

铸 铁

上海机械学院铸造教研组编

上海人民机械出版

(上海, 绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 320,000

1975年12月第1版 1975年12月第1次印刷

统一书号: 15171·208 定价: 0.96 元

目 录

绪 言	1
第一章 灰铸铁	3
第一节 灰铸铁的机械性能	3
一、灰铸铁的牌号	3
二、灰铸铁的机械性能特点	5
三、金属基体对灰铸铁机械性能的影响	5
四、石墨对灰铸铁机械性能的影响	6
第二节 灰铸铁的结晶	8
一、铁-碳双重状态图	8
二、灰铸铁的一次结晶	10
三、灰铸铁的二次结晶	13
四、灰铸铁中石墨的分级	14
第三节 影响铸铁组织形成的主要因素	16
一、化学成分对铸铁组织的影响	16
二、冷却速度对铸铁组织的影响	19
三、过热和静置对铸铁组织的影响	21
第四节 灰铸铁的机械性能与化学成分和冷却速度的关系	21
一、共晶度与强度、硬度的关系	22
二、灰铸铁的强度、硬度与碳硅含量和铸件壁厚的关系	23
三、弹性系数与石墨碳量的关系	24
四、灰铸铁的机械性能与锰、磷含量的关系	24
第五节 灰铸铁的铸造性能	25
一、灰铸铁的流动性	25
二、灰铸铁的收缩	26
三、灰铸铁的铸造应力	28
第六节 灰铸铁的热处理	29
一、消除内应力退火	29
二、改变硬度热处理	30
第七节 孕育铸铁	31
一、孕育铸铁的化学成分	31
二、孕育剂和孕育处理	31
三、孕育铸铁的生产控制	32
四、孕育铸铁的性能特点和应用范围	33
五、孕育理论概述	34
第八节 稀土灰铸铁	34
一、原铁水的化学成分	35
二、稀土灰铸铁的处理工艺	35
三、稀土灰铸铁的性能特点	36

第二章 球墨铸铁	37
第一节 球墨铸铁的牌号和性能	37
一、球墨铸铁的牌号	37
二、球墨铸铁的机械性能	38
三、球墨铸铁的耐磨、耐热与耐蚀性能	39
第二节 球墨铸铁的化学成分	40
一、碳和硅	40
二、锰	40
三、磷	40
四、硫	40
第三节 球化剂	41
一、镁	41
二、稀土合金	41
三、稀土硅铁镁合金	42
四、其他球化剂	44
第四节 球化处理与孕育处理	45
一、球化处理方法	45
二、球化剂的加入量	47
三、球墨铸铁的孕育处理	47
第五节 球墨铸铁的质量检验	49
一、石墨球化情况的炉前检验	49
二、机械性能与金相组织检验	50
三、化学成分检验	50
第六节 球墨铸铁的凝固特点与铸造性能	51
一、球墨铸铁的凝固特点	51
二、球墨铸铁的铸造性能	53
第七节 合金球墨铸铁	54
一、稀土镁铜-钼系球墨铸铁	54
二、稀土镁锡球墨铸铁	55
三、稀土镁钨球墨铸铁	56
四、稀土镁钒钛球墨铸铁	56
五、稀土镁中锰球墨铸铁	56
六、稀土镁硅球墨铸铁	57
第八节 球墨铸铁的热处理	58
一、石墨化退火	58
二、正火	58
三、等温淬火	60
四、调质处理	62
第九节 铸态球墨铸铁	64
一、铸态高韧性球墨铸铁	64
二、铸态珠光体球墨铸铁	65
第十节 球墨铸铁的常见缺陷和防止方法	66
一、皮下气孔	66
二、缩松	67
三、夹渣	67

四、石墨飘浮	67
五、球化不良	68
第十一节 石墨球化理论概述	69
一、石墨的球化现象	69
二、气泡理论	70
三、螺旋位错和吸附理论	71
第三章 可锻铸铁	72
第一节 可锻铸铁的牌号和用途	72
一、可锻铸铁的牌号和性能	72
二、可锻铸铁的特点和用途	73
第二节 白口铸件的生产	74
一、化学成分的选择	74
二、孕育处理	75
三、可锻铸铁的熔炼和铸造工艺特点	77
第三节 白口铸件的热处理	77
一、铁素体可锻铸铁的退火	80
二、珠光体可锻铸铁的退火	81
三、可锻铸铁的退火工艺	82
四、固态石墨化过程的基本原理	83
第四节 可锻铸铁的其他生产方法	85
一、白心可锻铸铁	85
二、高硫球墨可锻铸铁	85
三、铸态可锻铸铁	86
四、合金可锻铸铁	87
第五节 可锻铸铁的常见缺陷和防止方法	88
一、回火脆性	88
二、灰口	89
三、缩松与枝状疏松	90
四、裂纹	90
第四章 特殊性能铸铁	91
第一节 耐磨铸铁	91
一、减磨铸铁	91
二、耐磨铸铁	95
第二节 耐热铸铁	97
一、铸铁的热损坏和提高耐热性的途径	97
二、高硅耐热铸铁	97
三、高铝耐热铸铁	98
四、铝硅耐热铸铁	98
五、含铬耐热铸铁	99
第三节 耐蚀铸铁	99
一、铸铁的腐蚀和提高耐蚀性的途径	100
二、高硅耐蚀铸铁	100
三、高铝耐蚀铸铁	102
四、其他耐蚀铸铁	102

