

高等专科学校试用教材

# 铸造合金及其熔炼

赵建康 主编

机械工业出版社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

# 铸造合金及其熔炼

赵建康 主编



机械工业出版社

**铸造合金及其熔炼**

赵建康 主编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张24<sup>1</sup>/<sub>2</sub>·字数594千字

1985年6月北京第一版·1985年6月北京第一次印刷

印数 0,001—8,700·定价 3.90 元

\*

统一书号: 15033·5982

# 前 言

本书是高等专科学校铸造专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生，学制为三年的《铸造合金及其熔炼》教学大纲进行编写的。

本书主要分铸铁及其熔炼、铸钢及其熔炼和铸造有色合金及其熔炼三个部分。根据培养目标，本书以铸铁为主。本书较详细地论述了铸造合金的结晶机制，合金成分、组织与性能的控制原理，熔炼用炉及其熔炼工艺。在编写中，本书力求全面系统地介绍本课程的基本理论，注意反映近年来国内外的科研成果和先进的生产经验，并介绍了常用的检测技术和有关的标准规范，为掌握现代铸造合金熔铸技术打下一定基础。

本书也适用于职工大学和业余大学。中等专业学校也可选用，并可供铸造厂有关工程技术人员参考。

本书由赵建康任主编，参加编写的有安永德和庄金水，吴存甫任主审。在本书编写过程中，承陕西机械学院铸造实验室、沈阳铸造研究所金相实验室、无锡球墨铸铁研究所，山东省机械设计研究院等单位的同志大力协助并提供有关资料，深表感谢。

由于编者水平所限，本书可能存在不少的缺点和错误，希读者多加批评指正。

编 者

## 常用计量单位表

符 号	单 位 名 称	备 注	符 号	单 位 名 称	备 注
mol	摩[尔]	物质的单位	l	升	体积单位, $1\text{m}^3 = 1000\text{l}$
m	米	长度单位	s	秒	时间单位
dm	分米	$1\text{m} = 10\text{dm}$	min	分	$1\text{min} = 60\text{s}$
cm	厘米	$1\text{m} = 100\text{cm}$	h	[小]时	$1\text{h} = 60\text{min}$
mm	毫米	$1\text{m} = 1000\text{mm}$	d	天(日)	$1\text{d} = 24\text{h}$
Å <sup>①</sup>	埃	$1\text{Å} = 1 \times 10^{-10}\text{m}$	r/min	转每分	转速单位
kg	千克(公斤)	质量单位, 公制中是重力单位, 写为kgf以兹区别	g/cm <sup>3</sup>	克每立方厘米	密 度
N	牛[顿]	力的单位 $1\text{kgf} = 9.807\text{N}$ $\approx 10\text{N}$	J	焦[耳]	热量, 功单位 $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$
N/mm <sup>2</sup>	牛每平方米	应力单位 $1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.807\text{N}/\text{mm}^2$	kW	千瓦	功率单位
Pa	帕[斯卡]	$1\text{N}/\text{mm}^2 = 1\text{MPa} (= 10^6\text{Pa})$ $1\text{atm}(\text{工程大气压}) = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$ $1\text{mmHg} = 9.807\text{Pa}$ $1\text{mmHg} = 133.32\text{Pa}$	°C	摄氏度	温度单位
t	吨	$1\text{t} = 1000\text{kg}$	K	开[尔文]	温度单位
			Hz	赫[兹]	频率单位
			A	安[培]	电流单位
			V	伏[特]	电压单位
			Ω	欧[姆]	电阻单位

① Å为非法定计量单位

## 常用符号表

符 号	名 称	备 注	符 号	名 称	备 注
L	液 相		$\sigma_s$	屈服强度	单位: $\text{N}/\text{mm}^2$
A	奥氏体		$a_k$	冲击韧性	单位: $\text{J}/\text{cm}^2$
F	铁素体		$\delta$	延伸率	
G	石 墨		HB	布氏硬度	
B	贝氏体		HRC	洛氏硬度	
C <sub>m</sub>	渗碳体		HV	维氏硬度	
M	马氏体		t	①时间	单位: h, min, s
S	索氏体			②温度	单位: K或°C
P	珠光体		Q	热 量	单位: J
C <sub>s</sub>	碳当量		G	自由能	单位: J
S <sub>c</sub>	共晶度		H	热 焓	单位: J
$\sigma_b$	抗拉强度	单位: $\text{N}/\text{mm}^2$	D, $\phi$	直 径	单位: mm
$\sigma_w$	抗弯强度	单位: $\text{N}/\text{mm}^2$	R	半 径	单位: mm



