

● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.04.023

蠕墨铸铁性能及其在内燃机中应用的研究进展

孙玉成¹, 孟迪², 姜爱龙¹, 郑洪亮², 田学雷²

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061 2. 山东大学 材料液态结构及其遗传性教育部重点试验室, 山东 济南 250061)

摘要: 内燃机作为一种应用广泛的动力源, 在轻量化及性能要求不断提高的背景下, 大功率内燃机的缸体、缸盖等结构复杂的薄壁铸件逐渐趋向于使用蠕墨铸铁以满足其对力学性能和导热性能的要求。但蠕墨铸铁生产工艺控制较难把握, 保证其质量一致性和稳定性存在着一定的难度。综述了蠕墨铸铁中石墨的生长机理, 总结了蠕墨铸铁生产技术以及组织性能控制的研究现状。提出了蠕墨铸铁的生产技术存在的问题和解决措施, 并给出了蠕墨铸铁研究的发展方向建议。

关键词: 蠕墨铸铁; 应用; 组织; 冷却速度; 研究进展

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)04-0417-06

Research Progress on Properties of Compacted Graphite Iron and Application in Internal Combustion Engine

SUN Yucheng¹, MENG Di², JIANG Ailong¹, ZHENG Hongliang², TIAN Xuelei²

(1. State Key Laboratory of Engine Reliability Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China; 2. Key Laboratory of Liquid Structure and Heredity of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: As a kind of widely used power source, the thin-wall castings with complex structure such as cylinder block and cylinder head of high-power internal combustion engine tend to use compacted graphite iron (CGI) to meet the requirements of mechanical properties and thermal conductivity under the background of continuous improvement of lightweight and performance requirements. However, it is difficult to control the production process of CGI and ensure its quality consistency and stability. The growth mechanism of graphite in CGI was reviewed. The production technology and microstructure and property control of vermicular graphite cast iron were summarized. The problems existing in the production technology of CGI and the development direction of CGI is suggested.

Key words: compacted graphite iron; application; microstructure; cooling rate; research progress

1948年美国人在研究用钕处理球墨铸铁过程中, 发现了蠕墨铸铁(CGI), 但在当时并没有引起重视。20世纪60年代, 我国的邱汉泉开始对蠕墨铸铁进行相关研究, 并将其应用到机床、内燃机等大型铸件。近年来, 随着对蠕墨铸铁的研究更加深入、应用更加广泛, 蠕墨铸铁的产量提升较大。据不完全统计, 现今我国蠕墨铸铁的产量为50万t左右^[1]。

蠕墨铸铁具有良好的综合性能, 兼具灰铸铁和球墨铸铁的优良特性: 力学性能介于灰铸铁和球墨铸铁之间; 而铸造性能、减振性及导热性都优于球墨铸铁, 与灰铸铁相近。同等壁厚条件下, 蠕墨铸铁的强度远高于灰铸铁, 可实现铸件的轻量化^[2]。20世

纪90年代初, 由于蠕墨铸铁具有优良的综合性能, 和其相对成熟稳定的生产技术, 蠕墨铸铁逐渐得到广大研究者的密切关注。越来越多的企业开始将蠕墨铸铁的生产技术应用于内燃机缸体、缸盖的批量生产中^[2-5]。

20世纪70年代末, 山东淄博蠕墨铸铁股份有限公司开始生产蠕墨铸铁件。且随其生产蠕墨铸铁的技术不断提高, 该公司在2011年牵头制定了关于蠕墨铸铁新的国家标准: 即在二维金相观察下, 蠕墨铸铁定义为石墨蠕化率大于80%的铸铁材料, 且其中可允许有球状、团状石墨, 但不允许有片状石墨的存在^[6]。

随着蠕墨铸铁的生产技术不断成熟, 由于其具有良好的综合性能, 同时内燃机具有复杂的结构设计, 从而使得蠕墨铸铁在内燃机中的应用逐渐趋于广泛。本文主要通过了解蠕墨铸铁中石墨的生长机

