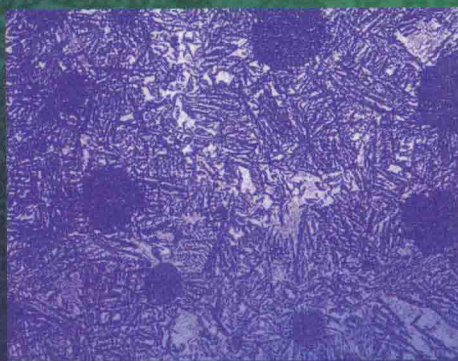


DUCTILE CAST IRON

郝石坚 宋绪丁 著

球墨铸铁

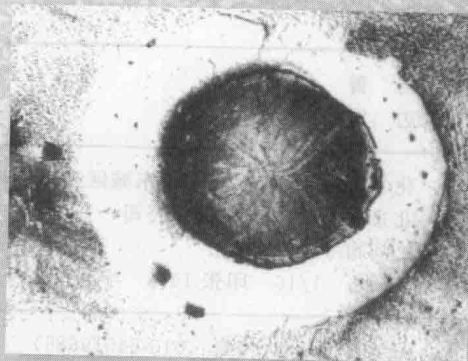
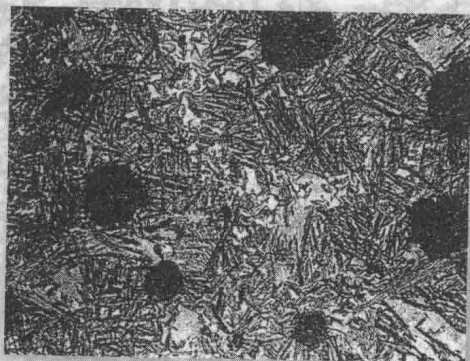


化学工业出版社

DUCTILE CAST IRON

郝石坚 宋绪丁 著

球墨铸铁



化学工业出版社

本书首先介绍球墨铸铁中石墨球化原理、铸态组织形成过程、铸件常存成分和合金元素对铸件组织和性能的影响。然后依次详细介绍球墨铸铁件的各项生产工艺,包括原铁水熔炼、球化处理、孕育处理、铸件浇注与补缩、铸件热处理。最后各章分别介绍等温淬火球墨铸铁、奥氏体球墨铸铁、薄壁和厚壁球墨铸铁件、异态石墨和铸造缺陷。全书内容完整,论述清晰,资料新颖,包含许多未曾见诸国内文献的技术资料,有助于开阔视野,促进铸造技术创新,提高我国球墨铸铁生产技术水平。

本书适合生产球墨铸铁的工程技术人员、铸造工程师、科研工作者阅读。也可作为高等学校相关专业参考读物以及继续教育教材。

著 丁 宋 型 铸 球

球墨铸铁



图书在版编目(CIP)数据

球墨铸铁/郝石坚,宋绪丁著. —北京:化学工业出版社,2014.11

ISBN 978-7-122-21814-8

I. ①球… II. ①郝… ②宋… III. ①球墨铸铁-教材 IV. ①TG143.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第210001号

责任编辑:杨 菁
责任校对:边 涛

文字编辑:颜克俭
装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数361千字 2015年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

FOREWORD

前言

铸铁是人类历史上应用最广泛的金属材料。考古出土文物证明,4000 多年以前,人类已经在冶铸青铜件的基础上利用有限的炼铁技艺开始制造铁器。中国是最早生产和应用铁器的国家之一,所生产的铁器包括农具、兵器、钟鼎、祭器、艺术品等。在很长的历史时期内,这些铸铁制品为我们祖先的生活和生产所利用。

铸铁是脆性金属材料,强度和韧性都很低。即使在古代,铸铁的应用范围也受到一定限制。我国劳动人民曾经摸索开发过一些生铁柔化技艺,使铸铁能在更多领域应用。多年前我国考古人员在河南省巩县铁生沟冶铁作坊遗址出土的西汉铁镢中发现完整的球状石墨。在电镜下观察经过热氧腐蚀的试样,发现其中球状石墨内部呈现年轮状结构,在偏振光下观察还可看到球状石墨显示的辐射状多晶形貌,与现代球墨铸铁中的球状石墨结构十分相似。这已经成为我国古代冶金史上璀璨的一页。战国时期铸造的铁器中已经发现团絮石墨。显微镜下观察两汉时代铸铁产品,可以看到近似黑心可锻铸铁和白心可锻铸铁的组织。而白心可锻铸铁 18 世纪才在欧洲出现,美国 19 世纪才制出黑心可锻铸铁件。

