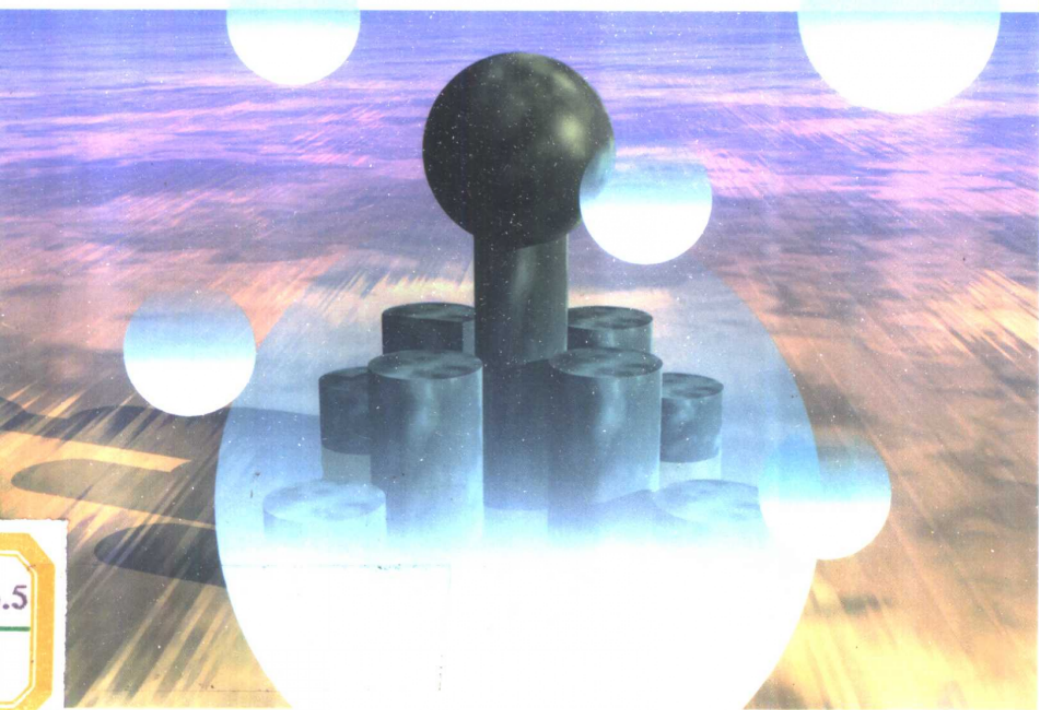


贝氏体球墨铸铁

魏秉庆 梁吉 吴德海 著



贝氏体球墨铸铁

魏秉庆 梁吉 吴德海 著



机械工业出版社

本书是一部阐述贝氏体球墨铸铁的专著。书中首先介绍了球墨铸铁的发展,指出,铸铁在人类从黑暗走向光明的征途中,发挥了巨大作用。在此基础上发展球墨铸铁是技术进步的必然结果。因此,到了20世纪70年代末,世界各国相继开发了贝氏体球墨铸铁。

本书详细介绍了等温淬火贝氏体球墨铸铁的物理冶金。在加入镍、钼、铜合金元素的情况下,采用不同的奥氏体化温度和等温淬火温度,可以得到各种性能的贝氏体球墨铸铁。并且,对于不同模数的铸件,加入相应量的镍、钼、铜合金元素,也可在铸态得到贝氏体球墨铸铁。

本书以较多的篇幅介绍了由作者研究开发的、硅锰合金化贝氏体球墨铸铁的物理冶金,在连续冷却条件下,可得到贝氏体球墨铸铁。在此基础上讨论了这种材质的相变机制和强化机制。最后,列举了贝氏体球墨铸铁的生产应用,表明,在工程上采用贝氏体球墨铸铁的效益显著。

本书可供从事铸造专业的工程技术人员以及材料应用和设计人员使用;也可供大专院校的学生与研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