收稿日期: 2018-03-27

作者简介: 孙玉成(1982-), 山东莱西人, 博士、工程师。主要从事铸造工艺及铸造CAE技术、快速成型技术方面的工作。
电话: 86-536-2298840, Email: sunyuc@weichai.com

理及其生产技术,综述了最新的蠕墨铸铁的组织和性能,以及其在内燃机所应用的研究进展。

1 蠕墨铸铁中石墨的生长机理

蠕墨铸铁中的石墨形态介于片状石墨和球状石墨之间,呈蠕虫状^[7],如图 1。蠕虫状石墨在生长的过程中经常在 a 方向和 c 方向转变生长,且在两个方向不断分枝,有侧向分枝和边缘分枝等生长方式。因此,蠕虫状石墨的端部多数呈圆钝形态,同时少数呈较尖锐的形态,其整体结构含有大量厚片状的石墨形态。同时,蠕虫状石墨形态经常会有较大的差异,其中主要原因是铁液中的很多微量元素对石墨形态具有很大的影响,当镁含量较高时,蠕墨铸铁中石墨形状更接近球状石墨;而镁含量较低时,其石墨形状会更接近于片状石墨^[8]。而获得稳定蠕墨铸铁时残余镁含量的范围较窄,其含量大约为从 0.007%~0.015%,一旦处理不当就容易得到球状石墨或者片状石墨,因此稳定的获得蠕墨铸铁的难度较大。同时,稀土元素 RE 含量对石墨形态同样具有重要影响,当铁液中 $\omega(\text{RE})$ 残留量在 0.04%~0.07%时,能获得较好的蠕虫状石墨。

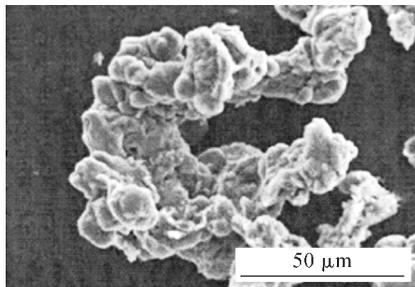


图 1 蠕虫状石墨形貌
Fig.1 Morphology of vermicular graphite

蠕墨铸铁中石墨的结晶过程可分为两个阶段:第一阶段在凝固过程中形成初生石墨晶胚,所析出的石墨为初生石墨;第二阶段是蠕虫状石墨的共晶生长过程,从而形成蠕虫状石墨^[9]。蠕墨铸铁在共晶凝固期间,随着凝固的进行,石墨逐渐增多且慢慢长大,同时莱氏体与奥氏体共晶形成共晶石墨,其含量逐渐变少。蠕虫状石墨在长大过程中,并不会被奥氏体包围。表明在固/液界面上,石墨有改变其生长方向的能力,与其他铸铁一样,是经过形核和长大过程共同作用而形成的^[10]。蠕墨铸铁的凝固特性取决于共晶生长模式,与灰铸铁的凝固特性更接近^[11]。

2 蠕墨铸铁的生产及质量控制

稳定生产蠕墨铸铁需保证蠕化剂吸收率尽可

能高且波动小。蠕墨铸铁的传统生产工艺包括:炉内加入法,出铁槽随流法和中间包处理法等。上述技术均存在蠕墨铸铁质量生产不稳定的问题,有学者研究并提出了一种可以替代传统蠕墨铸铁生产工艺的新技术——喂丝处理技术。喂丝处理技术通过结合先进的热分析技术能有效、稳定地生产高质量的蠕墨铸铁缸体、缸盖。目前,瑞典的 SinterCast、Nova-Cast 和德国的 OCC(Ohno Continuous Casting)均采用此技术^[12]。

OCC 技术在我国的应用较为广泛,如图 2 所示。其控制系统主要由 3 个测量部分以及一个计算控制部分组成,其中,3 个测量点的热分析系统均由软件系统——蠕铁导航器所控制。该控制系统通过所得到的温度信息进行分析计算,进而控制蠕化处理工艺。在蠕墨铸铁熔体的质量评判方面,OCC 技术通过所测得的热分析曲线的“OCC 指数分级”——镁指数、孕育指数进行评判。此外,OCC 软件系统可根据测得的热分析曲线计算两个指数,确定此区域是否是处于适合生产蠕墨铸铁的目标区域^[13]。