欧洲工业革命以前,我国在冶铸技艺和铸铁件生产规模方面一直处于世界前列。但是由于封建社会制度的束缚,使我们在几个世纪内逐渐落后于西方。

1947 年英国人 H. Morrogh 发现过共晶铁水中含稀土元素铈超过 0.02%,并经过适当孕育处理后,铸铁中的石墨由片状改变为球状,铸件强度和韧性均显著提高。1948 年,美国人 A. P. Gangnebin 试验在铸铁液中加入镁,当镁的质量分数 $\geq 0.04\%$,再经过硅铁孕育处理后,石墨也能成为球状。这些发现成为现代人认识和应用具有球状石墨铸铁的开端。镁并非稀有金属,而且制取球墨铸铁所需的镁量并不多,因此采用加镁处理制取含有球状石墨的铸铁很快就成为铸造界争相推广的技术。世界上出现了可以在工业上广泛应用的铸铁合金新品种——球墨铸铁。

球墨铸铁诞生迄今已有 60 多年。在此期间,各国铸造工作者对于铸铁合金凝固过程、球状石墨形核、生长机制、原铁水熔炼、铁水炉前处理方法、各种类型铸件的铸造和热处理工艺都进行了大量科学研究和生产实践。使球墨铸铁各项性能、应用可靠性和生产工艺逐步改进提高。当前已经成为产量逐年增加的优良铸造合金。

铸铁中石墨的形核、生长机制多年来一直是铸造界关注的问题。特别是球墨铸铁问世以来,这个问题进一步引起人们的注意。20 世纪 70 年代以前学术界争论的焦点在于球状石墨是由液相析出还是由固相分解而来。直到 70 年代初期,科学研究的结果使学术界确认了球状石墨是直接析出于液相。由于电子显微镜的应用和金属分析技术进步,石墨形核、生长机制的研究逐步深入。1972 年 Lux 综合了许多专家的研究成果,综述了有关球状石墨生成过程的研究成果,系统地阐明了石墨晶体的生长机制和过程。虽然迄今尚未发现能够产生球状

石墨的特定晶核,但是通过一些实验已经确认了石墨晶体是依赖螺位错缺陷提供的生长台阶和旋转孪晶缺陷提供的生长台阶沿不同晶向生长而形成。根据生长环境的热力学条件,晶体在不同晶向的生长速度和生长模式是不同的,产生的石墨晶体形态也不相同。球状石墨是由结晶核心沿径向辐射生长所生成的许多角锥形单晶体组成的晶体。角锥形单晶体是在凝固过冷环境下主要依靠螺位错上的生长台阶盘旋生长的产物。这些说法大多数已经获得相关的理论支持和实验证据,是当前学术界中有关石墨生长机制理论的主流见解。

在同一文献里,作者还把影响石墨球化的元素分别列出。提出镁、铈及部分其他稀土元素是能使铸铁中石墨球化的元素。另外也指出一些元素干扰石墨的球化。除了最常见的氧和硫以外,还有一些微量元素,如钛、铋、铅、锡等,即使质量分数微小也能对石墨球化产生明显的干扰作用。研究工作者列出两类元素的热力学参数,并将这些参数与该元素对石墨晶体生长模式的影响联系起来。确认了球化元素与干扰元素的作用以及发现稀土元素能够中和干扰元素的负面作用,对于球墨铸铁进一步开发利用产生了很大影响。

几十年来学术界出现过一些有关石墨球化的理论。值得注意的是近些年出现的气泡理论。该理论认为球化合金加入铁水过程中,铁水内产生大量细小气泡,石墨晶体在凝固过程中会依附于这些气泡内壁生长而成为球形。从而使铸件中产生大量球状石墨。这种说法曾得到相关实验证据,并且受到一些科研人员的理论支持。但是作为公认的球化理论,尚待深入研究。

制取球墨铸铁需要经过对铁水的球化处理和孕育处理(统称炉前处理)过程。进行球化处理的目的是安全地把球化合金熔入铁水,并获得较高而且稳定的球化元素吸收率,使铸铁凝固后镁的质量分数保持在所要求范围内[一般是 $\omega(\text{Mg})=0.04\%\sim 0.07\%$]。纯镁熔点为 660°C ,沸点为 1120°C 。沸点远低于炉前处理时的铁水温度。因此往铁水中加入纯镁时必然引起铁水剧烈波动,镁吸收率很低且不稳定。因此工业化制取球墨铸铁以来,一直在研制合适的球化合金以及改进球化合金加入铁水的方法。曾经将镁与镍或铜制成沸点和密度较高的合金加入铁水包中与铁水反应。20世纪60年代,我国开发了稀土硅铁镁球化合金。后来根据镁的气化温度随铁水承受的外界压力增加而提高的原理,出现了在密闭铁水包中压力加镁的处理方法。当前各国开发的球化处理方法约有十余种。本书将介绍其中应用最广泛的8种方法。当前我国企业最常用的是冲入法。许多西方国家比较广泛采用转包处理法和镁丝处理法。大量连续生产球墨铸铁件的工厂则乐于采用适合流水式浇注的型内球化处理方法。

