

铸造技术与应用案例

ZHUZAO JISHU YU YINGYONG ANLI

杜西灵 杜磊 编著

提供技术支持 成就优质铸件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

铸造技术与应用案例

杜西灵 杜 磊 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了铸造实用技术。内容包括：铸造技术基础、铸造合金及其熔炼、造型材料、铸造工艺设计、铸造工艺装备设计、铸造生产过程及控制、铸件缺陷分析及质量检验、铸造技术应用案例。本书内容新颖丰富，取材经典实用，反映了我国当代铸造和国际铸造先进技术发展趋势。

本书可供铸造工程技术人员、工人阅读使用，也可供相关专业的在校师生及研究人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

铸造技术与应用案例/杜西灵，杜磊编著. —北京：机械工业出版社，2009. 11

ISBN 978-7-111-28117-7

I. 铸… II. ①杜… ②杜… III. 铸造-技术 IV. TG24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 148479 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：陈保华 版式设计：霍永明 责任校对：王欣

封面设计：路恩中 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2009 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 32.75 印张 · 712 千字

0 001 - 3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-28117-7

定价：59.00 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

前 言

铸造有着悠久的历史，造福了我们这个世界，成为我们这个世界共有的文化与文明。伴随着世界经济的发展，中国铸造业取得了快速的发展，现已成为世界最大的铸件生产国和铸件消费国，并涌现了一批优秀的铸件生产企业和供应商。

在迅猛发展的同时，应该看到，铸造业是能耗多的行业，占机械工业总能耗的25%~30%。据统计，每生产1t合格铸件，约排放粉尘50kg，废气1000~2000m³，废砂1.3~1.5t，废渣300kg。整个铸造业每年排放污染物总量约为：粉尘150万t，废气400~600亿m³，废砂4000~4500万t，废渣900万t。相比之下，发达国家生产1t合格铸件的“三废”排放量不到我国的1/10，铸造厂用于环保的投资占整个设备投资的20%~30%，而我国只占5%~8%。因此，“节能减排”已成为重大课题。

产品质量是企业的生命，是市场的核心竞争力。企业必须立足于自主创新，提高企业的核心竞争力。为此，必须提高企业员工的素质，力求把自己担负的事情做得尽善尽美，提高产品开发和质量保证能力，提高企业内部各管理体系的能力，迎接市场化的挑战。

铸造是技术科学。伴随着我国全面融入科学技术高速发展的世界经济大潮中，作为装备制造业基础的铸造业，也必然要随之发生变化，要求其成为一种多学科、多专业融为一体的综合技术产业。“单一、技术含量低、经济附加值低”的传统生产方式，将逐步被“大规模、高技术含量、高附加值、清洁环保”的现代铸造生产所取代。企业应大力培养铸造专业人才，调动科技人员积极性，为本企业技术进步发展多做贡献。让我们共同为推动我国铸造业朝着“清洁、环保、节能和高效生产”的目标健康发展，为实现铸造强国愿望而努力奋斗。

本书全面系统地介绍了铸造实用技术。内容包括：铸造技术基础、铸造合金及其熔炼、造型材料、铸造工艺设计、铸造工艺装备设计、铸造生产过程及控制、铸件缺陷分析及质量检验、铸造技术应用案例。本书内容新颖丰富，取材经典实用，反映了我国当代铸造和国际铸造先进技术发展趋势。

本书可供铸造工程技术人员、工人阅读使用，特别是青年铸造工程技术人员。年轻一代是我们铸造业可持续发展的有力保证，是我国铸造业成功的未来，走自主创新道路的希望。希望这本书能在加快我国走向铸造强国的道路上，伴随他们，为他们提高铸造工艺技术水平，生产技术含量较高、用户满意的铸件提供

科技支持。

本书第1、7、8章由杜磊撰写，第2、3、4、5、6章由杜西灵撰写。全书由杜西灵统稿。书中引用了参考文献中的有关资料，在此，向这些文献资料的作者们表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在错误或不妥之处，恳请读者提出宝贵意见，以便修正，并在此表示感谢。

