

# 低碳 球墨铸铁

邢泽炳 著

中国农业科学技术出版社

# 低碳 球墨铸铁

邢泽炳 著

中国农业科学技术出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

低碳球墨铸铁 / 邢泽炳著. —北京: 中国农业  
科学技术出版社, 2012. 5

ISBN 978 - 7 - 5116 - 0719 - 5

I. ①低… II. ①邢… III. ①球墨铸铁 - 研究  
IV. ①TG143. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 228852 号

责任编辑 张孝安

责任校对 贾晓红 郭苗苗

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82109708(编辑室) (010)82109704(发行部)  
(010)82109709(读者服务部)

传 真 (010)82109708

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787mm × 1 092mm 1/16

印 张 13. 25

字 数 190 千字

版 次 2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价 30. 00 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

## 内容提要

本书是一本介绍低碳球墨铸铁的专著。球墨铸铁作为一种重要的结构材料，已经得到了相当广泛的应用，然而关于球墨铸铁中许多科学问题仍然悬而未决。低碳球墨铸铁从一个特殊的视角阐述了石墨球化及相变等诸多问题，为全面了解球墨铸铁提供有益的帮助，并为这种新材料的应用提供了理论依据。

本书首先介绍了球墨铸铁的发展历史以及现状，球墨铸铁当中亟待解决的科学问题；其次介绍了低碳球墨铸铁新材料的成分、组织、加工工艺以及性能特点；然后针对使用不同的  $S_x$  变质剂生产系列化的低碳球墨铸铁材料，分别介绍了每一类材料的成分、组织与性能，并根据各种材料的性能特点阐述适宜的应用范围。最后通过计算机模拟球墨铸铁凝固过程中石墨球的长大与冷却速度之间的关系，并用试验验证了此模拟过程的准确度，为球墨铸铁的生产提供了可靠的理论指导。

本书可供从事铸造或相近专业的专业技术人员、材料设计以及应用等科技人员使用或参考，也可做为大中专院校相关专业的研究生学习或参考。

# 前 言

球墨铸铁自 1947 年问世，到今天已经发展了半个多世纪的历程，其应用涉及机械、冶金、汽车、矿山等重要工业部门，得到了长足的发展，据统计，全世界球墨铸铁的产量已经达到灰铸铁总产量的 1/3，而且从发展趋势上来看，这个比例还将继续扩大。与钢相比，球墨铸铁生产工艺简单，成本较低，但力学性能已经能够接近或超过普通碳素结构钢的水平。因此，相信球墨铸铁将作为一种重要的结构材料长期存在。

但是，球墨铸铁在理论方面的研究还远没有达到与其应用相适应的程度，有关石墨的晶体结构，石墨的球化机理，变质剂的作用原理，固态下发生相变的特点等科学问题仍然是铸造工作者长期关注的焦点。虽然借助于现代先进的工具和手段，已经可以定量分析铸铁中各种相的晶体特征、存在形式，但却无法了解其变化的中间过程。科技工作者通过计算机模拟建立数学模型希望真实再现这一过程，包括建立各种球化学说，但是还是有很多不完善的地方，因此，对于球墨铸铁的理论分歧也将长期存在下去。

昆明理工大学球铁研究所高级工程师舒信福老师长期从事低碳球墨铸铁新材料的研究工作，开发了系列化的 Sx 变质剂产品，生产出具有不同性能特点的珠光体低碳球墨铸铁、铁素体低碳球墨铸铁、奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁和奥氏体低碳球墨铸铁，并且有针对性地应用到不同行业，发挥了良好的经济效益。并且根据低碳球墨铸铁的生产特点系统地研究了石墨球的结构，探讨了球化机理，并用计算机模拟球化过程。低碳球墨铸铁的研究从另一方面，另一个视角阐述关于球墨铸铁的科学问题，为球化学说提供了理论和实践基础。

生产低碳球墨铸铁必须使用 Sx 变质剂，Sx 变质剂中包含有传统球化剂





当中公认的某些反球化元素，这就进一步颠覆了球化与反球化的界限，使人们不得不重新思考何谓“球化元素”，何谓“反球化元素”。而且 Sx 变质剂代替传统球化剂和孕育剂，不但是用量少，而且大大简化生产工艺，节约了成本，成为未来球墨铸铁发展的重要方向。