在球化合金中加入稀土元素是球墨铸铁发展过程中的一项重要改进。铈是最早发现的球化元素。由于资源稀缺,价格昂贵,特别是发现镁的球化作用后,铈和稀土元素在国内球墨铸铁生产中并未获得广泛应用。后来发现镁球化合金中加入少量稀土元素(我国通常使用混合稀土合金)在利用高硫生铁制取球墨铸铁、抑制微量元素干扰石墨球化作用、消减球化衰退等方面效果显著,而且我国稀土资源比较丰富,于是国内开展了含有混合稀土元素的硅铁镁球化剂的应用研究,并制定了稀土硅铁镁球化合金国家标准。在国内推广应用这种球化合金获得较好效果。当今稀土元素已经进入我国球墨铸铁生产领域。这是我国改进球墨铸铁球化合金方面的一项进步。

众所周知,灰铸铁的片状石墨通常是由液相中某一核心开始向多方向生长,形成片状石墨-奥氏体共晶团。这个共晶团存在范围远大于球状石墨-奥氏体共晶团,而且在应力状态下球状石墨对基体金属连续性的破坏作用小得多,石墨边缘的应力集中现象也相对较弱。球墨铸铁力学性能优于灰铸铁。特别是冲击韧性、疲劳极限、耐热、耐蚀、耐磨能

力差距更为明显。珠光体球墨铸铁的最小抗拉强度和屈服强度分别为 600MPa 和 370MPa, 而珠光体灰铸铁最小抗拉强度则为 350MPa, 不显示明确屈服点。两者伸长率差距更为明显。

经过几十年的研究和实践, 球墨铸铁的组织控制技术已趋成熟。人们已经掌握了通过调整铸件化学成分、铸造工艺、热处理制度等手段控制铸件组织和性能。铸造工作者已经认识和能够利用常存元素和各种合金元素(包括一些微量元素)改变球墨铸铁力学性能、物理性质。在提高材料综合力学性能方面, 最突出的例子是 60 年代出现了等温淬火球墨铸铁。开发出贝氏体基体球墨铸铁。70 年代又出现了经过等温淬火制成的针状铁素体+高碳奥氏体基体的球墨铸铁(曾被称为奥贝球墨铸铁, 国外简称 ADI)。铸件经过奥氏体化以后, 含硅较高的奥氏体冷却到临界温度以下等温停留, 析出被硅强化的针状铁素体并使溶入奥氏体的碳量增加。导致基体组织获得复合强韧化, 并使奥氏体稳定性显著提高。这个品种的综合力学性能达到已有球墨铸铁的高峰。在伸长率为 10% 情况下, 拉伸强度可以超过 1000MPa。这种球墨铸铁的生产技术已经成熟, 产品已经应用到诸如重型曲轴一类产品。我国年产这类高强韧性球墨铸铁已达几十万吨。

添加了合金元素的球墨铸铁件已用于耐热、耐磨、耐腐蚀铸件, 并能制成可应用于低温环境的零件。与几十年前相比, 球墨铸铁件在各种工况、环境下的可靠性、工作性能、承载能力都发生巨大的变化。本书将在相关章节中介绍合金球墨铸铁。

球墨铸铁铸造性能良好。由于碳当量较高(通常在共晶成分附近)球墨铸铁水具有很好的流动性。凝固收缩率大于灰铸铁, 收缩产生的缺陷主要是集中缩孔和缩松, 比较容易利用共晶膨胀作用对铸件进行补缩, 便于消除铸件的收缩缺陷。

随着球墨铸铁生产技术长足进步和性能不断提高, 它的使用范围日益扩大, 汽车、铸管、船舶、机床、液压装置、通用机械、冶金和工程机械、农业机械等产品和行业中, 球墨铸铁件的使用已经非常普遍。球墨铸铁件产量逐年增长。迄今全世界球墨铸铁和灰铸铁的产量已经接近。

汽车制造行业中, 有许多高性能要求的零件, 如发动机汽缸头、曲轴、连杆、驱动桥壳、差速器壳体、排气歧管和涡轮增压器等都已采用球墨铸铁制造。其中曲轴、连杆是强度和刚度要求很高的零件, 需要采用经过等温淬火的低碳当量高合金球墨铸铁制造。汽车发动机上的一些铸件需要优良的耐热和抗热疲劳性能, 有些还是要求具有高热导率、能够快速散热的薄壁球墨铸铁件(壁厚 3mm 左右)。许多汽车生产厂采用高镍奥氏体球墨铸铁制造这些零件。全世界球墨铸铁件产量的 20%~25% 用于与汽车生产配套。

