

高等工科院校工程材料及机械制造基础系列教材

材料成形 技术基础

JISHUJICHU

CAILIAOCHENGXING

东南大学出版社

主 编: 何红媛
副主编: 周一丹

高等工科院校
工程材料及机械制造基础系列教材

材料成形技术基础

(原名:热加工工艺基础)

主 编 何红媛
副主编 周一丹
主 审 张启芳

东南大学出版社

内容提要

本教材是由江苏省高校金属工艺教学研究会组织编写的高等工科院校《工程材料及机械制造基础》系列教材之四《材料成形技术基础》。它是为适应 1998 年国家教育部调整和合并高校专业设置后而提出的改革教学内容、课程体系和加强学生素质及能力培养的要求而编写的。在 1996 年 12 月张启芳主编的《热加工工艺基础》原材料的基础上,精简了铸造、锻压、焊接内容,适当地增加和拓展了非金属材料成形的内容。

本教材共六章,内容主要有铸造、锻压、焊接、粉末冶金、非金属材料成形、材料成形方法的选用等。它几乎涉及了机械制造生产过程中除切削加工成形以外的所有工程材料的成形方法与工艺。每章附有适量的复习思考题。

本教材除讲述传统的成形技术外还注重介绍新材料、新技术、新工艺,尤其注重介绍当前材料成形技术的新进展及发展趋势。各种单位名称、名词术语等均采用最新国家标准。

本教材是高等工科院校机械工程类专业的基本教材,也可供高等工科院校近机类专业、高等工业专科学校、职业大学、职工大学、电视大学师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形技术基础/何红媛主编. —南京:东南大学出版社,2000.8

高等工科院校工程材料及机械制造基础系列教材
ISBN 7-81050-196-8

I. 材… II. 何… III. 金属加工-高等学校-教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 35105 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 武进第三印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:12.5 字数:312 千字

2000 年 8 月第 1 版 2000 年 8 月第 1 次印刷

印数:1-5000 定价:16.00 元

前 言

本教材是由江苏省高校金属工艺教学研究会组织编写的高等工科院校《工程材料及机械制造基础》系列教材之四《材料成形技术基础》。它是为适应 1998 年国家教育部调整和合并高校的专业设置后而提出的改革教学内容、课程体系和加强学生素质及能力培养的要求而编写的。是在 1996 年 12 月张启芳主编的《热加工工艺基础》原教材的基础上,精简了铸造、锻压、焊接内容,适当地增加和拓展了非金属材料成形的内容。东南大学出版社决定在本教材出版后,张启芳主编的《热加工工艺基础》不再出版。

本教材编写时本着“加强基础、注重工艺、强化能力的培养”的精神,各章以基础、方法、工艺、结构工艺性、新进展为一条主线,使得全书层次分明;具体的成形方法、成形工艺尽可能以典型零件为引线逐一牵出,以培养分析问题和解决实际问题的能力;在内容体系上注意兼顾系列教材中的《工程材料》和《金工实习》(机械类),基本做到“你无我有,你浅我深”,注重介绍当前材料成形技术的新工艺、新技术、新进展;各种单位名称、名词术语均采用国家标准。

本教材由何红媛任主编,周一丹任副主编,张启芳任主审,参加编写人员有:何红媛(内容提要、前言、绪论、第五章),周一丹(第三、六章),李集仁(第二、四章),孙瑜(第一章)。

骆志斌、卫家楣、王特典、张介岷等为本教材的编写和出版做了大量的工作,在此深表谢意。

限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2000 年 6 月

绪 论

材料是用来制造机器零件、构件和其它可供使用物质的总称。按化学组成分,材料可分为金属材料、无机非金属材料、有机非金属材料 and 复合材料。

材料是人类生产和生活的物质基础。材料的发展推动人类社会的进步,人类从最早使用的石器材料发展到如今文明社会大量使用的各类合金钢、非金属材料及复合材料便能充分说明这一点。而人类社会的进步又促进材料的发展。人类物质生活水平的提高和生产技术的发展是人类社会进步的重要标志,同时,人类进一步认识自然世界和改造自然世界的欲望更加强烈,发展生产、改善生活成为人类最基本的实践活动。在认识世界和改造世界的漫长岁月里,人类凭借自己的聪明才智,相继研制和开发了各种新材料、新工艺,促进了材料的发展。