# 录

前言  
 常用计量单位表  
 常用符号表  
 绪论 ..... 7

## 第一篇 铸铁及其熔炼

第一章 灰铸铁 ..... 4

§ 1-1 灰铸铁的性能及其技术要求 ..... 4

一、灰铸铁的性能特点 ..... 4

二、灰铸铁的牌号及技术要求 ..... 6

§ 1-2 铸铁的结晶 ..... 8

一、碳在铸铁中的存在形式 ..... 8

二、铁碳二元双重状态图 ..... 9

三、灰铸铁的一次结晶 ..... 12

四、灰铸铁的二次结晶 ..... 16

§ 1-3 铸铁的金相组织及其与机械性能的关系 ..... 17

一、铸铁中的石墨及其对机械性能的影响 ..... 17

二、铸铁中金属基体与机械性能的关系 ..... 22

§ 1-4 铸铁的化学成分对组织与性能的影响 ..... 24

一、化学元素在铸铁中的存在形式及其对状态图的影响 ..... 25

二、碳和硅对铸铁组织与机械性能的影响 ..... 26

三、硫和锰对铸铁组织与性能的影响 ..... 29

四、磷对铸铁组织与性能的影响 ..... 30

五、铸铁中合金元素对组织与性能的影响 ..... 32

§ 1-5 冷却速度及其它工艺因素对铸铁组织性能的影响。铸件化学成分的确 33

一、铸件冷却速度对铸铁组织性能的影响 ..... 33

二、铸铁的液体状态对组织性能的影响 ..... 35

三、铸铁化学成分的确 36

§ 1-6 铸铁的铸造性能 ..... 40

一、流动性 ..... 40

二、收缩性 ..... 45

三、铸铁件的缩孔 ..... 48

四、铸造应力、裂纹与变形 ..... 50

五、铸铁中的气体 ..... 54

六、铸铁的偏析 ..... 57

§ 1-7 孕育铸铁 ..... 58

一、孕育铸铁的制造原理 ..... 58

二、孕育铸铁的化学成分与配料 ..... 60

三、孕育处理工艺 ..... 60

四、孕育铸铁的炉前控制 ..... 61

五、孕育铸铁的性能及应用 ..... 62

§ 1-8 蠕墨铸铁 ..... 63

一、蠕墨铸铁的熔制工艺 ..... 63

二、蠕墨铸铁的组织、性能与应用 ..... 65

第二章 球墨铸铁 ..... 67

§ 2-1 球墨铸铁的性能和应用 ..... 67

一、球墨铸铁的规格和技术要求 ..... 67

二、球墨铸铁的性能特点及应用 ..... 68

§ 2-2 球墨铸铁的金相组织及其与机械性能的关系 ..... 71

一、石墨及其与机械性能的关系 ..... 72

二、基体组织及其与机械性能的关系 ..... 74

三、球墨铸铁的铸态组织 ..... 75

§ 2-3 球墨铸铁的结晶 ..... 76

一、球墨铸铁的一次结晶 ..... 76

二、球状石墨的晶体结构 ..... 78

三、球化理论概述 ..... 79

§ 2-4 球墨铸铁中化学成分的确定 ..... 81

一、球墨铸铁中化学成分的确定 ..... 81

二、球墨铸铁中常用合金元素的作用和使用范围 ..... 83

三、球墨铸铁铁水的熔化要求 ..... 84

§ 2-5 球墨铸铁的处理工艺 ..... 84

一、镁和稀土元素在铁水中的作用 ..... 84

二、球化剂的成分要求 ..... 86

三、球化剂的加入量	87	二、配料计算	180
四、球化处理工艺	89	§ 4-5 冲天炉铸铁熔炼的测试技术	184
五、孕育处理	91	一、铁水温度的测定	184
六、炉前检验	92	二、冲天炉风量和风压的测定	188
§ 2-6 球墨铸铁的铸造性能和铸造缺陷	94	三、冲天炉的炉气分析	190
一、球墨铸铁的凝固特点	94	四、铁水中含氧量的测定	191
二、球墨铸铁的铸造性能	94	§ 4-6 冲天炉炉型及结构特点	193
三、球墨铸铁的常见缺陷和防止方法	96	一、冲天炉炉型分析	193
§ 2-7 球墨铸铁的热处理	100	二、冲天炉的结构分析	200
一、铸铁热处理的特点	100	§ 4-7 鼓风机的选用	206
二、球墨铸铁热处理工艺	102	一、冲天炉送风阻力分析	206
第三章 可锻铸铁及特种铸铁	108	二、冲天炉常用鼓风机的特性及选用	207
§ 3-1 可锻铸铁	108	§ 4-8 特种化铁炉	213
一、可锻铸铁的石墨化原理	108	一、水冷无炉衬冲天炉	213
二、可锻铸铁白口铸件的熔制	111	二、外加燃料助熔的焦炭冲天炉	213
三、可锻铸铁的石墨化退火工艺	113	三、煤粉化铁炉	215
四、缩短可锻铸铁退火周期的措施	115	四、燃油化铁炉和燃气化铁炉	217
五、可锻铸铁常见的缺陷及防止措施	116	五、电化铁炉	217
§ 3-2 耐磨铸铁	118		
一、在润滑条件下工作的耐磨铸铁	118		
二、干摩擦条件下工作的耐磨铸铁	124		
§ 3-3 耐热铸铁和耐蚀铸铁	125		
一、铸铁的高温破坏及耐热性要求	125		
二、耐热铸铁的类别、成分和性能	126		
三、耐蚀铸铁及其类别、成分和性能	129		
第四章 铸铁的熔炼	131		
§ 4-1 铸铁熔炼概述	131		
一、冲天炉的熔炼过程	131		
二、铸铁熔炼的技术要求	132		
§ 4-2 冲天炉的熔炼原理	134		
一、焦炭的燃烧	134		
二、铁料的熔化	142		
三、冲天炉内的冶金反应	147		
§ 4-3 冲天炉熔炼工艺	157		
一、冲天炉用的耐火材料及砌炉工艺	157		
二、冲天炉用的焦炭及使用控制	160		
三、冲天炉送风及其控制	166		
四、冲天炉特性曲线(网格)图及其应用	169		
五、冲天炉的熔渣及其控制	171		
六、冲天炉熔炼过程中的故障	174		
§ 4-4 冲天炉用金属炉料及配料计算	177		
一、冲天炉用金属炉料	177		
		第二篇 铸钢及其熔炼	
		第五章 铸造碳钢	221
		§ 5-1 碳钢的结晶过程和铸态组织	221
		一、碳钢的结晶过程	221
		二、碳钢的铸态组织	222
		§ 5-2 化学成分对铸造碳钢机械性能的影响	227
		一、碳的影响	227
		二、硅的影响	227
		三、硫的影响	227
		四、锰的影响	228
		五、磷的影响	228
		§ 5-3 碳钢铸件热处理的特点	228
		一、全退火	228
		二、正火	229
		三、正火加回火	230
		四、扩散退火	230
		§ 5-4 碳钢的铸造性能	232
		一、铸钢的流动性	232
		二、铸钢的体积收缩率和缩孔率	233
		三、铸钢的线收缩	234
		四、铸钢件的热裂	235
		五、铸钢件的冷裂	237

