

球墨铸铁

吴德海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

球墨铸铁

吴德海 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了特别是 20 世纪 70 年代以来,我国球墨铸铁的生产和科学研究成果;同时也较为系统地介绍了国外的成熟技术和研究成果。本书从铸铁的石墨分类开始,继而分析了 Fe—C 合金的热力学;由此,相继介绍了球墨铸铁的凝固、球化处理与孕育处理、铸造缺陷与防止、热处理、铸态球墨铸铁、厚大断面球墨铸铁、等温淬火奥氏体球墨铸铁、连续冷却的贝氏体球墨铸铁、球墨铸铁的性能、石墨球化理论的进展,以及球墨铸铁的生产应用,最后附以各种国外的球墨铸铁标准。

这是一部从物理冶金角度阐述球墨铸铁的专著。本书的特点是以基本理论阐述,并力求与生产实践结合。

本书可供从事球墨铸铁研究、生产的技术人员参考。同时,本书也可供大专院校材料加工领域的师生用作参考书;也可供相关的研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

球墨铸铁 / 吴德海著. —北京: 中国水利水电出版社,
2006

ISBN 7 - 5084 - 4136 - 2

I. 球... II. 吴... III. 球墨铸铁—基本知识
IV. TG143.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124089 号

书 名	球墨铸铁
作 者	吴德海 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 16.25 印张 385 千字
版 次	2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—2660 册
定 价	41.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

球墨铸铁是从 20 世纪 50 年代至今发展迅速的铸造合金。世界工业发达国家广泛采用球墨铸铁取代锻钢、铸钢、可锻铸铁和普通灰铸铁制作各种结构件、由此获得了巨大的经济效益和社会效益。并且,至今在全世界范围内,球墨铸铁的年产量与黑色铸造金属(铸钢、可锻铸铁和普通灰铸铁之和)的年产量之比值还在继续增加。有的工业发达国家球墨铸铁的年产量已经超过普通灰铸铁的年产量。我国球墨铸铁的年产量也有迅速的发展,至今,年产量在全球占第二位。与此相适应,出版“球墨铸铁”方面的专著,对于球墨铸铁的生产发展,就具有迫切的现实意义。

1950 年清华大学王遵明教授在我国率先研究成功了球墨铸铁。此后,举办了全国球墨铸铁讲习班,由王遵明教授主持讲授了球墨铸铁的理论与实践。为此,王遵明教授主编了“球墨铸铁”教材。这也是我国第一部关于球墨铸铁的专著。由此讲习班培养的工程技术人员后来都成为球墨铸铁的专门人才,为我国的球墨铸铁生产与发展发挥了重大作用。

1961 年由机械工业出版社出版了前苏联瓦申柯教授著的《镁铸铁》中译本。该书总结了自 1947~1948 年出现球墨铸铁以来在世界范围内的生产与研究概况。1976 年由河南省机械局组织了国内一些专家编写了《稀土镁球墨铸铁生产技术及应用》(内部发行)。该书主要总结了国内 20 世纪 60~70 年代中期生产球墨铸铁的经验。此书的背景是要开发和利用国内的稀土资源。当时,国内普遍采用冲天炉生产球墨铸铁,造成铁液处理的温度低和原始硫分过高,致使球墨铸铁的质量低而且不稳定。为此,采用较多的稀土。该书在着重反映稀土元素在球墨铸铁生产中的有利作用方面,作出了积极的贡献。

1977 年,基于国际上球墨铸铁的迅速发展和国内球墨铸铁的迫切需求,由沈阳铸造研究所、大连工学院和上海科学技术协会合编了《球墨铸铁》,由机械工业出版社出版。该书除了总结国内 20 世纪五六十年代球墨铸铁的生产与研究成果以外,还吸收并力求全面反映国际上有关球墨铸铁的最新技术与研究成果。这是我国第一部由国内专家合写并正式出版发行的球墨铸铁专著。它对我国球墨铸铁的快速发展,使之接近国际水平作出了重要贡献。

本书的作者从事铸铁的物理冶金教学与研究达 40 年,其中,研究工作主要内容是球墨铸铁。积 40 年之经验,作者写就了本书。本书的特点:

- 一是反映 20 世纪 70 年代以后国内外球墨铸铁的生产技术与研究成果;
- 二是反映作者本人参加的有关球墨铸铁的研究成果。

基于研究成果,特别是在将这些研究成果运用到工厂的生产实践过程中,作者对球墨

铸铁有了较全面和较深刻的认识。为此，本书作者将多年收集和积累的技术资料，整理成书，以飨读者。

作者衷心感谢中国水利水电出版社为出版此书所给予的鼎力支持。曹阳编辑严谨的科学精神和忘我的工作态度使作者铭记在心。在编写过程中。作者参阅并引用了大量专著和相关文献，特别是清华大学李春立教授提供了许多扫描电镜照片，在此对他们一并表示感谢。由于水平有限，时间仓促，书中难免有不当和欠妥之处，敬请各位专家和读者批评指正。