材料只有经过各种不同的成形方法加工,使其成为毛坯或制品后,才具有使用价值。合理的成形工艺,先进的成形技术才能使材料成为所需的毛坯或制品。随着人类社会的进步,生产力的发展,材料的成形技术也经历了从简单的手工操作到如今复杂的、大型化的、智能化和机械化生产的发展过程。我国古代劳动人民对材料及其成形技术的研究远远超过同时代的欧洲,直到 17 世纪,我国还一直处于世界领先地位,为世界文明和人类进步作出了巨大贡献。

我国祖先最早用火烧制陶器和瓷器,五代时期我国陶瓷技术已登峰造极,这时生产的瓷器被誉为“青如天、明如镜、薄如纸、声如磬”。瓷器已成为中国文化的象征。

我国的铸造技术和锻造技术闻名于世,1939 年在河南安阳出土的商代晚期(至今已有 3000 多年)青铜器司母戊鼎重达 875kg,体积庞大,花纹精巧。1965 年在湖北江陵县楚墓中出土的越王勾践青铜宝剑,虽然埋在地下已有 2000 多年,但其刃口锋利异常,当试验者握剑轻轻一挥,竟把叠在一起的十九层白纸截断。

我国的焊接技术也有着悠久的历史,在河南辉县战国墓中,殉葬铜器的耳和足是用钎焊方法与本体连接的,这比欧洲国家应用钎焊技术还早 2000 多年。

我国还是最早使用胶粘剂的国家之一,在陕西临潼秦始皇陵二号出土的两乘大型彩绘铜车马,每乘各有一车四马,由一名御官俑驾驭,其材料以青铜为主,并配以金银饰品。造型逼真的铜马和装饰华丽的铜车,反映了秦朝时期我国祖先精湛的冶铸技术,而金银饰品之间连接是用无机胶粘剂胶接的,说明了早在 2000 多年前,我们的祖先已掌握了无机胶接技术。

我国明朝科学家宋应星编著的《天工开物》一书中记载了冶铁、炼钢、铸钟、锻铁、淬火等各种金属的加工方法,它是世界上有关金属加工工艺最早的科学著作之一。

我们的祖先在材料及其成形技术方面有过辉煌的成就,但是在新中国成立前的近百年,由于长期的封建统治,尤其是外国侵略者的掠夺和剥削,使我国的科学技术处于落后状态。新中国成立后,我国的工农业生产和科学技术得到了迅速发展,特别是党的十一届三中全会以来,在改革开放正确路线指引下,广大科技工作者努力攀登世界科学技术高峰,使我国科学技术领域内的各个方面都取得了举世瞩目的伟大成就。如与材料及其成形技术有着密切

联系的卫星技术,我国已成为世界上具有此项先进技术的少数几个国家之一,处于世界领先水平。

金属材料在 20 世纪是应用最广泛的工程材料,机床、工程机械、汽车等,其重量的 85% 以上是金属材料。而非金属材料由于资源丰富、能耗低,具有优良的电气、化学、力学等综合性能,在近几十年来得到迅速的发展,其发展速度和势头目前已高于金属材料,其中有机高分子材料和陶瓷材料的发展尤为迅速。20 世纪 90 年代末世界有机合成高分子材料的产量已达钢铁产量(体积)的四倍;新近研制的高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧陶瓷、光学陶瓷等高性能陶瓷,可制作切削工具、高温陶瓷发动机、航天飞机外壁瓦片、陶瓷热交换器等,使陶瓷的应用领域大大拓宽。复合材料由于在强度、韧性和耐蚀性能等方面比单一的金属、陶瓷或高分子材料都优越,因此,材料的复合化已成为当今材料发展的趋势。可以预见,今后在工程材料领域里将打破金属材料一统天下的格局,金属材料、陶瓷、有机高分子材料和复合材料将成为工程材料中的四大支柱。

“材料成形技术基础”是高等院校机械类专业必修的一门综合性的技术基础课。本课程主要涉及工程材料的成形技术,其内容包括:金属材料的铸造、锻压、焊接、粉末冶金、高分子材料的成形、陶瓷的成形、复合材料的成形等。其基本要求是:学生在金工实习的基础上,通过本课程的学习,能够掌握毛坯或制品的成形方法、成形原理及其成形的工艺特点,具有根据毛坯或制品能正确选择成形方法和制定工艺及参数的初步能力;具有综合运用工艺知识分析零件结构工艺性的初步能力;了解有关新材料、新工艺、新技术及其发展趋势。为学习其它有关课程及以后从事机械设计与制造方面的工作,奠定必要的基础。

