

铸钢和铸造高温合金及其熔炼

傅恒志 主编

西北工业大学出版社

铸钢和铸造高温合金及其熔炼

傅 恒 志 主 编

西北工业大学出版社

内 容 简 介

本书比较全面地阐述了铸钢和铸造高温合金及其熔炼的基本问题。全书共分三篇十三章。第一篇和第二篇介绍铸造碳钢、铸造低合金钢、铸造不锈钢、铸造耐热钢和铸造镍基高温合金的成分、组织和性能间的关系,并着重阐述了冶金工艺参数对组织和性能的影响以及合金组织的控制。第三篇除了介绍电弧炉炼钢的原理和工艺要点外,着重阐述了感应电炉熔炼、真空感应电炉熔炼和电渣熔炼的原理和工艺要点及其对合金性能的影响。

本书可作为航空高等院校铸造专业的教材,也可供非航空高等院校铸造专业师生选用和从事冶金、铸造工作的工程技术人员参考。

铸钢和铸造高温合金及其熔炼

傅恒志 主编

责任编辑 于兴旺

*

西北工业大学出版社

陕西省新华书店发行

西北工业大学印刷厂印装

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 18 字数 443 千字

1985 年 7 月第一版 1985 年 7 月第一次印刷 印数 0001—5000 册

统一书号: 15433·009 定价 3.16 元

前 言

本书是根据航空高等院校铸造专业教学计划和《铸钢和铸造高温合金及其熔炼》课程教学大纲编写的。全书共三篇十三章，第一篇为铸钢，第二篇为铸造高温合金，第三篇为铸钢和铸造高温合金熔炼。本书主要讲述铸钢及铸造高温合金的成分、组织和性能间的关系以及熔铸工艺对合金组织和性能的影响，讲述各种熔炼方法（包括电弧炉、感应电炉、真空感应电炉和电渣炉）的原理和工艺特点。

本书供航空高等院校铸造专业教学使用，也可供非航空院校铸造专业教学和从事铸造工作的科技人员参考。

本书由西北工业大学傅恒志教授主编。第一篇的第一章、第二章和第三篇由史正兴编写，第一篇的第三章由刘忠元编写，第二篇由傅恒志编写。

本书在编写过程中，承西安交通大学周定远副教授审阅全稿，并提出了许多宝贵的修改意见；承西北工业大学商宝禄同志和南昌航空工业学院季玮同志参加编写大纲的讨论，并提出了不少建设性的意见；承西北工业大学学报编辑部蔺西亚同志精心绘制全书图稿。编者在此谨致热忱的谢意。

由于编者水平有限，实践经验不足，加之成稿时间仓促，书中难免有不少不当和错误之处，恳望读者批评指正。

编 者

1984年8月

目 录

第一篇 铸 钢

第一章 铸造碳素钢	1
§ 1-2 铸造碳素钢的分类和一般特性	1
§ 1-2 铸造碳素钢的机械性能	3
一 碳的影响.....	3
二 硅的影响.....	3
三 硫的影响.....	4
四 锰的影响.....	4
五 磷的影响.....	5
§ 1-3 铸造碳素钢的铸造性能	5
一 铸造碳素钢的流动性.....	6
二 铸造碳素钢的收缩与缩孔和缩松.....	8
三 碳素钢铸件的热裂.....	11
四 碳素钢铸件的冷裂.....	13
§ 1-4 铸造碳素钢的铸态组织缺陷	13
一 晶粒粗大.....	13
二 魏氏组织.....	14
三 表面脱碳组织.....	16
四 非金属夹杂物.....	17
第二章 铸造低合金钢	19
§ 2-1 概述	19
§ 2-1 锰系铸造低合金钢	19
一 单元锰铸造低合金钢.....	19
二 多元锰铸造低合金钢.....	20
§ 2-3 铬系铸造低合金钢	23
一 单元铬铸造低合金钢.....	23
二 多元铬铸造低合金钢.....	24
§ 2-4 铸造低合金钢的铸造性能	28
一 铸造低合金钢的铸造性能.....	28
二 铸造低合金钢的铸造工艺特点.....	29

§ 2-5 稀土元素在铸钢中的应用	29
一 稀土元素在钢中的作用	30
二 稀土元素对铸钢机械性能的影响	33
三 稀土元素对铸钢铸造性能的影响	33
第三章 铸造不锈钢和耐热钢	35
§ 3-1 铸造不锈钢	35
一 钢的电化学腐蚀及提高钢的抗蚀性途径	35
二 铸造不锈钢的化学成分、组织和分类	39
三 马氏体不锈钢	39
四 奥氏体不锈钢	46
五 铬锰氮不锈钢	52
六 马氏体沉淀硬化不锈钢	52
§ 3-2 铸造耐热钢	55
一 钢的化学腐蚀及提高钢的抗氧化性途径	55
二 铸造耐热钢	60
三 铸造热强钢	62
§ 3-3 不锈钢和耐热钢的熔铸工艺特点	69