作 者

2006 年 9 月于清华园

目 录

前言

第一章 绪 论

第一节 球墨铸铁的发现	2
第二节 球墨铸铁的发展	5

第二章 石墨形态的分类与命名

第一节 分类与命名的原则	7
第二节 分类与命名详图	7
第三节 分类与命名的简要说明	9

第三章 铁碳合金的热力学分析

第一节 纯铁	21
第二节 Fe—C 合金系	25
第三节 Fe—C—X 合金系	29

第四章 球墨铸铁的凝固

第一节 球状石墨的形成	36
第二节 球墨铸铁的凝固特性	41
第三节 球墨铸铁的组织	44

第五章 球墨铸铁的化学成分

第一节 基本元素	50
第二节 合金元素	57
第三节 微量元素	66
第四节 球墨铸铁的合金化	68

第六章 球化处理和孕育处理

第一节 球化处理	77
----------	----

第二节 孕育处理	88
----------------	----

第七章 铸造缺陷及防止

第一节 球化不良与球化衰退	94
第二节 缩孔和缩松	97
第三节 气孔	100
第四节 夹渣	104
第五节 石墨漂浮	105
第六节 反白口	106
第七节 碎块形石墨	107

第八章 球墨铸铁热处理

第一节 球墨铸铁热处理基础	110
第二节 球墨铸铁热处理工艺	117

第九章 铸态球墨铸铁

第一节 生产铸态球墨铸铁铸件的可能性	124
第二节 铸态球墨铸铁生产工艺要点	126
第三节 铸态球墨铸铁生产中的问题	127

第十章 厚大断面球墨铸铁

第一节 厚大断面球墨铸铁的凝固特性	131
第二节 提高厚大断面球墨铸铁质量的措施	134
第三节 核燃料储运器	139

第十一章 等温淬火球墨铸铁

第一节 等温淬火球墨铸铁的特征及应用	141
第二节 等温淬火过程中的组织转变	144
第三节 化学成分	145
第四节 热处理	149
第五节 力学性能	152

第十二章 连续冷却贝氏体球墨铸铁

第一节 问题的提出	156
第二节 连续冷却贝氏体球墨铸铁的制取	158

第三节	贝氏体球墨铸铁磨球.....	170
-----	----------------	-----

第十三章 奥氏体球墨铸铁

第一节	概述.....	174
第二节	形成原理和化学成分.....	175
第三节	性能.....	176
第四节	生产技术.....	185
第五节	生产应用.....	189

第十四章 球墨铸铁的性能

第一节	力学性能.....	193
第二节	物理性能.....	198
第三节	工艺性能.....	202
第四节	使用性能.....	206

第十五章 石墨球化理论的进展

第一节	概述.....	214
第二节	石墨球化理论的各种假说.....	215
第三节	球化理论取得的进展.....	217
第四节	尚有争论的问题.....	218

第十六章 球墨铸铁的生产应用

第一节	应用领域.....	223
第二节	球墨铸铁的国家标准及选用.....	229

附录 国外球墨铸铁标准

一、国际标准 [ISO 1083 : 1987 (E)]	232
二、美国标准 (ASTM A536—1984)	235
三、欧洲标准 (EN 1563 : 1997)	236
四、日本标准 (JIS G 5502—1995)	241
五、俄罗斯标准 (ГОСТ 7293—1985)	242
六、各国等温淬火奥氏体球墨铸铁标准	244

参考文献	247
------------	-----

第一章 绪 论

如果不借助铸造工作者的智慧、力量和坚持不懈的努力，我们的世界就不可能有这样快的发展速度。

自从地球上的矿物被发现以来，金属铸造在人类社会发展中一直起着重要作用，它使人类能制造出赖以生存的设备，使人类能为争取自立而奋斗。

人类进入文明社会是以使用金属铸造材料（铜与铁）开始的。世界上最早的文明古国都先后进入过青铜器时代。早在公元前 4000 年，古埃及人便掌握了炼铜技术。我国用矿石炼铜始于公元前 2000 年（夏代早期）。晚商和西周是我国青铜时代的鼎盛时期，重达 875kg 的“司母戊”大方鼎，至今仍珍藏在我国的博物馆里。铜是人类最先使用的金属。在青铜器时代，铁比铜要宝贵，这是因为当时炼铜比炼铁更容易；并且，在地球表层中往往有呈自然金属状态、“露头”形式存在的自然铜，因而容易被发现和开采。

人类最早使用的铁是陨石铁（又称自然铁，也叫陨铁）。古埃及在至今 5000 年以前的前王朝时期，曾用含镍 7.5%^①的陨石铁做成铁珠。陨石铁的主要成分是铁和镍，这两者的共同含量一般在 98% 以上，其中，含镍量 $w(\text{Ni}) = 4\% \sim 20\%$ ，余为铁；其他杂质元素中除含钴 $w(\text{Co}) = 0.3\% \sim 1.0\%$ 以外，磷、硫和碳含量均很低 [含磷 $w(\text{P}) = 0.1\% \sim 0.3\%$ ，含硫 $w(\text{S}) = 0.2\% \sim 0.6\%$ ，含碳 $w(\text{C}) = 0.01\% \sim 0.2\%$]。