第五章 冲天炉熔炼	103
第一节 冲天炉的构造和加工工艺.....	104
一、冲天炉的结构类型.....	104
二、直筒型冲天炉的结构.....	105
三、曲线炉膛冲天炉的结构.....	108
四、冲天炉的操作工艺.....	112
第二节 冲天炉的基本原理.....	115
一、冲天炉工作的一般过程.....	115
二、冲天炉内底焦的燃烧.....	116
三、冲天炉内炉气的分布.....	118
四、冲天炉内金属炉料的预热、熔化和铁水的过热.....	119
第三节 影响冲天炉铁水温度的主要因素.....	121
一、送风对铁水温度的影响.....	121
二、焦炭对铁水温度的影响.....	125
三、金属炉料对铁水温度的影响.....	127
四、熔炼操作对铁水温度的影响.....	127
五、冲天炉结构对铁水温度的影响.....	128
六、冲天炉的网形图.....	129
第四节 新型冲天炉.....	130
一、新型冲天炉的炉型.....	130
二、新型冲天炉曲线炉型尺寸的表示方法.....	134
三、新型冲天炉的风口.....	134
四、新型冲天炉的使用效果.....	137
五、新型冲天炉的应用实例.....	139
六、新型冲天炉炉型尺寸的系列化.....	139
七、新型冲天炉的其他结构形式.....	139
第五节 冲天炉熔炼中化学成分的变化.....	151
一、含碳量的变化.....	151
二、硅、锰和铁的氧化烧损.....	153
三、含硫量的变化.....	155
四、含磷量的变化.....	158
第六节 冲天炉的配料计算.....	158
一、配料计算的原始资料.....	158
二、配料计算.....	159
第七节 冲天炉熔炼控制.....	162
一、冲天炉操作参数的选择与计算.....	162
二、冲天炉熔炼的控制.....	164
三、冲天炉熔炼中的故障及其防止方法.....	167
第八节 低碳铸铁的熔炼特点.....	169
一、低碳铸铁的熔炼特点.....	169
二、节约废钢的主要措施.....	170
第九节 煤粉化铁.....	171
一、煤粉化铁炉的结构.....	172
二、煤粉化铁炉的操作.....	174
三、煤粉化铁炉的工作特点.....	175

第十节 冲天炉用鼓风机	176
一、离心式鼓风机	176
二、罗茨式鼓风机	178
三、叶氏鼓风机	179
四、鼓风机功率消耗的计算	179
第十一节 冲天炉的测试	180
一、温度测量	180
二、压力测量	184
三、风量测量	185
四、炉气分析	187
五、炉料料面测定	190
六、前炉内铁水液面测定	191
附 录	192
一、各类铁铸件标准	192
二、生铁锭的化学成分	195
三、铁合金的化学成分	197
四、铁合金比重、堆比重及熔点	201
五、元素的物理性质	202
六、燃料及熔剂	205
七、冲天炉用鼓风机	207
八、耐火材料与绝热材料	208
九、各种硬度值的对照	209

绪 言

铸铁是最常用的铸造材料,被广泛应用于机械制造、冶金矿山、石油化工、交通运输、基本建设和国防工业等部门。在各类机械中,铸铁件约占机器重量的45~90%,在机床和重型机械中,则要占机器重量的85~90%。所以,学习和研究铸铁技术,对于铸造生产更好地为社会主义革命和社会主义建设服务,是很有意义的。

伟大领袖毛主席指出:“中国是世界文明发达最早的国家之一”。我国是世界冶铸技术的发源地。早在春秋时期,我国的铸铁技术就已有有了很大的发展。公元前513年,晋国为了从法律上限制奴隶主贵族,用一种名叫“鞴”的特制皮囊,以人力鼓风炼铁,将“刑书”铸在一个大铁鼎上,叫作“铸刑鼎”。它打击了奴隶主贵族及其政治代表孔丘,同时也促进了铸铁技术的发展。到了战国时期,炼铁规模不断扩大,发展到能用多个“鞴”同时向炉内鼓风炼铁;1953~1957年间出土的战国时期的犁铧铁范(金属型)和铁铲表明,那时我国不仅有白口铸铁件,还有由白口铁退火而得的黑心可锻铸铁件。公元前119年,西汉武帝刘彻在法家代表人物桑弘羊的协助下,宣布了“盐铁官营”政策,促进了我国历史上铁器的第二次大发展。据《汉书·贡禹传》记载,为了铸钱,官营的采矿和炼铁业“一岁功十万人已上”。河南巩县铁沟西汉炼铁遗址,一处面积就达二万一千六百平方米,可见当时炼铁规模之大。在西汉时期,许多地区逐渐用煤代替一部分木炭炼铁,并出现了竖炉结构,采用了多管鼓风,进一步提高了铸铁技术。而在欧洲,铸铁技术大约是在十一至十二世纪由我国传入的;至于可锻铸铁,直到公元1722年才在法国出现。由此可见,在世界冶铸技术史上,我国劳动人民曾经写下了光辉的篇章,作出了卓越的贡献。这也是当时法家进步、革新的思想政治路线促进的结果。后来,正是由于其对立面儒家反动的思想政治路线在封建社会中越来越占统治地位,起着阻碍和破坏的作用,致使我国的铸铁技术长期处于发展迟缓状态。可锻铸铁的生产技术逐步衰落失传;炼铁炉和熔铁炉合为一体的状况持续了一千多年,直到明朝才逐步分开发展。明朝宋应星,敢于冲破儒家路线的束缚,打破“述而不作,信而好古”的教条,写出了总结我国古代科学技术,其中包括冶铸等工艺的著作《天工开物》,对铸铁技术的发展起了促进作用。

解放前,在“三座大山”的残酷压迫下,我国熔炼铸铁所用的炉子只是一些容量很小的苏炉、搀炉和三节炉,几乎没有冲天炉。那时,只能生产抗拉强度在18公斤/毫米²以下的低强度铸铁,用于制作简单的修配件。为数很少的可锻铸铁,其退火周期竟长达七天以上。这是黑暗的旧社会造成的恶果,也是反动统治阶级尊孔复古、崇洋媚外的必然结果。

