

铸造手册

铸铁

1

中国机械工程学会铸造分会 组编
张伯明 主编

第3版



铸 造 手 册

第 1 卷

铸 铁

第 3 版

中国机械工程学会铸造分会 组编
张伯明 主编



机 械 工 业 出 版 社

《铸造手册》第3版共分铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺和特种铸造6卷出版。本书为第1卷《铸铁》。本书共有绪论、铸铁的基础知识、铸铁材质的检测、灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁、抗磨铸铁、冷硬铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁、铸铁熔炼等12章。分别论述了铸铁生产的简史和发展趋势；生产优质铸铁所必须掌握的基础知识；研究铸铁材质的常规与现代测试技术；各种铸铁的最新国家标准、牌号及金相组织、性能、化学成分、提高材质性能的方法及典型铸件；冲天炉、电炉和双联等铸铁熔炼方法，熔炼的节能与环境保护，生产各种铸铁的原辅材料。附录中列出了各种铸铁的最新国际标准和主要工业发达国家的标准以供参考和研究。第3版除了更新了许多旧标准外，在内容上也作了较大的删改，使得手册更为新颖、实用。

本手册主要供广大铸造工作者使用，也可供产品设计、科研人员及高等院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

铸造手册·第1卷，铸铁/张伯明主编；中国机械工程学会铸造分会组编.—3版.—北京：机械工业出版社，2010.11

ISBN 978-7-111-32234-4

I. ①铸… II. ①张… ②中… III. ①铸造—手册
②铸铁—手册 IV. ①TG2-62②TG25-62

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第200432号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：余茂祚 责任编辑：余茂祚

版式设计：霍永明 责任校对：李锦莉 任秀丽

封面设计：姚毅 责任印制：杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年1月第3版·第1次印刷

184mm×260mm·57.75印张·4插页·1904千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-32234-4

定价：148.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：（010）88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：（010）68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：（010）88379649

读者服务部：（010）68993821

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

建国以来,我国铸造行业获得很大发展,年产量超过3500万t,位居世界第一;从业人员超过300万人,是世界规模最大的铸造工作者队伍。为满足行业及广大铸造工作者的需要,机械工业出版社于1991年编辑出版了《铸造手册》,2002年出版了第2版,手册共6卷813万字。第2版手册自出版发行以来,先后分别重印4~6次,深受广大铸造工作者欢迎。两院院士、中国工程院副院长师昌绪教授,科学院院士、上海交通大学周尧和教授,科学院院士、机械科学研究院名誉院长雷天觉教授,工程院院士、中科院沈阳金属研究所胡壮麒教授,工程院院士、西北工业大学张立同教授,工程院院士、清华大学柳百成教授等许多著名专家、学者都曾对这套手册的出版给予了高度评价,认为手册内容丰富、数据可靠,具有科学性、先进性、实用性。这套手册的出版发行对跟踪世界先进技术、提高铸件质量、促进我国铸造技术进步起到了积极推进作用,在国内外产生较大影响,取得了显著的经济效益及社会效益。第1版手册于1995年获机械工业出版社科技进步(暨优秀图书)一等奖,1996年获中国机械工程学会优秀工作成果奖,1998年获机械工业部科技进步二等奖。

第2版手册出版后的近8年来,科学技术迅猛发展,先进制造技术不断涌现,标准及工艺参数不断更新,特别是高新技术的引入,使铸造行业的产品及技术结构发生很大变化,原手册部分内容已不能适应当前生产实际及技术发展的需要。应广大读者要求,我们对手册进行了再次修订。第3版修订工作由中国机械工程学会铸造分会和机械工业出版社负责组织和协调。

修订后的手册基本保留了第2版的风格,仍由铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺、特种铸造共6卷组成。第3版除对第2版已显陈旧落后的内容进行删改外,着重增加了近几年来国内外涌现出的新技术、新工艺、新材料、新设备的相关内容,并以最新的国内外技术标准替换已作废的旧标准,同时采用法定计量单位,修改内容累计达40%以上。第3版手册详细介绍了先进实用的铸造技术,数据翔实,图文并茂,基本反映了21世纪初的国内外铸造领域的技术现状及发展趋势。新版手册将以崭新的面貌为铸造工作者提供一套完整、先进、实用的技术工具书,对指导生产、推进21世纪我国铸造技术进步,使我国从铸造大国向铸造强国转变将发挥积极作用。

按GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》规定,材料冲击性能用吸收能量KV、KU表示,V、U分别代表试样缺口形状。但由于2007年后新制定的一些铸铁新标准仍用过去的 A_K 和 a_K ,而且脆性铸铁材料的冲击试样往往不开缺口,故本手册在各章专业材料中仍用符号 A_K 和 a_K 表示,仅在第1卷第3章中交待了新的试验及表示方法。

第3版铸造手册的编写班子实力雄厚,共有来自工厂、研究院所及高等院校40多个单位的110名专家、教授参加编写,而且有不少是后起之秀。各卷主编是:

第1卷铸铁 中国农业机械化科学研究院原副院长张伯明研究员。

第2卷铸钢 沈阳铸造研究所所长姜延春研究员。

第3卷铸造非铁合金 北京航空材料研究院院长戴圣龙研究员。

第4卷造型材料 清华大学黄天佑教授。

第5卷铸造工艺 机械科学研究总院院长李新亚研究员。

第6卷特种铸造 清华大学姜不居教授。

本书为《铸造手册》的第1卷《铸铁》，编写组织工作得到中国农业机械化科学研究院的大力支持，并在本书编委会的主持下，经过许多同志的辛勤工作而完成的。主编张伯明研究员和副主编陆文华教授、孙国雄教授全面负责，汇同编委完成各章的审定工作。全书共12章，各章编写分工如下：