从美索不达米亚出土的文物证明，大约在公元前 3000 年就有了铁器，在公元前 2000 年人类就知道了铸铁技艺。古代文物表明，中国人早在 2500 年前，就制作了铸铁件。重达 270kg 的铸铁刑鼎，是公元前 513 年铸造成功的。春秋晚期的铸铁器出土的有江苏六合程桥楚墓的铁丸、长沙楚墓的铁锺和铁鼎等。战国初期出现了用热处理法制取韧性铸铁的工艺，战国后期出现了铁范。在中国，生产铸铁要比其他国家早许多个世纪。

铸铁在中国得到迅速的发展，这在很大程度上是由于熔炼设备的改善和拥有丰富的原材料。采用风箱，取得了较大的风量；使铁矿石与木炭在高温下长时间保持接触，从而得到了适于浇注入铸型的铁液。为了增加流动性，中国人很早就知道加入动物或人体骨骼以增磷。

多少世纪以前，我国人民就把铸铁件用于制作各种制品，如铸铁炊具、钟、农业机具和各种容器等。但是，就全世界范围来说，在工业革命以前，铸铁件的用途主要是兵器、祭器和艺术品。

由于铸铁技术长期受控于经验水平，所以它的强度一直很低。到 1860 年，铸铁的强度只有 60~100MPa。第一次世界大战期间（1914~1918 年），铸铁的抗拉强度提高到 120~140MPa。后来，通过在铸铁熔化时加入废钢（占炉料的 40%~80%）和采用熔化过热的方法，使铸铁的抗拉强度达到 200MPa 以上，但是，当增加废钢量过大时，反而使

① 本文中化学成分均为质量分数。

力学性能恶化。为此,1922年美国人 A. F. Meehan 发明了孕育铸铁,就是采取严格控制化学成分、高温熔炼并在炉前进行孕育处理的方法,可使铸铁的抗拉强度达到 300MPa。这种铸铁的特点是:基体为 100%珠光体组织,对断面敏感性小并具有中等、均匀分布的(呈 A 型)石墨,并且共晶团数量明显增多。

孕育铸铁的出现,在铸铁冶金史上是划时代的,这是因为,在此以前人们并不知道通过孕育处理可以大幅度提高铸铁的性能;而在这以后,通过孕育处理不仅可以提高普通灰铸铁的性能,而且还出现了优质的球墨铸铁和蠕墨铸铁。孕育处理就是人为地把某种物质加入到液态金属(铁液)中,以改变其物理冶金状态,从而改善材质的性能指标,而这种改善又不能以合金化作用得到解释。虽然, A. F. Meehan 当时发明的孕育铸铁(又叫作密烘铸铁——Meehanite)至今在生产中所占比重并不很多,但他采用的孕育技术、孕育剂及由此而发展的孕育概念和孕育机制,对于铸铁的发展来说,起了重要的里程碑作用,而且至今仍起着重要作用。

进入 20 世纪 30 年代,在孕育铸铁发展的基础上,附加合金元素(镍、铬、钼、铜等)可使铸铁中的珠光体细化,从而得到索氏体、托氏体基体组织。就当时的工业技术而言,采用合金化使灰铸铁的抗拉强度可达到 400MPa,已是很高的性能指标,这就是合金铸铁的应用。

灰铸铁力学性能低的重要原因是其石墨形态呈片状所致。为此,曾试图通过热处理改变石墨形态。早在 1722 年,法国人 R $\grave{e}$ aumur 制作了白心可锻铸铁;1826 年美国人 Seth Boyden 发明了黑心可锻铸铁,结果均使石墨变成团絮状。但是,这两种可锻铸铁都对化学成分要求严格(对碳、硅、硫、锰等均有严格要求),需要长时间的可锻化热处理,并且只限于生产薄壁的、小尺寸铸件。另外,可锻铸铁的石墨形态也不圆整,只能达到团絮状。因此,冶金学者的多年宿愿就是要能得到具有良好的强度、塑性与韧度、石墨呈球状的铸铁。

1947 年和 1948 年,英国人和美国人相继研究并生产了球墨铸铁。它的抗拉强度达到了 600MPa,还有 3%的伸长率,基体组织为珠光体。1977 年,出现了由贝氏体和奥氏体组成的等温淬火奥氏体球墨铸铁(又称奥氏体—贝氏体球墨铸铁,国际上称 ADI),其抗拉强度达到了 1200MPa,并有 2%的伸长率。

由此可以看出,铸铁的发展是以追求高强度作为驱动力的。从 1860 年灰铸铁抗拉强度 60~80MPa 提高到 1977 年的奥氏体—贝氏体球墨铸铁的 1200MPa,由于技术的进步,铸铁的抗拉强度提高了近 20 倍。