六、钢液中的气体 .....	237	四、氧化期 .....	275
七、铸钢中非金属夹杂物 .....	239	五、还原期 .....	280
八、铸钢中的偏析 .....	240	六、出钢 .....	287
<b>第六章 铸造合金钢 .....</b>	<b>242</b>	七、浇注 .....	288
§ 6-1 铸造低合金结构钢 .....	242	§ 7-5 碱性电弧炉不氧化法炼钢工艺特点 .....	289
一、合金元素在铸钢中的作用 .....	242	§ 7-6 酸性电弧炉炼钢工艺特点 .....	291
二、单元素铸造低合金钢 .....	243	§ 7-7 感应电炉炼钢 .....	291
三、多元素铸造低合金钢 .....	245	一、感应电炉炼钢的特点 .....	292
四、低合金钢的铸造性能特点 .....	245	二、感应电炉的结构及炉衬 .....	293
五、低合金钢铸件的热处理 .....	247	三、无芯感应电炉的熔炼 .....	294
§ 6-2 铸造高合金钢 .....	248	§ 7-8 真空感应电炉炼钢 .....	297
一、铸造高锰钢 .....	248		
二、铸造不锈钢 .....	250		
三、铸造耐热钢 .....	256		
四、铸造低温用钢 .....	257		
五、铸造工具钢 .....	258		
<b>第七章 铸钢的熔炼 .....</b>	<b>260</b>		
§ 7-1 概述 .....	260		
一、转炉炼钢法 .....	260		
二、平炉炼钢法 .....	261		
三、电弧炉炼钢法的优缺点 .....	261		
§ 7-2 炼钢用原材料 .....	262		
一、金属材料 .....	262		
二、造渣材料 .....	263		
三、氧化材料 .....	263		
四、增碳材料 .....	264		
五、耐火材料 .....	264		
§ 7-3 三相电弧炉的构造 .....	264		
一、三相电弧炉的结构概述 .....	264		
二、炉体及炉衬砌筑 .....	265		
三、炉盖 .....	267		
四、装料机构 .....	267		
五、电极升降与夹持机构 .....	267		
六、倾炉机构 .....	267		
七、电气装置 .....	268		
八、水冷装置 .....	269		
九、电极 .....	269		
十、电弧炉的主要技术指标 .....	270		
§ 7-4 碱性电弧炉氧化法炼钢工艺 .....	270		
一、扒补炉 .....	271		
二、装料 .....	272		
三、熔化期 .....	273		
		<b>第三篇 铸造有色合金及其熔炼</b>	
		<b>第八章 铸造铝合金及其熔炼 .....</b>	<b>300</b>
		§ 8-1 铸造铝合金 .....	300
		一、铸造铝合金的分类 .....	300
		二、铸造铝硅合金 .....	304
		三、铸造铝铜合金 .....	309
		四、铸造铝镁合金 .....	310
		五、铸造铝锌合金 .....	312
		六、铝合金的铸造性能及工艺特点 .....	313
		七、铸造铝合金的热处理 .....	315
		§ 8-2 铸造铝合金的熔炼 .....	319
		一、铸造铝合金的熔炼特点 .....	319
		二、炉料及配料计算 .....	320
		三、铸造铝合金的去气和精炼 .....	325
		四、铸造铝合金的变质处理 .....	330
		五、典型铝合金熔炼工艺介绍 .....	332
		<b>第九章 铸造铜合金及其熔炼 .....</b>	<b>333</b>
		§ 9-1 铸造铜合金 .....	333
		一、纯铜性质及铸造铜合金的分类 .....	333
		二、铸造锡青铜 .....	334
		三、铸造铝青铜 .....	343
		四、铸造黄铜 .....	347
		§ 9-2 铸造铜合金的熔炼 .....	352
		一、脱氧 .....	352
		二、去气 .....	355
		三、精炼 .....	356
		四、铜合金的熔炼工艺 .....	357
		<b>第十章 其他铸造有色合金及其熔铸 .....</b>	<b>364</b>
		§ 10-1 铸造镁合金及其熔铸特点 .....	364



一、铸造镁合金的成分、组织与性能 .....	364	§ 11-1 坩埚炉 .....	372
二、铸造镁合金的熔铸特点 .....	366	一、焦炭坩埚炉 .....	372
§ 10-2 铸造锌合金及其熔铸特点 .....	367	二、燃油坩埚炉和燃气坩埚炉 .....	374
一、铸造锌合金的性能特点 .....	367	三、电阻坩埚炉 .....	375
二、铸造锌合金的牌号、成分与组织 .....	367	§ 11-2 感应电炉 .....	376
三、铸造锌合金的熔炼 .....	368	一、高频感应电炉 .....	376
§ 10-3 轴承合金及其熔铸特点 .....	369	二、中频感应电炉 .....	377
一、轴承合金的分类 .....	369	三、工频感应电炉 .....	378
二、锡锑和铅锑轴承合金 .....	369	§ 11-3 反射炉和电弧炉 .....	379
三、锡锑和铅锑轴承合金的熔化和浇注 .....	371	一、反射炉 .....	379
第十一章 铸造有色合金熔炼炉 .....	372	二、电弧炉 .....	380