第二篇 铸造高温合金

第四章 航空工业用铸造高温合金的发展	71
§ 4-1 航空发动机对高温合金的要求	71
§ 4-2 高温合金的发展	72
第五章 高温合金的相组成	85
§ 5-1 高温合金的基本相图	85
§ 5-2 高温合金中组成相的分类及结构特征	91
一 高温合金中的间隙相	91
二 高温合金中的金属间化合物	94
§ 5-3 高温合金中相的形成规律及对力学性能的影响	96
一 金属间化合物	96
二 间隙相	104
第六章 高温合金的强化原理	107
§ 6-1 高温合金的固溶强化	107
§ 6-2 高温合金的沉淀强化	115
§ 6-3 高温合金的晶界强化	120

第七章 高温合金的力学性能与组织的关系	129
§ 7-1 高温合金的瞬时和持久性能及抗蠕变能力与组织的关系	129
一 高温力学性能的基本特点	129
二 合金的高温瞬时和持久性能及抗蠕变能力与组织的关系	135
§ 7-2 高温合金的机械疲劳及热疲劳性能与组织的关系	139
一 机械疲劳性能与合金组织的一般关系	139
二 热疲劳性能与组织的关系	145
第八章 高温合金的铸造性能与组织控制	150
§ 8-1 高温合金的铸造性能及冶金工艺参数的影响	150
一 凝固特性与冶金工艺参数的影响	150
二 铸造性能与冶金工艺参数的关系	157
三 显微疏松与合金成分的关系	165
§ 8-2 定向凝固及单晶铸造	170
一 定向及单晶组织与力学性能的特点	172
二 定向结晶组织的控制	174
第九章 高温合金的相计算原理及应用	181
§ 9-1 拓扑密排相(TCP)对合金力学性能的影响	181
§ 9-2 电子空位理论与合金相的关系	182
§ 9-3 高温合金中的电子空位计算(PHACOMP).....	184
§ 9-4 相计算中存在的问题	187
一 过渡金属电子空位数确定中存在的问题	187
二 电子化合物及 σ 相的价键特性及其表征中存在的争论	189
§ 9-5 相计算方案的改进及新的计算方法	192
一 Barrows 和 Newkirk 的计算方案	192
二 新的预测 TCP 相方案的基本设想	195
三 新方案的计算步骤及计算结果	200

第三篇 铸钢和铸造高温合金的熔炼

第十章 电弧炉炼钢	204
§ 10-1 概述	204
§ 10-2 碱性电弧炉氧化法熔炼	205
一 扒补炉	206
二 装料	206
三 熔化期	206

四 氧化期.....	207
五 还原期.....	211
§ 10-3 碱性电弧炉不氧化法熔炼.....	218
一 炉料.....	219
二 装料.....	219
三 熔化.....	219
四 还原.....	219
§ 10-4 酸性电弧炉炼钢.....	220
一 概述.....	220
二 酸性电弧炉炼钢工艺特点.....	220
第十一章 感应电炉熔炼.....	223
§ 11-1 概述.....	223
§ 11-2 感应电炉的结构.....	225
一 变频装置.....	225
二 炉体.....	227
§ 11-3 感应电炉的熔炼工艺.....	228
一 打结坩埚.....	228
二 炉料和装料.....	229
三 熔化.....	231
四 脱氧.....	231
五 合金化及合金液温度的调整.....	231
六 出钢及浇注.....	232
§ 11-4 感应电炉熔炼实例.....	232
一 ZG45 的熔炼.....	232
二 ZG35CrMnSi 的熔炼.....	233
三 ZG1Cr18Ni9Ti 的熔炼.....	233
四 K12 合金的熔炼.....	234
第十二章 真空感应电炉熔炼.....	236
§ 12-1 真空感应熔炼原理.....	236
一 脱氧反应.....	236
二 去气作用.....	237
三 金属的蒸发.....	238
四 坩埚发应.....	238
§ 12-2 真空感应熔炼设备.....	240
一 真空感应电炉.....	240
二 真空泵.....	243
三 真空计.....	247

四 真空检漏	250
§ 12-3 真空感应熔炼工艺	251
一 坩埚制造	251
二 炉料准备	252
三 装料	252
四 熔化	252
五 精炼	253
六 合金化	253
七 浇注	254
§ 12-4 真空熔炼对高温合金铸造性能和机械性能的影响	255
一 真空熔炼对高温合金铸造性能的影响	255
二 真空熔炼对高温合金机械性能的影响	256
第十三章 电渣熔炼	257
§ 13-1 概述	257
§ 13-2 电渣熔炼设备	258
§ 13-3 电渣熔炼工艺过程	261
一 原材料的准备	261
二 电渣过程的建立	262
三 电渣熔炼过程中的几个现象	262
§ 13-4 电渣过程的电制度	264
一 电制度对电渣过程稳定性的影响	264
二 电制度对金属熔滴的影响	265
§ 13-5 熔渣	266
一 熔渣的作用	266
二 对熔渣的要求	266
三 常用渣系介绍	268
§ 13-6 电渣熔铸的冶金特点和铸件质量	269
一 合金元素的氧化和还原	269
二 有害元素的去除	270
三 非金属夹杂物的去除	271
四 气体的去除	272
五 电渣铸锭(件)的结晶组织特点	273
六 电渣钢和合金的机械性能	274
主要参考文献	275