“材料成形技术基础”是一门内容广泛,技术性和实践性较强的课程,建议安排在“工程材料”和“金工实习”课以后讲授,要尽可能利用现代化教学手段(多媒体教学、电视录像片等)以提高学生的感性认识。教学形式应多样化,可通过课堂讨论或实验,加深学生对课程内容的理解,应把学生素质和能力的培养贯穿于整个讲课过程中。努力使本课程的教学达到上述的基本要求。

1 铸造

熔炼金属,制造铸型,并将熔融金属浇入铸型,凝固后获得一定形状和性能铸件的成形方法称为铸造。铸造是机械制造中生产机器零件或毛坯的主要方法之一。与其它成形方法相比,铸造生产具有下列特点:

(1)成形方便,工艺灵活性大

铸件的轮廓尺寸可由几毫米到数十米;壁厚由 0.5 mm 到 1m 左右;质量可由几克到数万千克。可生产形状简单或十分复杂的零件。对于具有复杂内腔的零件,铸造往往是最佳的成形方法。机器中形状复杂的箱体、缸体、床身、机架等往往都是铸件。可用于铸造的合金范围很广,铸铁、铸钢、铜合金、铝合金、镁合金、锌合金等均可用于铸造,其中铸铁材料应用最广。

(2)成本低廉,设备简单、周期短

铸件所用材料来源广泛,大部分可以就地取材,且可以利用金属废料和废机件。一般情况下铸造生产不需要大型、精密设备。而且由熔融金属直接就可获得形状和尺寸与零件接近的毛坯或直接获得零件(精密铸造),节省了大量的金属材料、加工工时以及生产组织和半成品运输等费用,降低了铸件的生产成本。

(3)铸件的力学性能较差,质量不够稳定

铸件中常常有许多缺陷(如气孔,缩松等),而且内部组织粗大、不均匀,其力学性能比相同材料的锻件低。此外,铸造工序繁多,一些工艺过程较难控制,使铸件质量不够稳定,废品率较高。

(4)铸造生产劳动强度大,生产条件差

铸造生产劳动强度大,生产条件差,铸造过程中产生的废气、粉尘等对周围环境造成污染。近几十年来,铸造技术发展很快。许多新型铸造材料、新工艺、新技术和新设备的出现和现代化铸造车间或工厂的建立,使铸造劳动条件大大改善,环境污染得到控制,铸件的质量和性能也大大提高,铸件应用范围也日益扩大。

1.1 铸造基础

1.1.1 合金的铸造性能

铸造合金除应具备符合要求的力学性能和必要的物理、化学性能外,还必须有良好的铸造性能。合金的铸造性能主要指合金的充型能力、收缩、吸气性等。

1) 熔融合金的充型能力

熔化合金填充铸型的过程,简称充型。熔融合金充满铸型型腔,获得形状完整,轮廓清晰铸件的能力,称合金的充型能力。充型能力首先决定于熔融金属本身的流动能力(即流动性),同时又受外界条件影响,如铸型性质、浇注条件、铸件结构等因素影响。因此,充型能力是上述各种因素的综合反映。影响合金充型能力的主要因素有:

(1)合金的流动性

流动性是熔融金属的流动能力,它是影响充型能力的主要因素之一,是液态金属固有的属性。流动性仅与金属本身的化学成分、温度、杂质量以及物理性质有关。合金的流动性好,充填铸型的能力就强,易于获得尺寸准确、外形完整和轮廓清晰的铸件,可避免产生铸造缺陷。决定合金流动性的因素主要有:

① 合金的种类 合金的流动性与合金的熔点、热导率、合金液的粘度等物理性能有关。铸钢熔点高,在铸型中散热快、凝固快,则流动性差。

② 合金的成分 同种合金中,成分不同的铸造合金具有不同的结晶特点,对流动性的影响也不相同。纯金属和共晶合金是在恒温下进行结晶的,结晶时从表面向中心逐层凝固,凝固层的表面比较光滑,对尚未凝固的金属的流动阻力小,故流动性好。特别是共晶合金,熔点最低,因而流动性最好。图 1-1-1 为铅锡合金的流动性与化学成分的关系曲线。