第1章 清华大学：吴德海教授

第2章 西安交通大学：陆文华教授

第3章 沈阳铸造研究所：赵芳欣研究员，于波研究员

第4章 中国农业机械化科学研究院：张伯明研究员

第5章 东南大学：孙国雄教授

第6章 一汽集团公司无锡柴油机厂：应忠堂研究员级高工

第7章 河北龙凤山铸业有限公司：钱立教授

第8章 暨南大学：李卫教授

第9章 邢台机械轧辊（集团）有限公司：苏长岐研究员级高工、
邢台德龙机械轧辊有限公司：秦英方高工

第10章 东南大学：孙国雄教授

第11章 沈阳铸造研究所：齐笑冰研究员、于波研究员

第12章 江苏大学：何光新教授

附录 中国农业机械化科学研究院：胡家骢研究员

本书统稿工作由主编张伯明研究员与责任编辑余茂祚研究员级高工共同完成。

本书在编写过程中得到各编写人员所在单位的大力支持，也得到了苏州振吴电炉有限公司、淄博蠕墨铸铁股份有限公司、江阴市铸造设备厂有限公司、苏州市兴业铸造材料有限公司、河北龙凤山铸业有限公司、北京海德华机械设备有限公司的大力支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者指正。

中国机械工程学会铸造分会
机械工业出版社

第2版前言

建国以来,我国铸造行业获得很大发展,年产量超过千万吨,位居世界第二;从业人员超过百万人,是世界规模最大的铸造工作者队伍。为满足行业及广大铸造工作者的需要,机械工业出版社于1991年编辑出版了《铸造手册》,共6卷610万字。第1版手册自出版发行以来,先后分别重印3~6次,深受广大铸造工作者欢迎。两院院士、中国工程院副院长师昌绪教授,科学院院士、上海交通大学周尧和教授,科学院院士、机械科学研究院名誉院长雷天觉教授,工程院院士、中科院沈阳金属研究所胡壮麒教授,工程院院士、西北工业大学张立同教授等许多著名专家学者都对这套手册的出版给予了高度评价,认为手册内容丰富、数据可靠,具有科学性、先进性、实用性。这套手册的出版发行对跟踪世界先进技术、提高铸件质量、促进我国铸造技术进步起到了积极推进作用,在国内外产生较大影响,取得了显著的经济效益及社会效益。手册1995年获机械工业出版社科技进步(暨优秀图书)一等奖,1996年获中国机械工程学会优秀工作成果奖,1998年获机械工业部科技进步二等奖。

第1版手册出版后的近十年来,科学技术迅猛发展,先进制造技术不断涌现,标准及工艺参数不断更新,特别是高新技术的引入,使铸造行业的产品及技术结构发生很大变化,手册内容已不能适应当前生产实际及技术发展的需要。应广大读者要求,我们对手册进行了修订。第2版修订工作由中国机械工程学会铸造分会和机械工业出版社负责组织和协调。

修订后的手册基本保留了第1版风格,仍由铸铁、铸钢、铸造非铁合金、造型材料、铸造工艺、特种铸造共6卷组成。为我国进入WTO,与世界铸造技术接轨,并全面反映当代铸造技术水平,第2版除对第1版已显陈旧落后的内容进行删改外,着重增加了近十几年来国内外涌现出的新技术、新工艺、新材料、新设备的相关内容,并以最新的国内外技术标准替换已作废的旧标准,同时采用新的计量单位,修改内容累计达40%以上。第2版手册详细介绍了选进实用的铸造技术,数据翔实,图文并茂,基本反映了20世纪90年代末至21世纪初国内外铸造领域的技术现状及发展趋势。新版手册将以崭新的面貌为铸造工作者提供一套完整、先进、实用的技术工具书,对指导生产、推进21世纪我国铸造技术进步将发挥积极作用。

第2版手册的编写班子实力雄厚,共有来自工厂、研究院所及高等院校40多个单位的109名专家教授参加编写。各卷主编是:

第1卷 铸铁 中国农业机械化科学研究院副院长 张伯明研究员。

第2卷 铸钢 中国第二重型机械集团公司总裁 姚正耀研究员级高工。

第3卷 铸造非铁合金 北京航空材料研究院院长 刘伯操研究员。

第4卷 造型材料 清华大学黄天佑教授。

第5卷 铸造工艺 沈阳铸造研究所总工程师 王君卿研究员级高工。

第6卷 特种铸造 中国新兴铸管集团公司董事长 范英俊研究员级高工。

本书为《铸造手册》的第1卷《铸铁》,编写组织工作得到中国农业机械化科学研究院的大力支持,并在该卷编委会的主持下,经过许多同志辛勤劳动完成的。本卷的主编张伯明研究员和副主编陆文华教授全面负责,汇同编委完成各章的审定工作。各章编写分工如下:

第1章 清华大学:吴德海教授。

第2章 西安交通大学:陆文华教授。

第3章 沈阳铸造研究所：赵芳欣高工。

第4章 中国农业机械化科学研究院：张伯明研究员、胡家骢研究员。

第5章 清华大学：吴德海教授。

第6章 一汽集团无锡柴油机厂：唐力高工。

第7章 宏德天津矿业有限公司：钱立教授。

第8章 广州有色研究院耐磨所：李卫研究员级高工。

第9章 邢台机械轧辊（集团）有限公司：苏长岐研究员级高工、周守航高工。

第10章 山东工业大学：李秀真教授，于化顺教授。

第11章 沈阳铸造研究所：申泽骧研究员级高工。

第12章 一汽集团公司工艺材料所：刘长锁高工、陈位铭高工。

附 录 中国农业机械化科学研究院：关洪国高工。

本书统稿工作由主编张伯明研究员与责任编辑余茂祚研究员级高工共同完成。

本书在编写过程中得到各编写人员所在单位的大力支持，也得到了陶令桓顾问等有关同志的大力支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，不周之处，在所难免，敬请读者指正。

中国机械工程学会铸造分会编译出版工作委员会

本书所用符号表

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
R_m	抗拉强度	MPa 或 N/mm ²	H	磁场强度	A/m
R_{mc}	抗压强度		B	磁感应强度	T
$R_{p0.2}$	屈服强度		μ	泊松比	
R_{mcp}	抗压屈服强度		w	质量分数	
σ_{bb}	抗弯强度		φ	体积分数	
τ_b	抗剪强度、抗扭强度		A	奥氏体	
S	疲劳强度		P	珠光体	
S_D	弯曲疲劳强度		B	贝氏体、奥铁体	
σ_t^θ	持久强度		M	马氏体	
σ_e	弹性极限		L_d	莱氏体	
σ	应力	N	FeC	渗碳体	
σ_c	临界应力		S	索氏体、时效态	
σ_p	非比例伸长应力		G	石墨	
τ	切应力		C	碳化物、淬火态	
E	弹性模量	MPa 或 N/mm ²	CE	碳当量	
G	切变模量		RE	稀土	
A	断后伸长率	%	Z	铸态	
ϵ	应变		Zh	正火态	
Z	断面收缩率		H	回火态	
KV, KU	冲击吸收能量	J	D	等温淬火态	
A_K	冲击吸收功		ADI	等温淬火球墨铸铁	
a_K	冲击韧度	J/cm ²	S_c	共晶度	
K_{IC}	平面应变断裂韧度	J/cm ² 、MPa · m ^{1/2} 或 N/cm ^{3/2}	HG	硬化度	
HBW	布氏硬度		RH	相对硬度	
HRA	洛氏硬度		RG	成熟度	
HRB			Qi	品质系数	
HRC			M_f	马氏体转变终了温度	
HM	马氏硬度		M_s	马氏体转变开始温度	
HV	维氏硬度		Ac_1	加热时下临界点温度	
HK	努氏硬度		Ac_3	加热时上临界点温度	
HS	肖氏硬度		Ac_m	加热时过共析上临界点温度	
λ	热导率	W/(m · K)	Ar_1	冷却时下临界点温度	
c	比热容	J/(kg · K)	Ar_3	冷却时上临界点温度	
ρ	密度、电阻率	g/cm ³ 或 t/m ³ 、 $\Omega \cdot m$	Ar_{cm}	冷却时过共析上临界点温度	
γ	电导率	S/m	筛号	与旧标准的目等同	
α_t	线胀系数	1/K			

目 录

第3版前言

第2版前言

本书所用符号表

第1章 绪论

1.1 铸铁发展简史	1
1.1.1 灰铸铁	2
1.1.2 球墨铸铁	2
1.1.3 蠕墨铸铁	3
1.1.4 可锻铸铁	4
1.1.5 特种性能铸铁	4
1.1.6 铸铁熔炼	5
1.2 对现代铸铁的展望	6
1.2.1 铸铁生产在当今社会中的地位 与作用	6
1.2.2 我国铸铁件的发展	7
1.2.3 对现代铸铁生产提出的质量 要求	8
参考文献	9

第2章 铸铁的基础知识

2.1 铸铁的分类	10
2.2 Fe-C 相图	11
2.2.1 Fe-C、Fe-Fe ₃ C 双重相图	11
2.2.2 Fe-C、Fe-Fe ₃ C 双重相图中的 基本组成	11
2.2.3 Fe-C、Fe-Fe ₃ C 双重相图中的 组成相	13
2.2.4 Fe-C-Si 准二元相图	13
2.2.5 铸铁中常见元素对 Fe-C 相图上 各临界点的影响	14
2.2.6 碳当量和共晶度的意义及 表达式	14
2.3 铸铁的凝固结晶及固态相变	15
2.3.1 铸铁的非平衡凝固概念与 过程	15
2.3.2 铸铁熔液的结构	16
2.3.3 初生石墨的结晶	17
2.3.4 初生奥氏体的结晶	17
2.3.5 共晶凝固过程	22
2.3.6 磷共晶的形成	33

2.3.7 连续冷却时铸铁的固态相变	34
2.3.8 铸铁的热处理原理	36
2.4 影响铸铁铸态组织的因素	38
2.4.1 冷却速度的影响	38
2.4.2 化学成分的影响	40
2.4.3 铁液的过热和高温静置的 影响	43
2.4.4 孕育的影响	44
2.4.5 气体的影响	45
2.4.6 炉料的影响	53
2.5 铸铁凝固及冷却过程中主要缺陷的 形成原理及其防止	54
2.5.1 缩孔及缩松的形成及其防止	54
2.5.2 铸造应力、变形和开裂及其 防止	55
2.5.3 非金属夹杂物和组织不均匀性 及其防止	56
2.5.4 气孔的形成及其防止	59
参考文献	60