“革命就是解放生产力,革命就是促进生产力的发展”。伟大领袖毛主席领导的中国人民革命的胜利,打破了旧的生产关系,解放了全国人民,为铸铁生产的发展开辟了广阔的途径。1949年,我国开始生产孕育铸铁,把铸铁的强度提高到20公斤/毫米²以上。1950年,我国开始试制球墨铸铁,并于1951年投入了生产。1952年,在上海诞生了我国自行设计和装备的第一个机械化铸铁车间。在大跃进的年代里,我国铸造工人创造了独具风格的多宝

冲天炉,试制成功了高硫球墨可锻铸铁,并进而推广了可锻铸铁快速退火。我国的铸铁生产获得了蓬勃的发展。伟大的无产阶级文化大革命运动粉碎了刘少奇、林彪的反革命修正主义路线,进一步焕发了广大工人群众的革命积极性。在“独立自主、自力更生”方针的指引下,我国铸造工人立足于国内资源,发展和创造了高强度、耐热、耐磨和耐腐蚀等各类铸铁,球墨铸铁的最高抗拉强度可达120公斤/毫米²以上,可锻铸铁的最短退火周期只有二十多小时,并且试验成功了新型冲天炉、煤粉化铁和油炉化铁,发展了电炉熔炼铸铁,修订了各类铸铁件的标准,进一步提高了铸铁生产的机械化程度,广泛开展了有关铸铁方面的群众性的科学实验。

铸铁发展的历史表明,阶级斗争、生产斗争和科学实验是推动铸铁发展的动力。因此,学习和研究铸铁这门技术,必须紧密联系三大革命运动的实践,坚持前进,坚持革新,自觉贯彻执行毛主席的革命路线,为多快好省地发展我国铸铁工业服务。

铸铁的种类很多,按断口颜色的不同,可分为灰口铸铁、白口铸铁和麻口铸铁;按强度的不同,可分为低强度铸铁和高强度铸铁;按化学成分的不同,可分为普通铸铁和合金铸铁;按生产方法和组织性能的不同,可分为普通灰铸铁、孕育铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和特殊性能铸铁。各类铸铁的使用性能、铸造性能、生产工艺和熔炼方法虽然互有差别,但是,它们都遵循着各类铸铁所共有的一些基本规律。毛主席说:“每一个事物内部不但包含了矛盾的特殊性,而且包含了矛盾的普遍性,普遍性即存在于特殊性之中”。所以,在教学实践中,应该结合典型产品,深入学习一种或二种铸铁及其熔炼方法,从中找出规律性的东西,以点带面,触类旁通,着重于提高分析问题和解决问题的能力。

第一章 灰 铸 铁

灰铸铁是应用最为广泛的一种铸铁。在各类铸铁件的总产量中,灰铸铁件要占 80% 以上。灰铸铁的铸造性能、切削性能、耐磨性能和吸振性能都优于其他各类铸铁,而且生产方便,成品率高,成本低。因此,在发展工业生产中,灰铸铁有着比较重要的作用。本章主要讨论普通灰铸铁、孕育铸铁和稀土灰铸铁,阐述灰铸铁的性能与其化学成分和金相组织的关系,讨论灰铸铁的铸造性能和生产方法,为多快好省地生产灰铸铁件提供基本知识,也为学习其他各类铸铁打下基础。

第一节 灰铸铁的机械性能

灰铸铁的机械性能是生产合格灰铸铁件所必须保证的基本指标。本节在介绍灰铸铁牌号的基础上,讨论灰铸铁的机械性能特点与其金相组织的关系,以根据性能的要求选定合适的组织。

一、灰铸铁的牌号

1. 灰铸铁的牌号分级

灰铸铁的牌号是根据生产实践经验和使用要求制订出来的。它是统一生产和使用灰铸铁的依据,也是灰铸铁机械性能的概括。我国 1967 年制订的灰铸铁件的国家标准 (GB976-67) 见附录一,附录中还列举了这些铸铁的主要用途。

灰铸铁的代号为“HT”,这是“灰铁”二字汉语拼音的第一个字母。在 1967 年制订的灰铸铁国家标准中,将灰铸铁分为七个牌号,如表 1 所示。为了比较对照,表中还列出了 1962

灰铸铁的牌号分级

表 1

国家标准 (GB976-67)	一机部 1962 年标准 (JB297-62)
HT10-26	HT00
HT15-33	HT12-28
HT20-40	HT15-32
HT25-47	HT18-36
HT30-54	HT21-40
HT35-61	HT24-44
HT40-63	HT28-48
	HT32-52
	HT35-56
	HT38-60

年第一机械工业部颁布的标准 (JB297-62)。每个牌号“HT”后的第一组数字代表最低抗拉强度 (公斤/毫米²), 第二组数字表示最低抗弯强度 (公斤/毫米²)。目前, 我国有些工厂还在使用 1962 年制订的一机部标准。为了贯彻执行国家标准, 必须进一步做好新标准的推广工作。

2. 灰铸铁机械性能试验方法

灰铸铁机械性能数据与试验方法有密切关系。试验条件不同, 所得数据也会随之而异。根据国家标准规定, 灰铸铁机械性能试验用的试棒毛坯, 用干型以立浇底注方式制取。试棒直径视铸件的主要壁厚而定, 如表 2 所示 (详见附录一)。