在一定温度范围内结晶的亚共晶合金,其结晶过程是在铸件截面上一定的宽度区域内同时进行的。在结晶区域中,既有形状复杂的枝晶,又有未结晶的液体。复杂的枝晶不仅阻碍熔融金属的流动,而且使熔融金属的冷却速度加快,所以流动差。结晶区间越大,流动性越差。

③ 杂质与含气量 熔融金属中出现的固态夹杂物,将使液体的粘度增加,合金的流动性下降。如灰铁中锰和硫,多以 MnS (熔点 $1650^{\circ}C$) 的形式悬浮在铁液中,阻碍铁液的流动,使流动性下降。熔融金属中的含气量愈少,合金的流动性愈好。

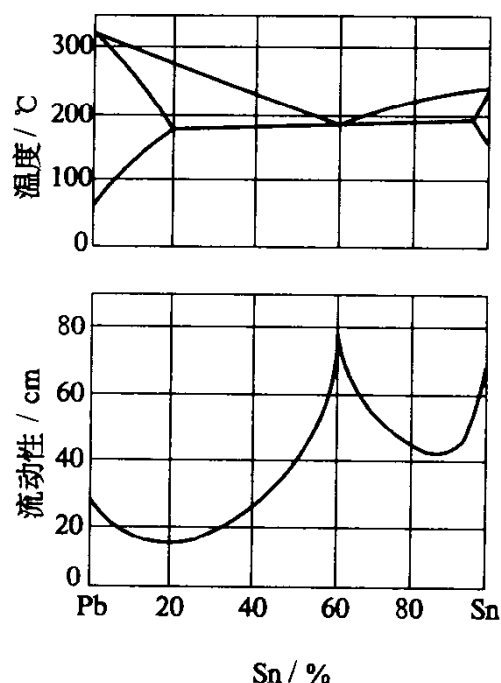


图 1-1-1 流动性和成分的关系

(2)浇注条件

① 浇注温度 浇注温度对合金的充型能力有决定性影响。浇注温度高,液态金属所含的热量多,在同样冷却条件下,保持液态的时间长,所以流动性好。浇注温度越高,合金的粘度越低,传给铸型的热量多,保持液态的时间延长,流动性好,充型能力强。因此,提高浇注温度是改善合金充型能力的重要措施。但浇注温度过高,会使金属的吸气量和总收缩量增大,从而增加铸件其它缺陷的可能性(如缩孔、缩松、粘砂、晶粒粗大等)。因此,在保证流动性足够的条件下,浇注温度应尽可能低些。

② 充型压力 熔融合金在流动方向上所受的壓力愈大,充型能力愈好。砂型铸造时,充型压力是由直浇道的静压力产生的,适当提高直浇道的高度,可提高充型能力。但过高的砂型浇注压力,使铸件易产生砂眼、气孔等缺陷。在低压铸造、压力铸造和离心铸造时,因人为加大了充型压力,故充型能力较强。

(3)铸型条件

熔融合金充型时,铸型的阻力及铸型对合金的冷却作用,都将影响合金的充型能力。

① 铸型的蓄热能力 表示铸型从熔融合金中吸收并传出热量的能力,铸型材料的比热和热导率愈大,对熔融金属的冷却作用愈强,合金在型腔中保持流动的时间缩短,合金的

充型能力愈差。

②铸型温度 浇注前将铸型预热到一定温度,减小了铸型与熔融金属的温度差,减缓了合金的冷却速度,延长了合金在铸型中的流动时间,则合金充型能力提高。

③铸型中的气体 浇注时因熔融金属在型腔中的热作用而产生大量气体。如果铸型的排气能力差,则型腔中气体的压力增大,阻碍熔融金属的充型。铸造时,除应尽量减小气体的来源外,应增加铸型的透气性,并开设出气口,使型腔及型砂中的气体顺利排出。

④铸件结构 当铸件壁厚过小,壁厚急剧变化、结构复杂,或有大的水平面时,均会使充型困难。因此在进行铸件结构设计时,铸件的形状应尽量简单,壁厚应大于规定的最小壁厚。对于形状复杂、薄壁、散热面大的铸件,应尽量选择流动性好的合金或采取其它相应措施。

2) 合金的收缩

(1)合金的收缩及其影响因素

①收缩 铸件在凝固和冷却过程中,其体积减小的现象称为收缩。收缩是铸造合金本身的物理性质,是铸件许多缺陷(如缩孔、缩松、变形、开裂等)产生的基本原因。为了获得形状和尺寸符合技术要求、组织致密的铸件,必须对收缩的规律加以研究。