第一篇 铸 钢

铸钢是一种重要的金属结构材料，它具有良好的综合机械性能和物理化学性能。与铸铁比较，铸钢具有较高的强度、塑性、韧性和良好的焊接性；如果往钢中加入某些合金元素，还可获得某些特殊性能，如耐磨、不锈、耐热、无磁等，这是铸铁所不及的。因此，铸钢在现代机械制造业中应用很广，如轧钢、锻压、运输、发电、矿山、石油、化工等设备中，许多零件的毛坯都是钢铸件；尤其是六十年代以来，由于熔铸工艺的发展和许多适用于铸造的新钢种的出现，使得各种机械中的许多零件，由锻钢件改为铸钢件，进行大量生产。在国防工业（如航空、舰船、兵器、原子能等）中，铸钢件的应用也很广泛，占有重要地位。

铸钢的种类很多，可按化学成分、金相组织、熔炼方法和用途分类。在生产中通常按化学成分和用途分类。按化学成分，铸钢可分为碳素钢和合金钢两类；按用途，铸钢可分为结构钢、工具钢、不锈钢、耐热钢、耐磨钢、磁钢等。

第一章 铸造碳素钢

§ 1—1 铸造碳素钢的分类和一般特性

铸造碳素钢具有较好的综合机械性能和铸造性能，而对原材料的要求不高，合金元素消耗少，成本低，熔炼和铸造工艺又易于掌握，因此在各工业部门应用很广。碳素铸钢件的产量约占全部钢铸件产量的 75~80%。

铸造碳素钢中除铁以外，还有碳、硅、锰、磷、硫等元素，其中碳含量的多少对钢的组织 and 性能影响最大，其它元素的含量在各种牌号的铸造碳素钢中基本不变，所以铸造碳素钢的分类是以含碳量为依据的。我国铸造碳素钢的牌号、成分和性能如表 1—1。

按对硫、磷含量的要求不同，每种牌号又分为 I、II、III 级，如表 1—2。

铸造碳素钢根据含碳量的不同，可分为低碳钢（ $<0.20\%C$ ）、中碳钢（ $0.20\sim0.50\%C$ ）和高碳钢（ $>0.50\%C$ ）。

低碳钢（ZG15）具有较高的塑性和韧性，但强度较低。这类钢通常要经渗碳处理，然后再进行淬火、回火，提高强度指标和耐磨性。它常用来制造凸轮等耐磨零件。由于其含碳量和含锰量较低，因而有较高的透磁性和相当低的功率损耗，故又常用于制造电动机座架、外

表 1-1 铸造碳素钢的牌号、成分和性能(GB979-67)

牌 号	化 学 成 分 %			机 械 性 能* (不 低 于)				
	C	Mn	Si	σ_b kgf/mm ²	σ_s kgf/mm ²	δ_5 %	Ψ %	a_k kgf·m/cm ²
ZG15	0.12	0.35	0.20	40	20	25	40	6.0
	~ 0.22	~ 0.65	~ 0.45					
ZG25	0.22	0.50	0.20	45	24	20	32	4.5
	~ 0.32	~ 0.80	~ 0.45					
ZG35	0.32	0.50	0.20	50	28	16	25	3.5
	~ 0.42	~ 0.80	~ 0.45					
ZG45	0.42	0.50	0.20	58	32	12	20	3.0
	~ 0.52	~ 0.80	~ 0.45					
ZG55	0.52	0.50	0.20	65	35	10	18	2.0
	~ 0.62	~ 0.80	~ 0.45					

* 经全退火后的机械性能。

表 1-2 碳素铸钢的质量级别 (GB979-67)

级 别	S% (≤)	P% (≤)
I (高级铸钢)	0.04	0.04
II (优质铸钢)	0.05	0.05
III (普通铸钢)	0.06	0.06

壳等一类电器零件。这类钢由于含碳量低，所以其铸造性能较差，由于熔点高，因而给熔炼、浇注和获得优质铸件带来很大困难；在同样浇注温度下，钢液的流动性差，易产生浇不足和形成疏松、气孔、非金属夹杂等缺陷；比较容易氧化；有较高的形成热裂倾向。因此，铸造生产中较少采用低碳钢。