## 绪 论

铸造合金是浇注铸件用的各种合金的总称，它包括铸铁、铸钢和铸造有色合金等三类铸造用合金。

铸造合金在国民经济建设中占有相当重要的地位，它是工农业生产和国防建设中的基本结构材料。在各类机器设备上，铸件所占的比重很大。例如：（按重量计算）

机床、重型机械	70~90%
内燃机	70~90%
压缩机、风机、	60~80%
拖拉机、农业机械	40~70%

由此可见，它是整个机器制造工程材料的重要组成部分。在铸造合金中，铸铁因其来源广，成本低，铸造性能良好，故铸铁的产量一般占铸造合金总产量的80%以上。铸钢具有更高的机械性能，铸造有色合金则具有一般钢铁所不具备的一些特殊性能，因而也都得到广泛的应用。

铸造合金在我国的应用有极其悠久的历史，早在四千多年前新石器时期的一些文化遗址中，就发现了青铜小型铸件（如刀锥等工具）。商周时期铸造技术已得到了很大发展，当时铸造青铜器不但已有种类繁多的生产和生活用具，而且还制造了大量的兵器、乐器、车马器等。工艺水平也达到了很高的水平，如商代晚期的青铜司母戊大方鼎重达815 kg，而且所铸出的文字花纹细致。

我国是世界上生产铸铁最早的国家，据“左传”记载，周敬王七年（公元前513年），晋国已铸成了大型铸铁鼎（称刑鼎）。在江苏六合程桥出土的白口铸铁丸就是春秋末年的遗物。由于铁器锋利，强度较高和易于制作，铁铸件的生产在战国中、后期便迅速得到发展，许多铜器为铸铁件所代替。铸铁的冶铸在广大地区已发展到相当大的规模，如山东临淄齐国故都冶铁遗址的面积达40余万m<sup>2</sup>。这与国外相比我国铸铁的生产比欧洲早一千多年。

根据出土的战国早期的文物证明，我国白口铸铁技术早在春秋末年就已有相当发展。当时的人们已能将白口铸铁件经高温石墨化退火而得到黑心可锻铸铁件，如湖南长沙出土战国时代的韧化白口铁件，其金相组织为团絮状石墨和铁素体珠光体基体。而在欧洲直至1722年才开始使用白心可锻铸铁，黑心可锻铸铁直到十九世纪才在美国研制成功，可见我国可锻铸铁的生产较欧美早1500年以上。

到西汉时期，我国铸铁生产技术又有了更大的发展。灰铸铁已开始大量生产，在出土的许多灰铸铁件的金相组织中，皆存在典型的A型分布的片状石墨。在河南巩县铁生沟遗址中出土的铁镢，经金相分析发现它是一种球化良好的球墨铸铁，其石墨形状与现代球墨铸铁中的石墨相似。

我国古代在铸铁熔炼方面的成就也极显著。春秋时代即有称“橐”的特制皮囊，这是人力鼓风工具。在东汉时期又发展了“牛排”，“马排”等畜力鼓风设备，以后又有称“水排”的水力鼓风机。宋代还出现了不同类型的“木风扇”，这种木制鼓风机大大提高了送风风压

和风量，为当时大型铸铁熔炼炉的兴造提供了有利基础。

远在西汉的巩县铁生沟遗址中，就曾发现掺有石英石和绿色岩石的粘土系耐火砖，遗址中也发现有石灰石熔剂和含有  $\text{CaO}$  41.93%， $\text{MgO}$  3.22% 的碱性炉渣遗物，这些都表明当时的熔炼技术已达到了相当高的水平。我国也是最早炼出焦炭并用于冶金和铸造的国家。炼焦最早记载于明代方以智著的“物理小识”，这本著作详细记载了焦炭的制法，“煤臭者烧熔而闭之成石，凿而入火日礁”，礁就是焦炭的古称。焦炭燃烧温度高，热强度高，来源广。它的使用标志着冶铸工业已发展到一个更高阶段。

在有色合金方面，铜镍合金·白铜在我国晋代以前即开始应用。白铜古代称“烂银”，白铜的熔铸和广泛使用也是我国古代铸造合金的一个重要成就。

此外，由于铸造合金的不断发展，古代有很多有关铸造合金方面的著作。例如，春秋战国时期的“考工记”一书就详细记载了青铜中，铜、锡、铅的配比及其与性能间的关系，是世界上最早有关铸造合金的科学论著。

总之，在世界铸造合金熔铸技术的发展史中，我国古代劳动人民表现出极大的智慧和创造力，写下了光辉的篇章。

解放前，我国的现代铸造工业的发展还是相当落后的。一方面生产规模小，另一方面铸造合金的品种少，工艺陈旧，几乎没有现代化冲天炉，仅能生产一般性生产、生活和机器修配用铸件。