合金的收缩量常用体收缩率或线收缩率来表示。当温度从 t_0 下降到 t_1 时,合金的体收缩率和线收缩率分别以单位体积和单位长度的变化量来表示。即

$$\text{体收缩率 } \epsilon_v = (V_0 - V_1) / V_0 \times 100\% = \alpha_v (t_0 - t_1) \times 100\%$$

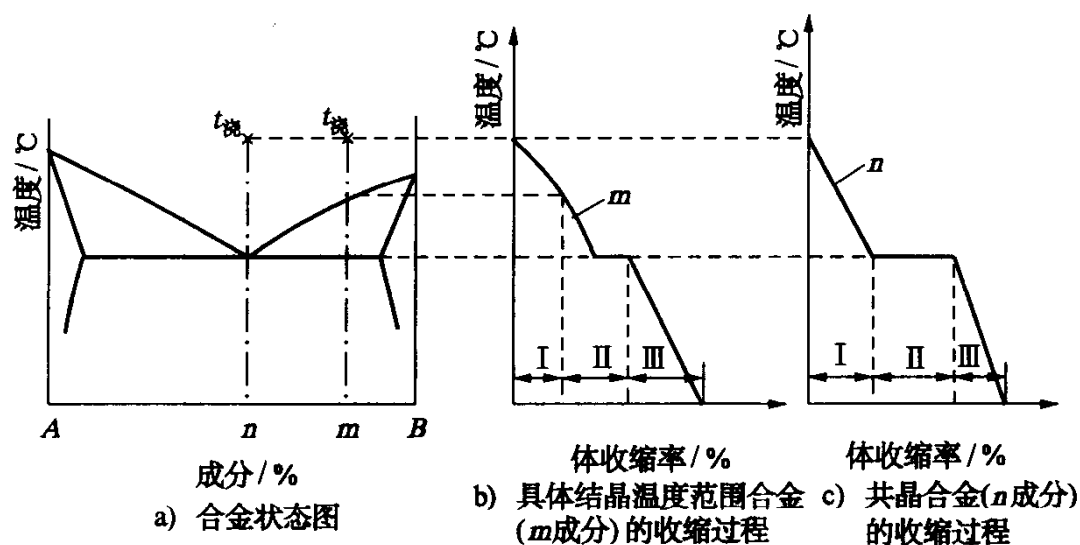
$$\text{线收缩率 } \epsilon_L = (L_0 - L_1) / L_0 \times 100\% = \alpha_L (t_0 - t_1) \times 100\%$$

式中 V_0, V_1 ——合金在 t_0, t_1 时的体积(cm^3);

L_0, L_1 ——合金在 t_0, t_1 时的长度(cm);

α_v, α_L ——合金在 t_0 至 t_1 温度范围内的平均体收缩系数和线收缩系数($1/^\circ\text{C}$)。

合金的收缩可分为三个阶段(图 1-1-2):



I—液态收缩; II—凝固收缩; III—固态收缩

图 1-1-2 铸造合金收缩过程示意图

a)液态收缩 从浇注温度冷却到凝固开始温度(液相线温度)的收缩,即金属在液态时由于温度降低而发生的体积收缩。

b)凝固收缩 从凝固开始温度冷却到凝固终止温度(固相线温度)的收缩,即熔融金属在凝固阶段的体积收缩。

c)固态收缩 从凝固终止温度冷却到室温的收缩,即金属在固态由于温度降低而发生的体积收缩。

合金的液态收缩和凝固收缩表现为合金的体积缩小,通常以体积收缩率来表示。它们是铸件产生缩孔、缩松缺陷的基本原因。合金的固态收缩,尽管也是体积变化,但它只引起铸件各部分尺寸的变化。因此,通常用线收缩率来表示。固态收缩是铸件产生内应力、裂纹和变形等缺陷的主要原因。

合金的总体收缩为上述三个阶段收缩之和。它与合金的成分、温度和相变有关。不同合金收缩率是不同的,表 1-1-1 给出了几种铁碳合金的体收缩率。

表 1-1-1 几种铁碳合金体收缩率

合金种类	含碳量 /%	浇注温度 /℃	液态收缩 /%	凝固收缩 /%	固态收缩 /%	总体积收缩 /%
碳素铸钢	0.35	1610	1.6	3	7.86	12.46
白口铸铁	3.0	1400	2.4	4.2	5.4~6.3	12
灰铸铁	3.5	1400	3.5	0.1	3.3~4.2	6.9~7.8