中碳钢(ZG25、ZG35、ZG45)的铸造性能较低碳钢为好。有较低的熔点，较好的流动性，铸件中的气体和非金属夹杂物较少，抗热裂倾向的能力较强，易于获得成型铸件。但随着含碳量的增加，其导热性也随之降低，这将引起较大的铸造应力，易使铸件变形。中碳钢铸件都要经过热处理（退火、扩散退火、正火和回火等），以提高铸件的机械性能。中碳钢具有良好的强度、塑性和韧性的综合性能，它广泛用于要求承受一定载荷与冲击载荷的零件，如齿轮、连杆、机架、缸体等。

高碳钢(ZG55)具有较高的强度、硬度和耐磨性,但塑性较低,多用来制造冲击载荷不大的耐磨零件,如轧辊、模具等。高碳钢的铸造性能良好,但由于导热性差和较大的脆性,铸件有产生巨大应力而形成冷裂的危险。所以高碳钢铸件仅进行一般的退火处理,且加热和冷却时应缓慢进行。

§ 1—2 铸造碳素钢的机械性能

影响铸造碳素钢的机械性能的因素较多,主要有化学成分、熔铸工艺和热处理制度等。而钢的化学成分是决定其性能的最基本的、最主要的内在因素。改变化学成分可有效地改变钢的组织,从而改变其机械性能。下面我们着重讨论化学成分对铸造碳素钢机械性能影响的主要规律。

一、碳 的 影 响

碳是铸造碳素钢中的主要元素,对钢的基体组织起着决定性的作用。碳可以少量固溶于奥氏体和铁素体中,但钢中的碳主要以渗碳体(Fe_3C)形态存在。由表 1-1 和 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图可见,铸造碳素钢中碳的含量小于 0.6%,在亚共析钢范围内,其基体由铁素体和珠光体组成。随着钢中含碳量的增加,组织中珠光体的比例相应增加,因而在机械性能上表现为抗拉强度、屈服强度和硬度相应提高,塑性和韧性相应降低,如图 1-1 所示。

从图 1-1 中可以看出,随着碳量的增加,抗拉强度比屈服强度提高要快。可是含碳量超过 0.5%后,屈服强度不再提高,反而有所下降,塑性和韧性显著降低,硬度大为提高,钢的切削加工性恶化。因此,一般常用的碳钢铸件含碳量的上限不超过 0.5%。对于需调质的碳钢铸件(一般为形状简单的小件),含碳量一般不超过 0.45%,否则容易产生淬火裂纹。

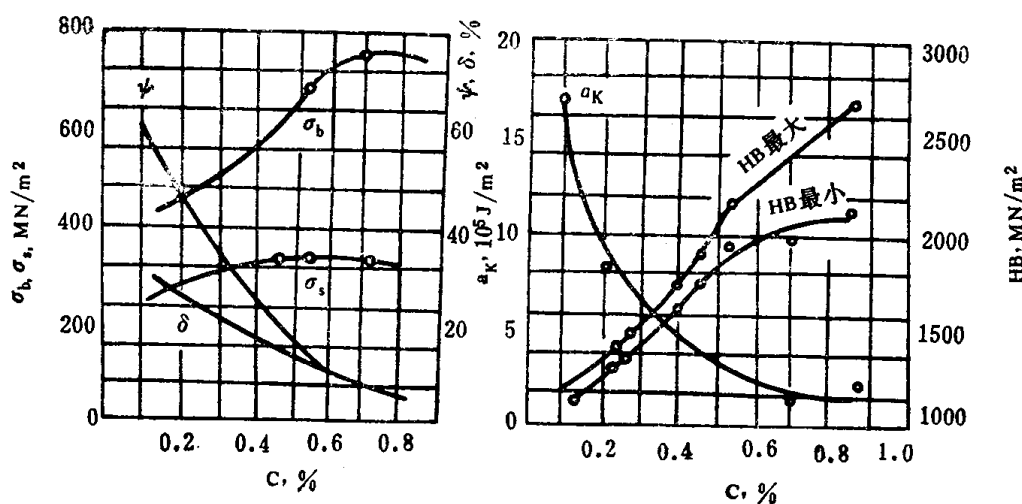


图 1-1 碳对碳钢(退火状态)机械性能的影响

二、硅 的 影 响

硅在钢中是有益的元素,它的主要作用是使钢液脱氧和镇静。低于规格硅量的钢,在浇注后易产生气孔和针孔等缺陷。铸造碳素钢中硅含量为 0.20~0.45%,大部分溶于铁素体