第3章 铸铁材质的检测

3.1 铸铁化学成分分析	61
3.1.1 分析方法的分类	61
3.1.2 取样和制样的标准和方法	61
3.1.3 常用铸铁化学成分分析标准	63
3.1.4 碳硫分析	64
3.1.5 光电直读光谱分析	65
3.1.6 热分析	66
3.2 铸铁组织检验	67
3.2.1 金相试样的制备	67
3.2.2 石墨检验	68
3.2.3 基体组织检验	71
3.2.4 碳化物检验	75
3.2.5 磷共晶检验	78
3.2.6 共晶团检验	78
3.2.7 高温金相组织检验	80
3.2.8 晶粒尺寸检验	81
3.2.9 彩色金相组织检验	84
3.2.10 组织定量分析	86
3.2.11 常用铸铁金相检验标准	88
3.3 铸铁现代分析方法	89

3.3.1 扫描电子显微分析	89	4.1 金相组织特点及其对性能的影响	181
3.3.2 透射电子显微分析	97	4.1.1 石墨	181
3.3.3 电子探针 X 射线显微分析	107	4.1.2 基体	181
3.3.4 X 射线衍射分析	109	4.1.3 碳化物	185
3.4 铸铁物理性能测试	112	4.1.4 磷共晶	185
3.4.1 密度测试	112	4.1.5 共晶团	190
3.4.2 线膨胀系数测试	114	4.1.6 金相组织对性能的影响	190
3.4.3 比热容测试	115	4.2 灰铸铁的性能	197
3.4.4 热导率测试	118	4.2.1 力学性能	197
3.4.5 磁性参数测试	120	4.2.2 物理性能	208
3.5 铸铁力学性能试验	121	4.2.3 使用性能	212
3.5.1 拉伸试验	121	4.2.4 工艺性能	218
3.5.2 楔压试验	129	4.3 灰铸铁的冶金质量指标	222
3.5.3 硬度试验	130	4.3.1 成熟度及相对强度	223
3.5.4 冲击试验	143	4.3.2 硬化度及相对硬度	224
3.5.5 弯曲试验	145	4.3.3 品质系数	225
3.5.6 压缩试验	147	4.4 提高灰铸铁性能的途径	225
3.5.7 弹性模量试验	149	4.4.1 化学成分的合理选配	226
3.5.8 旋转弯曲疲劳试验	153	4.4.2 改变炉料组成	230
3.5.9 平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验	156	4.4.3 铁液过热处理	232
3.5.10 疲劳裂纹扩展速率和疲劳 裂纹扩展门槛值试验	159	4.4.4 铁液孕育处理	234
3.6 铸铁铸造性能的测定	160	4.4.5 低合金化	245
3.6.1 流动性测定	160	4.5 灰铸铁的热处理及其他处理	249
3.6.2 体收缩测定	160	4.5.1 灰铸铁热处理特点	249
3.6.3 线收缩测定	161	4.5.2 灰铸铁常用的热处理工艺	249
3.6.4 裂纹倾向测定	162	4.5.3 频波谐波时效	254
3.6.5 铸造应力测定	164	4.6 灰铸铁的标准及合理选用原则	256
3.6.6 凝固膨胀力测定	164	4.6.1 灰铸铁的力学性能标准	256
3.7 铸铁使用性能试验	165	4.6.2 灰铸铁力学性能与铸件壁厚的 关系	258
3.7.1 耐热性能试验	165	4.6.3 试棒与铸件本体性能	258
3.7.2 耐磨和抗磨性能试验	166	4.6.4 合理选用原则	260
3.7.3 耐蚀性能试验	171	4.7 典型灰铸铁件	262
3.7.4 耐压试验	172	4.7.1 高强度灰铸铁件	262
3.7.5 致密性试验	173	4.7.2 薄壁减磨灰铸铁件	269
3.7.6 铸造磨球冲击疲劳寿命试验	174	4.7.3 D 型石墨铸铁件	274
3.8 铸铁的无损检测	174	4.7.4 离心铸造灰铸铁排水管	276
3.8.1 用超声波法测定球墨铸铁 球化率	174	参考文献	277
3.8.2 用超声波法鉴别铸铁石墨 形态	175	第 5 章 球墨铸铁	279
3.8.3 用电磁法进行铸铁分选	175	5.1 金相组织	279
3.8.4 铸铁件缺陷的无损检测	179	5.1.1 石墨	279
参考文献	179	5.1.2 基体	282
第 4 章 灰铸铁	181	5.1.3 碳化物	290
		5.1.4 磷共晶	292
		5.2 球墨铸铁的性能	294