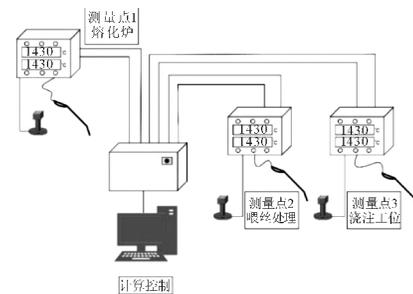


图 2 OCC 技术原理图
Fig.2 Schematic diagram of OCC technology

其中喂丝处理技术已经成功应用在 OCC 技术中,由于喂丝处理技术生产的蠕墨铸铁稳定且其蠕化率较高,含渣量也较低,进而大大减少甚至消除了缸盖中的缩松、气孔及夹渣等缺陷,同时提高了缸盖的铸造质量。喂丝处理技术可实现稳定生产结构复杂的蠕墨铸铁缸盖,且蠕墨铸铁的蠕化率稳定在 80%以上。

除了广泛使用的 OCC 技术外,SinterCast 也可以稳定生产蠕墨铸铁,不仅由于其具备一线式控制,而且它还配备了信息反馈系统,进而促进生产工艺的优化。其中,反馈系统的作用是通过测得铁液中的 Mg 量、碳当量和孕育剂量等结果且实时显示,从而可以对生产工艺进行修正,为蠕墨铸铁的稳定生产提供了很大的可能性^[14]。NovaCast 是通过优化浇冒口系统出气系统进而避免夹杂、夹渣、以及缩松、缩孔铸造等缺陷;同时计算机可同步显示凝固温度、浇注速度和压力等变化,并对凝固过程中可能产生的

缺陷提出预测,从而最大程度的优化铸造工艺。同时国内开发的喂丝法和冲入法(RE与球化剂复合蠕化处理)以及河北科技大学开发的在线控制方法等对于蠕墨铸铁的稳定生产具有很大的意义。

3 蠕墨铸铁的组织与性能

近年来,诸多学者在蠕墨铸铁组织、力学性能、导热性能等方面进行了相关研究。在蠕墨铸铁组织方面,陆文华等人研究了当蠕墨铸铁壁厚为12 mm以上时,合金元素Sb、Cu、Cr对蠕化率影响很小^[15]。同时Kim等学者对蠕墨铸铁中石墨的蠕化率进行研究,研究发现蠕墨铸铁试件的壁厚在10~50 mm时,随着蠕墨铸铁铸件厚度的增加,其蠕化率也随之增加;并且增加合金元素Cu会提高其组织中珠光体含量^[16,17]。对于蠕墨铸铁基体中珠光体含量的研究,也有学者发现蠕墨铸铁经K/Na变质剂处理后,能提高铸铁石墨化程度,并减小珠光体层片间距^[18]。

在力学性能方面,研究表明当蠕墨铸铁中石墨含量相同,蠕化率较低时,其蠕墨铸铁中的珠光体组织含量较多,表现为较高的抗拉强度和硬度^[7]。而经过合金处理的蠕墨铸铁,力学性能有较大程度提高。此外,经过锡和多元低合金化处理的蠕墨铸铁也可有效促进珠光体的形成并使其得到细化,同时可以有效减少并细化石墨,从而提高蠕墨铸铁的屈服强度和拉伸性能^[19,20]。蠕墨铸铁以钕钛生铁为原材料时,经蠕化处理,抗拉强度和硬度也能得到显著提高^[21]。在导热性能方面,蠕墨铸铁的蠕化率对其导热系数影响较大,且随蠕墨铸铁蠕化率升高,其导热性能逐渐增大^[22]。