在此，向昆明理工大学舒信福教授为首的科研团队，尤其是姚兴群、王恒、唐瑞春、郭跃华、朱延东、李玉中和李玲芳等支持本课题研究的学者表示感谢。

在本书的著作过程中难免有错误和不妥之处，恳请各位专家与读者批评指正。

邢泽炳

2011 年 9 月

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| <b>第一章 概 论</b> .....            | (1)  |
| <b>第一节 铸铁发展概况</b> .....         | (1)  |
| 一、灰铸铁 .....                     | (3)  |
| 二、球墨铸铁 .....                    | (4)  |
| 三、蠕墨铸铁 .....                    | (6)  |
| 四、可锻铸铁 .....                    | (7)  |
| 五、特种性能铸铁 .....                  | (8)  |
| 六、铸铁熔炉 .....                    | (9)  |
| 七、现代铸铁的质量要求 .....               | (12) |
| <b>第二节 球墨铸铁发展概况</b> .....       | (15) |
| 一、现代球铁的诞生及发展 .....              | (15) |
| 二、我国球铁的发展状况 .....               | (17) |
| <b>第三节 低碳球墨铸铁简介</b> .....       | (18) |
| 一、概述 .....                      | (18) |
| 二、低碳球墨铸铁的相关文献 .....             | (19) |
| 三、研究低碳球墨铸铁的意义 .....             | (23) |
| 四、低碳球墨铸铁的特点 .....               | (24) |
| <b>第二章 低碳球铁的组织与性能</b> .....     | (27) |
| <b>第一节 低碳球墨铸铁的组织</b> .....      | (27) |
| 一、低碳球墨铸铁中的石墨 .....              | (27) |
| 二、低碳球墨铸铁的基体组织 .....             | (31) |
| <b>第二节 系列化的低碳球墨铸铁及其性能</b> ..... | (32) |





|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 一、准铸态贝氏体低碳球铁 .....             | (33)         |
| 二、耐热耐蚀奥氏体低碳球铁 .....            | (36)         |
| 三、高韧塑性铁素体低碳球铁 .....            | (37)         |
| 四、低碳球铁的摩擦磨损性能 .....            | (38)         |
| 五、低碳球墨铸铁的腐蚀性能 .....            | (45)         |
| <b>第三章 低碳球墨铸铁球化及变质机理 .....</b> | <b>(47)</b>  |
| 第一节 低碳球墨铸铁的球化机理 .....          | (48)         |
| 一、球墨铸铁球化机理的研究状况 .....          | (48)         |
| 二、球墨铸铁中石墨的晶体结构和位向 .....        | (53)         |
| 三、球化机理研究的主要方法及成果 .....         | (55)         |
| 第二节 球状石墨的形核 .....              | (64)         |
| 一、球状晶胚的形成 .....                | (65)         |
| 二、石墨球状形核的热力学稳定性 .....          | (69)         |
| 第三节 球状石墨的生长 .....              | (76)         |
| 一、球状石墨在铁液中的生长 .....            | (77)         |
| 二、球状石墨在奥氏体中的生长 .....           | (84)         |
| 第四节 “气泡学说”的探讨 .....            | (88)         |
| 一、气泡学说的描述以及不足之处 .....          | (89)         |
| 二、球状石墨的生长方向 .....              | (90)         |
| 三、球状石墨的表面 .....                | (95)         |
| 第五节 球状石墨显微分析 .....             | (95)         |
| <b>第四章 珠光体低碳球墨铸铁 .....</b>     | <b>(102)</b> |
| 一、化学成分和生产工艺的选择 .....           | (102)        |
| 二、光学显微组织 .....                 | (103)        |
| 三、透射电镜 (TEM) 分析 .....          | (104)        |
| 四、低碳球铁性能的影响因素 .....            | (104)        |
| 五、变质剂变质机理的探讨 .....             | (112)        |
| 六、Sx 变质剂中反球化元素的作用分析 .....      | (117)        |
| 七、低碳球铁的韧化处理 .....              | (123)        |
| 八、低碳球铁的强化处理 .....              | (124)        |
| <b>第五章 铁素体低碳球墨铸铁 .....</b>     | <b>(125)</b> |
| 一、化学成分的选择 .....                | (126)        |
| 二、工艺确定 .....                   | (129)        |
| 三、铁素体低碳球墨铸铁的组织与性能 .....        | (129)        |