铁素体球墨铸铁耐腐蚀性能优于钢、灰铸铁, 耐压能力强, 非常适用于制造水、煤气输送管道和管件(三通、弯头、变径管等)。可用于制造 $\phi 500\text{mm}$ 以上大口径管子, 也可用于各种建筑物的给排水管道。离心铸造球墨铸铁管道的社会需求量很大, 其产量约为世界球墨铸铁件总产量 40% 以上, 就其产量占世界球墨铸铁件总产量而言, 离心铸管是产量占第一位的品种。

其他诸多行业也广泛使用球墨铸铁件。金属切削机床的大型工作台、滑板、自动卡盘、龙门铣床横梁, 压力机立柱、机座, 大型离心水泵外壳、核废料储运罐、大型注塑机机座等都采用球墨铸铁制造。

本书共 12 章。前三章属于第一部分, 讨论球墨铸铁铸态组织生成的基本理论、铸件化学成分和性能。第 1 章讨论球墨铸铁凝固和固态相变。重点讨论球状石墨的生成过程、分布状态以及影响因素。固态相变则讨论奥氏体组织在冷却过程中的转变, 重点讨论共析转变和

影响球墨铸铁铸态基体类型及铸件性能因素。这些都是球墨铸铁制造者、研究者、使用者应该熟悉的基础内容。第2章介绍球墨铸铁的化学成分。分类介绍常存元素、合金元素、微量元素、气体元素在球墨铸铁中的作用,并提出各种元素在性能不同铸件中的合适含量范围。第3章介绍球墨铸铁性能。在力学性能部分,首先简要阐述球墨铸铁拉伸断裂机制以及由此形成的拉伸强度性能。继而讨论了球墨铸铁硬度、弹性模量、扭转、剪切、弯曲强度、压缩强度、冲击韧度、疲劳极限、断裂韧度、抗热疲劳强度以及高温力学性能和低温力学性能。基本上简要说明了球墨铸铁承受各种常见机械负载的能力。在物理性质方面,主要介绍与球墨铸铁应用密切相关的热物理性质,包括热导率、线膨胀系数、比热容、熔化潜热等。也介绍了密度、铁水表面张力、黏度以及有关的电阻率、磁性质。

第4章至第8章是本书第二部分。介绍球墨铸铁件生产的各项基本工艺和相关工序的技术要点。第4章讨论在感应炉和冲天炉中熔化球墨铸铁原铁水。本章所提到的生产工艺大多来源于工厂长期的生产实践,并且经过验证、总结,认为所提资料可供铸造工作者参考。当前单独采用冲天炉熔炼球墨铸铁原铁水的工厂已逐年减少,但一部分工厂仍在使用的。因此,本章重点讨论感应炉熔炼工艺之后,对冲天炉熔炼也作了简要介绍。第5章介绍制取球墨铸铁比较常用的8种球化处理方法和所用的处理装备。其中包括国内最常用的冲入法球化处理工艺、国外使用较广泛的转包处理法(G. F. 法)、适用于批量生产的型内球化处理工艺。本章对各种处理方法都作了比较详细的介绍,并对严重影响球状石墨生成的球化衰退问题和高硫铁水的处理进行了探讨。第6章讨论铁水的孕育处理。介绍了常用孕育剂、各种孕育处理方法、抑制孕育衰退要点、提高孕育效果等问题。第7章讨论铸件成形过程中的两个重要工艺环节,即铁水浇注和凝固过程中体积收缩的补充。前者主要讨论与铸件结构、铁水温度、浇注速度、阻挡熔渣等因素有关的浇注系统设计和应用。铸件补缩是防止铸件产生缩孔、疏松缺陷的主要手段。在这方面,本书首先分析了铸型中液态收缩和凝固收缩的基本规律,据此讨论了冒口补缩原理、冒口尺寸设计以及利用共晶膨胀实现厚壁铸件无冒口铸造工艺,对铸造工作者有实际意义。第8章阐述球墨铸铁件热处理工艺的特点,并介绍了铸件消除内应力、石墨化退火、正火、淬火与回火、表面强化等工艺过程。