贝氏体球墨铸铁/魏秉庆等著. —北京:机械工业出版社, 2001.10

ISBN 7-111-08878-6

Ⅰ. 贝… Ⅱ. 魏… Ⅲ. 贝氏体-球墨铸铁-基本知识 N.TG143.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第18661号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨燕 版式设计:霍永明 责任校对:魏俊云
金晓玲

封面设计:方芬 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年6月第1版·第1次印刷

890mm×1240mm A5·9.125印张·266千字

0 001—1 800册

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

前 言

人类经历了农业社会和工业社会，即将进入智能社会，一个崭新的知识经济时代即将到来。因此，科学技术的发展对于人类的文明和社会的进步是至关重要的。

自 1947~1948 年球墨铸铁问世以来，至今它已成为重要的工程材料之一，而且就其发展势头来看，至少在 21 世纪的上半世纪，球墨铸铁还将继续发展。现在，全世界球墨铸铁的产量已占全世界灰铸铁产量的 $\frac{1}{3}$ ，并且，这个比例还将继续增大。

20 世纪 70 年代末期，中国、美国和芬兰彼此独立地、又几乎是同时地宣布，他们各自研究开发了等温淬火贝氏体球墨铸铁。这种材质的性能优异，在伸长率相同的情况下，贝氏体球墨铸铁的抗拉强度是普通（珠光体-铁素体型）球墨铸铁的两倍；并且，它的弯曲疲劳强度可与合金锻钢相当；其冲击韧度则是普通球墨铸铁的数倍。为此，这种等温淬火贝氏体球墨铸铁一经问世，就受到了全世界，首先是材料工程界、齿轮工作者、汽车制造以及相关的设计人员，还有铸造工程界的重大关注，连续 3 届的国际等温淬火贝氏体球墨铸铁学术会议充分肯定了这种材质的优异性能和潜在的工程价值。

但是，这种等温淬火贝氏体球墨铸铁在其发展过程中也遇到了障碍，这就是它需要贵重的合金元素（镍、铜、钼）和盐浴等温处理，导致生产成本的增加；并且，在机械加工过程中，因其中的奥氏体产生加工硬化现象，致使机械加工带来了困难。为此，在充分肯定贝氏体球墨铸铁具有优异性能的基础上，研究开发不需要贵重元素、不需要采用盐浴等温处理来生产贝氏体球墨铸铁，就具有迫切的现实意义。

本书是在我们多年从事球墨铸铁工作的基础上，首先研究了镍、铜、钼合金化贝氏体球墨铸铁的物理冶金以及铸态下不同模数的贝氏体球墨铸铁的物理冶金。此后，我们对硅锰合金化贝氏体球墨铸铁进

行了系统研究，其中包括，在连续冷却条件下获得贝氏体及其相变机制与强化机制。

硅锰合金化贝氏体球墨铸铁已成功地应用于抗磨材料，至今在国内已有 30 多家工厂采用连续冷却方式制作硅锰合金化贝氏体球墨铸铁磨球，效益显著，故这种材质已被列入国家标准《铸造磨球》，由于硅锰合金化贝氏体球墨铸铁在生产实践中取得了成功，因而获得省部级科技进步奖多项，并取得国家发明专利 2 项。

书中内容主要选自我们的研究成果和生产实践，并参阅了国内外相关文献写成。我们力图全面、系统地阐述贝氏体球墨铸铁的物理冶金，旨在从理论到生产实践，从工艺参数的优化到具体的性能指标给予全面的介绍。本书第一、二、三章由吴德海撰写；第四、五章由梁吉撰写；第七、八、九章由魏秉庆撰写。