第一节 球墨铸铁的发现

一、前期工作

1934 年, N. Ahmad 借助于相交的尼科尔偏光镜,第一次发现了呈径向辐射状的球状石墨,它区别于无序分枝的团絮状回火碳。一年以后, H. A. Nipper 用偏振光研究了回火碳的结构。其中,他很清楚地观察到了少数球状石墨中的十字架图像。Nipper 认为,这

种在回火碳中偶然存在的球状石墨是与石墨的六边形晶体结构相关。这些石墨晶体在熔体中呈径向辐射长大。尽管 Nipper 在观察中对球状石墨的形成特征有了显著的深化认识,但他并未采取任何进一步的措施来说明这种石墨结构的重大意义,也未有意识地设法采取措施来获得这种石墨结构。

早在 1935~1936 年,德国阿汉铸造研究所就已知道,在低碳高硅的铸铁中可以获得普遍呈球状石墨的方法。1936 年在杜塞尔道夫举办的第 12 届国际铸造年会上,展出了这种球状石墨照片。并且,当时展出的铸件与记录一直由阿汉铸造研究所保存至今。

1937 年, H. Gröbel 和 H. H. Hanemann 在研究过共晶 Fe—C 合金时,在石墨与渗碳体结构中发现了石墨球。这是在含碳量特别高,比渗碳体含碳量 [$w(C) = 6.7\% \sim 7.7\%$] 高出许多的情况下,发现了个别的石墨球。为此,他们认为,只有当含碳量超过渗碳体的含碳量时,在熔体中才会析出石墨球。

1937 年,由 Hanemann 编著的金相图谱中首次示出了球状石墨的金相照片。这幅照片是 C. Adey 从事高碳 Fe—C 合金的研究时得到的,这项研究与从事活塞环生产密切相关。为此, Adey 获得了相应的专利。Adey 在最后一版的专利保护中说:“获得高强度铸铁的方法特点就是:不含有夹渣的共晶或过共晶铸铁,含硅量的质量分数大于 1,在快速凝固条件下,石墨全部或部分地呈球状在金属基体中析出。”

Adey 在其博士论文中全面阐述了他在此领域的研究工作,其部分内容公开发表于 1948 年。在 1947 年阿汉铸造研究所举行的学术报告会上, Adey 作了研究报告,相关内容至今并未公开发表。根据 Adey 的研究,为了在铸铁中得到球状石墨,必须满足下列条件:

(1) 铸铁的化学成分应该是共晶或过共晶的,也就是说共晶度不小于 1。

(2) 铁液应是纯净的,特别重要的是铁液中含硫量要极低 [$w(S) < 0.008\%$],为此,要采取过热和脱硫处理措施。

(3) 要使铁液经受快速凝固及相当快速的冷却。

Adey 采取上述措施,成功地得到球化良好的球墨铸铁。把这种铁液浇注到砂型中,只要是壁厚小于 30mm 的铸件,就可得到球状石墨。对于壁厚更大的铸件来说,则要采取附加的冷却措施(采用金属型等)。

二、在铁液中加入钕处理

英国铸铁学会的 H. Morrogh 和 W. J. Williams 根据他们早期对可锻铸铁的研究,确认在黑心可锻铸铁中,含硅、锰较高时,绝大部分形成的是团絮状的回火碳。但是,在白心可锻铸铁中,含硅、锰较少时,则形成球状的回火碳,并且,悬浮状的 FeS 夹杂物在这种回火碳结晶时起着形核作用。他们的这些研究结果是与 C. W. Palmer 的研究结果一致的,后者指出,在贫锰和贫硫的可锻铸铁中,会出现紧密的、呈球状的回火碳。

随后, Morrogh 和 Williams 研究了 Fe—C—Co 合金的石墨化过程。他们确认,其结晶过程与 Fe—C—Si 合金很相似。在提高冷却速度,特别是在加入 SiCa 合金以后,石墨呈球状。此时,本来可以用镁取代钙。但是,在纯的 Fe—C 合金中,钙、镁这些元素均

没有作用。正如后来所解释的那样,原因是把钙、镁这些元素加入到熔融金属中的方法有问题。后来才得知,金属铈在 Fe—C—Ni、Fe—C—Si 和 Fe—C—Co 这三种合金系中,在含硫很低的情况下,均能促使球状石墨的形成,由于纯铈很贵,后来便采用含铈的质量分数为 45%~55% 的混合金属。经 Morrogh 等人的研究,为了得到球状石墨,必须满足下列要求:

- (1) 在未加入铈以前,铸铁应呈灰口凝固。
- (2) 铸铁成分应是过共晶的,即 $C + \frac{1}{3}(Si + P) > 4.3\%$ 。
- (3) 含硅量的质量分数为 2.3~7.0。
- (4) 含硫量应尽可能低,经加铈处理后,含硫量 $w(S) \leq 0.02\%$ 。
- (5) Mn、Cu、Ni、Cr、Mo 等元素可以任何含量单独或联合加入,但要满足其成分是通过共晶的。