新中国成立以后，我国国民经济迅速地发展，为铸造生产的发展开辟了广阔前景。1949年我国开始生产孕育铸铁，把铸铁的强度提高到  $300 \text{ N/mm}^2$  以上。1950年我国试制成功球墨铸铁，并很快在生产上推广使用。我国稀土资源丰富，以稀土镁球化剂，试制成了独具风格的稀土镁球墨铸铁，从而促进了球墨铸铁的发展。现生产的高强度球墨铸铁其抗拉强度已达  $1200 \text{ N/mm}^2$  以上，高韧性球墨铸铁其延伸率已达 17~24%。我国业已制定了具有国际先进水平的“球墨铸铁件”的国家标准，还成功试制了新型高强度蠕虫状石墨铸铁。在耐磨、耐蚀、耐热等特种铸铁和可锻铸铁的生产上，也都有了很大进展。早在 50 年代初，我国就建立了大批铸铁熔炼用现代化冲天炉，现已制定出我国冲天炉“三化”标准系列，研制和推广了具有我国特色的冲天炉炉型和一系列的先进熔炼工艺，发展了非焦化铁，电炉化铁。双联熔炼等工艺方法。根据制造大型动力、运输、冶金等机械的需要，我国大力发展了铸钢生产，浇出了许多重型铸钢件，有的达 100 t 以上。具有耐磨、耐热、耐蚀和非磁……等特点的高合金特种钢和许多新型钢种也大量用于铸钢生产。铸钢熔炼除重型机械生产上使用平炉外，还大量发展了电炉炼钢方法，并推广了感应电炉熔炼、真空熔炼、氩气脱碳熔炼、电渣熔炼、等离子炉熔炼等先进技术。

有色合金的铸造，近几年来也有新的发展，国内有些单位已能浇注出 27 t 重的大型铜合金螺旋桨，2 t 多重的大型铝铸件和 700 kg 重的复杂镁铸件。出现了许多新的有色铸造合金的品种。在铸造铝合金的熔炼中普遍采用了新的精炼、变质方法等有色合金熔炼新工艺。

随着我国社会主义现代化建设的蓬勃发展，对铸造合金的生产也提出了越来越高的要求。为满足四化建设的需要，我国必须大力发展铸造合金的新品种，不断推广铸造合金生产的新技术和新工艺。因此我们要认真学习铸造合金及其熔炼方法的基础知识，开展有关科学研究工作，为发展我国铸造生产，为把我国早日建成社会主义现代化强国作出贡献。

# 第一篇 铸铁及其熔炼

铸铁是工业上应用最广泛的一种铸造合金。铸铁的产量一般占铸造合金总产量的70%以上。因此在现代机器制造工业中，铸铁一直是一种重要的基本工程材料。

铸铁是经化铁炉熔化并铸造成型的高碳系铁碳合金，其含碳量超过铁碳合金状态图上  $E'$  点的含碳量(C, 2.08%)。

铸铁不是纯粹的铁碳合金，除碳外，还含有硅、锰、磷、硫等化学元素和一些杂质，有时还加入其他一些合金元素。普通铸铁的主要化学成分范围如下：

碳2~4%，硅1~3%，锰0.3~1.4%，磷0.1~1.2%，硫0.03~0.15%。

在普通铸铁中，因硅的含量较高，而且在铸铁结晶中又是一个起着重要作用的元素，故也常把铸铁作为铁-碳-硅三元合金来研究。

铸铁的种类很多，其分类如下：

1. 按铸铁金相组织分类，主要可分为：

白口铸铁 碳除少量溶于铁素体外，绝大部分以渗碳体形式存在于铸铁中，其断口呈白色。

灰口铸铁 铸铁中的碳全部或大部分以片状石墨的形式存在，其断口呈黑灰色。这类铸铁简称灰铸铁。

蠕墨铸铁 铸铁中的碳全部或大部分以蠕虫状石墨的形式存在。

球墨铸铁 铸铁中的碳全部或大部分以球状石墨的形式存在。

可锻铸铁 铸铁中的碳全部或大部分以絮状石墨的形式存在。

2. 按铸铁的化学成分分类，可分为：

普通铸铁；

合金铸铁。

所谓合金铸铁一般是指除碳外的其他元素如含钼、钛、钒 $>0.1\%$ ，含镍、铬、铜、铝 $>0.3\%$ ，含锰 $>2.0\%$ ，含硅 $>4\%$ 的铸铁。其中合金元素总量 $<5\%$ 者称低合金铸铁；合金含量在 $5\sim10\%$ 者为中合金铸铁；合金含量 $>10\%$ 者为高合金铸铁。

3. 按铸铁使用性能分类，还可分为：

结构用铸铁；

特种性能铸铁，也称特种铸铁。特种铸铁包括耐磨铸铁、耐热铸铁、耐蚀铸铁等。

本篇重点介绍灰铸铁和球墨铸铁的结晶原理、组织性能及熔制工艺。对可锻铸铁和特种铸铁只作一般介绍。本篇还对冲天炉的工作原理、炉型结构和熔化工艺做较详细的讨论。

# 第一章 灰 铸 铁

## § 1-1 灰铸铁的性能及其技术要求

灰铸铁通常是指具有片状石墨的铸铁，它包括普通灰铸铁和孕育铸铁等。灰铸铁是应用最广泛的一种铸铁。在各类铸铁的总产量中，灰铸铁占80%以上。灰铸铁虽强度较低，但生产方便，成本低，铸造性能优良，某些使用性能如缺口敏感性、减震性和耐磨性，灰铸铁有着许多独特的优点，因此，在机器制造业中灰铸铁始终占有很重要的地位。

