缸套用灰铸铁中的石墨组织具有显著的细化作用,能够促进珠光体组织的生成,稳定珠光体组织,细化珠光体的片层间距,但对其石墨形态则基本无影响。

(2) Sn元素能够明显提升铸件的力学性能,随Sn含量的增多,铸件的布氏硬度及抗压强度先增大后减小,在Sn含量为0.08 wt.%及0.06 wt.%时分别达到最高,为HB 355及1 385 MPa;而抗拉强度则随Sn含量的增多一直增大,在含量为0.10 wt.%时,达到峰值,为

469 MPa。

(3) 经Sn合金化处理后的灰铸铁铸件在Sn含量为0.08 wt.%时,综合性能达到最优,其布氏硬度、抗压强度及抗拉强度分别达到HB 355、1 341 MPa以及464 MPa。

(4) Sn元素的加入,强烈稳定了珠光体组织,使石墨数量增多,细化了共晶组织,因而使其力学性能得以提升。

致谢:感谢江苏省“双创团队”的资助与支持。

## 参考文献:

- [1] MOONESAN M, RAOUF A H, MADAH F, et al. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2012, 520 ( 10 ) : 226-231.
- [2] VADIRAJ A, BALACHANDRAN G, KAMARAJ M, et al. Wear behavior of alloyed hypereutectic gray cast iron [J]. *Tribology International*, 2010, 43 ( 3 ) : 647-653.
- [3] 曾建谋, 曾焕浪, 陈志明, 等. 轿车制动器的制动盘开发研究 [J]. *机床与液压*, 2005 ( 8 ) : 38-39.
- [4] 曹琨, 赵子文, 祁庆花, 等. 碳当量对合成铸铁力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2019, 68 ( 11 ) : 1232-1236.
- [5] 王娜娜, 刘金祥, 熊毅. 热处理对NbVTi合金灰铸铁组织和性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2015, 36 ( 2 ) : 114-118.
- [6] 翟彦博, 刘昌明. Mg<sub>2</sub>Si颗粒增强自生铝基复合材料气缸套 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29 ( 6 ) : 494-497.
- [7] SILVA M, NAVES V, MELO J, et al. Analysis of wear of cemented carbide cutting tools during milling operation of gray iron and compacted graphite iron [J]. *Wear*, 2011, 271 ( 9-10 ) : 2426-2432.
- [8] AKDEMIR A, KUS R, SIMSIR M. Investigation of the tensile properties of continuous steel wire-reinforced gray cast iron composite [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528 ( 10-11 ) : 3897-3904.
- [9] 李改玲, 吕家禹, 曹玉亭. Cr、Sn对灰铸铁组织和性能的影响及应用 [J]. *现代铸铁*, 2019, 39 ( 3 ) : 22-25.
- [10] 王瑞冬, 尹庆华. 6DM3灰铸铁缸体材料质量稳定性的控制工艺 [J]. *现代铸铁*, 2018, 38 ( 2 ) : 27-30.
- [11] 吕贤枝. 厚大断面灰铸铁平板铸件的试制 [J]. *现代铸铁*, 2017, 37 ( 2 ) : 32-36.
- [12] 秦英, 黄雪飞, 黄维刚. Sn、Nb对高碳当量灰铸铁组织和力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2015, 44 ( 10 ) : 97-99, 103.
- [13] 陈海军, 陈丹, 吴素珍, 等. Sn对蠕墨铸铁组织与抗热疲劳性能的影响 [J]. *铸造*, 2015, 64 ( 1 ) : 5-8.
- [14] 张文亮. 灰铸铁锡锡复合合金化的试验研究 [J]. *中国铸造装备与技术*, 1998 ( 4 ) : 20-21.
- [15] 吕焯哲. 锡对蠕墨铸铁组织及性能的影响 [D]. 郑州大学材料加工工程, 2013: 35-41.
- [16] 宋芳, 潘昊亮, 祝庆. Sn微合金化大断面球铁的组织性能分析 [J]. *热加工工艺*, 2021 ( 17 ) : 77-80.
- [17] 梁义田, 刘真, 袁森. 合金元素在铸铁中的应用 [M]. *合金元素在铸铁中的应用*, 1992: 129-132.
- [18] 徐修炎. 含锡灰铸铁中锡的分布及其复合物分析 [J]. *理化检验 (物理分册)*, 1985, 21 ( 4 ) : 3-6.
- [19] 辜祖勋. 对影响灰铸铁件质量的一些问题的探讨 [J]. *铸造*, 2003, 52 ( 5 ) : 356-360.
- [20] 赵靖宇, 吕焯哲, 孙玉福, 等. 锡对蠕墨铸铁显微组织和力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2013, 62 ( 10 ) : 948-952.
- [21] LYU Y, SUN Y, LIU S, et al. Effect of tin on microstructure and mechanical properties of compacted graphite iron [J]. *International Journal Cast Metals Research*, 2015, 28 ( 5 ) : 263-268.

## Effect of Sn on Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron for Super Large Cylinder

CHEN Rui-run<sup>1</sup>, LI Yi-li<sup>2</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, WANG Shu<sup>2</sup>, WANG Xin-xiu<sup>2</sup>, XIA Yuan<sup>3</sup>, ZHOU Guo-ping<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 3. Yangzhou Wutingqiao Cylinder Liner Co., Ltd., Yangzhou 225008, Jiangsu, China)

### Abstract:

Super large cylinder liner is an important part of large diesel engine, in order to improve the microstructure and mechanical properties of gray cast iron for super large cylinder liner, different contents of Sn were added for alloying treatment. Effects of Sn and its content on the microstructure and mechanical properties of gray cast iron were studied. The results showed that with the increase of the Sn content, the internal graphite structure of the gray cast iron was gradually refined, the amount increased, the pearlite content in the matrix increased, and the mechanical properties were obviously improved. When the Sn content was 0.08 wt.%, the comprehensive mechanical properties of the gray iron castings were the best. The Brinell hardness, compressive strength and tensile strength were HB 355, 1 341 MPa and 464 MPa, respectively, which were 50.4%, 23.1% and 54.3% higher than those of the materials without Sn. When the Sn content continued to increase, the Brinell hardness and compressive strength were deteriorated. The mechanism of Sn improving mechanical properties is to refine graphite structure and stabilize pearlite structure.

### Key words:

Sn; grey cast iron; cylinder liner; microstructure; mechanical properties