中，少量以非金属夹杂形式存在。固溶于铁素体中的硅也起强化基体的作用，但因量少，且硅在铁素体中的溶解度又大(18%)，所以对钢的机械性能影响不大(如图 1-2)。

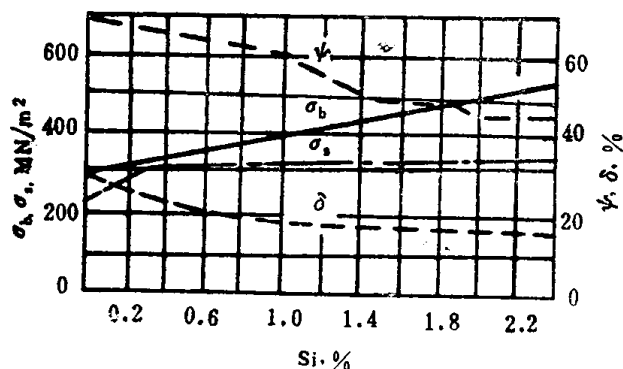


图 1-2 硅对碳钢机械性能的影响

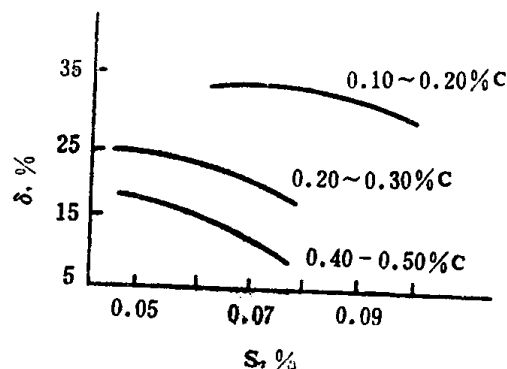


图 1-3 硫对不同含碳量钢的塑性的影响

三、硫的影响

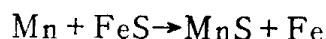
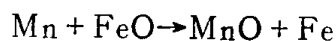
硫是钢中的有害杂质。当钢中含锰量低时，硫在钢中主要以 FeS 形态存在。当钢液冷凝时，FeS 与 Fe 形成 Fe-FeS 低熔点(985℃)共晶体，聚集于晶界上，使钢呈热脆性，显著地恶化了机械性能。当钢液脱氧不良，钢中 FeO 含量高时，则形成熔点更低(940℃)的三元共晶体(Fe-FeS-FeO)，危害性更大。

硫对钢的常温塑性的影响随着钢中碳含量的增加而加剧，如图 1-3 所示。

钢中硫量越少越好，不过，从实际生产条件和冶炼工艺上来看完全去掉硫是不容易的，所以根据零件的受力情况来规定硫的含量是合理的，如表 1-2 所列，把硫的含量分为三个级别。

四、锰的影响

在铸造碳素钢中，锰的主要作用是脱氧和中和硫的有害的影响，防止铸件产生热裂等缺陷。锰与钢中的氧和硫都有较大的亲和力，易形成 MnO 和 MnS，



MnS 与 FeS 又易结合成复合硫化物 $m(\text{MnS}) \cdot n(\text{FeS})$ 。MnS、MnO 和 $m(\text{MnS}) \cdot n(\text{FeS})$ 不溶于钢液，而且比重比铁小，因而易于上浮进入渣中，起到脱氧去硫的作用。因为 MnS 熔点高(1600℃)，即使部分留在钢中，在钢液凝固后仍是以孤立的颗粒状分布于晶界和晶内，它的有害作用也较 FeS 小得多。

为了完全中和硫的有害作用所需的锰量为钢中含硫量的 4-5 倍；脱氧所需锰量约 0.5%。因此当含 0.05% S 时，钢中锰的总含量约 0.7%。

此外，锰能少量固溶于铁素体中，起到固溶强化的作用，从而提高钢的屈服极限和抗拉强度，并且基本上不降低钢的塑性和韧性。但在规格含锰量的范围内(0.5~0.8%)，对钢的机械性能影响不大。

五、磷的影响

钢中的磷主要是以 Fe_3P 形式存在，而 Fe_3P 与 Fe 形成低熔点共晶体 ($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{P}$)，沿晶界析出，降低钢的塑性和韧性 (如图 1-4)，特别在低温下更为显著，表现为脆性大，易引起铸件的脆断。