第9章至第12章是本书第三部分。包括分章介绍具有高碳奥氏体+针状铁素体基体组织的等温淬火球墨铸铁,奥氏体球墨铸铁,薄壁和厚壁球墨铸铁以及球墨铸铁中的异态石墨和特有铸造缺陷。第9章首先介绍等温淬火球墨铸铁组织生成原理、铸件化学成分,并重点讨论在生产过程中如何选择铸件热处理工艺参数:奥氏体化温度、等温处理温度、等温处理时间,以便获得稳定的等温淬火组织和力学性能。当前许多高强韧性铸件大都采用这种材料,了解其生产工艺很有必要。第10章介绍奥氏体球墨铸铁。重点以高镍奥氏体球墨铸铁为例讨论奥氏体球墨铸铁的组织特点、生产工艺及其应用。高镍奥氏体球墨铸铁属于高合金球墨铸铁,具有非常优异的耐热耐蚀性能,在低温环境下也能正常使用。第11章介绍薄壁和厚壁球墨铸铁件的生产。近些年汽车的运行速度提高,设计者要求所配发动机尽快散去运行中产生的热量。同时也考虑减轻车身重量,节约燃料。发动机中一部分球墨铸铁零件壁厚已经减少到3mm以下。生产这类铸件的工厂必须采用合理化学成分并适当改进生产工艺。第11章介绍所需采取的工艺措施,并且介绍了利用检测石墨球数的方法预测和控制薄壁件组织以及采用硅碳孕育剂处理铁水以避免铸件出现白口和浇不足等铸造缺陷。这是第11章前半部分的内容。本章后半部分阐述壁厚超过50mm的厚壁球墨铸铁件组织特点、并介绍厚壁球墨铸铁件化学成分的选择和生产工艺特点。重点讨论了微量元素对产生畸形石墨的影响以及防止产生各种畸形石墨的技术措施。第12章首先讨论球墨铸铁组织中常见的各种非

球状石墨（或称异态石墨、畸形石墨）产生原因、形态特征，并提出预防这类石墨出现的相应措施。本章其余部分简要阐述球墨铸铁件的特有铸造缺陷。重点讨论皮下气孔、球化不良、石墨飘浮、黑渣（硅酸镁熔渣）、夹杂物、反白口现象等缺陷。并提出防止缺陷产生的具体措施。缩孔、缩松缺陷已在第7章作过介绍，本章只作简单补充。

本书内容主要来源于笔者及合作者在长期科研及生产实践中所获取和积累的资料（少数内容曾发表于笔者撰写的《现代球墨铸铁》一书），也借助了国内外公开发表的有关文献。本书出版之际，笔者谨向健在的和已离世的合作者以及有关文献作者表示由衷感谢。感谢他们为推动球墨铸铁生产技术进步而付出大量宝贵的劳动。作者也欢迎读者对本书内容提出改进意见和建议，进行技术交流，分享劳动成果。

郝石坚 宋绪丁

2014年12月

CONTENTS

目录

1 球墨铸铁铸态组织	1
1.1 铁碳硅合金相图	1
1.2 铸铁中的石墨晶体结构	2
1.2.1 球状石墨晶体的结晶核心	3
1.2.2 石墨晶体在晶体缺陷上生长	4
1.2.3 球状石墨晶体结构	6
1.2.4 球状石墨晶体的生长	6
1.3 球状石墨中的元素分布	8
1.4 球墨铸铁铸态组织的形成	8
1.4.1 球状石墨在铁水中析出	9
1.4.2 初生渗碳体析出	10
1.4.3 初生奥氏体析出	10
1.4.4 铁碳合金共晶转变	11
1.4.5 稳定系共晶转变和亚稳系共晶转变	12
1.4.6 二次渗碳体	16
1.4.7 磷共晶	17
1.5 固态相变	18
1.5.1 先共析铁素体析出	19
1.5.2 共析转变与共析组织	20
1.5.3 铁素体球墨铸铁	20
1.5.4 珠光体球墨铸铁	22
1.6 球墨铸铁的冷却曲线	23
参考文献	24
2 球墨铸铁化学成分	25
2.1 常存元素	25
2.1.1 碳和硅	25
2.1.2 锰	30
2.1.3 磷	32
2.1.4 硫	32

2.2 合金元素	33
2.2.1 铜	33
2.2.2 镍	34
2.2.3 硅	36
2.2.4 钼	36
2.2.5 铬	37
2.2.6 钒	38
2.3 微量元素	39
2.3.1 锡	39
2.3.2 铈	40
2.3.3 铅	41
2.3.4 铋	41
2.4 气体元素	41
2.4.1 氧	42
2.4.2 氮	42
2.4.3 氢	44
2.5 凝固过程中的元素偏析	44
2.6 一般球墨铸铁件的化学成分范围	45
参考文献	45