5.2.1 力学性能	294	6.2.1 力学性能	408
5.2.2 物理性能	311	6.2.2 物理性能	411
5.2.3 工艺性能	316	6.2.3 工艺性能	412
5.2.4 使用性能	321	6.2.4 使用性能	414
5.3 球墨铸铁的化学成分	326	6.3 影响组织及性能的因素	418
5.3.1 基本元素	326	6.3.1 蠕化率	418
5.3.2 合金元素	333	6.3.2 基体	419
5.3.3 微量元素	339	6.3.3 化学成分	419
5.3.4 各种基体组织球墨铸铁的 化学成分	341	6.3.4 冷却速度	424
5.4 球化处理及孕育处理	347	6.4 蠕墨铸铁的处理和控制	424
5.4.1 球化处理	347	6.4.1 蠕化剂及蠕化处理工艺	424
5.4.2 孕育处理	359	6.4.2 蠕墨铸铁的孕育处理	429
5.5 典型铸造缺陷及其防止	362	6.4.3 蠕化率的检测	429
5.5.1 球化不良与球化衰退	362	6.4.4 蠕墨铸铁蠕化处理和控制的 新进展	432
5.5.2 缩孔和缩松	363	6.5 蠕墨铸铁的缺陷及防止方法	432
5.5.3 皮下气孔	365	6.6 蠕墨铸铁的热处理	435
5.5.4 夹渣	365	6.6.1 蠕墨铸铁的正火	435
5.5.5 石墨漂浮	366	6.6.2 蠕墨铸铁的退火	436
5.5.6 反白口	367	6.6.3 蠕墨铸铁等温淬火	437
5.5.7 碎块状石墨	368	6.6.4 蠕墨铸铁淬火、淬火一回火	439
5.6 球墨铸铁的热处理	370	6.6.5 蠕墨铸铁硼铬共渗	439
5.6.1 球墨铸铁的二次结晶	370	6.7 蠕墨铸铁标准、牌号及其选用 原则	440
5.6.2 退火	378	6.7.1 蠕墨铸铁的牌号	440
5.6.3 正火	379	6.7.2 关于蠕墨铸铁的蠕化率	442
5.6.4 淬火与回火	380	6.7.3 牌号选用原则	442
5.6.5 等温淬火	381	6.8 典型蠕墨铸铁件	443
5.7 球墨铸铁的表面强化	383	6.8.1 柴油机缸盖	443
5.7.1 表面淬火	383	6.8.2 汽车排气管	445
5.7.2 化学处理	385	6.8.3 液压件	447
5.7.3 机械强化	386	6.8.4 钢锭模	447
5.7.4 激光表面熔凝处理	387	6.8.5 蠕墨铸铁缸体	449
5.8 球墨铸铁标准及选用	388	参考文献	451
5.8.1 球墨铸铁的牌号、标准	388	第7章 可锻铸铁	453
5.8.2 选用原则	391	7.1 可锻铸铁的分类和金相组织特点	453
5.9 球墨铸铁的生产应用	392	7.1.1 分类	453
5.9.1 应用领域	392	7.1.2 牌号与应用	453
5.9.2 典型球墨铸铁件	396	7.1.3 金相组织特点	454
参考文献	400	7.2 可锻铸铁的性能	459
第6章 蠕墨铸铁	402	7.2.1 力学性能	459
6.1 蠕墨铸铁金相组织特点	402	7.2.2 物理性能	464
6.1.1 石墨	402	7.2.3 工艺性能	464
6.1.2 基体组织	403	7.2.4 使用性能	465
6.1.3 共晶团	407	7.3 可锻铸铁的坯件生产	466
6.2 蠕墨铸铁的性能	408		

7.3.1 化学成分的选择原则	466	8.5.1 磨球	557
7.3.2 元素的作用与化学成分范围	466	8.5.2 衬板	558
7.3.3 熔炉与熔炼特点	467	8.5.3 渣浆泵护套与叶轮	559
7.3.4 孕育剂与孕育处理	468	参考文献	559
7.4 可锻铸铁的石墨化退火	469	第9章 冷硬铸铁	562
7.4.1 固态石墨化原理	469	9.1 概述	562
7.4.2 影响石墨化退火过程的因素	471	9.2 冷硬铸铁的一般特征	562
7.4.3 加速石墨化退火的措施	474	9.2.1 宏观断口	562
7.4.4 石墨化退火工艺	474	9.2.2 金相组织	562
7.5 可锻铸铁的脱碳退火	479	9.3 化学成分对组织和性能的影响	563
7.5.1 脱碳退火原理	479	9.3.1 各元素对白口倾向和石墨化的影响	563
7.5.2 影响脱碳过程的因素	479	9.3.2 各元素对冷硬铸铁白口层深度的影响	564
7.5.3 白心可锻铸铁的生产	480	9.3.3 各元素对冷硬铸铁显微组织和性能的影响	565
7.6 可锻铸铁的缺陷及防止方法	482	9.4 制造工艺对组织和性能的影响	568
7.6.1 铸造缺陷	482	9.4.1 工艺条件的影响	568
7.6.2 退火缺陷	483	9.4.2 工艺方法的影响	573
7.6.3 热镀锌缺陷	485	9.5 冷硬铸铁的性能优化	574
7.7 典型可锻铸铁件	487	9.5.1 微合金化	574
7.7.1 管路连接件	487	9.5.2 微合金化对组织和性能的影响	574
7.7.2 线路金具	487	9.6 冷硬铸铁的生产应用	575
7.7.3 高吨位铁帽	488	9.6.1 冷硬铸铁轧辊	579
7.7.4 管件	488	9.6.2 凸轮轴	581
7.7.5 玻璃模具	488	9.6.3 气门挺柱	581
7.7.6 等温淬火可锻铸铁	489	参考文献	582
参考文献	489	第10章 耐热铸铁	583
第8章 抗磨铸铁	490	10.1 铸铁的高温氧化	583
8.1 铸铁的抗磨性	490	10.1.1 铸铁高温氧化特点	583
8.1.1 抗磨性与工况的关系	490	10.1.2 铸铁氧化膜结构	583
8.1.2 抗磨铸铁件的失效	490	10.1.3 影响铸铁抗氧化性的主要因素	584
8.2 抗磨白口铸铁	491	10.1.4 铸铁的氧化脱碳	586
8.2.1 普通白口铸铁	493	10.1.5 提高铸铁抗氧化性的途径	587
8.2.2 低合金白口铸铁	494	10.1.6 铸铁抗氧化性的评定方法	587
8.2.3 中合金白口铸铁	498	10.2 铸铁的生长	587
8.2.4 高合金白口铸铁——高铬白口铸铁	512	10.2.1 生长机理	587
8.3 抗磨球墨铸铁	544	10.2.2 防止生长的措施	588
8.3.1 马氏体抗磨球墨铸铁	544	10.3 耐热铸铁的成分、组织及性能	589
8.3.2 贝氏体抗磨球墨铸铁	545	10.3.1 耐热铸铁的分类	589
8.4 双金属抗磨材料	547	10.3.2 耐热铸铁件标准	589
8.4.1 双液双金属复合铸造抗磨材料	547	10.3.3 硅系耐热铸铁的成分、组织及性能	590
8.4.2 镶铸双金属复合铸造抗磨材料	549		
8.4.3 铸渗工艺的双金属抗磨材料	551		
8.5 典型抗磨铸铁件	557		