磷也可固溶于铁素体中，起强化作用，提高钢的强度和硬度。但随着钢中碳和硅量的增加，磷的溶解度将显著降低。钢中含碳量越高，磷的有害影响越显著 (如图 1-5)。

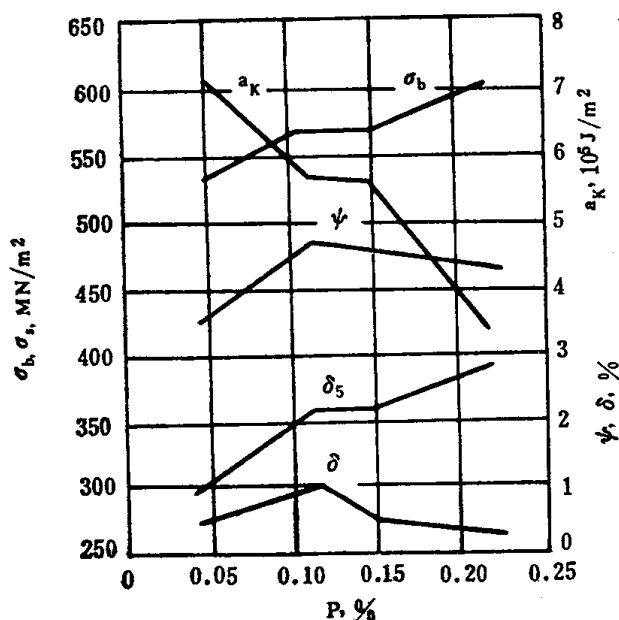


图 1-4 磷对碳钢(0.25%C)机械性能的影响

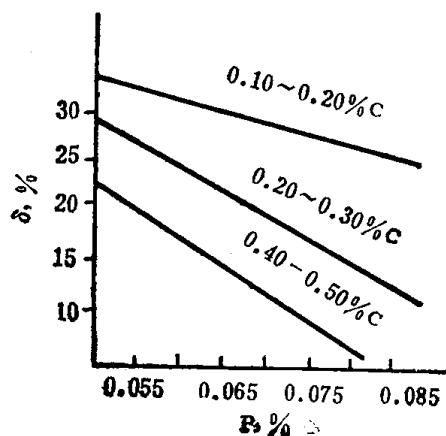


图 1-5 磷对不同含碳量钢的延伸率的影响

此外，由于磷容易发生偏析，故磷的有害作用还与铸件的冷却速度有关。冷却快，磷析出量少，磷的危害性相对小一些，反之，磷大量以 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{P}$ 共晶形式析出，危害就大。

磷是钢中的有害杂质，其含量越少越好，对铸造碳素钢要求小于 0.06%；对于厚壁铸件 ($>75\text{mm}$) 或含碳量较高的铸件，磷含量应尽可能低一些。但是，由于原材料和冶炼工艺上的原因，不能将磷除得很彻底，因此在国家标准 (表 1-2) 中根据铸件的不同用途把磷含量分为三个级别。

§ 1—3 铸造碳素钢的铸造性能

铸造碳素钢的铸造性能比灰铸铁要差得多。主要表现在：流动性差，需要较高的浇注温度；体收缩和线收缩值较大，因而产生缩孔、缩松、热裂和冷裂的倾向也较大；弹性模量大 (比灰铸铁大 2-4 倍)，容易产生较大的内应力；气体和非金属夹杂物较多，对流动性和抗热裂倾向有不良影响，并容易促进气孔和缩松的形成。所有这些都给铸钢件生产带来困难，需要在制订熔铸工艺时予以充分注意。

下面我们着重讨论铸造碳素钢的流动性、收缩、热裂和冷裂的特性。

一、铸造碳素钢的流动性

钢的流动性是影响铸件完整性的的重要因素。流动性好，就能保证钢液很好地充满铸型、获得尺寸准确、轮廓清晰的铸件。此外，流动性好还有利于钢液中气体和非金属夹杂物的排除，改善补缩条件，提高铸件的致密性，并在一定程度上减少缩松和热裂的产生。

影响钢的流动性的因素很多，从合金方面分析，主要有两方面，即钢液状态和钢的化学成分。

1. 钢液状态的影响

首先，应该指出：钢液过热度对其流动性有显著的影响。过热温度越高，钢液粘度越小，钢液在铸型中流动的速度就越大。同时，过热温度越高，钢液冷却过程中给予铸型的热量越多，铸型被加热的温度就越高，使钢在液态下可流动时间就越长。实验指出，钢的流动性与过热度近于直线关系，即 $\lambda \propto \Delta T$ (λ -流动性试样长度， ΔT -过热度)。对于含碳量为一定值的碳钢来说，其开始凝固温度为一定值。因此，浇注温度越高，过热程度越大，钢液的流动性越好，如图1-6所示。

第二、钢液中的非金属夹杂物对钢液的流动性影响也很大。由于各种冶金条件，钢液中存在着多种非金属夹杂物。它们的存在，提高了钢液的粘度，而且机械地阻碍钢液在型腔中的流动，因而降低钢液的流动性。显然，钢液中非金属夹杂物数量越多，其流动性也越差。研究还表明，如果夹杂物在钢液中呈多角的难熔的细小质点存在，则钢液的流动性更差。例如，

碳钢脱氧时所用脱氧剂的种类和加入次序对钢液流动性影响很大。正确的脱氧工艺应是先加锰铁，后加硅铁或者直接加硅锰铁，此时脱氧产物主要是低熔点硅酸盐，因而钢液流动性好。若先加硅铁，后加锰铁，脱氧产物主要是高熔点尖角形的 SiO_2 ，其尺寸极为细小，数量也较先加锰铁，后加硅铁时约多一倍，因而流动性差。若用复合脱氧剂脱氧（铝锰硅或硅钙等），则形成低熔点脱氧产物，能很快地凝聚上浮，则钢液的流动性更好。如表1-3所列。