### 一、灰铸铁的性能特点

为了更好的控制铸铁质量，首先应对灰铸铁的一些性能特点和要求作进一步地了解。

#### (一) 灰铸铁的抗拉强度和抗弯强度

灰铸铁的抗拉强度较铸钢低，(见表1-1)一般只有 $120\sim 250\text{N/mm}^2$ ，仅是铸钢的 $1/2\sim 1/3$ ，但比白口铁稍高。

表1-1 灰铸铁的机械性能与碳素铸钢的比较

材 料 名 称	机 械 性 能 指 标				
	抗拉强度 $\sigma_b$ $\text{N/mm}^2$	延 伸 率 $\delta$ %	冲击韧性 $a_k$ $\text{J/cm}^2$	弹性系数 $E$ $\text{kN/mm}^2$	布 氏 硬 度 HB
灰铸铁	100~350	0~0.5	0~8	70~160	120~270
碳素铸钢	400~600	20~30	25~50	200	

用孕育处理的方法熔制的灰铸铁称为孕育铸铁，其抗拉强度可以提高到 $350\text{N/mm}^2$ 。

按国家标准，抗拉强度是灰铸铁性能检验的一个主要指标。因此，在铸铁生产中，必须首先保证铸铁的抗拉强度达到所要求的指标。

铸铁的抗弯强度是铸铁强度的一个辅助指标。通常灰铸铁也可采用弯曲试验来控制其性能。因为抗弯强度的试验方法较简易，试样一般是铸态的，不需要切削加工就可以进行试验。

普通灰铸铁的抗弯强度为 $300\sim 450\text{N/mm}^2$ ，经孕育处理的灰铸铁抗弯强度可超过 $600\text{N/mm}^2$ 。

#### (二) 灰铸铁的塑性和韧性

普通灰铸铁的塑性很低(见表1-1)，故属于脆性材料。

因灰铸铁是脆性材料，不能用塑性材料常用的延伸率试验测定其塑性。一般以抗弯试验所测定的挠度值 $f$ 来推测和比较铸铁塑性变形能力。

灰铸铁的韧性很低，比钢低得多，如碳素铸钢(ZG35，正火)冲击韧性约 $35\text{J/cm}^2$ 左右，而一般灰铸铁仅 $2\sim 5\text{J/cm}^2$ 。

白口铁冲击韧性更低，也更脆。

#### (三) 灰铸铁的硬度

灰铸铁硬度一般在 HB120~270 范围内。若灰铸铁硬度达到 HB170~190 以上时，一般可以满足在有油润滑条件下的铸件表面耐磨要求，灰铸铁硬度也不应过高，一般要求不超过 HB250~270，否则难于切削加工。

白口铁硬度比灰铸铁高，一般在 HB350 以上，切削加工困难。

#### (四) 灰铸铁对缺口的敏感性

灰铸铁对零件表面出现缺口（如零件上的孔槽、棱角、划痕和内部的非金属夹杂物等）的敏感性很小。这是灰铸铁的一个优点。钢的抗拉强度高，但钢对零件表面缺口的敏感性很大，表 1-2 列出了灰铸铁与钢件的缺口作用系数的数据。由表可知，灰铸铁的抗弯疲劳强度基本不受缺口的影响，故作用系数为 1；钢件的缺口作用系数是 1.5~1.6，也就是当有缺口时，其抗弯疲劳强度显著下降，仅为无缺口的 62~67.5%。这说明钢的强度虽然高于灰铸铁，但当有缺口存在时，灰铸铁反而具有较高的可靠性。

表 1-2 铸铁和钢的抗弯疲劳强度（有缺口和无缺口）的比较

材 料	抗拉强度 $\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	抗弯疲劳强度 $\sigma_w$ N/mm <sup>2</sup>		缺口作用系数 $\beta = \frac{\sigma_w(\text{无缺口})}{\sigma_w(\text{有缺口})}$
		无 缺 口	有 缺 口	
灰 铸 铁	206	88	88	1
灰 铸 铁	265	113	113	1
灰 铸 铁	284	127	127	1
钢	432	225	152	1.5
钢	578	284	176	1.5

#### (五) 铸铁的减振性

当我们敲击钢棒时，能听到清脆的声音，余音很长，而敲击灰铸铁棒时则声音低沉沙哑。这是由于灰铸铁减振性高的缘故，如图 1-1 所示。

减振性是指材料本身吸收振动的能力。在灰铸铁中，存在着大量的片状石墨，它割裂了基体，对振动起阻滞作用，阻止振动能量的传播，并把振动的能量转化为热能，从而使机件的振动大大地得到缓和，故灰铸铁具有良好的减振性。因此机床床身等常用灰铸铁制造，以减少机床在工作时的振动，从而保证机件的加工精度。

一般说，在灰铸铁中，石墨片越粗大，它的减振性也越高；因此，对要求减振性高的零件，在强度许可范围内，应优先采用高碳硅的灰铸铁。

#### (六) 灰铸铁的耐磨性

灰铸铁在油润滑下的耐磨性（即减磨性）好，这也是灰铸铁的一个重要特点。在灰铸铁中，石墨在金属基体的摩擦表面上形成了微小的凹穴和沟槽，能起储油输油的作用，有利于摩擦面间油膜的形成。同时石墨本身又是一种良好的固体润滑剂，可在润滑表面起一定的润

