

铸造行业权威专家鼎力打造

铸造技术 应用手册

第①卷 铸铁

中国铸造协会 组编
马敬仲 主编
黄惠松 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

铸造技术 | 第①卷 应用手册 | 铸铁

中国铸造协会 组编

主编 马敬仲

主审 黄惠松

参编 曾艺成 邱汉泉 钱 立

周平安 张政国



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内容提要

全书共分 8 章, 包括铸铁的基础知识、灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁、特种铸铁、铸铁的熔炼、感应电炉与双联熔炼。

本手册可供机械行业技术人员、铸造企业技术人员和骨干工人、大专院校师生参考和使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸造技术应用手册. 第 1 卷, 铸铁/马敬仲主编; 中国铸造协会组编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 9

ISBN 978-7-5123-2123-6

I. ①铸… II. ①马… ②中… III. ①铸造-技术手册②铸铁-技术手册 IV. ①TG24-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 189661 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

策划编辑: 周娟 责任编辑: 杨淑玲 责任印制: 蔺义舟 责任校对: 李亚

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2012 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·30 印张·933 千字·1 插页

定价: 88.00 元



敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《铸造技术应用手册》编委会

主 任：张立波

副主任：姜不居 温 平 吕志刚

委 员：马敬仲 毛卫民 唐靖林 李传栻 李魁盛 荣丽辉 高 岩

总 序

铸造是制造业的基础，也是国民经济的基础产业。近年来，随着国民经济的高速发展，我国铸造业也迅猛发展，各类铸件的产量持续增长，截至 2008 年底，铸件总产量已连续 9 年稳居世界首位。众所周知，我国是一个铸造大国，但远不是一个铸造强国，与当前各工业发达国家相比，我国铸造业在工艺技术水平、生产管理水平、装备水平、产品技术含量（附加值）、平均生产规模、铸件生产效率、各项经济指标、设备利用率、能耗、环境治理和从业人员培训等方面仍存在较大差距。鉴于此，中国铸造协会特组织编写行业系列丛书，旨在提高从业人员素质，致力于中国铸造业的发展与振兴。

为了满足广大铸造从业人员的需求，特别是铸造专业技术人员的强烈要求，中国铸造协会组织有关专家编写了《铸造技术应用手册》，希望能够得到读者的厚爱。全书共分 5 卷：

- | | |
|-----------------|---------|
| 第 1 卷 铸铁 | 马敬仲 |
| 第 2 卷 铸钢 | 毛卫民 |
| 第 3 卷 铸造有色金属 | 唐靖林 |
| 第 4 卷 铸造工艺及造型材料 | 李传斌 李魁盛 |
| 第 5 卷 特种铸造 | 姜不居 吕志刚 |

手册内容从生产实际出发，立足国内外铸造生产现状，面向未来，贯彻“现代、简明、实用”的编写原则。手册以实用图表数据为主，辅以必要而适当的文字说明，具有很强的实用性和可读性，便于技术人员使用。本手册是铸造专业技术人员的工具书，也是铸造技术工人和涉及铸造技术的各界人士的参考书。

各卷由主编统稿，并分别由姜不居、黄惠松、钟雪友、曾大本、李传斌主审。

此书的编写得到了有关专家的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中缺点、疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

《铸造技术应用手册》编委会主任



序

铸铁以其特有的性能广泛应用于各个领域。2008年世界铸铁件（含灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁）产量为6830万t，约占铸件总产量的73%。我国铸铁件产量高达2510万t，约占我国铸件总产量的75%，世界铸铁件总产量的37%，位居世界第一。但是，在铸铁件质量、质量稳定性及高端铸铁件的生产技术上与国外一流水平相比，尚有较大差距。如何缩小这个差距，使我国铸铁件能应用到工作条件复杂、恶劣、苛刻的重要零部件中，仍然是今后一项重要的任务。

现代工业铸铁件的生产已有200多年的历史，发展至今，铸铁件无论在材质、质量、生产技术等方面均取得了重大进展：铸铁的抗拉强度从小于60MPa发展到1250~1600MPa，伸长率由0发展至25%~30%，旋转疲劳强度已达500MPa，球墨铸铁的低温韧性在-40℃下缺口冲击吸收能量也已达到12J以上。根据不同的工作条件和使用范围，铸铁的品种可分为孕育铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁以及各种抗磨、耐磨、耐热、耐蚀、耐低温等特种铸铁。应用范围也从普通机械的铸件扩大到超重型机床、数控加工中心、核电、风电、超临界燃气轮机、高速机车、化工、石油、船舰等关键铸件，成为重型机械、冶金、汽车、化工、石油、矿山等不可缺少的现代工程材料。