2. 钢液化学成分的影响

碳对钢液实际流动性影响最大。当浇注温度不变时，钢液的实际流动性随碳量的增加而提高（如图1-6）。这是因为碳降低钢的液相温度（如图1-6和表1-4），相应地增加了钢液的过热度。此外，碳还能降低钢的导热性，使钢液降温缓慢，这也有利于流动性的提高。

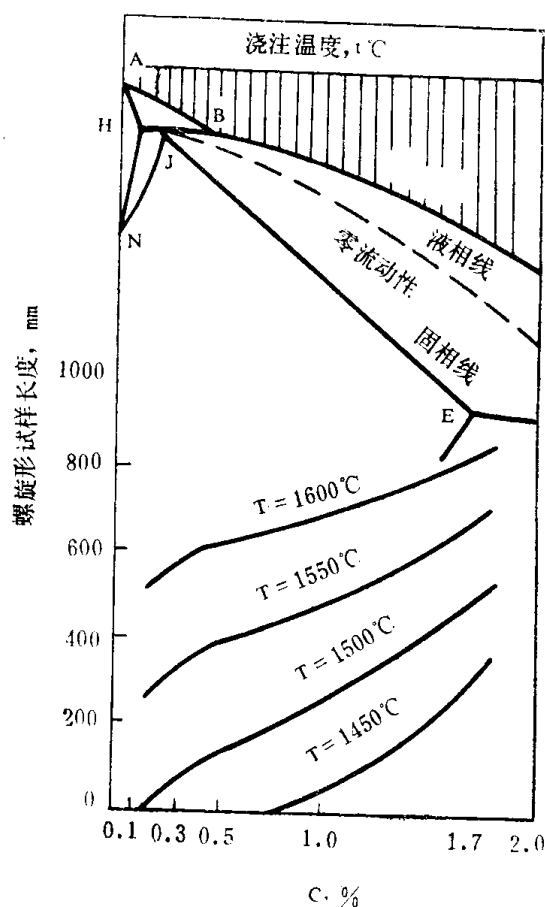


图 1-6 碳钢流动性与含碳量和过热度的关系

在生产中是以维持浇注温度不变为衡量标准的，所以低碳钢的流动性较差。

表 1-3 脱氧剂种类和加入次序对钢的流动性的影响

脱氧剂种类 及加入次序	先加硅铁 后加锰铁	先加锰铁 后加硅	铝 锰 硅 或 硅 钙
流动性(螺旋 长度 mm)	65	140	150~170

表 1-4 化学成分对钢的液相线温度的影响

合金元素	C	Si	Mn	S	P	Al	Ni	Ti
元素含量适用 范围%	<1	0~3.0	0~1.5	0~0.08	0~0.7	<1.0	0~9.0	
钢液中含元素 1%时, 液相线降低 的温度℃	65	8	5	25	30	3	4	18

这里还应指出，在同样过热温度下，钢液含碳量、结晶温度间隔与钢液流动性之间有着比较明显的对应关系，如图 1-7 所示。当含碳量从 0% 递增到 0.1% 时（A 至 H 间），结晶温度间隔逐渐增大，钢液流动性则相应地逐渐降低；当含碳量从 0.1% 递增到 0.18% 时（H 至 J 间）结晶温度间隔逐渐缩小，钢液流动性则相应地逐渐增高；当含碳量由 0.18% 递增到 0.51% 时（J 至 B 间），结晶温度间隔又逐渐增大，而钢液流动性则相应降低。钢的结晶温度间隔愈大，钢的流动性愈差。显然，这是由于结晶温度间隔愈大，其树枝状晶愈发达，造成钢液流动更大的阻碍的结果。

硅和锰使钢液流动性有所提高，因其加入而降低了钢的液相线温度，使之在相同的浇注温度下，相当于提高了过热度。

此外，由于硅、锰的脱氧和镇静作用，减少了钢液中的非金属夹杂物，故提高了钢

液的流动性。例如，据资料介绍，碳钢在 1500℃ 时，硅量从 0.25% 增至 0.4%，螺旋形试样长度从 450mm 增至 550mm；在 1600℃ 时，从 575mm 增至 775mm。