10.3.4 铝系耐热铸铁的成分、组织及性能	595	11.4.2 高铬耐蚀铸铁的耐蚀性及应用	648
10.3.5 铬系耐热铸铁的成分、组织及性能	598	11.4.3 高铬耐蚀铸铁件生产工艺	651
10.3.6 高镍奥氏体耐热铸铁的成分、组织及性能	600	11.5 中、低合金耐蚀铸铁	652
10.3.7 耐热铸铁的物理性能	602	11.5.1 铝铸铁	653
10.3.8 耐热铸铁的铸造性能	603	11.5.2 镍铬合金铸铁	653
10.4 耐热铸铁的选用	604	11.5.3 低镍铸铁	655
10.5 耐热铸铁的生产工艺	605	11.5.4 含铜铸铁	655
10.5.1 硅系耐热铸铁的生产工艺	605	11.5.5 耐盐卤冲蚀铸铁	655
10.5.2 铝系耐热铸铁的生产工艺	605	11.5.6 烧碱熔融锅用铸铁	656
10.5.3 铬系耐热铸铁的生产工艺	605	11.5.7 含锑铸铁	656
10.6 耐热铸铁的常见缺陷及防止方法	605	参考文献	657
10.7 典型耐热铸铁件	606	第12章 铸铁熔炼	660
10.7.1 针状预热器	606	12.1 概述	660
10.7.2 二硫化碳反应甑	606	12.1.1 铸铁熔炼的基本要求	660
10.7.3 SZD型工业锅炉侧密封板	608	12.1.2 铸铁熔炼炉的选择	661
参考文献	609	12.2 冲天炉熔炼	663
第11章 耐蚀铸铁	610	12.2.1 基本原理	663
11.1 铸铁的耐蚀性	610	12.2.2 冲天炉主要结构参数的选择	679
11.1.1 铸铁的腐蚀失效及特征	610	12.2.3 鼓风机的选择	689
11.1.2 铸铁的化学成分和金相组织对耐蚀性的影响	612	12.2.4 冲天炉熔炼主要工艺参数的选择	694
11.2 高硅耐蚀铸铁	622	12.2.5 冲天炉熔炼操作	702
11.2.1 高硅耐蚀铸铁件标准	622	12.2.6 冲天炉熔炼检测技术及控制	709
11.2.2 高硅耐蚀铸铁的化学成分、金相组织	622	12.2.7 改善冲天炉熔炼效果的主要措施	731
11.2.3 高硅耐蚀铸铁的力学和物理性能	625	12.2.8 冲天炉除尘	739
11.2.4 高硅耐蚀铸铁的耐蚀性及应用	626	12.2.9 常用的几种典型冲天炉	746
11.2.5 高硅耐蚀铸铁件生产工艺	630	12.2.10 热平衡与节能	767
11.3 高镍奥氏体耐蚀铸铁	632	12.3 电炉熔炼	769
11.3.1 高镍奥氏体耐蚀铸铁的化学成分和金相组织	632	12.3.1 用于铸铁熔炼的电炉种类及特点	769
11.3.2 高镍奥氏体耐蚀铸铁的力学和物理性能	634	12.3.2 无芯感应电炉熔炼	772
11.3.3 高镍奥氏体耐蚀铸铁的耐蚀性及应用	635	12.3.3 有芯感应电炉熔炼	789
11.3.4 高镍奥氏体耐蚀铸铁件生产工艺	640	12.3.4 感应电炉在浇注作业方面的应用	797
11.4 高铬耐蚀铸铁	646	12.3.5 感应电炉的节能与环保	798
11.4.1 高铬耐蚀铸铁的化学成分、金相组织和力学、物理性能	646	12.3.6 电弧炉熔炼	801
		12.4 双联熔炼	802
		12.4.1 双联熔炼的主要形式和特点	802
		12.4.2 双联熔炼炉的合理选配	803
		12.4.3 双联熔炼的应用实例	804
		12.5 炉料及修炉材料	805
		12.5.1 炉料	805
		12.5.2 修炉材料	822