我国目前已成为世界机械制造大国与铸造大国，但远不是强国。我国有50%以上的高端机械产品仍需进口。要成为机械制造强国，铸造是基础。铸件及铸铁件的质量对机械产品的性能具有重要的影响，因此，提高铸铁件的质量、性能和生产技术水平是当务之急。我深深感到，在这个重要的时期，出一批理论联系实际、对生产有指导意义的铸造生产技术书籍是有十分重要意义的。

本手册的编写方针是“简明、实用、现代”。作者都是70多岁的资深铸铁科技工作者，长期从事铸铁与熔炼的生产、教学和科研工作，有渊博的专业知识和丰富的实践经验。编写目的是将他们毕生掌握的专业知识毫无保留地编写在手册中，衷心希望能在由铸造大国走向铸造强国的过程中，对生产第一线的科技人员有所帮助。我对作者的无私奉献、良苦用心、严谨认真的态度和一丝不苟、求实创新的精神深表敬佩。

以“提高质量和质量控制”为指导思想编写的铸铁手册尚不多见，我由衷地希望并深信本手册对我国铸铁件质量的提高会有所帮助，并将在生产实践中得以进一步的发展。

中国工程院院士 柳百成

编 者 的 话

当知道要我们编写这本铸铁手册时，的确感到不小的压力，一是我们都是 70 岁以上的老人了，已感力不从心；二是国内已出版多种手册，难免有重复之嫌，所以多次向清华大学的黄惠松教授及中国工程院院士柳百成教授请教与讨论，并听取了姜不居教授关于对手册“实用、简明、现代”的要求及来自一些工厂的技术人员的意见，经过认真的反复讨论，形成了我们编者的共识。这个共识代表了当时的心情，现在要出版了，就以当时的这个共识作为我们编者的话吧。

1. 这部手册写作的背景有着内在的不同。我们年已古稀，从事铸造事业几乎一辈子，至今仍藕断丝连，难舍难离，我们对铸造及在生产一线的铸造技术人员与工人有着深厚的感情，要把我们一生中在技术知识上最重要的感受写进手册，期望对他们有所帮助。现在我国正处于从铸造“大国”走向“强国”的关键时期，提高铸件质量的工作应居首位，期望本手册的出版对铸件质量的提高有所帮助。

2. 要写好每一章的第一节。第一节写的是该铸铁的国内外发展概况及目前的最新发展。对各类铸铁发明、发现的历史要写，但这不是重点，重点是要写出该铸铁在历史发展的不同阶段其关键技术的突破、性能的提高及应用范围的拓展，并要提出我国目前存在的差距与改进的方向。实际上这是一篇有深度的概括性文章，使读者清醒地认识到从“大国”到“强国”的差距。提高铸件质量还有一段很长的路要走。

3. 要写好每一章的第二节。第二节是该铸铁的基本概念与操作要点，即要用简洁的语言写出该铸铁的基本概念、本质和特点，并着重写出操作要点，要指出抓住了哪几个环节、哪几项关键技术就基本上控制了组织与性能，保证了铸件质量。文字力求精练，这里不要解释、不要展开，解释与展开留到后面去说。能否把基本概念表叙得正确，把操作要点写到关键之处是这节的关键。

4. 谈到合金或其他因素对性能的影响时，不要面面俱到，要写最有影响、最常用的，一般的可一带而过。

5. 尽量用表格与图表示，使人一目了然，并使读者在阅读时感到最有印象的是经过浓缩、精练、提升而成的表格与图。

6. 编写时力求贯彻手册的宗旨。本手册的价值体现在“实用”上，“简明”体现在突出重点上，“现代”体现在用新工艺、新技术、新材料提高铸件的质量上。

我们为本书的编写付出了很多的努力，但能否达到上述要求，还希望读者多提意见、多指正。

铸铁手册共 8 章，编写分工如下：

第 1 章 铸铁的基础知识 马敬仲

第 2 章 灰铸铁 马敬仲

第 3 章 球墨铸铁 曾艺成

第 4 章 蠕墨铸铁 邱汉泉

第 5 章 可锻铸铁 钱立

第6章 特种铸铁 周平安

第7章 铸铁的熔炼 马敬仲

第8章 感应电炉与双联熔炼 张政国（辜祖勋、赵益明、代林参与编写）

在编写过程中，特别感谢下列人员的帮助：迁西奥迪爱公司的张会友，承德保通公司的严晓峰、江阴铸造设备厂的夏汝明，青岛青力铸造设备厂的于仁先及曾大本、张忠仇、巩继明等。