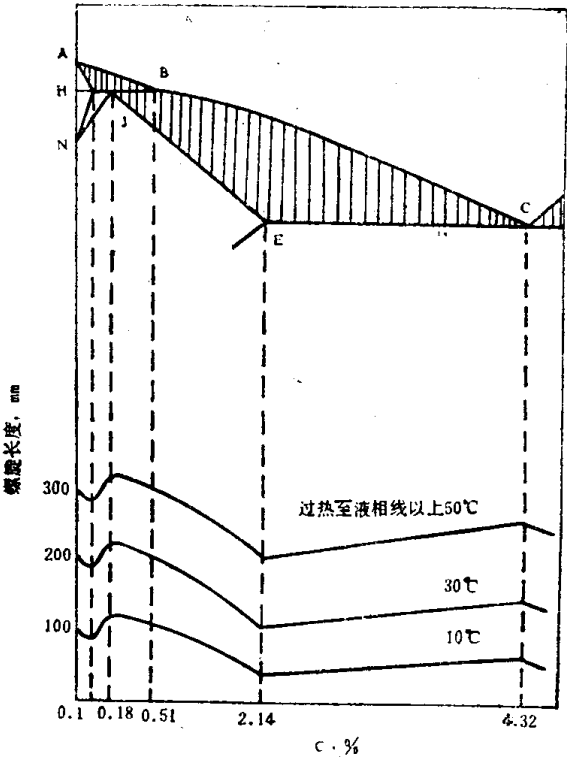


图 1-7 钢的流动性与结晶温度间隔的关系

硫恶化钢的流动性,因为硫形成难熔的 MnS 夹杂物;如果硫形成更难熔的 Al_2S_3 和 ZrS_2 ,则对流动性的有害影响更剧。但是,由于铸造碳素钢中的含硫量很低($\leq 0.06\%$),因此,硫对流动性的影响无实际意义。

当磷含量较高($>0.05\%$)时,磷能改善钢液的流动性,这是因为磷能降低钢的液相线温度和形成低熔点产物之故。但这种影响无实际意义,因磷量较高时,铸件很脆。

综上所述可知,在生产中,应控制钢液状态和化学成分,来保证钢液具有必要的流动性,其中控制钢液的浇注温度最为重要。为了保证钢液充满铸型并获得良好的铸件表面质量,必须采用足够高的浇注温度。但浇注温度也不宜过高,否则,易引起热裂、粘砂、气孔等铸造缺陷。因此应在保证获得轮廓清晰的铸件条件下,应采用较低的浇注温度。铸钢的浇注温度通常等于钢的液相线温度加上 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。具体的浇注温度应根据钢号及铸件、铸型和浇注方式的特点而定。低碳钢应采用较高的浇注温度,而高碳钢则应采用较低的浇注温度;小铸件、薄壁铸件和结构复杂的铸件应采用较高的浇注温度;熔模精密铸造通常为热模浇注,所以其浇注温度可适当低些。

二、铸造碳素钢的收缩与缩孔和缩松

1. 铸造碳素钢的收缩

铸钢的体积收缩过程包括三个阶段：液态收缩、凝固收缩和固态收缩，不同阶段有不同的收缩值。图 1-8 为碳钢 ($0.35\%C$)

体积随温度变化的情况。由图可知：
钢的体积总收缩 = 钢在液态下的体收缩 + 钢在凝固期间的体收缩 + 钢在固态下的体收缩；
而钢在固态下的体收缩 = 珠光体转变前的体收缩 - 珠光体转变时的体膨胀 + 珠光体转变后的体收缩。
钢在液态下体积随温度的变化比固态下大，而在凝固期间体积变化更大。一般说，钢在液态和凝固期间的收缩决定铸件缩孔与缩松的体积，而钢在固态下的收缩决定铸件的尺寸。

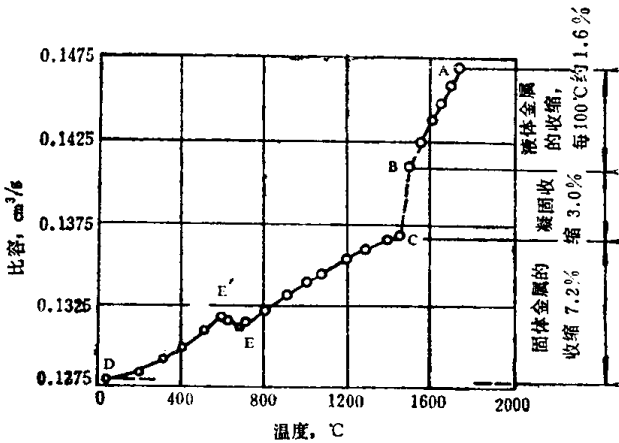


图 1-8 ZG35 的体收缩

前者考虑的应是体收缩，后者则应考虑线收缩。体收缩与与线收缩的关系可近似地表示为：体收缩系数（即温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 体积的收缩值） $\approx 3 \times$ 线收缩系数（即温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的线收缩值）。

必须指出：上述的收缩值是自由收缩值，与生产条件下钢铸件的收缩值有显著的差别。

2. 铸造碳素钢的缩孔与缩松

铸型被钢液充满后,由于钢在液态和凝固期间的体积收缩,将导致在铸件中形成集中的缩孔或分散的缩松。铸件有缩孔存在,自然会严重降低钢的机械性能,而细微的分散缩松,甚至只有在显微镜下观察的枝晶间疏松,同样会严重恶化铸件的机械性能,如图 1-9 所示。一般说,缩松对塑性的降低较之对强度的降低尤甚;占铸件体积 1% 的缩松就可使强度指标降为零。