作 者

目 录

前言

第 1 章 铸造技术基础 1

1.1 液态合金的充型 1

1.1.1 液态合金的充型能力和 流动性 1

1.1.2 影响合金充型能力的因素 ... 1

1.1.3 提高合金充型能力的途径 ... 3

1.2 铸件的凝固 4

1.2.1 铸件的凝固方式 5

1.2.2 铸件的凝固原则 6

1.2.3 凝固原则的选择 8

1.2.4 铸件凝固的控制 8

1.3 铸件的收缩 11

1.3.1 铸造合金的体收缩率和 线收缩率 12

1.3.2 合金的收缩过程 12

1.3.3 铸钢的收缩 13

1.3.4 铸铁的收缩 16

1.3.5 铸件的收缩 17

1.4 铸件中的缩孔与缩松 18

1.4.1 铸钢件的缩孔和缩松 18

1.4.2 铸铁件的缩孔和缩松 23

1.5 铸造应力和铸件变形 25

1.5.1 铸造应力 25

1.5.2 铸件变形及防止 28

1.6 铸件的裂纹 30

1.6.1 铸件的热裂 30

1.6.2 铸件的冷裂 34

1.6.3 铸件的温裂 34

1.7 铸件的热处理基础 35

1.7.1 铸钢件的热处理 35

1.7.2 铸铁件的热处理 41

第 2 章 铸造合金及其熔炼 44

2.1 铸钢及其电弧炉熔炼 44

2.1.1 铸钢 44

2.1.2 碱性电弧炉及其结构 49

2.1.3 炼钢原材料及配料计算 51

2.1.4 碱性电弧炉氧化法炼钢 过程及控制 53

2.1.5 碳钢的氧化法熔炼工艺 63

2.1.6 低合金钢氧化法熔炼 工艺 64

2.1.7 高合金钢的氧化法 熔炼工艺 68

2.1.8 初炼钢液的熔炼工艺 70

2.1.9 铸钢的炉外精炼技术 71

2.1.10 钢的浇注 77

2.2 铸铁及其冲天炉熔炼 78

2.2.1 铸铁 78

2.2.2 冲天炉的结构及其鼓 风机 92

2.2.3 冲天炉熔炼的基本原理 93

2.2.4 铸铁熔炼的配料计算 95

2.2.5 冲天炉的操作与控制 97

2.3 铸造非铁合金及其熔炼 99

2.3.1 铸造铝合金、铸造铜 合金 99

2.3.2 铸造非铁合金熔炼炉 104

2.3.3 铸造铝合金的熔炼 105

2.3.4 铸造铜合金的熔炼 106

第 3 章 造型材料 107

3.1 铸造用原砂 107

3.1.1 硅砂 107

3.1.2 非硅质砂（特种砂） 109

3.2 粘土砂 114

3.2.1 粘结剂——粘土 114

3.2.2 粘土砂用辅助材料 117

3.2.3 铸铁普通机器造型用

粘土湿型砂	118	4.1.2 铸造工艺对零件结构的要求	171
3.2.4 铸铁高密度造型用湿型砂	120	4.2 造型方法及型(芯)种类	171
3.3 水玻璃砂	122	4.2.1 造型方法	171
3.3.1 粘结剂——水玻璃	123	4.2.2 砂型、砂芯的种类	173
3.3.2 CO ₂ 硬化水玻璃砂	126	4.2.3 制芯方法分类及选择	174
3.3.3 有机酯水玻璃自硬砂	131	4.3 铸造工艺方案	175
3.4 树脂砂	136	4.3.1 铸件浇注位置的选择	175
3.4.1 铸造树脂的分类	136	4.3.2 铸型分型面的选择	176
3.4.2 覆膜树脂砂	136	4.3.3 造型的吃砂量和铸件在砂箱中的布置	177
3.4.3 热芯盒法树脂砂	139	4.4 铸造工艺参数	178
3.4.4 冷芯盒树脂砂	143	4.4.1 铸件尺寸公差	178
3.4.5 树脂自硬砂	147	4.4.2 铸件重量公差	179
3.5 油砂	153	4.4.3 机械加工余量	179
3.5.1 油类粘结剂	153	4.4.4 铸造线收缩率	180
3.5.2 植物油芯砂	155	4.4.5 工艺补正量	181
3.5.3 合脂芯砂	156	4.4.6 起模斜度	183
3.6 特种砂型芯砂	157	4.4.7 分型负数	185
3.6.1 以石灰石砂为原砂的型芯砂	157	4.4.8 最小铸出孔和槽	186
3.6.2 以锆砂为原砂的型砂	159	4.4.9 铸件毛重及钢液总重的计算	187
3.6.3 以铬铁矿砂为原砂的型砂	159	4.4.10 起吊力的计算	187
3.6.4 以镁砂为原砂的型砂	160	4.5 冒口与补贴	189
3.7 涂料	160	4.5.1 冒口的作用、分类、形状及设置原则	189
3.7.1 涂料的作用及性能	161	4.5.2 铸钢件的冒口与补贴	190
3.7.2 砂型铸造涂料标准及其基本组成	162	4.5.3 铸铁件的冒口设计	215
3.7.3 铸钢件水玻璃砂型涂料应用案例	165	4.5.4 非铁合金铸件的冒口设计	220
3.7.4 铸铁件树脂砂铸型涂料应用案例	166	4.6 冷铁的设计	222
3.7.5 铜、铝合金铸件粘土砂水基涂料应用案例	167	4.6.1 铸钢件用冷铁	222
3.7.6 表面合金化涂料应用案例	168	4.6.2 铸铁件用冷铁	228
第4章 铸造工艺设计	170	4.6.3 非铁合金铸件用冷铁	230
4.1 铸件结构的铸造工艺性	170	4.7 铸肋的设计	231
4.1.1 铸件质量对零件结构的要求	170	4.7.1 收缩肋	231
		4.7.2 拉肋	231
		4.8 出气孔的设计和设计案例	232
		4.8.1 出气孔的设计	232
		4.8.2 气缸体出气孔的设计	