其中,最为重要的条件是含碳量与含硫量。用铈经两次球化处理,抗拉强度可达到 800MPa。并且,通过合金化,基体组织可以是珠光体或是奥氏体。

Morrogh 认为,工业生产球墨铸铁不会有特殊的困难,如果有低硫生铁,并在坩锅炉、电弧炉、电阻炉或感应电炉中熔炼均可。当时的困难发生在采用冲天炉熔炼,由于焦炭增硫,使用含铈的混合金属是不利的。这是因为,要使含硫量从 $w(S) = 0.06\%$ 降至 $w(S) = 0.02\%$,必须加入 0.6% 的混合金属;如果原始含硫量只有 $w(S) = 0.02\%$,为使残留铈量达到 0.05%,则只要加入 0.1%~0.2% 的混合金属。

三、在铁液中加镁处理

早在 1902 年, A. Ledebur 就报道了在液态的可锻铸铁中加入少量镁的可能性。1908 年,由德国专利 No. 209914 表明, Griesheim—Elecfron 化工厂曾生产了 Fe—Mg 和 Mg—Fe—Si 合金,用于铸铁和铸钢件的脱氧。在铸铁和铸钢过热温度不高的情况下,可把镁以合金方式加入其中。当把镁加入到铸铁中时,可使其抗拉强度和抗压强度明显提高。加入质量分数为 0.05%~0.1% 的 Mg 即可达到此目的。在该专利的附录中还推荐制作 Mg—Al 或 Mg—Ni 合金,并把它们加入到液态的硅铁合金中。在 1918~1920 年,德国的研究人员还推荐一种脱氧剂的成分为: $w(Si) = 10\% \sim 40\%$, $w(Mn) = 0 \sim 20\%$, $w(Fe) = 0 \sim 10\%$,其余是镁。

1922~1931 年,美国人 A. M. Meehan 获取了多项专利,其内容是把 Ca、Mg、Ba、Li、Te 分别或是与 Cr、Ni、Ti 等元素复合加入到灰铸铁中,以便使石墨细化,但一开始并未取得成功。

取得决定性成果的是 Meehan 用镁或钙处理取得的专利。他在这项专利中指出,为了在处理后将铸铁达到所要求的效果,必须加入一定数量的活性元素。Meehanite 公司于 1941 年取得的美国专利 (No. 2364922) 指出,采用 Si—Ca 合金作为石墨化元素处理铁液后,再采用铈元素作为反石墨化元素,就可得到球状石墨。此外, E. Piwowarsky 曾建议在灰铸铁中加入 Cu、Ba、Li、Mg 等元素,以提高过共晶铁碳合金的强度。此时,由于这些元素作用的结果降低了合金的熔点,也就是相对提高了过热度,因而可得到细小石

墨,由此导致最终形成的石墨形态与回火碳相似。

1947年,美国的 Mond-Nickel Co. 从事了加镁获得球墨铸铁的研究。最基本的成就是由 A. P. Gangnebin、K. Millis 和 N. B. Pilling 三人于 1947 年 11 月 21 日获得的专利(美国专利 No. 2485760 和 No. 2485761)。他们要求保护的权利要求是,制作所有牌号的灰铸铁,石墨由短片状到球状,含镁量从痕迹量到 $w(\text{Mg})=0.3\%$ 。遗憾的是,他们并未注意到 1910~1941 年,世界各国,首先是美国、英国和德国已经取得的大量成就,这些成就旨在细化石墨,从而获得团絮状乃至球状石墨。

1948 年 5 月 7 日 Gangnebin 等三人第一次发表了在铁液中添加镁,随后用硅铁进行孕育处理,在残余镁量超过 $w(\text{Mg})=0.04\%$ 时即可得到球状石墨。他们采用 Mg-Ni 合金加入到铁液中,这在当时的技术上是重大的突破,这种球化技术具有毋庸置疑的可靠性。由此获得了球墨铸铁,它与同样成分但未经球化处理的原铸铁相比,在力学性能上显示出了无可争议的优越性。

正是因为采取镁处理铁液取得的突破性进展,从 1948 年起,在全世界开始了球墨铸铁的工业生产,以致它作为重要的工程材料,在过去的 50 多年里,对人类文明和社会进步发挥了重大作用。

我国是球墨铸铁发展较早、也是发展较快的国家。早在 1948 年清华大学王遵明教授就开展了球墨铸铁的研究。他在抚顺举办了全国第一个球墨铸铁学习班,为全国培养了第一批球墨铸铁技术人才。20 世纪 60 年代初,针对国内铁液中含硫量高、出铁温度低及生铁中含钛量较高的特点,由机械科学研究所与无锡柴油机厂、南京汽车厂等单位利用我国富有的稀土资源研究开发了稀土镁球墨铸铁,在生产中得到了普遍应用。1977 年,我国与美国、芬兰几乎同时宣布,独立地研究开发了等温淬火奥氏体球墨铸铁。