3 球墨铸铁力学性能与物理性质..... 47

3.1 力学性能	47
3.1.1 拉伸性能	47
3.1.2 球墨铸铁的拉伸断裂	47
3.1.3 球墨铸铁的拉伸强度	50
3.1.4 硬度	52
3.1.5 弹性模量	54
3.1.6 扭转、剪切、弯曲强度	55
3.1.7 压缩强度	55
3.1.8 冲击韧度	55
3.1.9 疲劳极限	57
3.1.10 断裂韧度	60
3.1.11 抗热疲劳强度	62
3.1.12 高温力学性能	62
3.1.13 蠕变与持久强度	64
3.1.14 高硅铁素体耐热球墨铸铁	65
3.1.15 低温力学性能	67
3.2 球墨铸铁物理性质	68
3.2.1 密度	68
3.2.2 热导率	69
3.2.3 线膨胀系数	70
3.2.4 比热容	71
3.2.5 熔化潜热	71

3.2.6 铁水表面张力	72
3.2.7 铁水黏度	72
3.2.8 电阻率	72
3.2.9 磁性质	73
参考文献	73

4 熔炼.....74

4.1 感应炉熔炼	74
4.1.1 感应炉坩埚	75
4.1.2 炉料	76
4.1.3 加料与熔化	78
4.1.4 感应炉坩埚损伤与维修	78
4.1.5 熔炼中常存元素含量的变化	80
4.1.6 铁水中加入的合金料	82
4.1.7 铁水炉前检验	83
4.1.8 感应炉熔炼电耗	84
4.1.9 感应炉熔制合成球墨铸铁	85
4.2 冲天炉熔炼	86
4.2.1 铁水成分在冲天炉熔化过程中的变化	87
4.2.2 合金元素的烧损	89
4.2.3 炉渣控制	89
4.3 双联熔炼	90
参考文献	91

5 球化处理.....92

5.1 球化元素	92
5.2 常用的球化合金	94
5.2.1 硅铁镁合金	95
5.2.2 稀土硅铁镁合金	96
5.2.3 稀土硅钙镁合金	97
5.2.4 稀土硅钙合金压块	97
5.2.5 镁-铁粉压块	98
5.2.6 铜镁合金和镍镁合金	98
5.3 球化处理	99
5.3.1 冲入法	99
5.3.2 压力加镁法	101
5.3.3 镁丝法	103
5.3.4 转包处理法 (G. F. 法)	104
5.3.5 喷吹处理法	105
5.3.6 镁焦法	105
5.3.7 型内球化处理法	106

5.3.8 液流处理法	112
5.4 球化处理前后铁水温度和成分的变化	113
5.5 球化衰退现象	113
5.5.1 炉前处理后铁水停留时间的影响	113
5.5.2 铁水原始含硫量的影响	114
5.5.3 充型完成前铁水温度的影响	115
5.5.4 铁水与空气接触的影响	115
5.5.5 球化剂的影响	115
5.6 球化剂加入量	116
5.7 高硫铁水球化处理	117
5.8 石墨球化质量评定	117
参考文献	119

6 孕育处理.....120

6.1 常用孕育剂	120
6.1.1 钡硅铁	121
6.1.2 锶硅铁	121
6.1.3 铅硅铁	122
6.1.4 铋硅铁	122
6.1.5 稀土钙硅铁	124
6.1.6 碳硅钙合金	125
6.1.7 稀土硅铁	125
6.2 孕育处理的基本工艺	126
6.2.1 炉前孕育	126
6.2.2 倒包孕育	126
6.2.3 型内孕育	126
6.2.4 浇包随流孕育	127
6.2.5 喂入孕育	127
6.3 孕育衰退现象	128
6.4 影响孕育效果的一些因素	128
6.4.1 炉料和熔炼方法	128
6.4.2 铁水温度	129
6.4.3 孕育剂加入量和颗粒尺寸	129
6.5 孕育处理效果评定	130
参考文献	131

7 铸件浇注与补缩.....132

7.1 球墨铸铁件的浇注系统	132
7.1.1 浇注系统结构	132
7.1.2 内浇口进入铸件型腔位置的选择	135
7.1.3 利用浇注系统阻挡熔渣	135

7.2 球墨铸铁件凝固过程中的体积变化	137
7.2.1 过共晶、共晶、亚共晶转变过程中铸件的体积变化	137
7.2.2 球墨铸铁件产生缩孔、缩松的影响因素	139
7.3 铸件补缩	142
7.3.1 铸件模数	142
7.3.2 冒口尺寸	143
7.3.3 铸件自补缩	145
7.3.4 控制压力冒口	147
7.3.5 多热节铸件的补缩	149
参考文献	149

8 热处理.....150

8.1 球墨铸铁热处理的特点	150
8.2 球墨铸铁在加热过程中的组织转变	151
8.3 球墨铸铁在冷却过程中的组织转变	152
8.4 消减内应力处理	153
8.5 石墨化退火	154
8.6 正火	155
8.7 淬火与回火	156
8.8 铁素体球墨铸铁的回火脆性	158
8.9 球墨铸铁件的表面强化	160
8.9.1 表面淬火强化	160
8.9.2 机械强化	160
8.9.3 渗层强化	161
参考文献	161