案例	233	选择	295
4.9 浇注系统设计	234	5.3.3 芯盒内腔尺寸的计算	296
4.9.1 浇注系统的选择	234	5.3.4 木质芯盒的结构	297
4.9.2 铸钢件浇注系统尺寸 设计	237	5.3.5 金属芯盒的结构	298
4.9.3 灰铸铁件浇注系统 尺寸设计	243	5.3.6 冷芯盒	305
4.9.4 球墨铸铁件浇注系统 尺寸设计	248	5.4 砂箱的设计	308
4.9.5 铜合金铸件浇注系统 设计	250	5.4.1 砂箱分类	308
4.9.6 铝合金铸件浇注系统 设计	250	5.4.2 砂箱的设计原则及材料	308
4.10 砂芯设计	251	5.4.3 通用砂箱	309
4.10.1 砂芯的分类及分块 原则	252	5.4.4 高压造型砂箱	319
4.10.2 水平砂芯的设计	253	第6章 铸造生产过程及控制	323
4.10.3 垂直砂芯的设计	256	6.1 生产准备	323
4.10.4 芯头尺寸的验算	259	6.1.1 熟悉生产计划	323
4.10.5 砂芯负数	261	6.1.2 读懂铸造工艺文件	324
4.10.6 芯骨与芯撑	262	6.1.3 准备型(芯)砂、涂料	324
4.10.7 砂芯的排气、合併及 预装配	263	6.1.4 准备模样(芯盒)、模板、 砂箱	325
4.11 铸造工艺文件	265	6.1.5 工具、辅具、量具的 准备	325
第5章 铸造工艺装备设计	267	6.1.6 生产场地的准备	326
5.1 模样	267	6.2 造型操作	326
5.1.1 模样的分类及要求	267	6.2.1 手工造型	326
5.1.2 模样尺寸的计算与标注	267	6.2.2 湿型机器造型	345
5.1.3 木模样	268	6.3 制芯操作	349
5.1.4 金属模	270	6.3.1 手工制芯	349
5.1.5 塑料模	273	6.3.2 机器制芯	362
5.1.6 泡沫塑料模样	277	6.4 砂型、砂芯的烘干	373
5.2 模板	278	6.4.1 烘干炉	374
5.2.1 模板种类及应用	278	6.4.2 烘干工艺	379
5.2.2 模底板结构设计	283	6.4.3 烘干过程控制及质量 检测	382
5.2.3 模样在模底板上的安装	288	6.5 合箱	382
5.2.4 模板的技术要求	294	6.5.1 合箱前的准备	383
5.3 芯盒	295	6.5.2 砂型摆放及质量检查	383
5.3.1 芯盒的种类及应用	295	6.5.3 下芯操作	384
5.3.2 芯盒材料及分盒面的 选择	295	6.5.4 合箱操作	386
		6.5.5 紧箱操作	388
		6.6 浇注操作	391
		6.6.1 铸钢的浇注	391
		6.6.2 铸铁的浇注	394

6.7 落砂、清理及后处理	395	合格	441
6.7.1 铸件的落砂	395	7.1.9 铸造缺陷分析案例	450
6.7.2 铸件的清理	399	7.2 铸件质量检验	452
6.8 铸件的挽救技术	400	7.2.1 铸件外观质量检验	453
6.8.1 电弧焊修补	400	7.2.2 铸件内在质量检验	456
6.8.2 浸渗修补技术	408	7.2.3 铸件质量的无损检验	458
6.9 消除铸件内应力处理	408	7.2.4 铸件质量评定	462
6.9.1 消除铸钢件内应力工艺		第8章 铸造技术应用案例	468
曲线	409	8.1 铸钢件工艺技术案例	468
6.9.2 消除铸铁件内应力工艺		8.1.1 远洋货轮挂舵臂	468
曲线	409	8.1.2 防磁电测车制动鼓	472
6.9.3 铝合金、铜合金铸件内应		8.1.3 铸钢阀门	481
力的消除	411	8.1.4 水泥烧结设备零件——	
第7章 铸件缺陷分析及质量		固定梁	489
检验	412	8.1.5 五型抽油机铸钢齿轮	490
7.1 铸造缺陷分析	412	8.1.6 发电设备水轮机转轮	496
7.1.1 多肉类缺陷	412	8.1.7 保温易切冒口铸造石油钻	
7.1.2 孔洞类缺陷	417	采配件制动鼓	497
7.1.3 裂纹、冷隔类缺陷	422	8.2 铸铁件工艺技术案例	504
7.1.4 表面缺陷	425	8.2.1 S195 柴油机缸体	504
7.1.5 残缺类缺陷	430	8.2.2 球墨铸铁钻井液旋流器	507
7.1.6 形状及重量差错类		8.2.3 气缸套	509
缺陷	433	8.2.4 球墨铸铁涡轮	511
7.1.7 夹杂类缺陷	437	参考文献	514
7.1.8 性能、成分、组织不			