表 2

铸件主要壁厚 (毫米)	<8	>8~15	>15~30	>30~50	>50
试棒毛坯直径 (毫米)	13	20	30	45	60

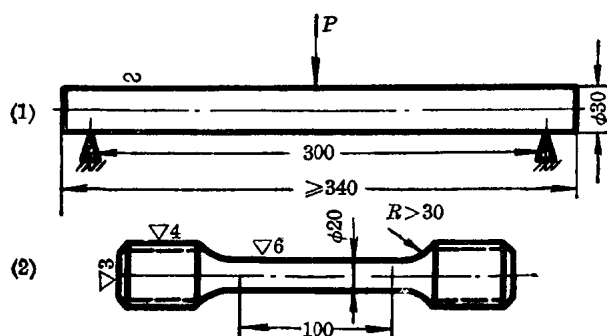


图 1 灰铸铁机械性能试样尺寸实例

(1) 抗弯试样; (2) 抗拉试样

抗弯试样直接用毛坯试棒。直径为 30 毫米的试棒尺寸如图 1(1) 所示。根据实测试样直径 d (毫米) 和试样弯断时的载荷 P (公斤), 可按下式算得抗弯强度 σ_w :

$$\sigma_w = \frac{8l}{\pi d^3} \cdot P \text{ 公斤/毫米}^2 \quad (1)$$

式中: l ——两支点间距离 (毫米)。

在作抗弯试验时, 可一并测出挠度 f (毫米) 的大小。

抗拉试样较为常用的尺寸如图 1(2) 所示。根据拉断时的载荷 P (公斤) 和实测试样直径 d (毫米), 可求得抗拉强度 σ_b :

$$\sigma_b = \frac{P}{F} = \frac{4P}{\pi d^2} \text{ 公斤/毫米}^2 \quad (2)$$

测定抗拉试验前后标距的大小, 可求出延伸率 δ :

$$\delta = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: l_0 ——试样原标距长度 (毫米);

l ——试样拉断后标距长度 (毫米)。

灰铸铁的延伸率很小, 一般不作测定。

关于灰铸铁件在常温静力条件下机械性能的测定, 应按照国家标准《灰铁铸件机械性能试验方法》(GB977-67) 执行。

二、灰铸铁的机械性能特点

“有比较才能鉴别。”与铸造碳钢相比，灰铸铁的机械性能具有如下三个显著的特点：

1. 强度特性较差

如表 3 所示，灰铸铁的抗拉强度、塑性、韧性和弹性都低于铸钢。

表 3

性能指标	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	延伸率 δ (%)	冲击韧性 a_k (公斤·米/厘米 ²)	弹性系数 E (公斤/毫米 ²)
铸造碳钢	40~60	20~30	2.5~5.0	20000
灰 铸 铁	10~40	0~0.5	0~0.8	7000~16000

2. 切口敏感性低

表 4 列出了某种灰铸铁件与铸钢件的切口作用系数的比较。由表可知，灰铸铁的抗弯疲劳强度不受切口的影响，故其作用系数为 1；而铸钢的切口作用系数则为 1.5，也就是当有切口时，其抗弯疲劳强度显著下降，只有无切口时的 67.5%。这说明虽然钢的性能优于灰铸铁，但在有切口存在时，它的性能就得不到充分发挥。

表 4

材 料	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	抗弯疲劳强度 σ'_w (公斤/毫米 ²)		切口作用系数 $\beta = \frac{\sigma'_w(\text{无切口})}{\sigma'_w(\text{有切口})}$
		无 切 口	有 切 口	
灰 铸 铁	20	9	9	1
铸 钢	44	23	15.5	1.5

3. 吸振性和耐磨性好

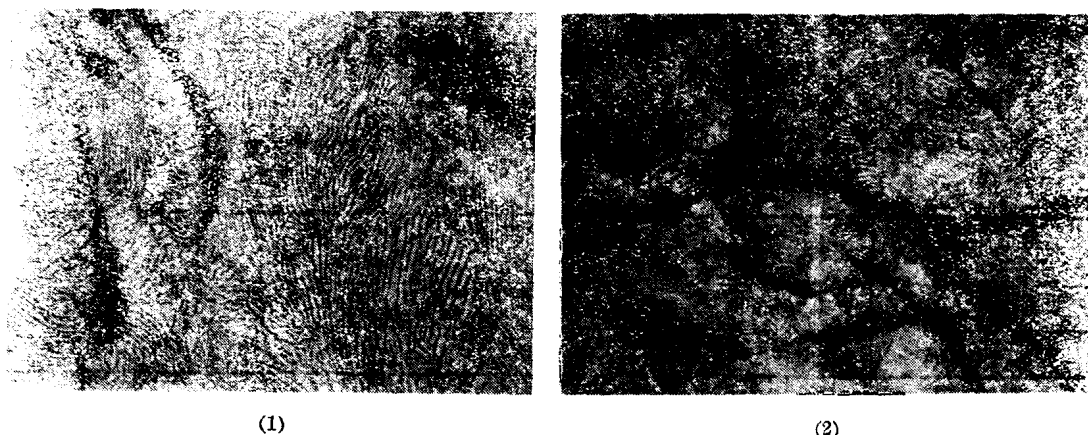
灰铸铁被广泛用于铸造机床床身和各类机器的机体等零件，其主要原因之一，是因为它具有良好的吸收振动的能力和耐摩擦的性能。

灰铸铁为什么会具有这些性能特点呢？毛主席说：“一切客观事物本来是互相联系的和具有内部规律的”。灰铸铁的这些性能特点是互相联系的，是由它的金相组织特点所决定的。由金属学的基本知识可知，灰铸铁的金相组织主要是金属基体和石墨。下面，分别讨论它们对机械性能的影响。

三、金属基体对灰铸铁机械性能的影响

所谓基体，系指材料的基本组成部分。含有非金属夹杂物（例如石墨等）的金属材料，其基本的金属部分则称为金属基体。灰铸铁的金属基体有三种类型：珠光体，铁素体，珠光体和铁素体的复合。普通灰铸铁的金属基体以珠光体为主，并含有少量铁素体；高强度灰铸铁则主要是珠光体基体；属于铁素体基体的灰铸铁主要是高硅铸铁。