9 等温淬火球墨铸铁.....162

9.1 高碳奥氏体+针状铁素体球墨铸铁组织的形成	163
9.2 铸件化学成分	165
9.2.1 常存元素	165
9.2.2 合金元素	166
9.3 奥氏体化	167
9.4 等温处理	168
9.4.1 等温处理温度	168
9.4.2 等温处理时间	171
9.5 成分偏析对等温淬火铸件的影响	172
9.6 高碳奥氏体+针状铁素体球墨铸铁力学性能	173
9.7 铸件质量检验	174
9.8 高碳奥氏体+针状铁素体球墨铸铁件的几项工艺改进	174
9.8.1 预处理	174
9.8.2 分段等温处理	174
9.8.3 等温处理+回火	175

9.9 高碳奥氏体+针状铁素体球墨铸铁的应用	175
参考文献	175

10 奥氏体球墨铸铁..... 176

10.1 高镍奥氏体球墨铸铁化学成分	176
10.1.1 镍	177
10.1.2 碳	178
10.1.3 硅	179
10.1.4 锰	180
10.1.5 铬	180
10.1.6 铌	181
10.2 力学性能	181
10.2.1 高温力学性能	182
10.2.2 低温力学性能	183
10.3 抗腐蚀能力	183
10.4 物理性质	184
10.4.1 热膨胀系数	184
10.4.2 磁性质	185
10.5 高镍奥氏体球墨铸铁显微组织	185
10.6 高镍奥氏体球墨铸铁件生产	186
10.6.1 铸造工艺性	186
10.6.2 炉料熔化	187
10.6.3 球化及孕育处理	187
10.6.4 铸件热处理	189
参考文献	189

11 薄壁和厚壁球墨铸铁件..... 190

11.1 薄壁球墨铸铁件	190
11.2 避免薄壁铸件出现白口	190
11.2.1 铸件碳当量	190
11.2.2 铁水孕育处理	193
11.3 提高铁水流动性	194
11.4 壁厚误差	195
11.5 改善力学性能	196
11.6 薄壁球墨铸铁件的铸造	196
11.7 厚壁球墨铸铁件	197
11.8 厚壁球墨铸铁件组织特点	197
11.9 厚壁球墨铸铁件化学成分	197
11.9.1 常存元素	197
11.9.2 微量元素	198
11.10 孕育处理	200
11.11 厚壁件铸造工艺	200

参考文献.....	202
-----------	-----

12 异态石墨和铸造缺陷..... 203

12.1 异态石墨.....	203
12.1.1 碎块石墨	204
12.1.2 蠕虫石墨	206
12.1.3 花形石墨	207
12.1.4 球片石墨	207
12.1.5 片状石墨和刺状石墨	208
12.2 球状石墨异常分布.....	209
12.2.1 石墨球呈线状排列	209
12.2.2 尺寸差别大的石墨球共同存在	210
12.3 常见铸造缺陷.....	210
12.3.1 皮下气孔	210
12.3.2 缩孔、缩松	211
12.3.3 球化不良	211
12.3.4 石墨漂浮	211
12.3.5 黑渣（硅酸镁渣）	215
12.3.6 夹杂物	218
12.3.7 反白口现象	220
参考文献.....	220

球墨铸铁铸态组织

1.1 铁碳硅合金相图

图 1-1 所示相图中^[1]，实线显示铁碳硅三元相图的 $\omega(\text{Si})=2.4\%$ 截面图。虚线显示铁碳二元合金稳定系相图。该相图指出在平衡条件下各组成相存在的温度和成分范围以及合金液-固相变和固态相变的临界数据，是研究和了解铁碳系合金的基础资料。实线构成的相图