|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 四、铁素体低碳球墨铸铁生产的理论分析 .....                 | (130)        |
| <b>第六章 奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁 .....</b>           | <b>(147)</b> |
| 第一节 奥氏体—贝氏体球铁简介 .....                    | (147)        |
| 一、奥氏体—贝氏体球铁的发展 .....                     | (147)        |
| 二、奥氏体—贝氏体球铁的性能标准 .....                   | (151)        |
| 三、奥氏体—贝氏体球铁的应用 .....                     | (153)        |
| 第二节 奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁组织与性能 .....             | (154)        |
| 一、奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁的成分选择 .....               | (154)        |
| 二、奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁的生产工艺 .....               | (156)        |
| 三、奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁的组织与性能 .....              | (156)        |
| 第三节 主要化学元素对奥氏体—贝氏体低碳球墨铸铁性能的<br>影响 .....  | (159)        |
| 一、Si 对于等温淬火低碳球铁性能的影响 .....               | (159)        |
| 二、Mn 对于等温淬火低碳球铁性能的影响 .....               | (161)        |
| 三、Cu 对于等温淬火低碳球铁性能的影响 .....               | (163)        |
| 第四节 等温淬火工艺对奥氏体—贝氏体低碳球铁组织和性能的<br>影响 ..... | (165)        |
| 一、奥氏体化时间的影响 .....                        | (165)        |
| 二、等温转变温度的影响 .....                        | (166)        |
| 三、等温转变时间的影响 .....                        | (167)        |
| <b>第七章 低碳球墨铸铁微观组织计算机模拟 .....</b>         | <b>(169)</b> |
| 第一节 模拟程序设计 .....                         | (169)        |
| 一、程序设计的工作平台 .....                        | (169)        |
| 二、模拟程序的对话框设计 .....                       | (170)        |
| 第二节 低碳球墨铸铁微观组织模拟结果验证 .....               | (190)        |
| 一、模拟计算时的初始参数 .....                       | (190)        |
| 二、程序结果验证 .....                           | (191)        |
| <b>参考文献 .....</b>                        | <b>(193)</b> |



# 第一章

## 概 论

### 第一节 铸铁发展概况

铸铁具有优异的铸造性能和加工工艺性能，且价格便宜，是一种重要的工程材料，广泛应用于国民经济的各个部门。但是，铸铁材料从灰铸铁到孕育铸铁和球墨铸铁，从普通球墨铸铁到奥贝球墨铸铁，人类掌握和使用铸铁材料经历了漫长的发展阶段。人类掌握铸铁材料并用它来制造人类赖以生存的各种工具和设备，整个人类的文明进步伴随着铸铁材料的发展历史。因此，从另一个方面讲，人类的文明进步与铸铁材料的发展息息相关。

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，例如，在公元前 4000 年，古埃及人便掌握了炼铜技术，我国古人在公元前 2000 年左右学会从矿石炼铜的技术，晚商和西周是我国青铜时代的鼎盛时期，其中，重达 875kg 的“司母戊”大方鼎就是这一时期青铜器的杰出代表作品。在铁器和炼铁技术出现之前人类最早使用的金属材料是铜，这主要是因为当时的生产力条件下，炼铜比炼铁更容易，而且，在地球表层中有呈自然金属状态存在的铜，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），陨石铁的主要成分是铁和镍，一般两者的质量分数可达 98% 以上 [其中， $w(\text{Ni})$  约为 4% ~ 20%，余为 Fe]，其他杂质元素包括  $w(\text{Co}) = 0.3\% \sim 1.0\%$ ， $w(\text{P}) = 0.1\% \sim 0.3\%$ ， $w(\text{S}) = 0.2\% \sim 0.6\%$ ， $w(\text{C}) = 0.01\% \sim 0.2\%$ 。古埃及人在至今 5 000 年以前的前王朝时期，曾用 Ni 含量（质量分数）为 7.5% 的陨石铁做成铁珠。

从美索不达米亚出土的文物证实，大约在公元前 3000 年古埃及人和古罗马人就有了铁器；在公元前 2000 年就掌握了铸铁生产技术。但是，若论人类早期对铸铁的应用，古代中国人的铸铁件制造水平远远高于其他古人。据考古发现，古代中国人早在 2500 年前就制作了重达 270kg 的铸铁刑鼎。公元 953 年，用泥范明浇法铸造的河北沧州铁狮子，共有 500 余块范块拼铸而成，体重约 50t，如图 1-1 所示。已经出土的春秋晚期江苏六合程桥楚墓的铁丸，长沙