铁素体是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶体，亦称“ α -固溶体”，因其含碳量极低，性能近于纯铁，故又称为纯铁体。铁素体的性能极软，强度低而塑性、韧性高。珠光体是铁素体与渗碳体成层片状相间排列的组织。由于渗碳体性硬而脆，所以珠光体具有较高的强度和硬度，而其塑性和韧性则比铁素体的低，而且，随着铁素体与渗碳体片间距的缩小，珠光体的强度、硬度和耐磨性也随之增加。图 2 所示为片间距不同的二种珠光体组织。图中的深黑色粗大条状物就是石墨。

图 2 灰铸铁的金相组织 $\times 500$

(1) 粗片状珠光体; (2) 细片状珠光体

金属基体是灰铸铁具有一系列机械性能的基础。为了说明金属基体对灰铸铁性能的影响,下面将基体的性能与普通灰铸铁的性能作一对照,见表 5。

表 5

基 体 组 织	基 本 性 能			普 通 灰 铸 铁 性 能		
	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	HB	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ (%)	HB
铁 素 体	25~30	40~50	80~100	10~12	<1	95~163
片状珠光体	80~85	20~25	160~230	18~20	<1	140~240

表 5 所列数据,随着试验条件的不同,会有一定的出入。但是,从这一比较中可以看出,以珠光体为基体的灰铸铁,其强度和硬度比以铁素体为基体的高。基体中珠光体的含量愈多,结构愈细密,则强度、硬度和耐磨性能愈好。而灰铸铁的塑性则随珠光体含量的增加,结构的粗大而下降。因此,金属基体主要影响灰铸铁的强度、硬度、耐磨性和塑性。从保证强度、硬度和耐磨性的观点来看,基体组织最好是细小的珠光体。高强度灰铸铁的基体就是属于这种类型的。

从表 5 还可以看出,灰铸铁的硬度,由于硅溶解在基体中起强化作用,因此比纯铁碳合金的要高,而其强度与延伸率则都小于基体,这是金属基体被石墨削弱

的结果,削弱得愈厉害,强度下降得愈多。因此,灰铸铁的机械性能实际上就是被石墨削弱了的金属基体的性能。从这个意义上说,灰铸铁的强度特性主要取决于石墨。

四、石墨对灰铸铁机械性能的影响

石墨在铸铁中具有双重作用:缩减作用与切口作用;吸振作用与减磨作用。下面分别讨论这两种作用。

1. 石墨在铸铁中的缩减作用与切口作用

石墨的比重约为铸铁的 $1/3$, 体积约占铸铁的 $7\sim 10\%$, 其本身的抗拉强度在 2 公斤/毫米² 以下, 故其所在之处, 象孔洞一样, 缩小了铸铁的实际工作断面。如图 3 所示, 断面为 ab 的铸铁板, 当受拉

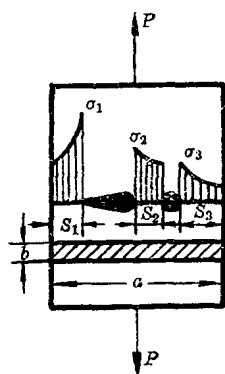


图 3 石墨的缩减作用与切口作用示意图

力 P 时, 其计算应力为:

$$\sigma_{\text{计算}} = \frac{P}{ab}$$

由于铸铁中含有石墨, 使断面缩小, 其实际应力 (不计石墨厚度) 为:

$$\sigma_{\text{实}} = \frac{P}{(S_1 + S_2 + S_3)b}; \quad \sigma_{\text{实}} > \sigma_{\text{计算}}$$

铸铁中由于石墨存在而使其工作断面缩小、实际应力增大的这种作用称为石墨的缩减作用。

此外, 在石墨边缘还形成切口, 造成应力集中, 产生应力峰 σ_1 , 其值远远超过 $\sigma_{\text{实}}$, 这就是石墨的切口作用。

为什么灰铸铁的强度特性较差, 而又比较脆呢? “事物发展的根本原因, ……在于事物内部的矛盾性。”由于石墨的缩减作用与切口作用, 灰铸铁在较小的外力作用下, 就已在内部产生了很大的实际应力和应力集中, 促使材料从局部损坏而迅速扩展, 形成脆性断裂。这就是灰铸铁强度较差而又较脆的内在原因。另一方面, 灰铸铁中由石墨所形成的很多切口, 使外来切口的作用相对减弱, 从而使切口敏感性下降。

石墨在铸铁中的缩减作用与切口作用, 是其对铸铁机械性能影响的一个普遍规律。但其作用的强弱则与石墨的特性有关。石墨数量增多, 缩减作用与切口作用均较大, 强度与塑性都很低。当石墨碳量一定时, 石墨片愈粗大, 则片数愈少, 切口作用就有所减小, 但易于在某些断面上造成强烈的缩减, 使强度显著下降; 石墨片过小, 则片数很多, 不仅切口作用显著加剧, 而且石墨片也易于互相连通, 加剧了缩减作用。因此, 石墨片以中等大小为宜, 其长度大致在 0.25~0.03 毫米范围内。当石墨碳量相同且石墨片尺寸一定时, 石墨片的不均匀分布和方向性分布, 都将使灰铸铁的强度和韧性显著下降。石墨的形状对铸铁性能的影响极大。例如, 同为珠光体基体的铸铁, 当石墨由片状变为球状时, 其抗拉强度将由 20~25 公斤/毫米²提高到 50~70 公斤/毫米²以上, 几乎与中碳钢相同。这是由于球状石墨的缩减作用与切口作用都较小, 从而使金属基体的作用得到了充分发挥的缘故。所以, 改善石墨的形状一直是提高铸铁性能的一条极其重要的途径。可锻铸铁和球墨铸铁就是在这个基础上, 作为“以铁代钢”的重要铸铁而迅速发展起来的。