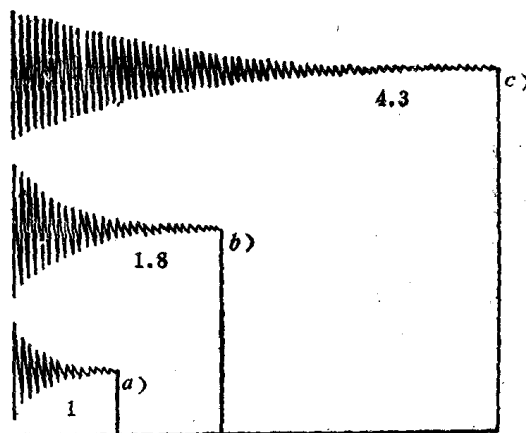


图 1-1 灰铸铁球墨铸铁及铸钢的振动衰减示意图

a) 灰铸铁 b) 球墨铸铁 c) 钢

滑作用，特别在出现半干摩擦的情况下，这一作用更为明显。灰铸铁的金属基体对耐磨性也有着重要的影响，基体必须具有足够的硬度和强度。实践表明，灰铸铁具有均匀分布的石墨和珠光体基体时，耐磨性最好，石墨过分粗大，耐磨性反而降低。

因为灰铸铁在有润滑条件下的耐磨性好，故机床上、动力机上的一些有减磨性能要求的零件，多采用这种材料制造。

总之，灰铸铁机械性能的主要特点是：

- 1) 抗拉强度比钢低，但仍具有一定的强度值，尚能满足许多机器零件承受抗拉载荷的要求；
- 2) 塑性、韧性很低，属于脆性材料；
- 3) 硬度能适合切削加工和零件耐磨的要求；
- 4) 对缺口敏感性低；
- 5) 减振性好；
- 6) 油润滑下的耐磨性好。

灰铸铁的铸造性能大大优于铸钢和其他一些合金。灰铸铁的熔点比钢低，流动性好，可浇注薄壁复杂铸件；灰铸铁收缩小，形成缩孔、裂纹、气孔的倾向较小，易获得健全的铸件。

铸铁熔炼所需设备及基建费用较低，所用原材料价格便宜，因此铸铁件成本也较低。灰铸铁件成本仅是铸钢件的30~50%，是有色金属铸件的15~20%。

由于灰铸铁有上述优点，故在工业部门一直得到广泛应用。

## 二、灰铸铁的牌号及技术要求

我国国家标准对灰铸铁的牌号、机械性能以及其它一些技术要求都做了统一的规定。

灰铸铁是根据直径30mm的单铸试样的抗拉强度分级(见表1-3)，并以单铸试样的抗拉强度作为验收依据的。验收时， $n$ 牌号的灰铸铁其抗拉强度在 $n$ 至 $(n+100)N/mm^2$ 范围内即为合格。

单铸试样的直径为 $30^{+0.05}mm$ ，长度为230mm，采用砂型立浇顶注的方法制取。

当铸件壁厚超过20mm而重量又超过200kg时，可采用附铸试样作为验收依据，其抗拉强度应符合表1-4的规定。附铸试样直径有30mm和50mm两种。I型附铸试样为框形试样，试样距铸件55mm，分别由直径为50mm和70mm的圆柱体与铸件相连。II型附铸试样为厚30mm，高50mm的板形试样，直接与铸件相连。

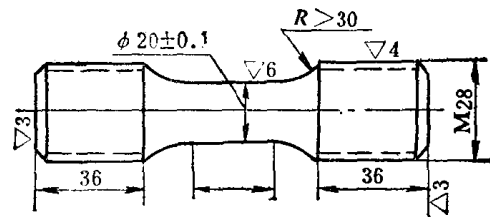


图1-2 灰铸铁抗拉试样

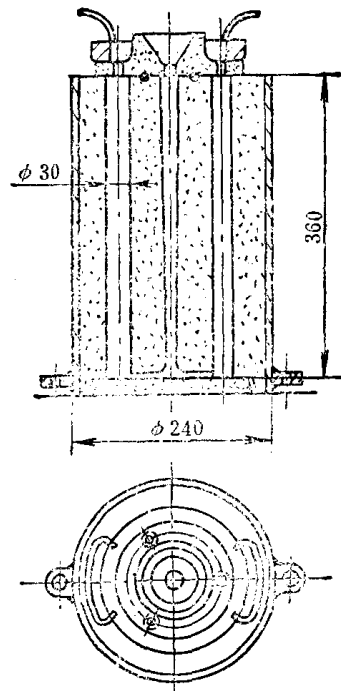


图1-3 灰铸铁抗弯试样的制备

灰铸铁抗拉试样见图1-2, 其标记直径为20mm, 最小平行段长度为60mm。试样两端的形状尺寸可根据试验机夹紧装置确定。

灰铸铁若拟进行抗弯试验时, 抗弯试样直径一般为30mm, 长度不小于340mm (试验时支点中心距为300mm), 采用砂型立浇底注的方法制取, 见图1-3。

表1-3 灰铸铁的分级及单铸试样的抗拉强度

牌 号	抗拉强度 $\sigma_b \geq$		牌 号	抗拉强度 $\sigma_b \geq$	
	N/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>		N/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>
HT 100	100	(10.2)	HT 250	250	(25.5)
HT 150	150	(15.3)	HT 300	300	(30.6)
HT 200	200	(20.4)	HT 350	350	(35.7)

表1-4 灰铸铁附铸试样的抗拉强度

铸铁牌号	铸件壁厚 (mm)		抗拉强度 $\sigma_b \geq$ (N/mm <sup>2</sup> )				铸 件 (仅供参考)
			I 型附铸试样		II 型附铸试样		
	>	≤	φ30mm	φ50mm	φ30mm	φ50mm	
HT150	20	40	130		(120)		120
	40	80	115	(115)	110		105
	80	150		105		100	90
	150	300		100		90	80
HT200	20	40	180		(170)		165
	40	80	160	(155)	150		145
	80	150		145		140	130
	150	300		135		130	120
HT250	20	40	220		(210)		205
	40	80	200	(190)	190		180
	80	150		180		170	165
	150	300		165		160	150
HT300	20	40	260		(250)		245
	40	80	235	(230)	225		215
	80	150		210		200	195
	150	300		195		185	180
HT350	20	40	300		(290)		285
	40	80	270	(265)	260		255
	80	150		240		230	225
	150	300		215		210	205