楚墓的铁插和铁鼎，以及战国时期出现的铁范和韧性铸铁的制造工艺等均可以说明，古代中国人在铁器制造和使用方面对人类所作的巨大贡献。我国劳动人民使用铸铁件用于制作炊具、农业机具以及各种容器等。但是，就世界范围来说，在工业革命以前，铸铁件的用途主要是兵器、祭器和艺术品。



图 1-1 沧州铁狮子

铸铁的发展历史经历了漫长的岁月，达几千年之久，但是，由于工艺水平落后，其发展速度非常缓慢。直到 1722 年，列奥米尔发明了 R. A. DeReaumur 冲天炉，并开始用显微镜研究铸铁的组织 and 断口之后，铸铁材料的研究和使用才有了迅速的发展。1734 年，Svedenberg 编写的《铸铁学》(De ferro) 问世，对铸铁工艺有了初步的理论认识。特别是 1765 ~ 1785 年间，由于瓦特蒸汽机的出现，在机器制造业和桥梁建筑业中大量使用铸铁，并开始采用铸铁制造铁轨。1788 年，为巴黎的自来水厂铸造了总长达 60km 的输水铸铁管，把它通向凡尔赛宫，以提供宫廷生活用水。铸铁需求量的增加，促进了铸铁技术的进步和理论研究工作的发展。从此，铸铁走上了工业发展的道路。

从近代物理冶金学的观点来看，铸铁是一种铁碳硅合金，一般碳的质量分数为 2.0% ~ 4.5%，Si 的质量分数为 1% ~ 3%。此外，铸铁中还含有 Mn、P、S 等常存元素以及其他的合金或杂质元素。通常，按照铸铁中碳的存在形态把铸铁分成灰口铸铁（碳主要以单质石墨的形式存在）和白口铸铁（碳以化合态  $\text{Fe}_3\text{C}$  的形式存在）。同时，灰口铸铁按照单质石墨形态的不同，可以分为（普通）灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁四大类。此外，按照铸铁中是否含有除常存元素以外的其他合金元素，还可把铸铁分成普通铸铁与合金铸铁，合金元素含量较高的铸铁也可叫做特殊性能铸铁。现将各种铸铁的发展分别简述如下。

## 一、灰铸铁

人类最早使用的铸铁材料就是灰铸铁。灰铸铁中的石墨主要以片状形式存在，由于片状石墨对基体的割裂严重，在石墨尖角处易造成应力集中，降低了灰铸铁的抗拉强度、塑性和韧性，因此，灰铸铁的力学性能较差。灰铸铁的力学性能除了取决于石墨片以外还决定于基体组织的类型。灰铸铁的基体组织分为铁素体、珠光体以及铁素体—珠光体，其中，铁素体基体灰铸铁的石墨片粗大，强度和硬度最低，故应用较少；珠光体基体灰铸铁的石墨片细小，有较高的强度和硬度，主要用来制造较重要铸件；特别要指出的是，具有体积分数为100%的珠光体铸铁与具有体积分数为100%铁素体铸铁相比，其相对耐磨性可提高近100倍。铁素体—珠光体基体灰铸铁的石墨片较珠光体灰铸铁稍粗大，性能不如珠光体灰铸铁。故工业上使用较多的是珠光体基体的灰铸铁。

因此，灰铸铁的研究和应用主要是通过细化石墨片以及获得100%的珠光体基体组织为目标的。为此，铸铁工作者已经奋斗了近百年之久。1885年，英国人Turner把硅铁加入白口铁水中，得到了最早的高强度铸铁。1922年，英国人Meehan用硅化钙和硅化镁生产出高强度灰铸铁，并申请了专利。同期，美国人Crosby把硅铁和石墨加入铁水得到了珠光体基体和均匀分布的A型石墨。所以一般认为，现代的孕育铸铁起始于Meehan（密烘）的专利，因此，亦称密烘铸铁。

为生产高强度的气缸体，曾发展了Lanz法生产珠光体铸件。这种方法是由A. Diefenthaler和K. Sipp两人在德国Mannheim城的HeinrichLanz铸铁厂研制成功的，并由此而获得了德国和其他国家的专利。这种铸件的特点在于它具有很高的强度和特别小的裂纹敏感性。在生产Lanz珠光体铸件时，化学成分要根据铸件壁厚严加控制，其C+Si总的质量分数在3.5%~4.6%。对于小型薄壁铸件，采用较高的C+Si总量，并使铸型与型芯在大于500℃的温度下预热，对于厚壁铸件，则采用较低的C+Si总量和较低的预热温度。这种方法，可在铸件各部位得到体积分数为100%的珠光体+A型石墨，并且铸造应力很小，但这种工艺复杂、成本高昂，因而至今在生产上已不再采用。