②影响收缩的因素

a)化学成分 碳素钢随含碳量增加,凝固收缩增加,而固态收缩略减。灰铸铁中,碳是形成石墨化元素,硅是促进石墨化元素,所以碳硅含量增加,收缩率减小。硫阻碍石墨的析出,使铸铁的收缩率增大。适量的锰,可与硫合成 MnS ,抵消硫对石墨的阻碍作用,使收缩率减小。但含锰量过高,铸铁的收缩率又有增加。

b)浇注温度 浇注温度愈高,过热度愈大,合金的液态收缩增加。

c)铸件结构和铸型条件 铸型中的铸件冷却时,因形状和尺寸不同,各部分的冷却速度不同,结果对铸件收缩产生阻碍。此外,铸型和型芯对铸件的收缩也将产生机械阻力,铸件的實際线收缩率比自由线收缩率小。因此设计模样时,应根据合金的种类、铸件的形状、尺寸等因素,选取适合的收缩率。

(2)缩孔的形成及其防止

铸型内的熔融合金在凝固过程中,由于液态收缩和凝固收缩所缩减的体积得不到补充,在铸造件最后凝固部位将形成孔洞。按孔洞的大小和分布可分为缩孔和缩松。

① 缩孔 缩孔通常隐藏在铸件上部或最后凝固部位,有时在机械加工中可暴露出来。缩孔形状不规则,孔壁粗糙。

缩孔的形成过程如图 1-1-3 所示。液态金属填满铸型(图 a))后,因铸型吸热,靠近型腔表面的金属很快就降到凝固温度,凝固成一层外壳(图 b)),温度下降,合金逐层凝固,凝固层加厚,内部的剩余液体,由于液态收缩和补充凝固层的凝固收缩,体积缩减,液面下降,铸件内部出现空隙(图 c)),直到内部完全凝固,在铸件上部形成缩孔(图 d))。已经形成缩孔的铸件继续冷却到室温时,因固态收缩使铸件的外形轮廓尺寸略有缩小(图 e))。

纯金属或共晶成分的合金易于形成集中缩孔。

② 缩松 缩松实质上是将集中缩孔分散为数量极多的小缩孔。

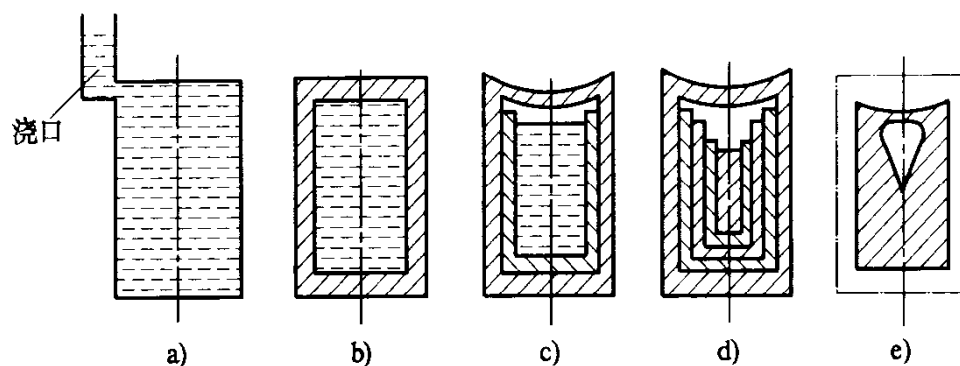


图 1-1-3 缩孔形成过程示意图

缩松形成过程如图 1-1-4 所示。一般合金在凝固过程中都存在液—固两相区,树枝状晶在其中不断扩大。枝晶长到一定程度(图 a)),枝晶分叉间的熔融金属被分离成彼此孤立的状态,它们继续凝固时也将产生收缩(图 b)),这种凝固方式称糊状凝固。这时铸件中心虽有液体存在,但由于树枝晶的阻碍使之无法补缩,在凝固后的枝晶分叉间就形成许多微小的孔洞(图 c))。这些孔洞只有在显微镜下才能辨认出来,我们称这种很细小的孔洞为疏松(显微缩松)。