第1章 铸造技术基础

1.1 液态合金的充型

1.1.1 液态合金的充型能力和流动性

1. 液态合金的充型能力

液态合金填充铸型的过程简称充型。液态合金充满型腔，获得形状完整、轮廓清晰铸件的能力，称为液态合金的充型能力。在液态合金充型过程中，有时伴随着结晶现象，若充型能力不足，形成的晶粒堵塞充型通道，液态合金被迫停流，使铸件薄壁处或远离浇口的宽大表面产生“浇不足”或“冷隔”等缺陷。

液态合金的充型能力，是液态合金的流动性、铸型性质、浇注条件、铸件结构等各种因素影响的综合反映。

2. 液态合金的流动性

流动性是液态合金的主要铸造性能之一。液态合金的流动性越好，表示液态合金的充型能力越强。充型能力强的液态合金，有利于浇注出轮廓清晰、薄而复杂的铸件，有利于非金属夹杂物和气体上浮和排除，有利于合金冷凝过程的补缩。因此，设计铸件、选材、编制铸造工艺时，要考虑合金的流动性。

液态合金的流动性用浇注流动性试样衡量。流动性试样种类很多，如螺旋形、球形、U形、真空试样等，在生产和科学研究中最常用的是“螺旋形试样”。在相同的浇注条件下，浇注出的试样越长，说明液态合金的流动性越好。

液态合金的流动性与它的化学成分、杂质含量、物理性能有关。同一种液态合金用不同的铸造方法铸造出的铸件最小壁厚不同；同样的铸造方法，由于液态合金不同，能得到的最小壁厚也不同。试验得知：灰铸铁、硅黄铜的流动性最好，铸钢的流动性最差。

1.1.2 影响合金充型能力的因素

1. 合金的化学成分

合金的化学成分是影响流动性的最主要因素。图1-1示出为铁碳合金的流动性与成分的关系。由图得知：合金成分越远离共晶点，结晶温度范围越宽，流动性越差。

(1) 铸铁的流动性 亚共晶铸铁随碳含量增加，结晶间隔减小，流动性提高。越接近共晶成分，流动性越好，充型能力越好，越容易铸造。此外，铸铁中的其他元素也影响流动性。

1) 磷含量增加，铸铁的流动性增大。但磷含量增加使铸铁变脆，通常不用增磷

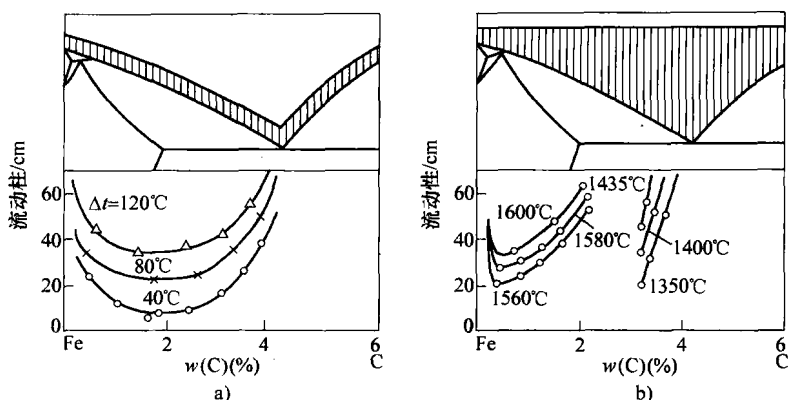


图 1-1 铁碳合金的流动性与成分的关系

a) 相同过热温度的流动性 b) 相同浇注温度的流动性

的方法提高铸铁的流动性。对于追求轮廓清楚、花纹清晰的艺术品铸件，因不承受载荷，要求铁液具有很好的充型能力，可适当提高磷含量。

2) 硅的作用和碳相似，硅量增加，液相线下降。因此，在同一过热温度下，铸铁的流动性随硅含量的增加而提高。

3) $w(\text{Mn}) < 0.25\%$ 时，锰不影响铸铁的流动性。但当 $w(\text{Mn})$ 高时，会产生较多的 MnS 夹杂物悬浮在铁液中，增加铁液的粘度；另外，容易形成氧化膜，致使铁液的流动性降低。

4) Ni 、 Cu 降低铸铁的液相线温度，能稍许提高其流动性。 Cr 可提高液相线温度，使流动性下降。但这三个元素，在质量分数 $< 1\%$ 时，对流动性影响不明显。