本书的出版问世，得到机械工业出版社的基金资助，对此，我们特致由衷的感谢。

由于我们水平有限，在本专著中当有错误和欠妥之处，恳请各位专家与读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第一章 球墨铸铁的发展	1
第一节 铸铁的发展	1
一、历史的回顾	1
二、强度是铸铁发展的驱动力	2
第二节 球墨铸铁的发现	4
一、前期工作	4
二、在铁液中加铈处理	6
三、在铁液中加镁处理	7
第三节 珠光体-铁素体球墨铸铁的性能	8
一、力学性能	8
二、球墨铸铁与其它钢铁材料力学性能对比	11
第四节 珠光体-铁素体球墨铸铁的应用	13
第五节 球墨铸铁的发展	16
第二章 等温淬火贝氏体球墨铸铁	20
第一节 等温淬火贝氏体球墨铸铁的发展	20
第二节 原理	23
一、简述	23
二、在球墨铸铁中获得贝氏体基体组织的原理	24
三、热处理工艺带	26
第三节 化学成分	30
一、简述	30
二、化学元素对球墨铸铁等温转变的行为	33
第四节 热处理	39
一、奥氏体化温度和时间	39
二、奥氏体等温转变温度和时间	42
三、等温淬火	45
四、等温淬火工艺参数对基体组织的影响	47

第五节	力学性能	53
一、	简述	53
二、	抗拉强度	55
三、	冲击韧度	56
四、	疲劳强度	57
五、	断裂韧度	58
六、	标准	60
第三章	铸态贝氏体球墨铸铁	63
第一节	问题的提出	63
第二节	原理	64
第三节	合金元素对铸态贝氏体球墨铸铁基体组织的影响	66
一、	镍的影响	66
二、	硅的影响	68
三、	铜的影响	69
四、	钼的影响	71
第四节	合金元素对铸态贝氏体球墨铸铁力学性能的影响	72
一、	镍(铜)的影响	72
二、	镍与铜联合作用	74
三、	铜与钼联合作用	75
四、	镍与钼联合作用	76
五、	镍、钼、铜的联合作用	77
六、	镍、钼、铜、硅的联合作用	78
七、	冷脆转变温度	81
第五节	回火处理	82
第六节	应用实例	85
一、	塔式起重机升降螺母	85
二、	铁粉磨碎机叶角	85
三、	石墨挤压模	85
四、	辊套	85
五、	轧辊	86
第四章	硅锰合金化连续冷却贝氏体球墨铸铁	87
第一节	概述	87
第二节	铸铁中的锰和硅	90
一、	铸铁中的锰	90

二、	铸铁中的硅	94
第三节	水溶性淬火介质	99
一、	简述	99
二、	无机物水溶性淬火介质	101
三、	有机聚合物水溶性淬火介质	103
第四节	硅锰合金化连续冷却贝氏体球墨铸铁的组织 and 性能	113
一、	锰和硅对基体组织的影响	113
二、	锰和硅对力学性能的影响	118
三、	热处理对组织和性能的影响	121
四、	断裂韧度、低温冲击韧度及淬透性	126
第五节	硅锰合金化球墨铸铁的形变热处理	128
一、	铸铁的形变热处理	128
二、	硅、锰及硅锰比对形变热处理硅锰合金化球墨铸铁组织和性能的影响	129
三、	变形率对硬度和冲击韧度的影响	133
四、	回火温度对组织和性能的影响	134
五、	淬透性及加工硬化能力	136
六、	硅锰合金化球墨铸铁的轧制	136
第五章	亚温淬火硅锰合金化贝氏体球墨铸铁	140
第一节	概述	140
第二节	球墨铸铁的亚温处理	141
一、	球墨铸铁热处理的特点	141
二、	共析转变三相区内破碎状铁素体的形成	147
三、	硅锰合金化对球墨铸铁共析三相区的影响	152
四、	奥氏体化温度对水溶性介质淬火硅锰合金化球墨铸铁组织和性能的影响	153
五、	硅锰含量对水溶性介质亚温淬火硅锰合金化球墨铸铁组织和性能的影响	156
第三节	硅锰合金化连续冷却贝氏体球墨铸铁生产中的若干问题	164
一、	关于化学成分及控制	164
二、	关于球化处理	167
三、	孕育处理	169
四、	炉前控制	170