最近 20 年来,我国球墨铸铁的研究与生产均取得了长足的进步,2004 年产量超过 500 万 t,位居世界第一。在汽车、建筑、农用机械及铸管领域,我国生产的球墨铸铁件,不仅用于国内,也大量远销国外。

第二节 球墨铸铁的发展

球墨铸铁的发展速度是令人惊异的。1949 年全世界的球墨铸铁产量是 5 万 t,1960 年是 53.5 万 t,1970 年是 500 万 t,1980 年是 760 万 t,1990 年是 915 万 t,1995 年是 1290 万 t,2000 年是 1310 万 t,2002 年是 1405 万 t,2004 年是 1870 万 t。并且,这种发展势头还将继续下去。预计到 2010 年,全世界球墨铸铁的产量将超过 2000 万 t。

在全世界的球墨铸铁产量中,大部分是由几个为数不多的工业发达国家所生产。在发展球墨铸铁生产的同时,这些国家的可锻铸铁和铸钢的生产则在下降。

美国在球墨铸铁的生产中发展最为迅速。美国自 1950~1969 年的 20 年来,可锻铸铁和铸钢件的产量变化不大,而球墨铸铁产量则不断增长。至 1969 年,美国球墨铸铁产量已经超过了可锻铸铁,这时,已有许多汽车零件由可锻铸铁改成球墨铸铁生产。1969 年美国可锻铸铁产量为 115 万 t,而球墨铸铁产量则超过了 150 万 t。至 1980 年,美国的铸

钢件产量是 168 万 t；而当年的球墨铸铁产量已达 215 万 t。这就意味着，美国球墨铸铁的年产量已超过铸钢件的年产量。这种情况在其他工业发达国家也是如此。

还要指出的是，进入 20 世纪 80 年代，灰铸铁的生产在全世界范围里有明显下降。1980 年全世界灰铸铁件的产量是 5230 万 t，至 2000 年，则降至 3400 万 t。这种下降也导致全世界铸件总产量下降，尽管在此期间，球墨铸铁和铸造铝（镁）合金的产量在迅速增加。

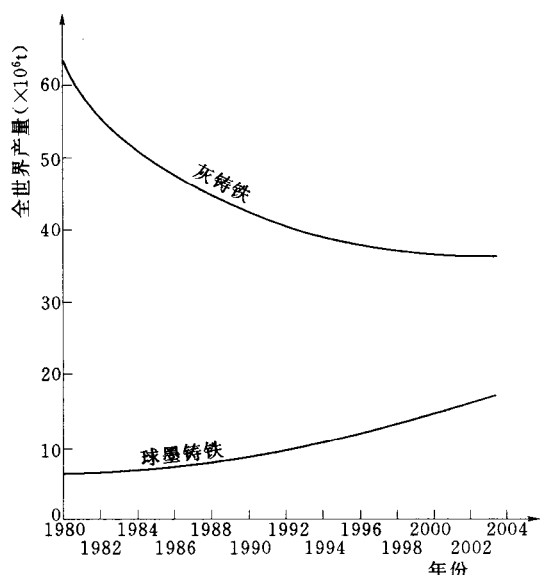


图 1-1 1980~2004 年全世界灰铸铁与球墨铸铁年产量的变化

全世界铸件总产量呈下降趋势的原因是，铸件用量大的支柱产业（汽车工业、住宅建筑和农业机械）发展速度减慢及其他工程材料〔塑料、复合材料、铝（镁）合金、陶瓷等〕的崛起。例如，美国 1980 年每辆汽车的平均重量是 1500kg，1990 年则减至 1020kg；灰铸铁所占比重由 15% 减至 11%，此时，铝合金则由 4% 增至 9%，工程塑料则由 6% 增至 9%。

至今，球墨铸铁年产量占灰铸铁年产量的比值在增大。如果说 1980 年这两者在全球的比值是 14.46%；到 2004 年，这两者的比值在美国已增至 94.3%。这也就是说，在美国，球墨铸铁的年产量已接近灰铸铁年产量。在可望的未来，在全世界范围里，这两者的比值还将继续增大，球墨铸铁还将以每年 2%~4% 的速率递增。

球墨铸铁迅速发展的原因可以归结为：

(1) 可在相当宽广的范围里，满足设计对材质的要求。

(2) 与相同水平的材质相比，球墨铸铁的价格低廉。例如，汽车曲轴用球墨铸铁制作代替锻钢件，生产成本减少 50%。

(3) 生产技术不断进步与完善，这表现在：①熔炼技术的改善；②脱硫、球化和孕育处理新技术的开发；③新的铸造方法与技术的应用；④质量控制体系的完善。

总之，由于出现了球墨铸铁，使机械零件和铸件本身的质量有了很大提高，从而球墨铸铁的产量也就迅猛增加。可以这样说，球墨铸铁占铸件年产总量的比例，特别是它与灰铸铁的比例，从一个侧面，标志着一个国家的工业发展水平。

图 1-1 示出 1980~2004 年全世界灰铸铁与球墨铸铁年产量的变化。由图中可以看出，灰铸铁年产量递减和球墨铸铁递增的趋势必将持续下去。可以预期，全世界的球墨铸铁年产量终将超过灰铸铁的年产量。