5) 由于稀土镁具有脱硫、去气和排除非金属夹杂物，使铁液净化的作用，稀土球墨铸铁的流动性原本好于灰铸铁；但是，原铁液经球化处理，温度下降很多，若原铁液温度较低，含硫量高，则其流动性比灰铸铁要差。

铸铁的结晶温度范围一般都比铸钢的宽，所以铸铁的流动性比铸钢的好。

(2) 铸钢的流动性 高碳钢的结晶温度范围虽然比低碳钢的宽，可是由于液相线温度低，容易过热，所以实际流动性并不比低碳钢差。合金元素对铸钢流动性的影响如下：

1) $w(\text{Si}) < 0.6\%$ 时，提高硅含量，钢的流动性增加。

2) 当 $w(\text{Mn}) < 2\%$ 时，对钢的流动性影响不明显；当 $w(\text{Mn}) = 2\% \sim 14\%$ 时，随锰含量增加，流动性提高。

3) 钢中 $w(\text{P}) > 0.05\%$ 时，其流动性提高；但铸件变脆，随碳含量的增加，这种现象更严重。

4) 硫能形成难熔的 MnS 、 Al_2S_3 等夹杂物，使钢的流动性下降。

5) $w(\text{Cr}) > 1.5\%$ 时，降低钢的流动性。

6) 钢的所有合金元素中，铜最有利于提高钢的流动性。

(3) 除合金成分外,影响流动性的因素还有结晶潜热、金属的比热容、密度、热导率、液态金属的粘度、表面张力,以及合金熔炼过程和其他影响因素。

2. 浇注条件

浇注条件(指浇注温度、充型压头、浇注系统结构等)对合金的充型能力的影响起决定性的作用。

(1) 浇注温度 浇注温度越高,充型能力越好。在一定温度范围内,充型能力随浇注温度的提高而直线上升。因此,对薄壁铸件或流动性差的合金,适当提高浇注温度,以防浇不足和冷隔缺陷。但过高的浇注温度,由于吸气多、氧化严重,充型能力提高幅度减小,铸件容易产生缩孔缩松、粘砂、气孔、粗晶等缺陷,故在保证充型能力足够的前提下,浇注温度不宜过高。

(2) 充型压头 合金液在流动方向所受的压力越大,充型能力越好。因此,适当提高直浇道高度或人工加压方法,可提高充型压头。但合金液静压头过大或充型速度过高时,会发生喷射和飞溅,致金属氧化和产生“铁豆”缺陷;型腔中气体来不及排除,反压力增大,容易造成“浇不到”或“冷隔”缺陷。

(3) 浇注系统结构 浇注系统结构越复杂,流动阻力越大,在静压头相同的情况下,充型能力越低。正确的浇注系统结构、内浇道的合理布局、各组元截面积的合适比例,使金属液平稳地充满型腔。

3. 铸型性质

(1) 铸型的蓄热系数 蓄热系数越大,铸型的激冷能力就越强,合金液在铸型中保持液态的时间就越短,充型能力下降。

(2) 铸型的温度 热型浇注使充型能力得以提高,例如:采用干型热箱合型浇注,金属型预热浇注,熔模铸造型壳高温熔浇等。

(3) 铸型中的气体 当铸型的发气量过大,或浇速太快而排气能力不足时,使浇注过程型腔气体压力增大,阻碍合金液流动充型,甚至有时浇不进去,或出现合金液翻腾、飞溅现象。为此,应设法减少气体的来源,应使型(芯)砂具有良好的透气性,在远离浇口的最高位置开设出气孔。

4. 铸件结构

(1) 铸件的模数 铸件模数 $(M) = \frac{\text{铸件实际体积}(V)}{\text{铸件全部表面积}(S)}$

在同样浇注条件下,对于体积 V 相同的铸件,若模数 M 大,则表面积 S 较小,热量散失较缓慢,充型能力就较高。铸件的壁越薄,模数越小,则越不容易被充满。

(2) 铸件结构复杂程度 越是结构复杂的铸件,则铸型型腔结构也复杂,合金液的流动阻力大,充填铸型就困难。

1.1.3 提高合金充型能力的途径

(1) 合金方面 要正确选择合金的成分。只要不影响铸件的使用性能,选用结晶温度范围小的合金,或将合金成分调整到实际共晶成分附近。要合理控制熔炼工

艺:

- 1) 炉料要干净, 熔剂要烘干。
- 2) 熔炼过程, 尽量使合金液不接触或少接触有害气体。
- 3) 对某些合金要充分脱氧或精炼去气, 减少非金属夹杂物和气体。
- 4) 钢液脱氧, 要先加锰铁, 后加硅铁, 脱氧产物主要是低熔点硅酸盐, 容易清除, 钢液流动性好。

5) “高温出炉, 低温浇注”是铸铁件生产的成功经验。高温出炉能使一些难熔的固体质点熔化, 未熔的质点和气体在浇包中镇静时会上升, 使铁液净化, 提高铁液的流动性。