在发展高强度灰铸铁的过程中，钢性铸铁的生产曾经起过重要作用。所谓钢性铸铁就是靠加入大量废钢（质量分数可达40%~80%）熔炼得到的铸铁。这种铸铁的成分为： $w(C) = 2.8\% \sim 3.0\%$ 、 $w(Si) = 1.5\% \sim 1.7\%$ 、 $w(Mn) = 0.8\% \sim 1.0\%$ 、 $w(P) \leq 0.3\%$ 、 $w(S) \leq 0.12\%$ 。由于C、Si含量较低，所以，这种铸铁具有珠光体组织和很高的力学性能，抗拉强度可达200MPa以上。这种钢性铸铁曾被用来制作各种尺寸的炮弹和各种机器上的重



要零件。这种降低碳、硅含量以提高灰铸铁强度的方法，在灰铸铁发展的历程中，曾经是重要的措施。但是，增加废钢加入量和与之相应的提高铁液过热温度等工艺措施，使铸件的薄壁处出现白口组织，铸铁的力学性能不但没有提高，反而会恶化，而孕育技术的出现使灰铸铁材料的抗拉强度达到近 400MPa。

进一步提高低碳铸铁强度的方法就是采取合金化以及合金化与孕育处理联合使用，为此，采用合金元素的质量分数小于 3% 的低合金铸铁。在低合金高强度灰铸铁中，最早使用的合金元素是镍、铬元素。质量比在  $\text{Ni} : \text{Cr} = 3 : 11$  的情况下，可使珠光体的分散度提高，形成索氏体型组织，此时，抗拉强度可达 400 ~ 450MPa，同时，也改进了其他使用性能。当附加适量的合金元素如  $w(\text{Mo}) = 0.6\% \sim 1.0\%$ ， $w(\text{Ni}) = 1.5\% \sim 3.5\%$  时，可以得到针状组织。具有这种组织的灰铸铁，抗拉强度可达 450 ~ 600MPa。后来的研究表明，在镍、铬、钼低合金铸铁中，镍可全部或部分地用铜或锰取代。

与钢性铸铁的情况一样，采用低碳成分的合金铸铁时，可得到很高的力学性能，但必须在过热的条件下实现，由此就会产生过冷石墨。为此，生产合金铸铁时，往往要采取孕育处理。

由以上叙述可见，灰铸铁的发展主要是以提高强度作为驱动力的。从发展的途径来看，早期着眼于孕育处理。为了进一步提高强度，以后的发展方向则着眼于同时采用孕育处理与合金化。另外，为了改善灰铸铁的铸造性能，则力求采用较高碳当量的铸铁，这对低碳含量以及低合金铸铁尤为重要。

## 二、球墨铸铁

球墨铸铁中的石墨以球状形式存在，这样就大大降低了石墨对基体的割裂作用，使铸铁的强度达到基体组织强度的 70% ~ 90%。因此，球墨铸铁可以通过各种热处理使基体的力学性能得到充分发挥，到目前为止，球墨铸铁是性能最好的铸铁材料。

早在 1935 ~ 1936 年，德国人发现，当成分为  $w(\text{C}) = 1.5\%$ 、 $w(\text{Si}) = 3.5\%$  的铁碳合金时，在凝固过程中可析出球状石墨，这就是后来人们称呼的石墨钢。C. Adey 于 1937 年发现在活塞环中有球状石墨存在。以后，在高温碱性炉渣覆盖下的高碳铁液，经快速冷却后，在铸态也得到了球状石墨。但此项研究并未发展成功用于工业生产。

现代球墨铸铁是由美国国际镍公司（INCO）青年科研人员麦里斯（K. D. Millis）于 1943 年 4 月 12 日研制成功的，它熔化了几组镍硬铸铁，典型成分分别为：3.35% C、0.5% Si、0.5% Mn、4.5% Ni 和 1.5% Cr。分别添加