编者

目 录

总序	
序	
编者的话	
第1章 铸铁的基础知识	1
1.1 铸铁的分类	1
1.2 Fe-C (石墨)、Fe-Fe ₃ C 双重相图	3
1.2.1 Fe-C (石墨)、Fe-Fe ₃ C 双重相图的基本概念	3
1.2.2 铸铁结晶的三个阶段	3
1.2.3 铸铁结晶过程中的两个临界点和四条特性曲线	4
1.3 铸铁的碳当量和共晶度	6
1.3.1 碳当量	6
1.3.2 共晶度	6
1.4 铸铁的凝固与结晶过程	7
1.4.1 铸铁的凝固与结晶过程	7
1.4.2 铸铁组织中的共晶团	8
1.5 铸铁的组织	10
1.5.1 铸铁的组织	10
1.5.2 铸铁的组织与铸铁力学性能的关系	11
1.6 影响铸铁铸态组织的因素	12
1.6.1 化学成分的影响	12
1.6.2 冷却速度的影响	16
1.6.3 铁液过热与保温的影响	19
1.6.4 炉料的影响	19
1.6.5 孕育的影响	20
1.6.6 气体含量的影响	22
1.7 铸铁的凝固与铸铁的铸造性能	23
1.7.1 铸铁的凝固方式	23
1.7.2 铸铁的流动性	23
1.7.3 铸铁的收缩性	25
1.7.4 铸铁的铸造应力	26
参考文献	27
第2章 灰铸铁	28
2.1 灰铸铁的国内外概况及最新进展	28
2.2 灰铸铁的基本概念和生产控制的基本原则	31
2.2.1 灰铸铁的基本概念	31
2.2.2 灰铸铁生产中控制技术的基本原则与要点	33
2.3 灰铸铁的牌号	34
2.3.1 力学性能	34
2.3.2 硬度等级与铸件硬度	37
2.3.3 国外的灰铸铁的标准	37
2.4 灰铸铁的化学成分	39
2.4.1 灰铸铁的化学成分与灰铸铁的力学性能	39
2.4.2 灰铸铁的化学成分与灰铸铁的铸造性能和加工性能的关系	43
2.4.3 灰铸铁化学成分中的合金元素与微量元素	45
2.5 灰铸铁的金相组织	49
2.5.1 灰铸铁金相检验与标准	49
2.5.2 金相组织对灰铸铁性能的影响	58
2.6 灰铸铁的生产与控制	68
2.6.1 灰铸铁合理的选用原则	68
2.6.2 灰铸铁冶金质量的指标	69
2.6.3 灰铸铁的生产与控制	71
2.6.4 灰铸件的孕育	82
2.7 典型的灰铸铁件	100
2.7.1 机床铸件	100
2.7.2 发动机气缸体、气缸盖	106
2.7.3 动力机械中的气缸套和活塞环	109
2.7.4 D型石墨灰铸铁件	113
参考文献	116
第3章 球墨铸铁	119
3.1 球墨铸铁的发现及发展概况	119
3.2 球墨铸铁的特性	122
3.3 球墨铸铁牌号的选用原则及国家标准	127
3.3.1 球墨铸铁牌号的选用原则	127
3.3.2 球墨铸铁的国家标准	127

3.4 球墨铸铁的化学成分	130	4.2.1 什么是蠕墨铸铁	199
3.4.1 基本元素	130	4.2.2 蠕虫状石墨及其结晶特征	199
3.4.2 合金元素	135	4.2.3 蠕墨铸铁基体组织特征	200
3.4.3 微量元素	142	4.2.4 蠕墨铸铁性能特点	201
3.4.4 球墨铸铁化学成分的推荐	142	4.3 蠕墨铸铁的牌号及其选用	201
3.5 球墨铸铁的金相组织	143	4.3.1 我国的蠕墨铸铁牌号标准	201
3.5.1 石墨	143	4.3.2 蠕墨铸铁牌号的选用	202
3.5.2 基体组织	147	4.3.3 国外蠕墨铸铁牌号标准	202
3.6 球墨铸铁的生产控制技术	154	4.4 蠕墨铸铁的金相标准	204
3.6.1 球墨铸铁生产主要环节及 控制	154	4.4.1 石墨形态	204
3.6.2 典型铸造缺陷及防止方法	161	4.4.2 基体组织	205
3.6.3 球化率的检测技术	162	4.5 蠕墨铸铁的化学成分	208
3.7 球墨铸铁的主要性能及其影响 因素	162	4.5.1 五大元素	208
3.7.1 物理性能	162	4.5.2 蠕化元素	209
3.7.2 力学性能	165	4.5.3 合金元素	211
3.7.3 工艺性能	169	4.6 蠕墨铸铁的主要性能	212
3.7.4 使用性能	170	4.6.1 力学性能	212
3.8 球墨铸铁的热处理及化学处理	174	4.6.2 物理性能	213
3.8.1 球墨铸铁热处理工艺	174	4.6.3 铸造性能	214
3.8.2 表面热处理	177	4.6.4 切削加工性能	216
3.9 铸态球墨铸铁	178	4.6.5 蠕墨铸铁的焊接性能	217
3.9.1 铸态球墨铸铁生产中应 注意的几个问题	178	4.6.6 蠕墨铸铁的电镀性能	217
3.9.2 铸态球墨铸铁生产工艺 要点	180	4.6.7 蠕墨铸铁的使用性能	217
3.10 球墨铸铁的应用范围及典型 零件	181	4.7 蠕墨铸铁生产技术及其控制	220
3.10.1 应用范围	181	4.7.1 稳定生产的控制要点	220
3.10.2 重点行业及典型零件	182	4.7.2 蠕墨铸铁的蠕化剂	220
3.11 等温淬火球墨铸铁	187	4.7.3 蠕墨铸铁的蠕化处理	225
3.11.1 等温淬火球墨铸铁发展 历史	187	4.7.4 蠕墨铸铁的孕育处理	229
3.11.2 等温淬火球墨铸铁性能及其 特点	188	4.8 蠕墨铸铁的质量检验及缺陷 防治	232
3.11.3 等温淬火球墨铸铁生产技 术与控制	190	4.8.1 蠕化处理效果的快速检验	232
3.11.4 等温淬火球墨铸铁的应用	194	4.8.2 力学性能检验	235
参考文献	196	4.8.3 蠕墨铸铁件的无损检验	235
第4章 蠕墨铸铁	198	4.8.4 蠕墨铸铁件常见的铸造缺陷 及其防治	236
4.1 蠕墨铸铁国内外发展概况	198	4.9 蠕墨铸铁的热处理	238
4.2 蠕墨铸铁的基本概念	199	4.9.1 蠕墨铸铁的临界点和 C-曲线	238
		4.9.2 正火	239
		4.9.3 淬火	240
		4.9.4 回火	240
		4.9.5 等温淬火	240
		4.9.6 铁素体化退火	241