第六章 硅锰合金化贝氏体球墨铸铁的强化机制	171
第一节 概述	171
一、 金属材料的强化理论	171
二、 特定合金材料的强化机制	175
第二节 抗磨贝氏体球墨铸铁强化机制	176
一、 贝氏体片层厚度与晶界强化	176
二、 贝氏体转变中析出碳化物的弥散强化	183
三、 贝氏体球墨铸铁的位错强化	191
四、 合金元素在贝氏体中的固溶强化	199
第三节 抗磨贝氏体球墨铸铁的裂纹形核与扩展	200
一、 裂纹的形核	201
二、 裂纹的扩展途径	202
三、 裂纹形核与扩展的热力学分析	206
第七章 硅锰合金化贝氏体球墨铸铁的相变机制	207
第一节 概述	207
一、 贝氏体相变机制研究的发展	207
二、 钢中贝氏体转变与组织特点	209
三、 铸铁中贝氏体转变的研究	211
第二节 贝氏体球墨铸铁相变热力学	213
一、 贝氏体形核驱动力	213
二、 化学位	215
三、 贝氏体形核驱动力的影响因素	218
第三节 贝氏体球墨铸铁相变动力学	221
一、 球墨铸铁中贝氏体的形成过程	221
二、 贝氏体的长大	222
第四节 贝氏体球墨铸铁相变晶体学	233
一、 贝氏体在石墨球表面形核的晶体学特征	233
二、 石墨球表面贝氏体形核模型	245
第八章 贝氏体球墨铸铁的生产应用	247
第一节 奥氏体-贝氏体球墨铸铁的生产应用	247
一、 简述	247
二、 奥氏体-贝氏体球墨铸铁的生产过程	248
三、 奥氏体-贝氏体球墨铸铁齿轮	252
四、 奥氏体-贝氏体球墨铸铁在曲轴等其它结构件上的应用	255

第二节 抗磨贝氏体球墨铸铁的生产应用	259
一、 简述	259
二、 抗磨贝氏体球墨铸铁磨球	264
三、 抗磨贝氏体球墨铸铁磨球的工程应用	271
参考文献	274

第一章 球墨铸铁的发展

第一节 铸铁的发展

一、历史的回顾

如果不借助于铸造工作者的智慧、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过程中一直起着重要作用。作为各种技术发展不可分割的一部分，铸造使我们能制造出人类赖以生存的设备；使人类能为争取自立而奋斗；使我们能够制造出汽车、火车和飞机。总之，金属铸造是人类迈向美好生活不可缺少的关键一环。

应该说，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曾先后进入了青铜器时代。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器时代的鼎盛时期，重达875kg的“司母戊”大方鼎，迄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存在的自然铜，以“露头”形式存在，因而容易被发现与开采。

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，曾用镍的质量分数为7.5%的陨石铁做成铁珠。陨石铁的主要成分是铁和镍，铁和镍总的质量分数在98%以上，其中镍的质量分数为4%~20%，余为铁，其它杂质元素中除钴的质量分数为0.3%~1.0%外，磷、硫和碳的含量是很低的（磷的质量分数为0.1%~0.3%，硫的质量分数为0.2%~0.6%；碳的质量分数为0.01%~0.2%）。

陨石铁来自宇宙空间，从被撞击的陨石坑数来看，地球至少经受

过 139 次重大撞击，每年新发现的陨石坑平均有 5~6 个。1994 年 7 月 17 日苏梅克-列维 9 号彗星按照科学家一年前的精确计算（误差只有几分钟），准确地与木星相撞。这是人类历史上第一次观察到的宇宙奇观，这个彗星直径 10km，重达 5000 亿 t，它的碎块以 210000km/h 的速度撞击木星。彗星总加起来的撞击能量相当于 400000 亿 t 的 TNT 爆炸。在 6500 万年以前，地球曾遭受到彗星的一次严重撞击，由此可能导致了恐龙的灭绝。科学家们预测，公元 2126 年 8 月 14 日，斯威夫特-塔特尔彗星将有万分之一的几率与地球相撞，届时，又将有的大的陨石从天而降。另外，1994 年 9 月 18 日发现的麦克霍兹 2 号彗星的碎块正朝着地球方向前进。