蠕墨铸铁的机械加工性能、高温性能和疲劳性能等方面也有部分学者进行了相关研究。在机械加工性能方面,通过加入合金元素锡,蠕墨铸铁中的蠕虫状石墨得以细化,分布更加均匀,借此其强度和硬度均得以提高^[18,23,24]。同时发现,蠕墨铸铁的蠕化率越高,其基体组织越趋于均匀,切削抗力减小且加工性能较好^[19]。在高温性能方面,研究表明,蠕墨铸铁具有较强的高温(500℃)抗拉强度,且通过复合多元合金元素可以大大提高其高温强度保持率,由56%提高到71%以上^[16,25]。在热疲劳性能方面,研究发现,蠕墨铸铁中不同蠕化率对其热疲劳性能的影响不同,当蠕化率在70%~80%时,蠕墨铸铁的热疲劳性能最好^[26]。同时,部分学者在蠕墨铸铁的热疲劳性能和使用寿命等方面也有相关预测性研究^[27,28]。

除此之外,冷速对铸铁的基体组织及力学性能

也是较为重要的一个影响因素,诸多学者对此已经进行了深入的研究。包括冷却速度对球墨铸铁基体组织的影响^[29,30],冷速对高铬铸铁基体组织的影响^[31],以及冷速对灰铸铁基体组织的影响^[32-34]。通过对冷却速度的控制,能进一步改善铸铁的导热性能^[35],力学性能^[36-40],电化学^[41]以及抗蚀性^[42]等性能。但目前,在冷速对蠕墨铸铁性能的影响方面研究较少。有学者通过改变蠕墨铸铁铸件壁厚,从而达到改变冷速的效果,研究表明蠕墨铸铁铸件越厚,凝固过程中其冷速越慢,所形成的晶粒粗大,抗拉强度降低,同时石墨更易衰退^[14]。

由于冷速对铸铁的影响机理相同,因此为提高蠕墨铸铁性能,同样可通过在浇注过程中控制冷速条件,从而在凝固过程中使基体表现出不同的组织,进而在一定程度上改善蠕墨铸铁的综合性能。即可通过设计更加系统的浇注条件建立冷却速度—凝固组织(蠕化率、石墨形态、基体组织)—力学性能、导热系数的关系模型进行系统性的研究。

4 蠕墨铸铁在内燃机中的应用

内燃机在动力机械装置、人类活动以及社会进步发展的过程中占有非常重要的地位。由于其热效率高、功率大,转速范围宽、内部零件之间相互配合方便和机动性能良好等优点,在机械装置中获得了广泛的应用。内燃机作为动力机械装置中的重要组成部分,其缸体、缸盖是结构复杂的薄壁铸件^[43]。在工作过程中,内燃机中燃烧室内燃料的燃烧温度非常高,大约能达到2000℃左右。缸体、缸盖不仅需要承受其带来的高温循环的热冲击,而且也需要经受高气压循环的冲击^[44],同时内燃机所承受的由高爆压带来的高负荷也大幅度提升。此外,燃烧室受热不均,内燃机内部也因此产生较大热应力,工作条件恶劣。因此,内燃机缸体、缸盖的材料不仅需要具有良好的高温力学性能,而且还需具有较好的导热性能,从而能够快速使其内部的温度逐渐降低并趋向均匀,进而有效地降低其内部热应力,以保证内燃机安全有效地进行工作。但现有结构中缸体、缸盖的强度难以满足其使用要求。

随着社会的不断发展和科技的飞速前进,如何进一步减轻内燃机的体重已经成为现代内燃机领域发展的一项意义重大的研究课题^[45]。研究表明,随着内燃机体重的降低,燃料消耗随之减少,同时污染物的排放量也得到降低,大大减少了环境污染。由此可见,减轻内燃机的体重对于节能减排意义重大。而且空气污染日渐严重,节能环保的意识深入人心,内燃

机的生产也逐渐朝着高功率,低能耗,低污染,低噪声以及耐久力更高更可靠的方向发展。近年来,国内外众多学者及生产厂家在减轻内燃机体重方面做出了很多努力,也取得了一定的研究成果。众多生产厂家在内燃机中采用废气再循环技术和增压技术,使得污染物排放量在一定程度上减少,但其会进一步放大内燃机气缸内最高温度和最高压力过大的缺点,从而使得内燃机缸体、缸盖的耐磨性能和强度愈加难以满足要求^[46]。综上所述,为达到内燃机重量进一步减轻并承受更高温度和压力的目的,使得其对缸体、缸盖的刚度、强度以及疲劳性能等方面有了更高的要求,因此如何强化内燃机缸体、缸盖成为了国内外学者研究的热点之一。