4.9.7 消除应力退火	241	5.7.3 加速石墨化退火的措施	275
4.9.8 表面热处理	241	5.7.4 石墨化退火工艺	276
4.10 蠕墨铸铁件的典型应用实例	242	5.8 可锻铸铁的脱碳退火	281
4.10.1 车辆运输铸件	242	5.8.1 脱碳退火原理	281
4.10.2 冶金用品和在交变热载荷下 服役的铸件	243	5.8.2 影响脱碳过程的因素	281
4.10.3 液压件类铸件	245	5.8.3 白心可锻铸铁的生产	282
4.10.4 机床类铸件	245	5.9 可锻铸铁的缺陷及防止方法	284
4.10.5 纺织机械铸件	245	5.9.1 铸造缺陷	284
参考文献	246	5.9.2 退火缺陷	284
第5章 可锻铸铁	248	5.9.3 热镀锌缺陷	284
5.1 概述	248	5.10 典型可锻铸铁件	288
5.1.1 回顾	248	5.10.1 管路连接件	288
5.1.2 当今应做的工作	248	5.10.2 线路金具	289
5.1.3 可锻铸铁的特征及生产控制 要点	249	5.10.3 高吨位铁帽	289
5.2 可锻铸铁的分类与牌号	250	5.10.4 汽车桥壳、轮毂	289
5.2.1 分类	250	5.10.5 可焊管件	289
5.2.2 牌号与应用	250	5.10.6 玻璃模具	290
5.3 可锻铸铁的金相组织特点	253	参考文献	290
5.3.1 铁素体可锻铸铁的金相组织 特点	253	第6章 特种铸铁	292
5.3.2 珠光体可锻铸铁的金相组织 特点	256	6.1 特种铸铁的特点、分类和国内外 发展概况	292
5.3.3 白心可锻铸铁的金相组织 特点	256	6.1.1 特种铸铁的特点和分类	292
5.4 可锻铸铁的性能	256	6.1.2 国内外发展概况	293
5.4.1 力学性能	256	6.1.3 影响特种铸铁性能的主要 因素和控制	295
5.4.2 物理性能	262	6.2 耐磨铸铁	296
5.4.3 工艺性能	262	6.2.1 耐磨铸铁的分类、特性以 及它在工业领域中的地位	296
5.4.4 使用性能	263	6.2.2 普通白口铸铁	301
5.5 可锻铸铁的化学成分	264	6.2.3 镍硬铸铁	301
5.5.1 化学成分的选择原则	264	6.2.4 铬合金铸铁	307
5.5.2 元素的作用及其含量范围	264	6.2.5 硅锰合金贝氏体球墨铸铁	334
5.5.3 化学成分举例	266	6.2.6 耐磨铸铁件的生产工艺和 基本装备	339
5.6 可锻铸铁的熔炼与孕育处理	266	6.2.7 冷硬铸铁	348
5.6.1 熔炉的选择	266	6.3 耐蚀铸铁	352
5.6.2 熔炼特点	266	6.3.1 铸铁的腐蚀特性及影响 因素	352
5.6.3 孕育剂与孕育处理	268	6.3.2 耐蚀铸铁的分类和特点	355
5.7 可锻铸铁的石墨化退火	270	6.3.3 典型耐蚀铸铁件及其应用	359
5.7.1 固态石墨化原理	270	6.4 耐热铸铁	361
5.7.2 影响石墨化退火过程的 因素	272	6.4.1 铸铁在高温下的基本特性和 影响因素	361