Zr、Ce、Bi、Cu 和 Pb，还有两组加 Te 和 Co，有一组添加 0.5% Mg。浇注成激冷试块，其中，加镁的试块不但达到了预期效果——促进形成碳化物，而且意外地发现了加镁的镍硬铸铁比加铬的标准镍硬铸铁明显提高了韧性。一年后做了加镁然后添加硅铁孕育，浇注试块切取拉伸试样与金相试样，发现析出完整的球墨，力学性能十分优异。这次试验标志着球墨铸铁的正式研制成功。经过 5 年的深入系统试验后，INCO 公司于 1947 年 3 月 22 日先在英国，1947 年 11 月 21 日后在美国申请了加镁球铁专利。

几乎与此同时，1947 年，英国人 H. Morrogh 发现，在过共晶的灰铸铁铁液中，加入 Ce 稀土元素，并以 Si-Mn-Zr 合金孕育，保留铸铁中铈的质量分数在 0.02% 以上时，铸铁中的石墨呈球状。1948 年，美国人 A. P. Gangnebin 研究在铁液中加入镁，随后用硅铁孕育，如果铁液中残留  $w(\text{Mg}) \geq 0.04\%$  时，可得到球状石墨。这种球状石墨铸铁的抗拉强度达到了 600MPa，还有 3% 的延伸率，远远超过了灰铸铁的力学性能。从此，球墨铸铁进入了大规模的工业化生产。

我国古代，在河南省巩县铁生沟西汉中、晚期的冶铁遗址中出土的铁镗，经过金相检验，呈球状石墨，球化率相当于现代标准一级水平。我国古代的铸铁，在一个相当长的时期里含硅量都偏低，例如在约 2000 年前的西汉时期，我国铁器中的球状石墨，是由低硅的生铁铸件经柔化退火的方法得到，不同于现代球墨铸铁的生产工艺。这是我国古代铸铁技术的重大成就，也是世界冶金史上的奇迹。

球墨铸铁作为新型工程材料的发展是惊人的。1949 年，全世界球墨铸铁产量是 5 万 t，1960 年为 53.5 万 t，1970 年为 500 万 t，1980 年为 760 万 t，1990 年为 915 万 t，1998 年为 1 298 万 t，2000 年为 1 310 万 t，2002 年为 1 405 万 t，2004 年为 1 870 万 t，2005 年为 1 959 万 t，2006 年为 2 168 万 t，2007 年为 2 287 万 t，2008 年约为 2 384 万 t。并且，随着时间的推移，全世界的球墨铸铁产量还将继续增长。与此同时，全世界的灰铸铁产量则由 1980 年的 5 230 万 t 下降到 2006 年的 4 253 万 t，和 2008 年 4 296 万 t，基本上呈逐年下降的趋势。可以预见，在不久的将来球墨铸铁产量将超过灰铸铁的产量，如图 1-2 所示。

我国从 1950 年开始研究和生产球墨铸铁，但发展速度极快，2008 年我国的球铁产量为 820 万 t，居世界第一位，约占当年世界球铁产量的 1/3，超过居世界第 2 位的美国（360 万 t）、居世界第 3 位的日本（200 万 t）和居世界第 4 位的德国（185 万 t）名的总和。我国球墨铸铁的发展经历了 3 个阶段：1950~1958 年为第一阶段——镁球墨铸铁时期。在这段时间我国球墨铸铁的研究与生产，从无到有，从小到大，从生产不太重要的零件到制造以曲轴为代表的重要结构件，稳步向前发展。到 1958 年形成了全国性的推广球墨铸铁的