一台以蠕墨铸铁为材质的内燃机重量比以灰铸铁为材质的内燃机重量减轻9%左右^[47]。此外,内燃机在高温情况下,需要具备较低的磨损率和优良的热疲劳等性能^[48]。蠕墨铸铁恰好满足上述性能,其在内燃机生产中得以较为广泛的应用。小型汽车的内燃机大多以铝合金为材质,但对于重型机械而言,采用以铝合金为材质的内燃机缸体、缸盖无法满足内燃机最高燃烧压力的要求,而高温性能优良的蠕墨铸铁恰能弥补这一缺点。此外,当蠕墨铸铁应用在某些高性能赛车内燃机上时,不仅可以减轻内燃机的体重,而且还可以提高其力学性能。如表1所示为奥迪4.2L V8蠕墨铸铁发动机与奔驰4.0L V8铝合金发动机性能对比数据^[5]。其中,奥迪4.2L V8的内燃机比奔驰4.0L V8内燃机的扭矩大约70 N·m;以及奥迪4.2L V8内燃机的功率与重量之比为0.94 kW/kg而奔驰4.0L V8内燃机的功率与重量之比0.89 kW/kg。从表1中数据看出,以蠕墨铸铁为材质的内燃机比以铝合金为材质的内燃机表现出更为良好的综合性能。

表1 蠕墨铸铁发动机与铝合金发动机性能对比
Tab.1 Comparison on the performance of compacted graphite iron engine and aluminum alloy engine

参数	奥迪 4.2L V8 (蠕墨铸铁)	奔驰 4.0L V8 (铝合金)
功率 /kW	240	231
比功率 /(kW/L)	57	57
扭矩 /(N·m/(r/min))	650/1600	580/1600
0-100 km/h 加速时间 /s	5.9	6.1
缸距 /mm	90	97
总长 /mm	520	640
发动机重量 /kg	255	259
功率与重量之比 /(kW/kg)	0.94	0.89

进入21世纪后,许多生产内燃机的企业开始着重研究开发以蠕墨铸铁为材质的内燃机铸件,包

括在内燃机正常工作中占有重要地位的缸体、缸盖、排气管等部件。其中中国重汽、玉柴、潍柴动力等企业已经能稳定大批量地生产以蠕墨铸铁为材质的缸体、缸盖。东风汽车等企业也可以生产以蠕墨铸铁为材质的排气管等内燃机铸件,可以看出,蠕墨铸铁对于内燃机的生产具有较大的意义。与此同时,少量的奥迪V8和V12柴油内燃机和大量的福特卡车内燃机等都是以蠕墨铸铁为材质,如表2所示为各种以蠕墨铸铁为材质的内燃机机型^[5,49-54]。

表2 蠕墨铸铁内燃机
Tab.2 Compacted graphite iron engine

序号	公司名	机型	铸件
1	一汽	6110/300 柴油机	缸盖
2	一汽	CA6110 柴油机	缸体
3	一汽	66 k 柴油机	缸体
4	潍柴	12 L 柴油机	缸体
5	潍柴	6M26 柴油机	缸体
6	玉柴	YC6113 柴油机	缸盖
7	玉柴	M3000 柴油机	缸盖
8	东风汽车公司	柴油机	排气管
9	奥迪	6.0 L V12 柴油机	缸体
10	奥迪	3.3 L V8 柴油机	缸体
11	达夫	12.6 L 1-6 柴油机	缸体
12	达夫	12.9 L 1-6 柴油机	缸体
13	福特-标致	2.7 L V6 柴油机	缸体
14	福特	3.6 L V8 柴油机	缸体
15	现代	3.0 L V6 柴油机	缸体
16	宝马	3.9 L V8 柴油机	缸体
17	曼	10.5 L 1-6 柴油机	缸体
18	曼	12.4 L 1-6 柴油机	缸体
19	奔驰	12.0 L V6 柴油机	缸体
20	奔驰	16.0 L V8 柴油机	缸体
21	欧宝	V6DTM 柴油机	缸体