2. 石墨在铸铁中的吸振作用与减磨作用

金属材料在弹性阶段, 在变动负荷的作用下, 将吸收的振动能量转变为热能的能力, 称为材料的吸振能力, 亦称周期韧性。

铸铁中的石墨对振动起缓冲作用, 阻止晶粒间振动能的传递并使之变为热能, 这就是石墨的吸振作用。一般说来, 具有粗片状石墨的低级铸铁, 由于石墨对晶粒的分割作用较大, 故其吸振能力比球墨铸铁好。因此, 对于承受振动较大的零件, 在强度许可的范围内, 往往优先采用低级铸铁。

石墨的减磨作用主要表现在储油与润滑两个方面。铸铁摩擦面上的石墨, 形成微小的凹穴, 起储油作用, 使摩擦副内的油膜易于保持。同时, 石墨本身又是一种良好的润滑剂, 脱落在摩擦面上, 起润滑作用。

必须指出, 铸铁的基体对耐磨性有很大的影响。因此, 石墨特性对铸铁耐磨性的影响, 必须与其对金属基体的削弱作用联系起来考虑。石墨数量过多, 虽然其储油与润滑作用均

有所提高,但由于基体削弱过多,仍然不利于耐磨。石墨片过大或过小,都将因缩减作用和切口作用的加剧而严重削弱基体,因而也不利于耐磨。石墨形状对铸铁耐磨性的影响,至今未有定论。在过去相当长的时期内,耐磨铸铁以灰铸铁为主。随着球墨铸铁的发展,它在耐磨零件上的应用也日趋广泛。此外,石墨的均匀分布也有利于铸铁耐磨性的提高。实际上,铸铁耐磨性的优劣,不仅与铸铁的特性有关,还和与其相摩擦的材料有关。正确选择摩擦副材料的配合,是提高耐磨性的一个十分重要的条件。

“对立统一规律是宇宙的根本规律。”灰铸铁的机械性能,来自于基体,受制于石墨,是基体性能与石墨作用对立的统一,而不是两者性能的代数和。石墨的大小、形状、数量和分布,基体的类型以及石墨和基体的不同配合,决定了灰铸铁的机械性能。表 6 列出了四种不同组织的铸铁的性能。

表 6

含 碳 量 (%)			石 墨 形 状	抗 拉 强 度 (公斤/毫米 ²)	抗 弯 强 度 (公斤/毫米 ²)	硬 度 (HB)
总 碳 量	化 合 碳	石 墨 碳				
3.36	0.36	3.00	大片状	18.9	30.3	136
	0.09	3.27	小片状	23.9	52.0	134
3.27	0.43	2.84	大片状	20.9	35.2	142
	0.14	3.13	小片状	30.1	60.2	136

表中化合碳含量的大小,表示基体中珠光体含量的多少。由表可知,大片状石墨铸铁的强度低于小片状的。当石墨形状和大小相同时,石墨碳量高的(亦即石墨数量多的)铸铁,比石墨碳量低的铸铁的强度要低。此外,当基体中化合碳量高时,也就是珠光体含量高时,铸铁的硬度也高(表中以第三种铸铁的硬度最高)。

因此,要保证灰铸铁的性能,必须首先要保证灰铸铁的金相组织。可是,灰铸铁的金相组织是怎样形成的?怎样才能获得所要求的组织?为了弄清这些问题,必须了解灰铸铁金相组织的形成过程,也就是灰铸铁的结晶。

第二节 灰铸铁的结晶

本节在介绍铁碳双重状态图的基础上,阐述铸铁的一次结晶和二次结晶及其影响因素,为控制组织、保证性能提供理论依据。

一、铁-碳双重状态图

铸铁是一种复杂的多元合金,除了铁和碳以外,还含有硅、锰、磷、硫等多种其他元素。为便于研究,一般将铸铁看作含碳量为 2% 以上的铁碳合金,然后再考虑其他因素加以修正。铁碳状态图是描绘铁碳合金结晶过程和组织转化规律的图形,亦称铁碳平衡图或铁碳相图。它是用实验方法测定的,对于分析铸铁的结晶过程和组织转化具有指导意义。有关这方面的基本知识已在《金属学》中讨论过,这里只是结合铸铁的特点,作一简要的复习。

实践表明,铸铁中的碳有时以化合状态(Fe_3C 即渗碳体)出现,有时则呈游离状态(石墨)存在。当铸铁中的碳完全以化合状态出现时,铸铁的断口白亮,呈放射状,性硬而脆,称

为白口铸铁或白口铁。当铸铁中的碳,除了少量组成珠光体的化合碳以外,全部以石墨的形式出现时,则铸铁的断口呈灰色,这就是灰口铸铁或灰铸铁。铸铁中的石墨究竟是怎样产生的?大致有二种见解:一种认为,石墨是由渗碳体分解而来的,白口铁经过高温退火而得可锻铸铁的事实,证实了这种看法;另一种则认为,石墨既可由渗碳体分解而来,又可直接从铁水和奥氏体中析出,在生产中经常出现的石墨飘浮现象,是石墨直接从铁水中析出的证明。按照后一种观点,铁碳合金的结晶过程和组织转化可以按铁-渗碳体或铁-石墨二种体系进行,与此相应的,就有二种状态图。铁碳双重状态图就是这二种状态图的迭合。

图4所示为铁碳双重状态图。图中实线表示铁-渗碳体体系,虚线表示铁-石墨体系,虚线与实线重合的线条都用实线表示,例如AC、JE、GS、GP、PQ等,这些线与高碳相(渗碳体或石墨)的存在状态无关,故两个体系合而为一。