- 6) 某些合金进行变质处理, 使晶粒细化, 有利于提高充型能力。

(2) 浇注方面

1) 对于薄壁铸件或流动性差的合金, 适当提高浇注温度, 可以改善充型能力。但要注意, 随着浇注温度的提高, 铸件一次结晶组织粗大, 容易产生缩孔缩松、粘砂、裂纹等缺陷。

- 2) 适当增加合金液静压头, 提高充型能力。

- 3) 合理的浇注系统设计, 可使合金液快速平稳充型。

(3) 铸型方面

1) 减小铸型的蓄热系数。造型材料的种类、型砂配比、铸型紧实度、冷铁应用方式等都影响蓄热系数。

- 2) 预热铸型。

3) 减少型砂发气性 (适当降低型砂中含水量和发气物质含量), 提高砂型透气性 (多扎出气孔, 设置出气冒口等)。

(4) 铸件结构方面 铸件模数越小, 结构越复杂, 越不容易充满。因此, 对于薄壁复杂件, 应正确选择浇注位置; 尽量简化浇注系统。

1.2 铸件的凝固

浇入铸型后的合金液, 由于热传导和冷却作用, 合金液温度下降, 降至液相线与固相线温度范围时, 合金液向固态转变。合金从液态转变为固态的状态变化, 称为凝固 (或一次结晶)。从液态转变为固态的过程称为凝固过程 (结晶过程)。凝固和一次结晶虽然指的是同一个状态变化过程, 但是, 一次结晶主要是从物理化学的观点出发, 研究液态合金的生核、长大、结晶组织的形成规律。凝固是从传热学的观点出发, 研究铸件与铸型的传热过程、铸件断面上凝固区域的大小、凝固方式与铸件质量的关系、以及铸件的凝固时间等。许多铸造缺陷, 如缩孔、缩松、热裂、偏析、气孔、夹杂物等都发生在凝固期间。了解铸件的凝固规律、影响铸件凝固的因素、认识凝固过程铸造缺陷的形成机理, 对控制凝固过程、减少和消除缺陷、改善内部组织、提高铸件性能、生产优质铸件具有重要意义。

1.2.1 铸件的凝固方式

1. 凝固动态曲线

铸件凝固动态曲线如图 1-2 所示。

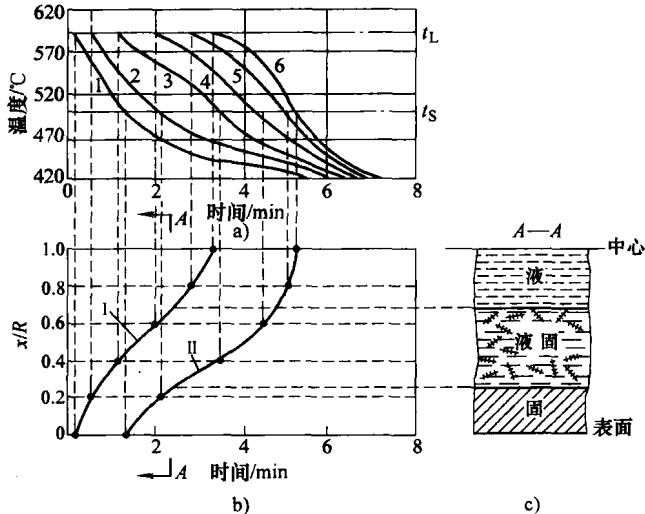


图 1-2 铸件凝固动态曲线及凝固区域

a) 铸件截面的温度-时间曲线 b) 凝固动态曲线 c) 铸件某一时刻的凝固区域

1、2、…、6—对应于 $x/R=0, 0.2, \dots, 1.0$ 曲线

x —铸件表面向中心方向的距离 R —铸件 $1/2$ 壁厚或圆柱体和球体半径

I—液相边界 II—固相边界

图 1-2b 中曲线 I，是与铸件断面上各时刻的液相线等温线相对应，称为“液相边界”。“液相边界”从铸件表面向中心移动，所到之处凝固就开始，因此也称液相边界为“凝固始点”。

图 1-2b 中曲线 II，是与铸件断面上各时刻的固相线等温线相对应，称为“固相边界”。“固相边界”离开铸件表面向中心移动，所到达之处凝固完毕，因此也称固相边界为“凝固终点”。

图 1-2c 所示为铸件 A—A 断面上某一时刻的凝固状况。除纯金属和共晶成分合金外，铸造合金凝固过程中铸件断面上一般都存在三个区域：固相区、液-固并存的凝固区和液相区。它们按凝固动态曲线所示的规律向铸件中心推进。凝固区是液-固并存的区域，铸件全部凝固后，凝固区域消失。