注: 表中括弧内的抗拉强度值仅适用于铸件壁厚大于试样直径时。



## § 1-2 铸铁的结晶

铸铁的机械性能和它的金相组织直接有关。所以要想提高铸铁的机械性能，就必须深刻地了解铸铁的组织是怎样形成的，也就是要认真研究铸铁的结晶过程。

### 一、碳在铸铁中的存在形式

碳在铸铁中的存在形式，主要有三种：

#### (一) 碳以溶解状态存在

碳能溶解在铁水和固溶体中。在铁水中，碳的溶解度较大。凝固后，奥氏体中碳的溶解度在共晶温度 $1145^{\circ}\text{C}$ 时为 $2.08\%$ ；温度下降到 $723^{\circ}\text{C}$ 时溶解度减低到 $0.68\%$ 左右，当奥氏体转变为铁素体后，碳的溶解度剧烈下降，在 $723^{\circ}\text{C}$ 时铁素体中最大溶解度也只有 $0.0218\%$ ，温度继续下降，溶解度就更低。

在铸铁冷却和相变过程中，只要含碳量超过了碳的溶解度，不论在液态还是固态，都将析出高碳相。由于结晶条件不同，高碳相可能以结晶碳的形式析出，形成石墨；也有可能以化合碳的形式析出，形成渗碳体。

这两种高碳相在结晶特点和性能上差别是很大的。

#### (二) 碳以结晶状态（石墨）存在

石墨是一种结晶状态的碳。石墨的晶格属六方晶格，见图1-4。每层基面上，碳原子排列成正六方形，原子间距离为 $1.42\text{Å}$ ，每个原子与相邻的三个原子由共价键牢固地连接在一起，其结合能为 $290\sim 330\text{kJ/mol}$ ，基面用(0001)表示。相邻两层基面之间的距离较大，各层之间原子由比较弱的范德瓦耳力联系着，结合能只有 $16.7\text{kJ/mol}$ ，所以石墨晶具有较强的各向异性，机械性能很低。

铸铁中的石墨，实际并非纯碳。据实验，石墨中尚溶解有极少量的铁及其他一些元素。铸铁中的石墨是分散度较大的片状结晶。在一定的结晶条件下，如结晶时冷却较慢，铸铁中促进石墨化的元素含量较多时，铸铁中的碳就全部和大部分以石墨的形式存在，

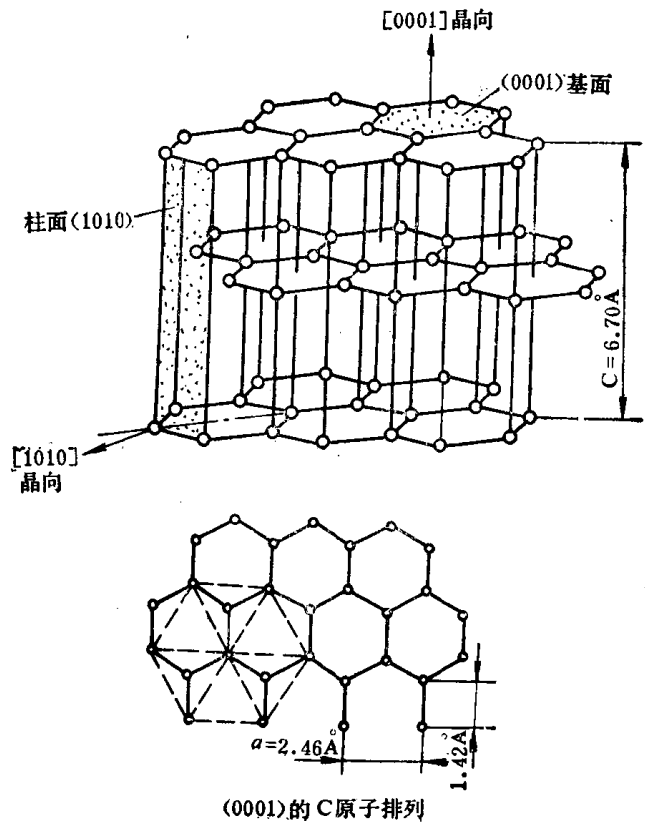


图1-4 石墨晶格示意图

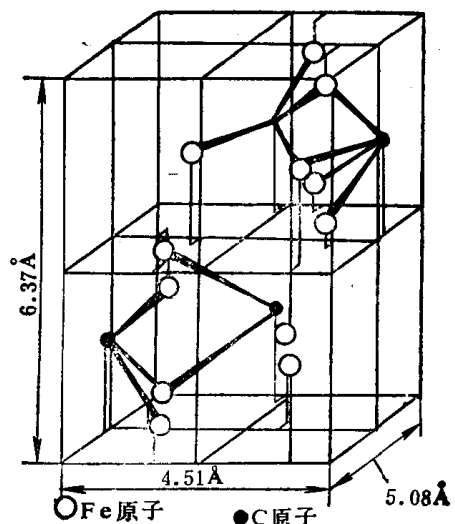


图1-5 渗碳体晶格示意图