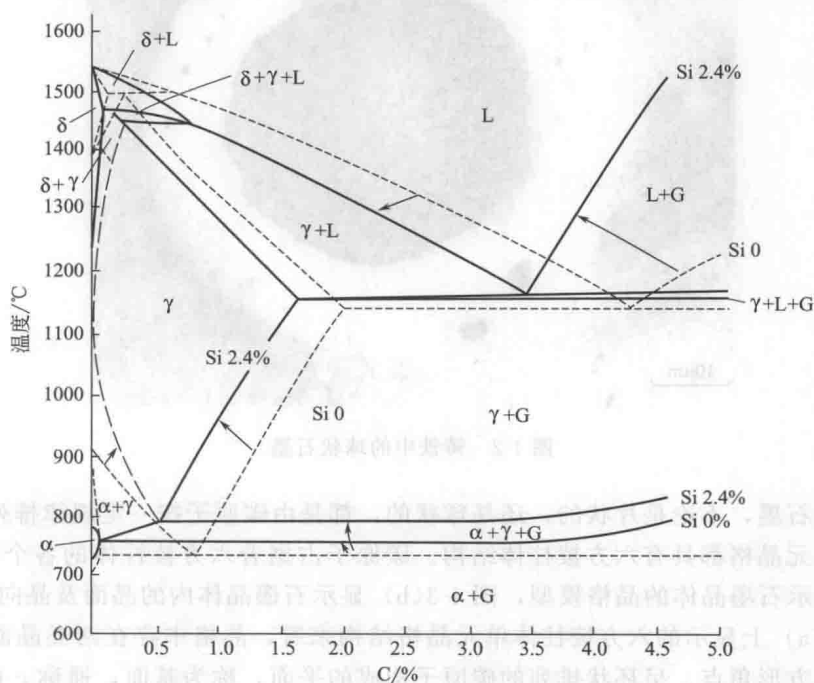


图 1-1 铁碳硅三元相图的 $\omega(\text{Si})=2.4\%$ 截面 (实线) 及铁碳二元合金相图 (虚线)

是一个动态图形，此图中各临界点随硅的质量分数变化而变化。其中有些变化值得注意，主要有：二元合金加入硅后，共晶点、共析点、奥氏体中碳的溶解度极限值都随硅的质量分数提高而移向低碳方向，温度也有所提高。奥氏体相区随硅的加入而相应缩小。铁碳二元相图中的共晶转变点和共析转变点都由固定温度改变为一个温度范围，出现两个三相共存区： $\gamma+L+G$ 区和 $\alpha+\gamma+G$ 区。

球墨铸铁是多元合金。其中影响合金相变的主要常存元素是铁、碳、硅。球墨铸铁的铸态组织按照铁碳硅三元合金相变规律经过凝固和固态相变过程而形成。球墨铸铁由液态降温到室温，其组织通常遵循两条路径发生相变，产生两类铸态组织。一是按照稳定系统转变最终形成含有球状石墨+基体的铸态组织，这是正常的球墨铸铁组织。二是按照亚稳定系统转变最终形成球状石墨+渗碳体基体的铸态组织，后者常用于耐磨球墨铸铁件。

有许多因素影响球墨铸铁的相变和组织生成过程。如铸件的化学成分、铸件冷却速度、铁水熔化工艺、球化和孕育处理、铸造和热处理工艺等都是基本因素。制取球墨铸铁时需要了解、利用和协调这些因素，使铸件获得我们预期的组织和性能。

本章以及后面有关章节将就这些内容分别进行讨论。

1.2 铸铁中的石墨晶体结构

图 1-2 显示偏振光镜下看到的球状石墨。

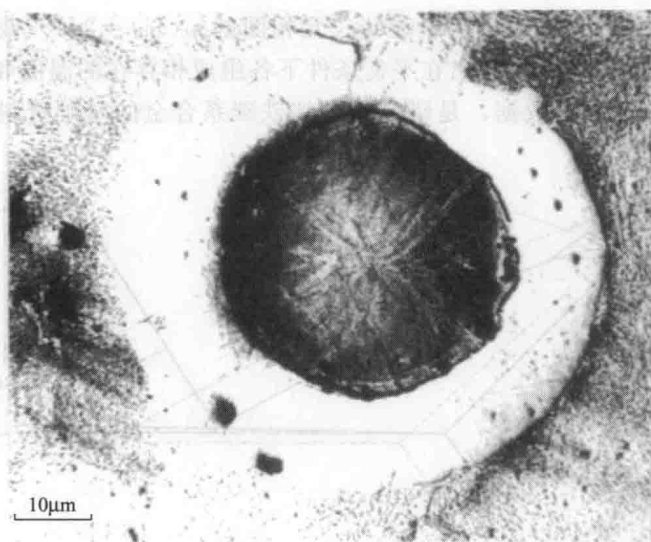


图 1-2 铸铁中的球状石墨

铸铁中的石墨，不论是片状的，还是球状的，都是由碳原子按一定规律排列而构成的晶体。晶体的单元晶格都具有六方棱柱体结构。碳原子占据着六方棱柱体的各个角点。图 1-3(a) 示意地显示石墨晶体的晶格模型，图 1-3(b) 显示石墨晶体内的晶面及晶向。

从图 1-3(a) 上显示的六方棱柱体单元晶格结构来看，晶格中存在两类晶面。其中一类是由占据正六方形角点、呈环状排列的碳原子构成的平面，称为基面，通称 c 面， c 面的晶体学符号为 (0001) 。垂直于基面的晶体学位向称为 c 向， c 向的晶体学符号为 $[0001]$ 。石