内燃机零部件之间的相互装配作用,以及其在工作过程中受到的外力影响,使得内燃机零部件之间会产生较大的机械应力。而内燃机的缸体、缸盖火力面上所需承受的热应力更大,其所承受热应力与机械应力的比例大约为从12.8:1到39.4:1之间。由此可见,内燃机所受的热应力比机械应力要大出一个数量级^[55,56]。除此之外,内燃机的缸体、缸盖都是复杂的薄壁结构,且需要承受较大的压力和热冲击,因此对内燃机的强度、刚度提出了较高的要求。而蠕墨铸铁恰好能满足上述要求,但在浇注过程中,因内燃机内部缸体、缸盖等各部分壁厚不同而导致各部位的冷却速度会有很大的差异,而凝固过程的冷却速度对蠕墨铸铁中基体组织和石墨的蠕化率有很直接的影响,从而对蠕墨铸铁的高温力学性能以及导热系数产生较大影响。综上所述,

在铸造过程中,冷却速度对蠕墨铸铁内燃机的工作性能具有较大影响,即可通过研究冷速与蠕墨铸铁的综合性能间的变化规律,实现对蠕墨铸铁的综合性能的提高。

5 总结与展望

内燃机作为应用广泛的动力源,其需具备优良的力学性能和导热性能,进而有效的提高内燃机的工作效率。蠕墨铸铁的力学性能优于灰铸铁,同时也具有良好的铸造性能和导热性能;且在同等壁厚下,蠕墨铸铁的强度远高于灰铸铁,有利于内燃机轻量化的实现。因此蠕墨铸铁已经成为生产重型机械内燃机缸体、缸盖的理想材料。

蠕墨铸铁组织、力学性能、导热性能、机械加工性能、高温性能和疲劳性能等方面也有学者对其进行了一定的研究,但冷速对蠕墨铸铁性能影响方面的研究较少。而冷却速度对球墨铸铁、灰铸铁性能的改善具有较大影响,在导热性能、力学性能、机械性能、电化学以及抗蚀性等性能提高方面均表现出较大的作用。冷速对铸铁的影响机理相同,因此为使蠕墨铸铁具有更好的综合性能,应确定冷却速度—凝固组织(蠕化率、石墨形态、基体组织)—力学性能、导热系数的关系模型,从而进行系统性的研究。这样对于提高内燃机性能、减轻内燃机体重和生产高质量的内燃机有着极其重要的意义,同时为进一步优化蠕墨铸铁件的生产工艺奠定基础。

参考文献:

- [1] 张忠仇,李克锐,曾艺成. 我国蠕墨铸铁的现状与展望[J]. 铸造, 2012, 61(11):1303-1307.
- [2] 张宪 [译]. 切削加工蠕墨铸铁(CGI)的挑战[J]. 工具展望, 2008 (4):24-25.
- [3] 王有清,胡飞,施华武,等. 蠕墨铸铁在气缸体铸件上的应用与发展[J]. 现代铸铁, 2010, 30(6):23-26.
- [4] Dawson S, Schroeder T. Practical Applications for Compacted Graphite Iron[J]. Transactions of the American Foundry Society & the One Hundredgth Annual Metal casting Congress, 2004.
- [5] 张伯明. 蠕墨铸铁在发动机上的应用[J]. 汽车与配件, 2011(2): 31-33.
- [6] 张忠仇,吴现龙,王拓. 蠕墨铸铁新国家标准介绍. 现代铸铁[J]. 2012, 32(1):15-18.
- [7] 闫军芳. 蠕墨铸铁组织形貌及其性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [8] Alonso G, Stefanescu D M, Suarez R. Kinetics of graphite expansion during eutectic solidification of cast iron [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2014, 27(2):87-100.
- [9] 苏华钦,施居府. 铸铁凝固及其质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [10] 赵西成. 蠕墨铸铁凝固过程及其组织形成机理的研究[J]. 铸造, 1992, 41(12):13-17.
- [11] 施居府. 蠕墨铸铁凝固过程中的共晶生长模式 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 1999, 24(1):49-53.
- [12] Ohno A. Continuous Casting of Single Crystal Ingots by the O. C. Process[J]. JOM, 1986, 38(1):14-16.
- [13] 金胜灿,韩振中,李连杰. OCC 蠕墨铸铁蠕化工艺及其生产控制技术的应用研究 // 2014 中国铸造活动周论文集[C]. 北京: 中国机械工程学会, 2014.
- [14] 陈位铭,金胜灿. SinterCast 蠕墨铸铁的大规模生产[J]. 汽车工艺与材料, 2005(5):20-23.
- [15] 陆文华,潘文霞,顾林喻. 壁厚及石墨化对蠕墨铸铁组织及性能的影响[J]. 铸造技术, 1984, 5(3):35-38.
- [16] 张馨心,张国伟,徐宏. 蠕墨铸铁组织性能均匀性研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13):27-30.
- [17] Kim S, Cockcroft S L, Omran A M. Optimization of the process parameters affecting the microstructures and properties of compacted graphite iron [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 476(1-2):728-732.
- [18] 郑冰,任凤章,张旦闻,等. 两种蠕墨铸铁显微组织与切削加工性能[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015, 36(5):5-9.
- [19] 杨忠,陶栋,郭永春,等. 多元低合金化对蠕墨铸铁组织与性能的影响[J]. 铸造, 2014, 63(2):115-119.
- [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] 李华基,洪观镇,胡慧芳. 钒钛蠕墨铸铁的特点及其应用前景[J]. 热加工工艺, 2010, 39(19):35-39.
- [22] Ma Z J, Tao D, Yang Z. The effect of vermicularity on the thermal conductivity of vermicular graphite cast iron [J]. Materials & Design, 2016, 93: 418-422.
- [23] 郑冰,任凤章,李锋军. Sn 对蠕墨铸铁显微组织和切削加工性能的影响[J]. 铸造, 2016, 65(2):137-140.
- [24] Mohammed W M, Ng E, Elbestawi M A. Modeling the effect of compacted graphite iron microstructure on cutting forces and tool wear [J]. Crip Journal of Manufacturing Science & Technology, 2012, 5(2):87-101.
- [25] 王敏毅,黄颖,林有希. 钕基重稀土蠕墨铸铁的高温性能研究[J]. 福州大学学报, 2012(4):501-507.
- [26] Wang C, Zhou H, Lin P Y. The thermal fatigue resistance of vermicular cast iron coupling with H13 steel units by cast-in process [J]. Materials & Design, 2010, 31(7):3442-3448.
- [27] Zhang M X, Pang J C, Qiu Y. Thermo-mechanical fatigue property and life prediction of vermicular graphite iron [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 698: 63-72.
- [28] Seifert T, Maier G, Uihlein A. Mechanism-based thermomechanical fatigue life prediction of cast iron. Part II: Comparison of model predictions with experiments [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(8):1368-1377.
- [29] 张锁梅,黄卫华,邢长虎,等. 不同冷却速度下球墨铸铁的基体组织[J]. 现代铸铁, 2000, (4): 29-32.
- [30] 薄鑫涛. 等温淬火球墨铸铁——ADI [J]. 热处理, 2016, 31(4): 46-46.
- [31] 陈闪闪,赵爱民,李振,等. 加热温度和冷却速度对亚共晶高铬