6.4.2 典型的耐热铸铁成分、组织和性能	362	7.6.1 冲天炉的优质熔炼操作	409
6.4.3 耐热铸铁的实际应用	369	7.6.2 熔炼过程中的炉况判断	410
6.5 特殊用途铸铁（艺术铸铁）	369	7.7 冲天炉熔炼过程的检测与过程控制	413
6.5.1 我国古代艺术铸铁的发展概况	369	7.7.1 冲天炉熔炼过程的检测	413
6.5.2 古代各类艺术铸铁件的特点和铸造方法	369	7.7.2 冲天炉熔炼过程的控制	413
6.5.3 现代艺术铸铁件的特点、应用和发展	371	7.8 冲天炉的节能	417
参考文献	372	7.8.1 热风冲天炉	418
第7章 铸铁的熔炼	374	7.8.2 水冷、无炉衬、长炉龄冲天炉	425
7.1 铸铁熔炼设备的发展	374	7.8.3 富氧送风	428
7.1.1 冲天炉、感应炉、电弧炉的发展趋势	374	7.9 冲天炉的环保治理	430
7.1.2 冲天炉的国内外发展概况	376	7.9.1 冲天炉的排放物及其危害	430
7.2 冲天炉的基本概念与操作要点	381	7.9.2 冲天炉的烟气排放标准	431
7.2.1 冲天炉的基本概念	381	7.9.3 冲天炉的排放治理	431
7.2.2 冲天炉的操作要点	382	7.10 冲天炉废弃物的综合利用	433
7.3 冲天炉基本的结构	382	参考文献	434
7.3.1 冲天炉的基本结构	383	第8章 感应电炉与双联熔炼	436
7.3.2 冲天炉结构的变化与改进	383	8.1 感应电炉	436
7.4 冲天炉熔炼的基本原理	387	8.1.1 感应电炉的工作原理、分类及其熔炼优势	436
7.4.1 底焦的燃烧	387	8.1.2 感应电炉的冶金特点	437
7.4.2 炉内热交换	389	8.1.3 感应炉的熔炼特点与铁液的质量控制	440
7.4.3 炉内的冶金反应	392	8.1.4 感应电炉的熔炼作业	442
7.5 冲天炉工艺参数选择与操作要点	401	8.1.5 感应炉的构成	446
7.5.1 冲天炉工艺参数的选择	401	8.1.6 感应电炉的炉衬	451
7.5.2 冲天炉用风机的选择	406	8.1.7 感应炉事故处理	463
7.6 冲天炉的优质熔炼操作与炉况判断	409	8.2 铸铁的双联熔炼	463
		8.2.1 双联熔炼的特点	463
		8.2.2 双联熔炼炉的选配	464
		参考文献	466

第1章 铸铁的基础知识

铸铁是一种以铁、碳、硅为基础的复杂的多元合金，其含碳量较高，质量分数一般为2.1%~4.0%。在工业用铸铁中，除碳、硅元素外还存有锰、磷、硫等元素。碳、硅、锰、磷、硫被称为铸铁的五大元素。工业用铸铁的成分范围为： $w(C)=2.4\% \sim 4.0\%$ ， $w(Si)=0.8\% \sim 3.2\%$ ， $w(Mn)=0.2\% \sim 2.0\%$ ， $w(P)=0.02\% \sim 0.8\%$ ， $w(S)=0.01\% \sim 0.15\%$ 。

在工业铸铁中，为满足耐磨、耐热、耐蚀、无磁等不同需要，常在铸铁中加入不同种类、不

同数量的合金元素，称为合金铸铁或特种性能铸铁。

1.1 铸铁的分类

铸铁分类方法有多种，见表1-1。

综合铸铁的特点进行分类，发现以石墨形态分类的铸铁多应用于工程结构件，以化学成分中合金元素分类的铸铁多应用于特种性能铸件，故可用这两种分类方法将铸铁分成八类，见表1-2。