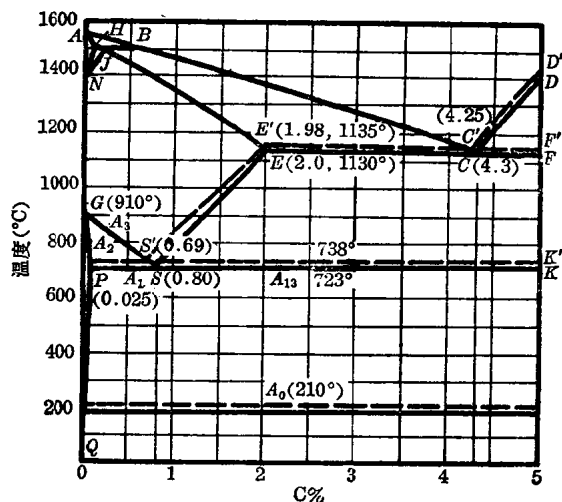
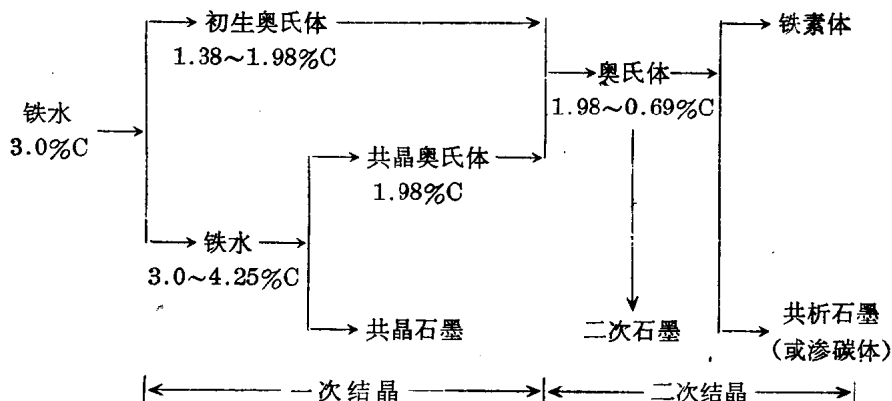


图4 铁-碳双重状态图

下面,以含碳3.0%的亚共晶灰铸铁为例,用铁碳双重状态图上的铁-石墨状态图,说明这种铸铁的结晶和组织转化过程。

含碳3%的铁水,冷至液相线后,首先析出奥氏体。随着初生奥氏体的析出,铁水的含碳量逐步提高至4.25%,从而进入了共晶转化,析出共晶石墨和共晶奥氏体。共晶转化后,奥氏体中碳的浓度按E'S'线逐渐下降,析出二次石墨。至奥氏体含碳量降至S'点,在S'K'线上开始共析转化。根据化学成分和冷却条件的不同,奥氏体分解为铁素体和石墨,或铁素体和渗碳体(即珠光体)。

上述转化过程可归纳如下:



如果这种转化按Fe-Fe₃C体系进行,则析出的高碳相是渗碳体而不是石墨,且奥氏体含碳量的变化范围也要作相应的改变。例如初生奥氏体的含碳量变化范围将为1.38~2.0%,而不是1.38~1.98%。

上述情况表明,铸铁的结晶过程是由两个互相连结的过程组成的:从初生奥氏体的析出

至共晶转化完毕的一次结晶；从共晶转化完毕至共析转化完毕的二次结晶。铸铁的一次结晶决定了石墨的特性，二次结晶决定了基体组织。因此，要控制铸铁的组织，就必须控制这两个结晶过程。

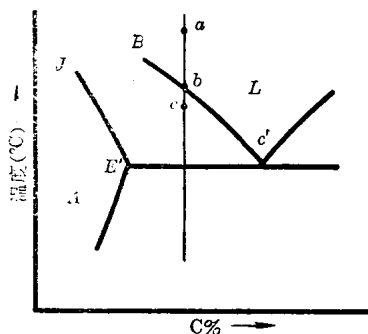
二、灰铸铁的一次结晶

灰铸铁的一次结晶，对于亚共晶铸铁来说，包括初生奥氏体的结晶和共晶转化二个阶段；对于过共晶灰铸铁来说，则包括初生石墨的结晶和共晶转化二个阶段。下面，以灰铸铁中最为常见的亚共晶灰铸铁为例说明灰铸铁的一次结晶。为简便计，采用下列符号：

A——奥氏体；	C_m ——渗碳体；
G——石墨；	P——珠光体；
F——铁素体；	L——铁水；
L/G ——铁水-石墨界面；	L/A ——铁水-奥氏体界面。

1. 初生奥氏体的结晶

初生奥氏体的结晶，与所有其他金属的结晶一样，由二个基本过程所组成：一是在液体金属中生成结晶核心，称为成核(生核或形核)；一是晶核长大成为晶体，称为成长或长大。



大。

如图5所示，成分为 a 的铁水，当其以极其缓慢的冷却速度冷至 b 点时，初生奥氏体将开始结晶。在液相线 BC 上， b 点的温度就是 a 成分铁水的平衡结晶温度。但在实际生产中，铁水是以一定的冷却速度进行冷却的，因此，结晶开始的实际温度 t_0 往往低于平衡结晶温度 t_b ，这两者的差值($t_b - t_0$)称为过冷度。冷却速度愈大，过冷度也愈大。