- 铸铁微观组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(11):78-84.
- [32] 闫世兴,董世运,徐滨士,等. 灰铸铁表面激光熔覆 NiCuFeBSi 合金层中碳扩散形式研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(9):2182-2186.
- [33] 张太荣,罗雪峰,欧阳代云. 冰箱压缩机曲轴箱侧板白口原因探讨[J]. 现代铸铁, 2014, 34(2):69-71.
- [34] 陆文华. 铸铁及其熔炼[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1981.
- [35] Holmgren, Daniel, Attila Diószegi, and Ingvar L. Svensson. Effects of carbon content and solidification rate on thermal conductivity of grey cast iron [J]. Research & Development, 2007, 3(4):210-214.
- [36] Er-jun, Liang, Song. Effects of forced cooling on mechanical properties and fracture behavior of heavy section ductile iron [J]. China Foundry, 2015, 12(6):398-405.
- [37] Oloyede O, Cochrane R F, Mullis A M. Phase Transformation, Microstructural Evolution and Property Modification in Rapidly Solidified Grey Cast Iron [C]//TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Springer International Publishing, 2017:719-727.
- [38] Suarez-Sanabria A, Fernandez-Carrasquilla J. Microstructure and mechanical properties of as-cast ferritic spheroidal cast iron for heavy section [J]. Revista de Metalurgia, 2006, 42(1):18-31.
- [39] Oloyede O, Cochrane R F, Mullis A M. Effect of rapid solidification on the microstructure and microhardness of BS1452 grade 250 hypoeutectic grey cast iron [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016.
- [40] Çetinarslan C S, Karaman Genç S. Study in the variation of mechanical properties of nodular cast iron depending upon section thickness [J]. Material wissenschaft und Werkstofftechnik, 2014, 45(2): 106-113.
- [41] Azzoug M O, Boutarek N, Drif R. Metallurgical, Mechanical and Electrochemical Behavior Study of the Lamellar Gray Cast Iron Treated with Vanadium [J]. Acta Physica Polonica A, 2016, 129(4):548-551.
- [42] Abboud J H. Microstructure and erosion characteristic of nodular cast iron surface modified by tungsten inert gas [J]. Materials & Design, 2012, 35: 677-684.
- [43] 洪晓先. 对汽车铸铁件生产中若干问题的再认识[J]. 现代铸铁, 2001(4):44-47.
- [44] 赖华清,范宏训. 汽车铝缸盖铸造工艺方法[J]. 中国铸造装备与技术, 2003(5):29-31.
- [45] 司乃潮,张亮,孙少纯,等. 高强度灰铸铁汽车内燃机缸体铸件的研制与应用[J]. 铸造, 2005, 54(5):501-505.
- [46] 赵新年,杨茂顺,韦斌. 高耐磨发动机气缸套的研究与开发[J]. 内燃机与配件, 2015(7):6-9.
- [47] 史蒂夫·道森. 蠕墨铸铁—现代柴油发动机缸体和缸盖的材料[J]. 铸造技术, 2009, 30(5):455-460.
- [48] 张永振,沈百令. 蠕墨铸铁的干摩擦[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [49] 陈位铭,金胜灿. 蠕墨铸铁 CA6110 柴油机缸体的试验研究[J]. 铸造技术, 2006, 27(4):341-343.
- [50] 周永寿,徐卫国,廖顶松. 66K 蠕墨铸铁缸体的试制及疲劳强度研究[J]. 现代铸铁, 2016, 36(6):56-60.
- [51] 姜爱龙,房夺,许景峰. 大型蠕墨铸铁气缸体材料工艺开发及应用[J]. 中国铸造装备与技术, 2017(1):54-57.
- [52] 李明,齐少豹. 6M26 蠕墨铸铁的生产工艺 [J]. 现代铸铁, 2015, 35(2):54-59.
- [53] 邓劲珊,刘治军,刘春雷. YC6113 柴油机蠕墨铸铁缸盖铸件的质量控制[J]. 铸造工程, 2010(4):27-29.
- [54] 李统宇,苏广才. M3000 蠕墨铸铁缸盖气缩孔的成因分析及克服措施[J]. 铸造技术, 2009, 30(12):1501-1503.
- [55] Whitelaw J H, Payri F, Arcoumanis C. Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2 [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2004.
- [56] 郭良平,张卫正,王长园,等. 柴油机气缸盖传热规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3):277-282.

技术资料邮购

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

本书由西安理工大学魏兵教授编著。共8章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页。

特快专递邮购价：226元。

邮购咨询：李巧凤 电话/传真：029-83222071 技术咨询：13609155628