表 1-1 多种形式的铸铁分类

分类方式	铸铁名称	铸 铁 特 征
按碳在铸铁中的形式	灰铸铁	碳主要以石墨的形式存于铸铁中，少量碳溶于基体中，部分碳以渗碳体形式组成珠光体
	白口铸铁	碳主要以渗碳体的形式存于铸铁中，无石墨
按断口颜色特征	灰铸铁	断口呈暗灰色，碳主要以石墨形式存在
	白口铸铁	断口成放射形状的白亮冰荏状，碳主要以渗碳体形式存在，无石墨
	麻口铸铁	断口为白亮中伴有灰黑斑点的花荏状，金相组织中渗碳体与石墨并存
按化学成分	普通灰铸铁	铸铁中的化学成分以五大元素为主，其中 Si、Mn、P 含量一般在较低的范围
	合金铸铁	除五大元素外，铸铁中含有较高含量的合金元素，如 $w(Si) > 4.0\%$ ， $w(Mn) > 2.0\%$ ， $w(Ti, V, Mo) > 0.1\%$ ， $w(Cr, Cu, Al, Ni) > 0.3\%$
按石墨形态	灰铸铁	石墨呈片状，组织为基体+片状石墨
	球墨铸铁	石墨呈球状，组织为基体+球状石墨
	蠕墨铸铁	石墨呈蠕虫状，组织为基体+蠕状石墨（+部分球状石墨）
	可锻铸铁	石墨呈团絮状，组织为基体+团絮状石墨
按使用性能	工程结构件用铸铁	灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁
	特种性能铸铁	耐热铸铁、耐蚀铸铁、冷硬铸铁、抗磨铸铁

表 1-2 铸铁的分类与特征

类别				组织特征	性能特征	成分特征	应 用
工程结构用铸铁	普通铸铁	灰铸铁	片状石墨	珠光体+铁素体	$R_m = 100 \sim 200MPa$ ，具有优良的减振性及铸造性能	成分为 C、Si、Mn、P、S 五大元素+少量合金元素	受力不高的零件
				珠光体	$R_m = 250 \sim 350MPa$ ，强度高、耐磨性好		承受中等载荷的零件

续表

类别				组织特征	性能特征	成分特征	应 用
工 程 结 构 用 铸 铁	普 通 铸 铁	球 墨 铸 铁	球 状 石 墨	铁素体	$R_m = 400 \sim 450\text{MPa}$, $A = 18\% \sim 10\%$ 高韧性、高塑性	成分除五大元素外, 还含有: $M_{\text{E残}} = 0.03\% \sim 0.07\%$, $R_{\text{E残}} = 0.02\% \sim 0.04\%$ 。根据性能要求加入不同的合金	承受冲击, 要求高韧性零件
				珠光体+铁素体	$R_m = 500 \sim 600\text{MPa}$, $A = 3\% \sim 7\%$, 较高的强度与韧性		承受动、静载荷的零件
				珠光体	$R_m = 700 \sim 900\text{MPa}$, $A = 2\%$ 高强度、高耐磨性		高强度、高刚性、高耐磨零件
				奥铁体 ^①	$R_m = 1000 \sim 1600\text{MPa}$ 超高强度、高耐磨性		承受高强度及动、静载荷的零件
		蠕 墨 铸 铁	蠕 虫 状 石 墨	铁素体	$R_m = 300\text{MPa}$, $A = 2\%$, 高韧性、高导热性	成分同球墨铸铁, 但 $M_{\text{E残}}$ 与 $R_{\text{E残}}$ 含量稍低	承受动、静载荷及耐热疲劳的零件
				珠光体+铁素体	$R_m = 350 \sim 400\text{MPa}$, $A = 1\% \sim 1.5\%$, 中等强度、耐磨性		承受高强度、耐热疲劳的零件
				珠光体	$R_m = 400 \sim 500\text{MPa}$, $A = 0.5\% \sim 1.0\%$, 高强度、高耐磨性		承受高强度与耐磨性的零件
		可 锻 铸 铁	团 絮 状 石 墨	铁素体	$R_m = 300 \sim 350\text{MPa}$, $A = 6\% \sim 10\%$ 高韧性 with 塑性	五大元素中 C 低、Si 低, 并要求 $w(\text{Cr}) < 0.06\%$ 热处理前的生坯必须为白口组织	管路连接件、阀门、板簧支架等
				铁素体+珠光体	$R_m = 450 \sim 550\text{MPa}$, $A = 4\% \sim 6\%$, 中等强度与耐磨性		需施焊的管路连接件
				珠光体	$R_m = 650 \sim 700\text{MPa}$, $A = 2\%$, 较高的强度与耐磨		发动机连杆、小曲轴、高吨位铁帽
特 种 性 能 铸 铁	合 金 铸 铁	抗 磨 铸 铁		白口组织基体+不同类型的碳化物; 不同基体+球墨+碳化物	抗磨性高, 韧性低 球墨抗磨铸铁具有高强度、高抗磨性	加入低、中、高合金元素 球墨抗磨铸铁中 $M_{\text{E残}} = 0.03\% \sim 0.06\%$ $R_{\text{E残}} = 0.02\% \sim 0.04\%$	非球墨抗磨铸铁用于承受小冲击的磨料磨损零件; 抗磨球墨铸铁用于较高冲击的磨料磨损零件
		冷 硬 铸 铁		表层: 白口组织 (珠光体+渗碳体) 内层: 灰口组织 (基体+片状或球状石墨)	外层耐磨性高、内层强度高	加入 Ni、Cr、Mo 等合金元素, 保证表层的白口硬度与深度。球墨铸铁材质时, $M_{\text{E残}} \geq 0.04\%$	用于外硬内韧的冷硬轧辊及冷硬铸件
		耐 热 铸 铁		灰口组织 石墨: (片状或球状)+不同的基体 (珠光体、铁素体、奥氏体等)	高的耐热性、抗氧化性, 在空气炉气中耐热温度可达 $600 \sim 1100^\circ\text{C}$, 但材质性能较脆	有 Si、Al、Cr 系耐热铸铁 (包括中硅、高铝、中硅铝、高铬等)	矿山烧结车挡板、篦条及炉用体。煤粉烧嘴、炉条、锅炉用炉体等
		耐 蚀 铸 铁		灰口组织 石墨: (片状或球状)+不同基体 (有铁素体、奥氏体等)	高的耐腐蚀性能	有高硅、高铬、高镍及铝铸铁、铝硅铸铁等	在不同酸、碱、盐介质中工作的泵、阀、叶轮、管道配件等