图5 初生奥氏体的结晶

设铁水过冷至 c 点开始结晶，此时，对于状态图上的平衡成分来说，铁水中的铁和碳都已经过饱和，因此，在冷却得最快的表面上生成了奥氏体(碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 内的固溶体)的晶核。随着铁水的进一步冷却，晶核逐步长大，其成长方向与散热方向相反，即热量由铁水向型壁发散，而晶核则由型壁向铁水中心长大。由于冷却速度较大，晶核沿各个方向的生长速度是不一致的，在棱角处因为散热快，生长也就快，所以先形成主干，然后长出分枝，由分枝再生分枝，逐步形成树枝状，称为“树枝晶”或“枝晶”，最后再充填枝晶间的空隙，完全凝固后成为晶粒和晶界的组织。奥氏体晶核生成的难易，与铁水的过热度、纯洁度和过冷度有关。过热度愈大，铁水愈纯洁，成核就愈困难，成核所需的过冷度也愈大。当过冷度增大时，生核率就大，也就是单位时间内在单位体积液体金属中所形成的晶核数目就多，所得晶粒就细小。外来质点对晶核生成的影响很大。当铁水中存在某些高熔点的质点时，它们往往可以作为结晶中心，显著地增加晶核数量，从而细化组织。奥氏体树枝晶的大小和形状，与铁水的冷却速度和化学成分有关。冷却速度愈大，树状晶愈小而薄，数量也愈多；化学成分愈近于共晶，从结晶开始至结晶完毕的凝固温度范围就愈小，树枝晶就不易发展，因此就小而少。这些原理与保证铸铁件的性能很有关系。例如，后面将要提到的孕育铸铁，就是选择碳硅含量低、凝固范围大的化学成分，在提高铁水过热度的基础上，通过孕育处理来增加外来核心，从而细化组织，使灰铸铁的强度和耐磨性得到了显著的提高。

初生奥氏体在结晶过程中，其含碳量沿 JE' 线变化，先析出的初生奥氏体的含碳量低，

后析出的含碳量高,最后析出的奥氏体的含碳量最高。因此,在初生奥氏体的中心与其外层之间存在着一个碳的浓度差 ΔC_A (见图6),外层含碳量高,中心含碳量低。另一方面,随着初生奥氏体的析出,铁水的含碳量沿着 BC' 线逐步增加。由于富铁相奥氏体的析出,在铁水与奥氏体的界面 (L/A 界面)上,铁水中碳的浓度最高,因而在铁水内部也存在着一个碳的浓度差 ΔC_L 。如图6所示,在 L/A 界面上,存在着一个碳浓度的高峰。碳在 L/A 界面上的浓度起伏,为在奥氏体周围生成石墨核心准备了条件。随着初生奥氏体结晶的告终,铁水转入了共晶转化。

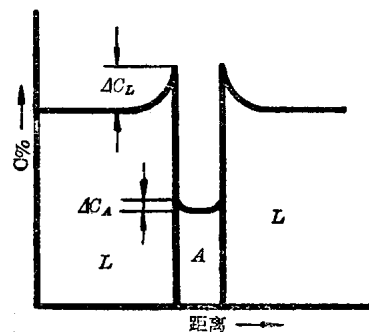


图6 铁水和奥氏体内碳浓度变化示意图

2. 灰铸铁的共晶转化

共晶转化是铸铁结晶过程中的一个关键性的环节,也是铸铁区别于钢的一个显著的标志。铸铁中的石墨特性,主要是由共晶转化过程决定的。因此,研究铸铁的共晶转化显得特别重要。

(1) 共晶石墨的析出: 如图7所示,共晶成分的铁水 e , 当冷却至 C' 点时,铁和碳皆处于饱和状态。铁的饱和线为 BC' , 碳的饱和线为 $D'C'$ 。此时,奥氏体与高碳相(石墨或渗碳体)有可能同时析出,但必须有一定的过冷度。设过冷至 x 点,则铁的饱和度为 xy , 碳的饱和度为 xz 。由此使奥氏体与高碳相进行结晶。如果 x 点在 EF 线以上 (EF 线为 $Fe-Fe_3C$ 状态图的共晶线,图7中未画出,可参阅图4),则共晶产物是奥氏体和石墨;如 x 在 EF 线以下,则高碳相通常是渗碳体,得白口铁。因为在过冷较大时,铁原子的扩散比较困难,而渗碳体的结构与铁比较接近,易于成核成长。

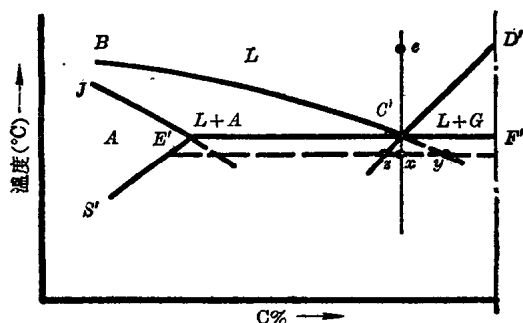


图7 灰铸铁的共晶转化

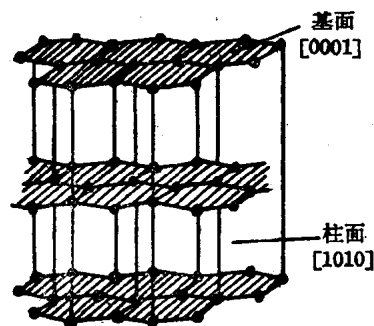


图8 石墨的结晶构造

研究表明,当共晶结晶形成奥氏体和石墨即生成灰口铁时,石墨通常是领先相,石墨核心首先析出,并且按片状生核和长大。石墨核心之所以首先析出,是由于碳原子间的结合力远比铁原子强,共晶铁水中的碳原子集团长大得快,易于成核的缘故。但是,由于铁水结构的不均衡性,在共晶转化中,奥氏体有时也会单独成核成长,由此而造成一些反常的组织。不过,从全局来看,石墨首先析出是灰铸铁共晶转化中比较普遍的现象。至于灰铸铁中的石墨为什么会按片状生核和长大,这还是一个没有完全解决的问题。一般认为,石墨呈片状成核长大是由石墨结构的异向性决定的。

石墨是六方晶格的晶体(图8),在六角环形基面(即 0001 面)上,每个碳原子与邻近三个碳原子以共价键结合,原子间距为 $1.42\text{\AA}$ 。这些碳原子间的结合力非常强,结合能为 79.6