12.5.3 隔热材料	829	A.3 蠕墨铸铁标准	866
12.5.4 冲天炉各部位及浇包耐火材料 的选用	830	A.4 可锻铸铁标准	871
参考文献	835	A.5 抗磨铸铁标准	880
附录	836	A.6 奥氏体铸铁标准	891
A 国外有关标准 (摘录)	836	A.7 等温淬火球墨铸铁标准	902
A.1 灰铸铁标准	836	A.8 高硅耐蚀铸铁标准	906
A.2 球墨铸铁标准	850	B 元素周期表	插页

第1章 绪论

人类经历了狩猎社会、农业社会和工业社会，现即将进入后工业社会，或者说是智能社会。21 世纪将是人类进入以信息为主导的智能社会。

支持这个信息社会的四大科学技术支持是：信息、生命、能源和材料科学技术。其中，材料科学技术对于人类的文明和社会的进步提供坚实的物质基础。

迄今，构成工程材料的组成有金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料。其中，金属材料在全部工程材料中占据绝大多数。在金属材料中，因成形方法的不同有轧制金属材料、铸造金属材料和锻造金属材料。其中，铸造金属材料在全部金属材料的比重是 $1/7 \sim 1/10$ 。在铸造金属材料中，尽管铝、镁铸造合金发展迅速，但是铸铁，特别是球墨铸铁也在快速发展。迄今，铸铁材料仍占据铸造金属材料的主导地位。

1.1 铸铁发展简史

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。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器皿和设备；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。

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，这两者的一般质量分数在 98% 以上。其中， $w(\text{Ni})$ 为 4% ~ 20%，余为铁；其

他杂质元素中除 $w(\text{Co})$ 为 0.3% ~ 1.0% 外，磷、硫和碳含量均是很低的 $w(\text{P}) = 0.1\% \sim 0.3\%$ ； $w(\text{S}) = 0.2\% \sim 0.6\%$ ； $w(\text{C}) = 0.01\% \sim 0.2\%$ 。

从美索不达米亚出土的文物证明，在公元前大约 3000 年就有了铁器；在公元前 2000 年就知道了铸铁技艺。尽管古希腊人和古罗马人在很有限的范围内知道铸铁的技艺，但是他们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。

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；此外还有江苏六合程桥出土的春秋晚期楚墓的铁丸；长沙楚墓的铁甬和铁鼎等。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。由此可见，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到铸型中的铁液。为了增加流动性，中国人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，例如铸铁炊具、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。

虽然铸铁的历史经历了漫长的岁月，达几千年之久，但其发展速度缓慢。直到公元 1722 年，出现了 R. A. F. De Reaumur 冲天炉，并开始用显微镜研究铸铁的组织 and 断口，之后，于 1734 年 Svedenberg 写的“铸铁学”（“de ferro”）问世。特别是 1765 ~ 1785 年之间，出现了瓦特蒸汽机，由此，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。公元 1788 年，为巴黎的自来水厂铸造了 60km 长的输水铸铁管，把它通向凡尔赛宫，以提供宫廷生活用水。从此，铸铁走上了工业发展的道路。要特别指出的是，考虑到输水管应具有足够的耐压和耐蚀能力，并应具有足够的韧性以支撑土壤的下沉压力，这条通向凡尔赛皇宫的世界第一条输水管道是用可锻铸铁制作的。

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%；硅的质量分数为 1% ~ 3%。此外，铸铁中还含有锰、磷、硫及其他合金元素。按铸铁中是否有石墨存在，把铸铁分成灰铸铁和白口铸铁；按石墨形态的不同，可以分为（普通）灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁和可锻铸铁；此外，按铸铁中是否含有除常规元素以外的合金元素，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。

1.1.1 灰铸铁

灰铸铁的发展首先是以获得体积分数为 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至少有 100 年之久。与具有珠光体—铁素体混合基体组织的铸铁相比具有体积分数为 100% 的珠光体铸铁具有较高的强度，这种铸铁中往往伴随着 A 型石墨，并且有较为细小的共晶团，因此断面敏感性得到改善。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。

为了制作高强度的气缸体，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 Heinrich Lanz 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断面敏感性。在制作 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 的质量分数在 3.5% ~ 4.6% 之间。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熔炼得到的铸铁。由于加入废钢的质量分数达 40% ~ 80%，它具有的成分是， $w(C) = 2.8\% \sim 3.0\%$ 、 $w(Si) = 1.5\% \sim 1.7\%$ 、 $w(Mn) = 0.8\% \sim 1.0\%$ 、 $w(P) \leq 0.3\%$ 、 $w(S) \leq 0.12\%$ 。由于碳、硅含量较低，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。

在灰铸铁发展的历程中，降低碳、硅含量以提高灰铸铁强度的方法，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，会促使形成过冷石墨，因而限制了使用范围。此外，在用钢性铸铁制作壁厚相差悬殊的铸件时，很难避免在薄壁处出现白口组织。