①奥铁体为等温淬火球墨铸铁的基体, 为针状铁素体+富碳奥氏体。

1.2 Fe-C (石墨)、Fe-Fe₃C 双重相图

铸铁是一种铁碳合金，当其中的碳量超过在铁液中的溶解度时，多余的碳会以石墨或碳化铁 Fe₃C 两种独立相存在于合金中，因而形成 Fe-C (石墨)、Fe-Fe₃C 双重相图，如图 1-1 所

示。图中虚线表示 Fe-C (石墨) 稳定系相图，实线表示 Fe-Fe₃C 亚稳定系相图。

在铸铁的实际生产中，石墨和渗碳体往往同时出现在一个铸件上。因此，研究铸铁时，必须研究铁-碳合金的双重相图。

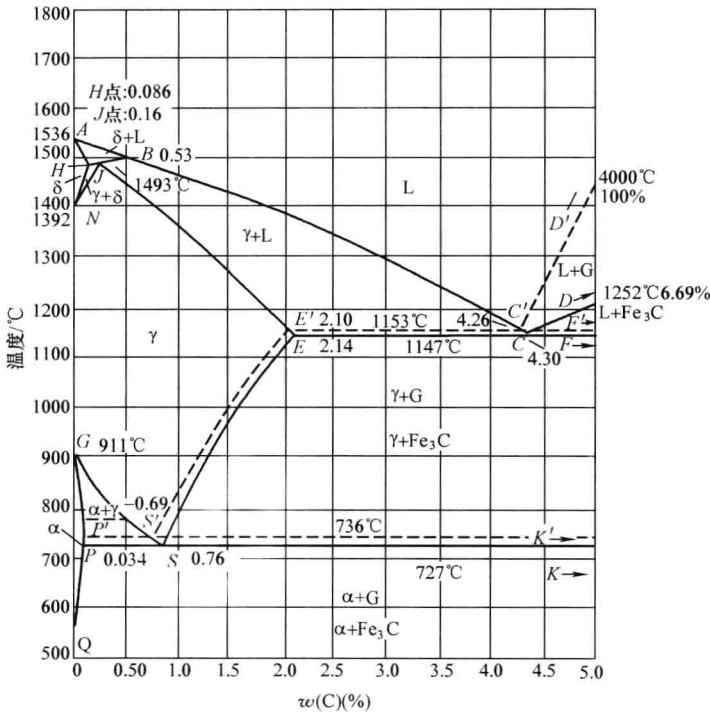


图 1-1 Fe-C (石墨)、Fe-Fe₃C 双重相图

1.2.1 Fe-C (石墨)、Fe-Fe₃C 双重相图的基本概念

铁碳合金相图是研究铸铁的基础，其基本概念见表 1-3。

表 1-3 Fe-C (石墨)、Fe-Fe₃C 双重相图的基本概念

名称	说 明
合金相图	1. 表示合金的状态与温度、成分之间关系的图形，称合金相图 2. 合金相图是在极缓慢的冷却条件(平衡条件)下获得的，是研究合金结晶过程中，各组织形成与变化规律的工具
铁碳合金相图	在极缓慢冷却(或极缓慢加热)条件下，不同成分的铁碳合金在不同温度时所形成组织的图形