对铸件质量影响较大的主要是凝固区的宽窄及其向铸件中心推进情况。因此，凝固区域是研究铸件凝固过程的重点。

2. 凝固方式

铸件断面的凝固方式取决于铸件断面凝固区域的宽度。凝固区域的宽度是由合金的结晶温度范围 Δt_c 与温度降 Δt （可以近似地表示为温度梯度）确定的。凝固方

式按凝固区域宽度分为三类：逐层凝固、体积凝固、中间凝固。

凝固区域的宽度可以根据凝固动态曲线上的液相边界与固相边界之间的纵向距离确定，因此这个距离的大小是区分凝固方式的准则。如果两条曲线重合，即恒定温度下结晶的金属或合金，或者其间距很小，则趋向于逐层凝固方式；如果两条曲线间距很大，则趋于体积凝固方式；如果两条曲线间距较小，则为中间凝固方式。

1) 逐层凝固的合金其补缩能力好、热裂倾向小、无缩孔、易获得组织致密的铸件。如纯金属、共晶成分合金、结晶温度范围较窄的合金，铸件截面温度梯度较大，属于此类合金。

2) 体积凝固（或糊状凝固）的合金，补缩能力较差，热裂倾向大，难以形成组织致密的铸件。如结晶温度范围很宽的合金，铸件截面温度场较平坦，液-固共存的糊状区域充斥铸件断面的合金，属于此类合金。

3) 中间凝固方式的铸件，其补缩能力、热裂倾向、流动性介于前两凝固方式之间。铸件截面上的凝固区域宽度介于前两者之间，则属于“中间凝固”方式。

实现铸件截面凝固区域的宽度是由合金的结晶温度范围和温度梯度决定的。合金的结晶温度范围与合金的化学成分有关。当合金的成分确定后，合金的结晶温度范围即确定。铸件截面的凝固区域宽度则决定于温度梯度。较大的温度梯度，可以使结晶温度范围变窄，所以铸件凝固控制通常是通过控制温度梯度来实现的。

1.2.2 铸件的凝固原则

1. 顺序凝固原则

铸件的顺序凝固原则，是采用各种措施，在铸件结构上建立一个递增的温度梯度，保证铸件按照远离冒口的部分最先凝固（图 1-3 中 I），其次是靠近冒口部分（图 1-3 中 II、III），最后才是冒口本身凝固的次序进行。

铸件按顺序凝固时，最先凝固部位的收缩，得到较慢凝固部分合金液的补缩，而较慢凝固部分的收缩，得到冒口中合金液的补缩，从而使铸件各个部位的收缩均能得到补缩，而将缩孔转移集中到冒口中。从而获得致密的铸件。

顺序凝固和逐层凝固不同。逐层凝固是指铸件某截面上的凝固方式，即铸件表层先凝固，然后一层一层地向铸件中心推进，最后是中心凝固。由于逐层凝固时，铸件心部保持液态的时间长，冒口的补缩通道易于保持畅通，故能充分发挥补缩效果。逐层凝固有利于顺序凝固。体积凝固由于结晶骨架迅速遍布整个截面，阻塞补缩通道，难以实现顺序凝固。因此，在采取顺序凝固原则时，要考虑合金本身的性

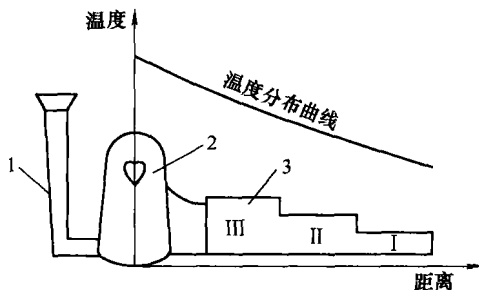


图 1-3 顺序凝固

1—浇道 2—冒口 3—铸件

质。

顺序凝固的优点：冒口补缩作用好，可以防止缩孔缩松，铸件致密。因此，对凝固收缩大、结晶温度范围较小的合金，常采用这个原则以保证铸件质量。

顺序凝固的缺点：①由于铸件各部分有温差，容易产生热裂、应力和变形；②顺序凝固需要加冒口和补贴，工艺出品率较低，切割冒口费时。

顺序凝固原则适用于铸钢、白口铸铁、铝合金和铜合金铸件的补缩。

2. 同时凝固原则

同时凝固原则是采取工艺措施，保证铸件结构上各部分之间没有温差或温差很小，使各部分近乎同时凝固，见图1-4。

同时凝固的优点：铸件各部分均匀冷却，热应力小，不容易产生热裂和变形；由于不用冒口或冒口很小，节省金属，提高了工艺出品率；简化工艺，切割冒口工作量较少，减少劳动量。缺点是：液态收缩较大的铸件，在铸件中心区域往往出现缩松，铸件不致密。