高强度灰铸铁的进一步发展，就是孕育铸铁的出现。1922 年美国 A. M. Meehan 在碳、硅含量较低的铁液中，用硅钙合金进行孕育处理，使灰铸铁的强度显著提高，消除了过冷石墨，改善了断面均匀性。如果把钢性铸铁进行孕育处理，可使不同壁厚的铸件本体抗拉强度达到 350 ~ 380MPa。但是，要得到优质的孕育铸铁，必须要严格控制碳当量和采取适宜的孕育处理。此外，铁液还须有很大程度的过热。

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 Ni:Cr = 3:1 的情况下，可使珠光体的分散度提高，形成索氏体型的珠光体组织，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 $w(Mo) = 0.6\% \sim 1.0\%$ 、 $w(Ni) = 1.5\% \sim 3.5\%$ 、 $w(C) = 2.5\% \sim 2.7\%$ 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。

由以上可见，灰铸铁的发展主要是以高强度作为驱动力的。从强度的记载得知，1860 年灰铸铁的抗拉强度只有 60 ~ 80MPa，发展至今，可以达到 400MPa；从发展的途径来看，早期着眼于孕育处理。但是，为了进一步提高强度，以后则着眼于合金化，并且，为了改善铸造性能，则力求采用较高碳当量的铸铁，这对低合金铸铁尤为重要。

1.1.2 球墨铸铁

早在 1935 ~ 1936 年间，德国人发现，当成分为 $w(C) = 1.5\%$ 、 $w(Si) = 3.5\%$ 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。但此项研究并未用于工业生产。

1947 年英国人 H. Morrogh 发现，在过共晶的灰

铸铁铁液中,加入铈和其他稀土元素,并以 Si-Mn-Zr 合金孕育,如果此时铁中铈的质量分数在 0.02% 以上时,则其中的石墨呈球状。

1948 年美国 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,从此,球墨铸铁进入了大规模的工业生产。

球墨铸铁作为新型工程材料的发展是令人惊异的。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, 1990 年为 915 万 t, 2000 年为 1310 万 t, 到 2007 年为 2288 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逐年下降。在 1980 年,全世界的灰铸铁产量是 5280 万 t, 1990 年为 4407 万 t, 2000 年为 3403 万 t, 2007 年为 4492 万 t。某些国家的球墨铸铁年产量已经超过当年的灰铸铁产量。图 1-1 所示是球墨铸铁与灰铸铁自 1980 年以来全世界年产量的变化。由图 1-1 可以看出,全世界球墨铸铁的年产量必将超过全世界灰铸铁的年产量,这是必然的趋势。

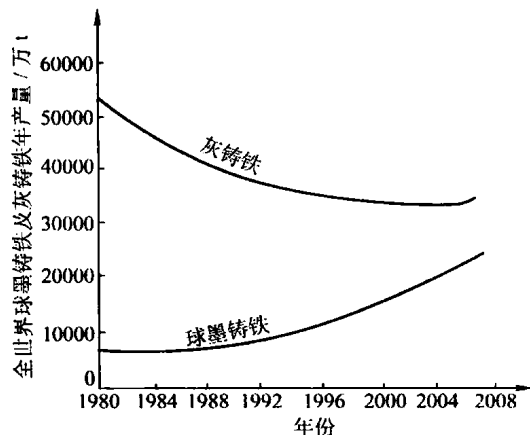


图 1-1 1980 年以来,全世界球墨铸铁与灰铸铁年产量的变化

我国球墨铸铁的发展经历了三个阶段。1950 ~ 1958 年为第一阶段——镁球墨铸铁时期。在这段时间里,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高潮。

稀土镁球墨铸铁的出现,是我国球墨铸铁发展的第二阶段。1959 ~ 1964 年底稀土镁球墨铸铁试验成功的这段时间内,研究工作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。

从 1950 年至今,我国球墨铸铁的生产得到了迅猛发展,2007 年球墨铸铁的年产量已超过 770 万 t。年产量已是世界第一位,已经超过美国和日本。

球墨铸铁在汽车、机床、农业机械和建筑等领域均有应用;另外,球墨铸铁管也得到广泛的应用,大约有 40% ~ 50% 的球墨铸铁用于铺设输水管线。球墨铸铁件最轻的只有几十克,最重的可达数百吨。有的球墨铸铁件壁厚超过 400mm,有的壁厚只有 3mm,并且是在铸态得到的铁素体基体组织。

基本组织是指珠光体—铁素体的球墨铸铁占全部球墨铸铁的 95% (其中,铁素体基体占 60%, 珠光体基体占 15%, 铁素体—珠光体混合基体占 20%), 其余基体的球墨铸铁占全部球墨铸铁的 5%。进入 20 世纪 80 年代,等温淬火奥氏体球墨铸铁 (Austempered Ductile Iron, ADI) 在国内外突起,至今,年产量已达数十万吨,这种球墨铸铁的力学性能优异,在断后伸长率达到 10% 的情况下,抗拉强度可达 1000MPa。采用不同的等温淬火温度,可使基体中含有不同体积分数的贝氏体和奥氏体组织,以满足不同工况条件下的使用要求。

1.1.3 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 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,使铁液成分含 $w(\text{Mg}) = 0.05\% \sim 0.06\%$ 、 $w(\text{Ti}) = 0.15\% \sim 0.50\%$ 、 $w(\text{RE}) = 0.001\% \sim 0.015\%$,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,从而,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。