续表

名称	说 明
Fe-C(石墨)、Fe-Fe ₃ C 双重相图	铸铁中的碳能以石墨或渗碳体(Fe ₃ C)两种独立相存在，因此铁碳存在着双重相图。Fe-C (石墨)相图，称稳定系平衡相图，Fe-Fe ₃ C 相图，称亚稳定系平衡相图。因为 Fe-Fe ₃ C 系在一定条件下可以向 Fe-C (石墨)系转化，故为亚稳定平衡相图
钢与铸铁	1. 碳质量分数小于 2.10% 的铁碳合金称为钢 2. 碳质量分数大于 2.10% 的铁碳合金称为铸铁 3. 研究钢的结晶过程、组织、性能及热处理工艺时，用 Fe-Fe ₃ C 亚稳定系相图 4. 研究铸铁的结晶过程、组织、性能及热处理时，用 Fe-C (石墨)与 Fe-Fe ₃ C 双重相图

1.2.2 铸铁结晶的三个阶段

铸铁在凝固与结晶过程中，经过三个结晶

阶段，即析出初相，共晶转变及共析转变，这三个阶段分别结晶出不同的组织，见表 1-4。

表 1-4 铸铁结晶的三个阶段

结晶过程	结晶发生的临界线	结 晶 产 物	图 标
初析阶段	液相线以下析出初生相	(1) BC 及 BC' 线以下析出初生奥氏体 (2) $C'D'$ 线以下析出初生石墨 (3) CD 线以下析出初生渗碳体	
共晶阶段	固相线以下发生共晶转变	(1) ECF 线以下发生共晶转变，共晶组织为共晶奥氏体+共晶渗碳体 (2) $E'C'F'$ 线以下发生共晶转变，共晶组织为共晶奥氏体+共晶石墨	
共析阶段	共析线以下发生共析转变	(1) PSK 线以下发生共析转变，奥氏体转变为珠光体（渗碳体+铁素体） (2) $P'S'K'$ 线以下发生共析转变，奥氏体转变为铁素体+石墨	

1.2.3 铸铁结晶过程中的两个临界点和四条特性曲线

在 $Fe-C$ （石墨）、 $Fe-Fe_3C$ 双重相图中，对铸铁结晶三个阶段有重要影响的是两个临界点

和四条特性曲线，两个临界点是共晶点 C （或 C' ）和共析点 S （或 S' ），四条特性曲线是液相线 BCD （或 $BC'D'$ ）；固相线（共晶线） ECF （或 $E'C'F'$ ）；碳在奥氏体中的溶解曲线 ES （或 $E'S'$ ）及共析线 PSK （或 $P'S'K'$ ），见表 1-5。

表 1-5 铸铁结晶过程中的两个临界点和四条特性曲线

名称	曲线或临界点	特 性	图 示
液相线	BCD 和 $BC'D'$ 线	(1) 该线称为液相线，此线以上为液相区，用 L 表示 (2) 铁液冷却至此线时，开始结晶并析出初相 (3) BC 或 BC' 线以下皆析出初生奥氏体，用 A 或 γ 表示 (4) 在 CD 线以下析出初生渗碳体，用 Fe_3C 表示 (5) 在 $C'D'$ 线以下析出初生石墨，用 G 表示	

续表

名称	曲线或临界点	特 性	图 示
固相线 (共晶线)	ECF 与 E'C'F'线	(1) 该线称为固相线，合金冷却至此线后凝为固体，此线以下为固态区 (2) 液相线与固相线之间，液相与固相并存，为合金的结晶区，BCE (或 BC'E') 区内为铁液 + 初生奥氏体，在 DCF 区内为铁液 + 初生渗碳体，在 D'C'F' 区内为铁液 + 初生石墨 (3) 该线也称为共晶转变线，铁液冷却至此线以下时发生共晶转变，铁液转变为共晶奥氏体 + 共晶渗碳体 (按 ECF 线) 或转变为共晶奥氏体 + 共晶石墨 (按 E'C'F' 线) (4) 共晶奥氏体 + 共晶渗碳体可称为高温莱氏体 L_d，用公式表示为 $L_d = A + Fe_3C$	
共晶点	C (C')	共晶临界点，其碳的质量分数是：C 点为 4.30%，C' 点为 4.26%，生产中常简化为 4.30%	
碳在奥氏体中的溶解曲线	ES 与 E'S'线	碳在奥氏体中的含量随温度降低而减少，当温度下降时沿着此线，析出二次渗碳体 (按 ES 线) 或析出二次石墨 (按 E'S' 线)	
共析线	PSK 与 P'S'K'线	(1) 合金冷却至此线时发生共析转变，按 PSK 线奥氏体转变为珠光体 (铁素体 + 渗碳体)，用 P 来表示，按 P'S'K' 线奥氏体转变为铁素体 + 石墨，铁素体用 α 或 F 表示 (2) 共析转变按 Fe-Fe₃C 进行，高温莱氏体 (奥氏体 + 渗碳体) 则变为低温莱氏体 (珠光体 + 渗碳体)，低温莱氏体的表示公式为 $L'_d = P + Fe_3C$	
共析点	S (S')	共析临界点，其碳的质量分数是：S 点为 0.76%，S' 点为 0.69%	