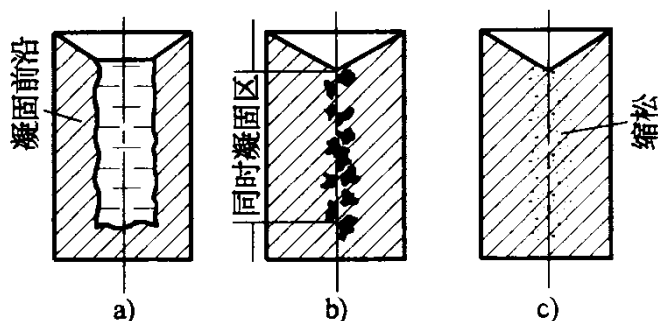


图 1-1-4 缩松形成示意图

由以上缩孔和缩松的形成过程,可得到以下规律:

- a)合金的液态收缩和凝固收缩愈大(如铸钢,白口铁,铝青铜),铸件愈易形成缩孔。
- b)合金的浇注温度愈高,液态收缩愈大,愈易形成缩孔。

结晶温度范围宽的合金,倾向于糊状凝固,易形成缩松。纯金属和共晶成分合金,倾向于逐层凝固,易形成集中缩孔。

③缩孔和缩松的防止

a)按照定向凝固原则进行凝固 定向凝固原则是指采用各种工艺措施,使铸件上从远离冒口的部分到冒口之间建立一个逐渐递增的温度梯度,从而实现由远离冒口的部分向冒口的方向定向地凝固,如图 1-1-5 所示。这样铸件上每一部分的收缩都得到稍后凝固部分的合金液的补充,缩孔转移到冒口部位,切除后便可得到无缩孔的致密铸件。

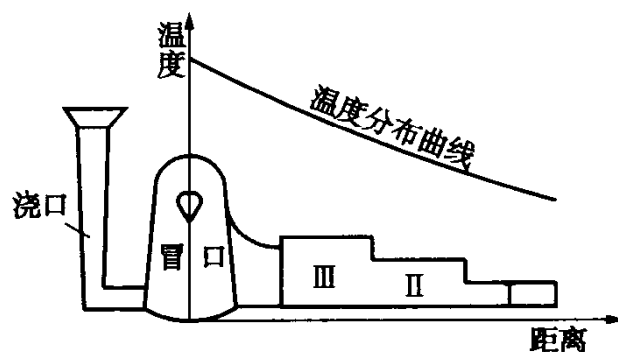


图 1-1-5 定向凝固示意图

b)合理地确定内浇道位置及浇注工艺 内浇道的引入位置对铸件的温度分布有明显影响,应按照定向凝固的原则确定。例如,内浇道应从铸件厚实处引入,尽可能靠近冒口或由冒口引入。

c)合理地应用冒口、冷铁和补贴等工艺措施 冒口、冷铁和补贴的综合运用是消除缩孔、缩松的有效措施。图 1-1-6 是铸钢主缸体的铸造工艺图。

3) 铸造应力、铸件的变形与裂纹

(1) 铸造应力

铸造应力按产生的原因不同,主要可分为热应力、收缩应力两种。

①热应力 铸件在凝固和冷却过程中,不同部位由于不均衡的收缩而引起的应力,称热应力。我们在这里讨论的热应力,主要是指铸件在冷却过程中,由于温度不同而引起不均衡收缩所产生的应力。

现以图 1-1-7 所示的框形铸件来说明热应力的形成过程。它由一根粗杆 I 和两根细杆 II 组成,图 1-1-7 上部表示杆 I 和杆 II 的冷却曲线, $t_{\text{临}}$ 表示金属弹塑性临界温度。当铸件处于高温阶段时, ($T_0 \sim T_1$ 间) 两杆均处于塑性状态。尽管杆 I 和杆 II 的冷却速度不同,收缩不一致,但两杆都是塑性变形,不产生内应力。继续冷却到 ($T_1 \sim T_2$) 间,此时杆 II 温度较低,已进入弹性状态,但杆 I 仍处于塑性状态。杆 II 由于冷却快,收缩大于杆 I,在横杆的作用下将对杆 I 产生压应力而杆 I 反过来对杆 II 以拉应力(图 b))。处于塑性状态的杆 I 受压应力作用产生压缩塑性变形,使杆 I、II 的收缩趋于一致,也不产生应力(图 c))。当进一步冷却, ($T_2 \sim T_3$ 间) 杆 I 和杆 II 均进入弹性状态,此时杆 I 温度较高,冷却时还将产生较大收缩,杆 II 温度较低,收缩已趋停止,在最后阶段冷却时,杆 I 的收缩将受到杆 II 强烈阻碍,因此杆 I 受拉,杆 II 受压。到室温时形成残余应力(图 d))。