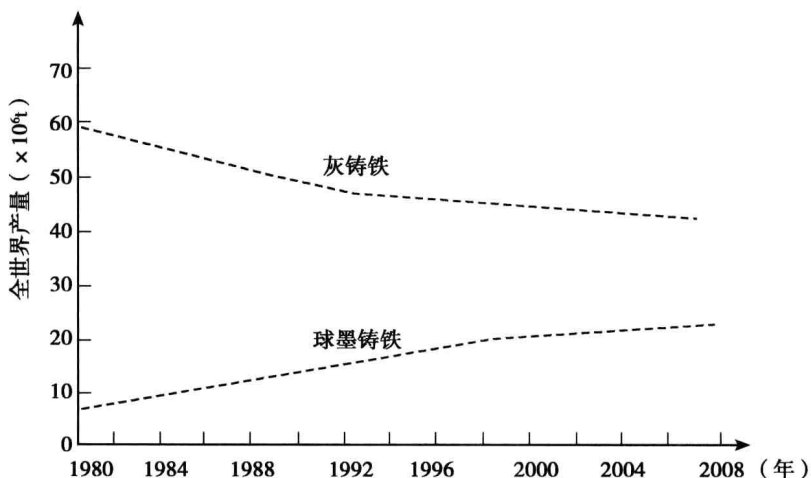


图 1-2 1980 ~ 2008 年全世界灰铸铁与球墨铸铁产量变化

高潮。1959 ~ 1964 年底稀土镁球墨铸铁试验成功是我国球墨铸铁发展的第二阶段。在这段时间内，研究工作和生产先后围绕高硫生铁制作球墨铸铁和寻求适合我国铸造生产条件下的新型球化剂这两项内容而展开。从 1965 年至今是我国球墨铸铁发展的第三阶段。这是以 1964 年底在南京召开的原第一机械工业部稀土推广应用会议为转机，开始了稀土镁球墨铸铁在全国的推广和普及。

### 三、蠕墨铸铁

蠕墨铸铁中的石墨呈蠕虫状，与片状石墨相比，蠕虫状石墨的长厚比明显减小，它对基体的割裂作用小于灰铸铁，且蠕墨铸铁中往往含有球状石墨，因此，蠕墨铸铁的力学性能也是介于灰铸铁和球墨铸铁之间。例如，蠕墨铸铁强度、韧性、疲劳极限、耐磨性能以及抗疲劳性能优于灰铸铁，但低于球墨铸铁。此外，蠕墨铸铁的导热性、切削加工性能优于球墨铸铁，这也是蠕墨铸铁作为钢锭模以及汽车发动机缸体材料使用的主要原因。

蠕墨铸铁早在 1947 年英国人 H. Morrogh 在研究用铈处理球墨铸铁的过程中，就发现了蠕虫状石墨。由于 H. Morrogh 当时以及后来的研究工作主要集中于研究怎样得到球状石墨以及球墨铸铁的性能，而蠕虫状石墨则被认为是处理球墨铸铁失败的产物，因此，没有被引起重视。

1955 年，美国 J. W. Estes 和 Schneidenwind 首次提出建议，采用蠕墨铸铁；1966 年，又由 R. D. Schelleng 继续提出应用蠕墨铸铁。美国在 1965 年的一项专利中提到，通过加入合金，使铁液成分中含  $w(\text{Mg}) = 0.05\% \sim 0.06\%$ 、 $w$





(Ti) = 0.15% ~ 0.50%、 $w(\text{Re}) = 0.001\% \sim 0.015\%$ ，就能得到蠕虫状石墨组织。到1976年，美国 Foote 矿业公司将这些主要元素按一定比例配成 Mg-Ti 系合金，作为商品供应市场，称为“Foote”合金，从此，蠕墨铸铁在工业上有了较多的应用。

另外，奥地利的研究工作者在20世纪60年代研究了稀土对球墨铸铁原铁液的影响，从中得到了生产蠕墨铸铁的可靠方法，于1968年获得奥地利专利。从此，奥地利开始大量生产铁素体蠕墨铸铁的卡车和拖拉机零件。

我国对蠕虫状石墨的认识，也是随着球墨铸铁的出现而开始的。尤其是20世纪60年代初，在用稀土硅铁合金制作稀土球墨铸铁时，这种蠕虫状石墨更为常见。然而，有意识地把含有这种石墨的铸铁作为新型工程材料来研究和应用是从1965年开始的。

进入20世纪60年代，在高碳铁液中加入稀土硅铁合金，发现其中部分试样的宏观断口呈“花斑”状，石墨为蠕虫状，其性能超过 HT300 灰铸铁的指标。鉴于当时国内高级灰铸铁生产中废钢来源的短缺，于是不加废钢，仅用稀土硅铁合金直接处理冲天炉高碳铁液来生产高级灰铸铁件，就成了当时研究课题的出发点。例如，大量消耗废钢的机床铸造业，曾试图在低牌号铸铁中加入不同量的稀土来节省废钢，以获得高牌号的灰铸铁。试验过程中发现，具有蠕虫状石墨的铸铁，其强度大幅度提高，从而获得不加废钢的高强度灰铸铁。

由于上述高级铸铁是用稀土处理而得到，因而曾先后将其命名为稀土高牌号灰铸铁、稀土（灰）铸铁等。20世纪60年代末期，根据光学显微镜下看到的石墨形貌，并与国外的命名力求统一，为此，我国文献中，把这种铸铁称为（稀土）蠕虫状石墨铸铁，简称为蠕墨铸铁。