从美索不达米亚出土的文物证明，在公元前 3000 年就有了铁器；在公元前 2000 年就知道了铸铁技艺。尽管古希腊人和罗马人在很有限的范围内知道铸铁的技艺，但是他们在早期对铸铁的应用，远不能和中国古代所掌握的铸铁技术和发展应用相比拟。我国重达 270kg 的铸铁刑鼎是公元前 513 年铸造的。已出土的春秋晚期江苏六合程桥楚墓的铁丸、长沙楚墓的铁锤和铁鼎，以及战国时期韧性铸铁工艺和铁范等表明，中国生产铸铁要比其它国家早许多个世纪。中国在战国、秦、汉时期就将铁器的冶炼技术不断向外传播，战国时期传到朝鲜、汉代时期传到日本。应该说，中国在铁器时代对人类做出了贡献。

铸铁的历史经历了 5000 年的漫长岁月，只是到了瓦特发明蒸汽机以后，由于在铁轨、铸铁管制造中的大量应用，才走上了工业发展的道路。而在此以前，铸铁只用来制作祭器、艺术品、兵器和农具。

二、强度是铸铁发展的驱动力

由于铸铁长期处于技艺的水平，所以它的强度一直很低。到公元 1860 年，铸铁的抗拉强度只有 60~100MPa。1883 年，开始研究在铸铁熔化期加入废钢，以提高强度。第一次世界大战期间（1914~1918 年），依靠冶金学的知识，铸铁的抗拉强度提高到 120~140MPa。后来，通过系统研究在铸铁熔化期加入大量废钢在炉料中占 40%~80%（质量分数）和采用熔化过热的方法，从而使铸铁强度大幅度提高。但是，当抗拉强度超过 200MPa 以上时，进一步增加废钢量（使碳、硅含量降低），反而使力学性能恶化。为此，便在 1922 年，由美国人

A. F. Meehan 发明了孕育铸铁，这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，可使抗拉强度达到 300MPa。这种铸铁的特点是：基体为 100%（体积分数）珠光体组织，对断面敏感性小，具有中等、均匀分布的（呈 A 型）石墨，并且共晶团数量得到明显增多。

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灰铸铁的性能，而且还出现了优质的球墨铸铁、蠕墨铸铁以及其它铸造合金、所谓孕育处理，就是人为地把某种物质加入到液体金属（铁液）中，以改变其物理冶金状态、从而改善材质（铸铁）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，以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，是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）可以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达到 400MPa，已是很高的性能指标，这就是合金铸铁的应用。

铸铁力学性能低的重要原因是基体组织中存在的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 Rëaumur 制作了白心可锻铸铁；1826 年美国 Seth Boyden 发明了黑心可锻铸铁，结果均使石墨变成团絮状。但是，这两种可锻铸铁都要求化学成分严格（对碳、硅、硫、锰等均有严格要求）、需要长时间的可锻化热处理，只限于生产薄壁的小尺寸铸件。并且，石墨形态也不圆整，只能达到团絮状。因此，可锻铸铁的生产应用受到了很大限制。1922 年以后，虽然出现了孕育铸铁，但是，它的塑性很差，这仍是铸铁的根本弱点。因此，冶金学者的多年宿愿就是要能得到具有良好的塑性与韧度、石墨呈球状的铸铁。

1947 年英国人 H. Morrogh 在过共晶灰铸铁中添加铈，采用 Si-Mn-Zr 合金孕育，当铈的质量分数在 0.02% 以上时，使铸铁中的石墨

呈球状。1948 年美国 A. P. Gangnebin 等人发表了在铁液中添加镁, 随后用硅铁合金进行孕育处理, 在残余镁的质量分数超过 0.04% 时, 即可得到球状石墨。从此, 球墨铸铁即迅速变成了重要的工程材料。这是因为球墨铸铁的抗拉强度从它一出现, 即达到了 600MPa, 此外还有 3% 的伸长率。这是指珠光体球墨铸铁具有的性能指标。此后, 通过镍钼、铜钼合金化, 使珠光体基体组织变成索氏体、托氏体组织, 由此抗拉强度达到 900MPa。1977 年以后, 由于贝氏体球墨铸铁的开发应用, 其抗拉强度达到了 1200MPa, 并保有 2% 的伸长率。因而, 使铸铁的性能得到进一步提高。