第二章 石墨形态的分类与命名^①

第一节 分类与命名的原则

1941年AFS和ASTM联合委员会对片状石墨进行了分类和命名,1961年C. K. Donoho提出了对球状石墨的分类与命名,这使人们对铸铁中石墨组织的认识进一步深化,并有力地促进了铸铁生产和科学研究的发展。近几十年来,由于在铸铁中普遍应用了稀土合金,以及引入了相当数量的微量元素,使铸铁中的石墨形态更加复杂多样;由于近年来对蠕虫状石墨铸铁研究工作的逐步深入,观察到了片状→蠕虫状→球状的多种过渡形态石墨。这些多种多样的石墨形态仅仅根据光学显微镜下的观察而进行分类显得远远不够,即使与力学性能联系起来进行分类,也还是不够科学。

扫描电子显微镜技术的发展及其在铸铁中的广泛应用,更辅之以深腐蚀、热氧腐蚀和离子轰击技术的配合便可能清晰地观察到各种形态石墨的三维立体特征及内部晶面排列位相。这就为对铸铁中石墨形态的科学分类奠定了有力的基础。

由于目前工厂中普遍使用的仍是光学显微镜,而且其制样方法较为简便迅速。因此,应将石墨二维形态与三维形态及其晶面排列特征进行对照。对石墨形态的命名,应以其在光学显微镜下所呈现的二维石墨质点的形态特征为主要依据,以便于其名称的普及推广应用。但由于仅仅观察石墨二维形态的局限性,还必须辅以三维形态的对应观察,以使这种命名有更科学的依据。石墨形态的分类,则应由其结晶特征,即经热氧腐蚀或离子轰击后石墨晶面排列的位相来区分。

第二节 分类与命名详图

石墨形态的分类与命名详图见图2-1。由图2-1可以看出,把铸铁中全部石墨形态分为片状石墨、蠕虫状石墨、球状石墨和絮状石墨四大类。前三类石墨是在液态结晶时形成的,后一类则是在固态经可锻化退火而得到的。因此,这一类石墨不在本章讨论之列。

片状石墨中,有常态(A型、B型、C型、D型、E型、F型石墨)和异态(水草形)石墨之分。蠕虫状石墨中也有常态(蠕虫形)和异态(松枝形)之分。在片状石墨和蠕虫状石墨之间,有两种过渡态石墨并列:靠近片状石墨的过渡态是卷曲形石墨,靠近蠕虫状石墨的过渡态是珊瑚形石墨。在球状石墨与蠕虫状石墨之间,也有一种过渡态,即团

① 1979年,我国成立了铸铁石墨形态分类与命名委员会。在全国许多单位的支持与协助下,进行了大量工作,在1980年完成初稿的基础上,该委员会于1981年完成了“铸铁石墨形态的分类与命名”的文稿并已公开发表。本章就是此文稿的主要内容。本书作者是此文稿的执笔人。文中所列举的石墨形态除絮状石墨以外均可能在球墨铸铁的生产中出现。