#### 四、可锻铸铁

可锻铸铁中的石墨呈团絮状，也称玛钢或韧性铸铁。它是由白口铸铁经石墨化退火（可锻化退火）后使石墨呈团絮状析出的铸铁。其化学成分范围通常为  $w(\text{C}) = 2.2\% \sim 2.8\%$ 、 $w(\text{Si}) = 1.2\% \sim 1.8\%$ 、 $w(\text{Mn}) = 0.4\% \sim 1.2\%$ 、 $w(\text{P}) \leq 0.1\%$ 、 $w(\text{S}) \leq 0.20\%$ 。由于这种铸铁具有一定的塑性和韧性，所以，称“可锻铸铁”，其实它并不可锻。按制作方法，可锻铸铁有白心（通过氧化脱碳获得）、黑心（通过石墨化退火获得）可锻铸铁之分。

1720 ~ 1722 年，法国人雷奥米儿（Reaumur）发明了后来被通常称为“欧洲法”（Procédé européen）的白心可锻铸铁生产方法。它的实质就是把亚共晶成分的铸态白口铸铁，埋入铁矿石粉（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）中加热氧化，其中，铸件表面的碳因氧化而减少。通过这种方法脱碳只发生在铸件表层一定范围内，在





铸件中心部位未能脱碳，因此铸铁件表层发黑，心部亮白，称为黑心可锻铸铁。黑心可锻铸铁表层的组织是铁素体，心部则是珠光体和少量渗碳体。白心可锻铸铁的突出优点是它具有一定的焊接性。

1820年，美国人塞斯博登（Seth Boyden）通过热处理，把白口铸铁中的 $\text{Fe}_3\text{C}$ 进行分解，使之析出团絮状石墨 + 金属基体（铁素体或珠光体）。他当时得到的可锻铸铁是铁素体基体的。这种方法通常被称为“美国法”（黑心可锻铸铁）。自塞斯博登以后，又通过不完全退火获得了珠光体基体 + 团絮状石墨的可锻铸铁，称为珠光体可锻铸铁。

其实，我国是生产可锻铸铁历史最悠久的国家。早在战国初期就出现了用热处理方法，使白口铸铁中与铁化合的碳成为石墨析出而获得韧性铸铁的工艺。在河南洛阳出土的战国初期经退火表面脱碳的钢面白口铁铤，是当时已有退火操作的一例。在这基础上延长退火时间就可以生产可锻铸铁。这一发明使铸铁在当时得以大量、广泛地用于军事和农业生产。

## 五、特种性能铸铁

普通铸铁要满足力学性能的要求。但是，还有些铸铁需要具有特殊的性能（耐磨、耐热、耐蚀、无磁和低膨胀系数等），这种铸铁称为特种性能铸铁。

为了获得特种性能铸铁，就必须在其中添加合金元素，因此，特种性能铸铁也是合金铸铁。当然，合金铸铁也可以是高强度铸铁。

在铸铁中，除了C、Si、Mn、P、S 5种常存元素以外，在使用的原材料和熔化过程中，常混入Cu、Cr、Mo、Ti、Sn、Pb、Sb、As、Ni和Al等微量元素，同时，也含有O、H、N等气体。现已查明，这些元素对铸铁的组织 and 性能有明显的影响，但是，如果这些元素含量较低或者不是有意加入的，虽然有上述各种微量元素存在，也不叫合金铸铁。另外，在天然铁矿中，常含有各种元素，只要它们的含量足以起到合金化作用时，也叫做合金铸铁。

1926年出现了高镍奥氏体耐腐蚀铸铁。1930年出现了马氏体镍硬白口铸铁和高铬白口抗磨铸铁。1936年发表了铸铁高温性能的研究结果，在铸铁中添加Ni、Cr、Si合金元素的对比表明，高铬铸铁 $[\text{w}(\text{C}) = 1.35\%、\text{w}(\text{Si}) = 2.0\% \text{ 和 } \text{w}(\text{Cr}) = 35\%]$ 具有最好的耐热性和高温强度。随着工业的发展和技术的进步，特种性能铸铁得到越来越多的应用。

加入合金元素的质量分数在3%以下的称为低合金铸铁，加入合金元素的质量分数在3%~10%的称为中合金铸铁；加入合金元素的质量分数在10%以上的称为高合金铸铁。

特种性能铸铁用途广泛，主要的可分成耐磨铸铁（其中，有减摩铸铁和