由此可以看出, 铸铁的发展是以追求具有优良的力学性能, 特别是具有高的抗拉强度作为驱动力的。从 1860 年灰铸铁的抗拉强度由 60~80MPa 提高到 1977 年的贝氏体球墨铸铁的 1200MPa, 这也就是说, 在这 120 年的时间里, 由于工业技术的进步, 铸铁的强度提高了近 20 倍, 图 1-1 是铸铁抗拉强度随年度不断提高的变化。

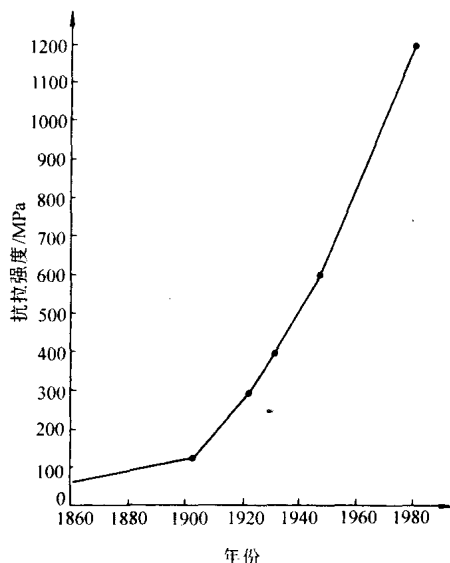


图 1-1 铸铁抗拉强度随年度的变化

第二节 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, 他很鲜明地观察到了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 在其观察中已经把出现的球状石墨

的形成特征，从认识上有了显著的深化，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；并且，他也并未有意识地设法采取措施来获得这种石墨结构。

早在 1935~1936 年间，德国阿汉铸造研究所就已知道，在低碳高硅的铸铁中，可以获得普遍都呈球状石墨的方法。并且，在 1936 年于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，比渗碳体中含碳量 ($w_c = 6.7\% \sim 7.7\%$) 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，这项研究是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，硅的质量分数 $> 1\%$ ，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 在他的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 作了他的研究报告，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，必须满足下列的条件：

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 ≥ 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以及相当快速的冷却。

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 以下的铸件，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、在铁液加铈处理

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, 在含硅、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, 在含硅、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 的研究结果相一致的。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, 其实钙、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 $C + \frac{1}{3} (Si + P)$ 的含量 $> 4.3\%$ (质量分数)。
3. 硅的质量分数在 $2.3\% \sim 7\%$ 之间。
4. 含硫量应尽可能低, 经加铈处理后, 硫的质量分数小于 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, 可得到抗拉强度达到 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即可。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，要使硫的质量分数从 0.01% 降至 0.02%，必须加入质量分数为 0.6% 混合金属；如果原始硫的质量分数只有 0.02%，为使残留铈的质量分数达到 0.05%，则只要加入质量分数为 0.1%~0.2% 的混合金属。

三、在铁液中加入镁处理

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 No209914 表明，Griesheim-Electron 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 w_{Mg} 0.05%~0.1%，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 年间，德国的研究人员还推荐这种脱氧剂的成分为： w_{Si} 10%~40%， w_{Mn} 0%~20%， w_{Fe} 0%~10%，其余是镁。

在 1922 年至 1931 年间，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，由 Meehanite 公司于 1941 年取得的美国专利 (No2364922) 指出，采用 Si-Ca 合金作为石墨化元素处理铁液后，再采用碲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。

由此要指出的是，在灰铸铁中获得球状石墨的方法是建立在以前大量工作的基础上，特别是在 1940~1941 年间英、美研究人员进行了系统的试验研究，并在非常短的时间内在一系列根本性的研究工作中取得了实质性的进展。