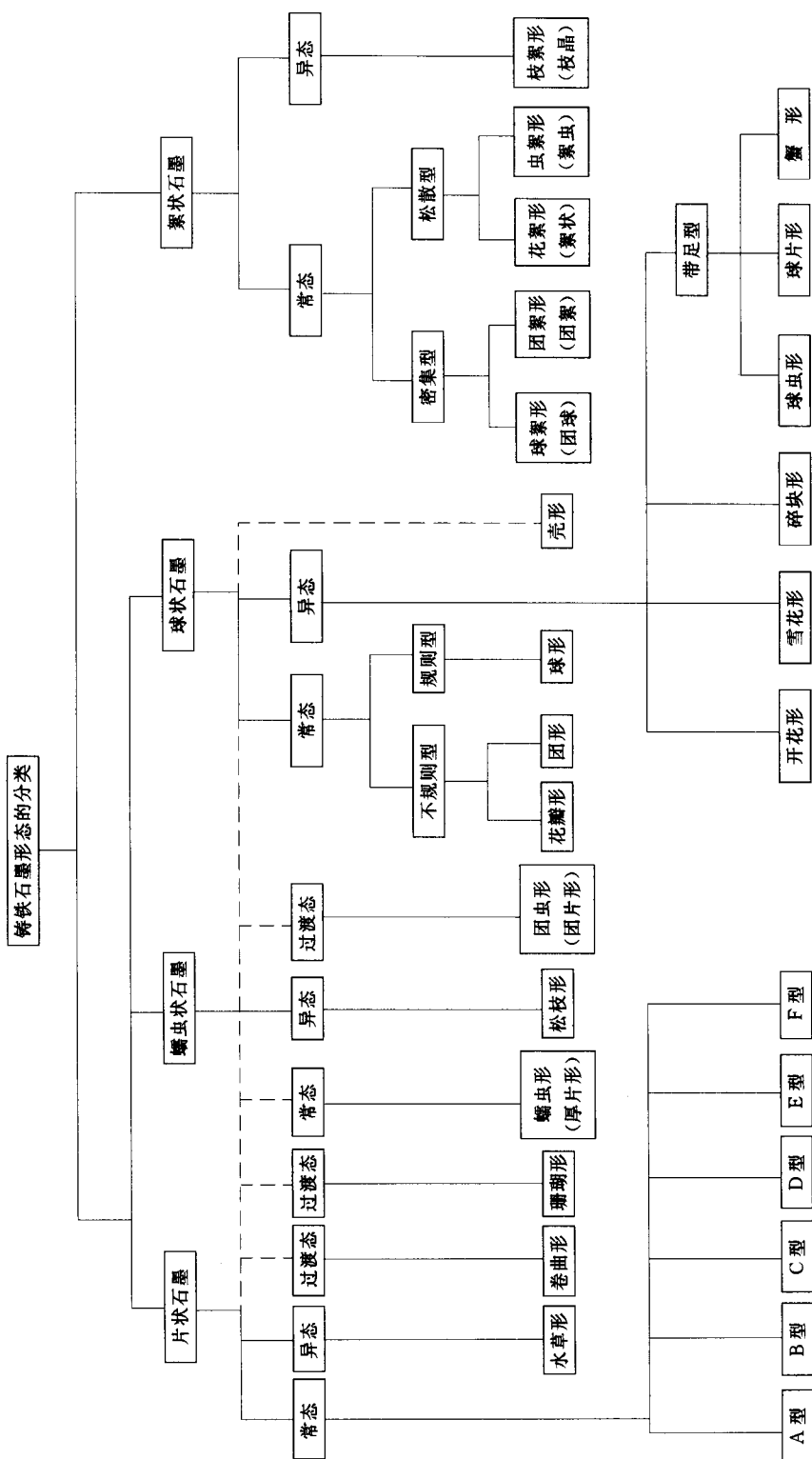


图 2-1 石墨分类

注：为便于实际应用，对与现有标准中名称不一的石墨，均在新名称下用括号注出原名称

虫形石墨。靠这三种过渡态石墨，把片状石墨、蠕虫状石墨和球状石墨相连接。由于过渡态石墨的多样性，或者由于它们内部的结晶构造还不清楚，所以用虚线连接。此外，在球状石墨中除了常态石墨和异态石墨以外，还有一种空心壳形石墨，由于它的生核与长大方式呈另一种型式，因此，用虚线连接。

絮状石墨也有常态和异态之分。在常态的絮状石墨中，因石墨密集的程度不同，而分成密集型和松散型，絮状石墨中还有异态，即枝絮形石墨。

第三节 分类与命名的简要说明

一、片状石墨

(一) 常态片状石墨

在普通灰铸铁中，通常出现的片状石墨有 A 型、B 型、C 型、D 型、E 型和 F 型。尽管它们随共晶度和冷却速度的不同，石墨片状的大小和分布各异，但经深腐蚀后的观察表明，它们均呈薄的片状、端部尖锐，石墨片本身呈较光滑的曲面，石墨片间彼此分枝而又互相联系。并且，它们都是以沿 a 轴方向长大为主。因此，可以认为它们均属同一种正常的片状石墨。

经深腐蚀后在扫描电镜下观察表明：A 型石墨片呈弯曲分枝，在同一共晶团内互相联系，由中心向外周呈辐射状：一个个共晶团内的石墨似花朵般紧密相邻；B 型石墨片也呈弯曲分枝，在同一共晶团内互相联系，但中心区域石墨片细小，有时能看到枝晶间分布特征，外周石墨片较为粗大，呈辐射状；C 型石墨平直粗大，分枝较少，石墨片间也是互相联系的。D 型和 E 型都是过冷石墨，石墨片较 A 型和 B 型更为细小、分枝更为频繁，石墨片之间也是互相联系的。D 型和 E 型石墨沿奥氏体枝晶间分布，又叫枝晶间石墨，但石墨片呈方向性排列。F 型石墨片呈弯曲分枝，石墨片间互相联系，由共同的中心向外周呈辐射状，如星形。图 2-2~图 2-13 分别是 A 型、B 型、C 型、D 型、E 型、F 型石墨的光学显微镜照片和扫描电子显微镜 (SEM) 照片。



图 2-2 A 型片状石墨

100×

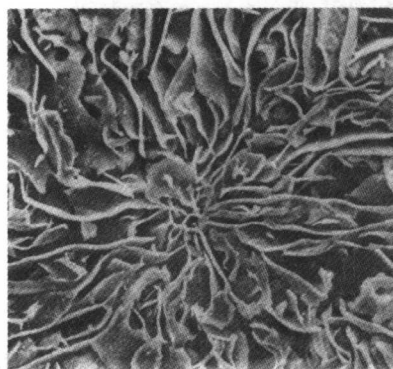


图 2-3 A 型片状石墨 (SEM)

100×