同时凝固适用于：

1) 壁厚均匀的铸件倾向用同时凝固，尤其是均匀薄壁铸件，消除缩松有困难，应采用同时凝固原则。

2) 结晶温度范围大，容易产生缩松的合金（如锡青铜），对气密性要求不高时，可采用同时凝固原则，使工艺简化。事实上，这种合金即使加冒口也很难消除缩松。

3) 从合金性质来看，适宜采用顺序凝固原则的铸件，当热裂和变形成为主要矛盾时，也可以采用同时凝固原则。

3. 均衡凝固原则

铸铁（灰铸铁和球墨铸铁）液态冷却时，要产生体积收缩，凝固时析出石墨又发生体积膨胀。均衡凝固是利用膨胀和收缩动态叠加的自补缩和浇冒口系统的外部补缩，采取工艺措施，使单位时间内的收缩与膨胀、收缩与补缩按比例进行的一种凝固工艺原则。

灰铸铁和球墨铸铁铸件的均衡凝固的补缩技术，着重于利用石墨化膨胀自补缩，冒口只是补充自补缩不足的差额，冒口不必晚于铸件凝固，冒口不应该放在铸件的热节上，冒口的补缩是有限的。这与顺序凝固原则要求冒口晚于铸件凝固相比，均衡凝固可使用尺寸较小的冒口，提高工艺出品率；由于冒口不放在热节上，可以消除冒口根部的缩孔和缩松缺陷，减少铸件废品率。

均衡凝固和同时凝固的共同点是：都强调浇注系统或冒口要从铸件薄壁处引入，使铸件不同部位的温差减小，以免局部过热。不同点在于：同时凝固原则主要着眼于减少应力、裂纹和变形，并不考虑补缩；均衡凝固则是从补缩出发，强调铸铁小

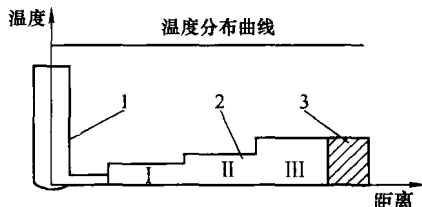


图1-4 同时凝固

1—浇道 2—铸件 3—冷铁

件、薄壁件、壁厚均匀件的补缩，但冒口又不安放在铸件的热节处，在有效补缩的同时，也减小了产生应力、变形和裂纹的倾向。

1.2.3 凝固原则的选择

工艺设计时，针对某一具体铸件，采用哪种原则，还要根据该铸件的材质、结构、技术要求，以及可能出现的铸造缺陷等综合考虑，抓住主要矛盾来选择该铸件的凝固原则。

1. 合金的铸造性质

合金的铸造性质基本上决定铸件采取何种凝固原则。

1) 凝固收缩大、结晶温度范围小、不产生大量妨碍补缩的结晶骨架的合金，例如，铸钢、可锻铸铁、高牌号灰铸铁、黄铜等，常采用顺序凝固。但当热裂、变形成为某铸件的主要矛盾时，也可采用同时凝固。

2) 碳硅含量高的灰铸铁，其体积收缩小，甚至不收缩，合金本身不容易产生缩孔和缩松；球墨铸铁铸件利用石墨化膨胀力实现自身补缩；壁厚均匀的铸件，尤其是薄壁铸件，倾向于同时凝固；结晶温度范围宽、容易产生缩松的合金，致密度要求不高，采取冒口也难消除缩松时，一般采用同时凝固原则。

3) 灰铸铁和球墨铸铁的薄小铸件，采用均衡凝固原则设计工艺，可以大大减少缩孔、缩松等缺陷，从而提高铸件内在质量。

2. 铸件的结构特点和工况条件

铸件的结构特点和工况条件，是决定采取何种凝固原则的主要因素。

1) 承受高温、高压、不允许渗漏，或受力很大又要保证绝对安全使用的铸件，或铸件某些部位致密性要求较高，并且进行机械加工，可采用顺序凝固原则。

2) 要求不高、铸件内缩孔、缩松不影响使用，局部受力较大、要求不高、此处又不是热节的铸件，一般采用同时凝固原则。

3) 对铸铁小件、薄壁件、壁厚均匀件的补缩，可采用均衡凝固原则，冒口不安放在铸件的热节处，在有效补缩的同时，也减小了产生应力、变形和裂纹的倾向。

1.2.4 铸件凝固的控制

在工艺上，控制铸件凝固的措施，有内浇道的引入位置、浇注工艺、合理应用冒口、补贴和冷铁、铸铁件均衡凝固控制技术、加压补缩、悬浮浇注等。

1. 内浇道的引入位置

内浇道的引入位置是指浇注系统中，内浇道布置在铸件上什么位置。内浇道位置确定后，浇注中型腔内合金液的流动方向和温度分布就基本确定，而温度分布影响铸件的凝固。内浇道在铸件浇注位置高度上的引入位置有三种基本形式：顶注式、底注式和中间注入式。

材料为碳钢的铸件，其高度为 900mm，砂型铸造，内浇道引入位置和铸件纵向温度分布关系见图 1-5。