热应力使冷却较慢的厚壁处受拉伸,冷却较快的薄壁处或表面受压缩,铸件的壁厚差别愈大,合金的线收缩率或弹性模量愈大,热应力愈大。定向凝固时,由于铸件各部分冷却速度不一致,产生的热应力较大,铸件易出现变形和裂纹,采用时应予以考虑。

②收缩应力 铸件在固态收缩时,因受铸型、型芯、浇冒口等外力的阻碍而产生的应力称收缩应力。一般铸件冷却到弹性状态后,收缩受阻都会产生收缩应力。收缩应力常表现为拉应力,与铸件部位无关。形成原因一经消除(如铸件落砂或去除浇口后),收缩应力也随之消之,因此收缩应力是一种临时应力。但在落砂前,如果铸件的收缩应力和热应力共同作用,其瞬间应力大于铸件的抗拉强度时,铸件会产生裂纹(如图 1-1-8 所示)。

③减小和消除铸造应力的措施

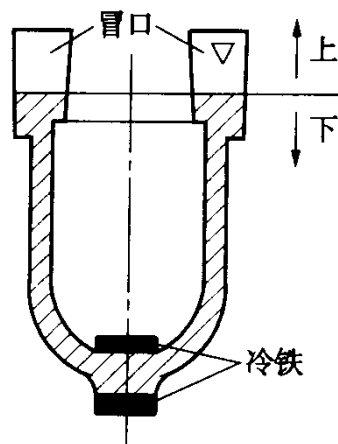
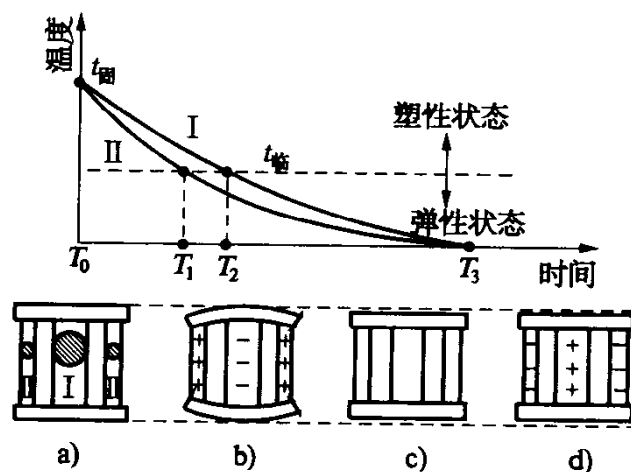


图 1-1-6 冷铁的作用



+ 表示拉应力；- 表示压应力

图 1-1-7 热应力的形成

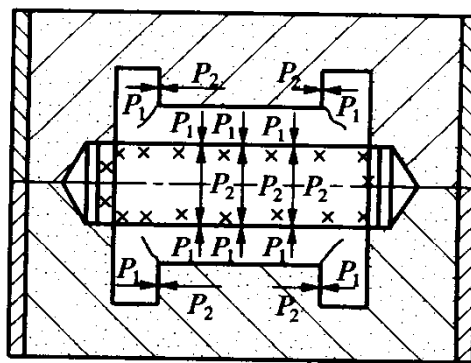


图 1-1-8 铸件产生收缩应力示意图

P_1 —铸件对砂型作用力；

P_2 —砂型对铸件反作用力

a)合理地设计铸件的结构 铸件的形状愈复杂,各部分壁厚相差愈大,冷却时温度愈不均匀,铸造应力愈大。因此,在设计铸件时应尽量使铸件形状简单、对称、壁厚均匀。

b)尽量选用线收缩率小、弹性模量小的合金。

c)采用同时凝固的工艺 所谓同时凝固是指采取一些工艺措施,使铸件各部分温差很小,几乎同时进行凝固(图 1-1-9)。因各部分温差小,不易产生热应力和热裂,铸件变形小。

d)设法改善铸型、型芯的退让性,合理设置浇冒口等。

e)对铸件进行时效处理是消除铸造应力的有效措施。时效分自然时效、热时效和共振时效等。所谓自然时效,是将铸件置于露天场地半年以上,让其内应力消除。热时效(人工时效)又称去应力退火,是将铸件加热到 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$,保温 $2 \sim 4\text{h}$,随炉冷却至 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$,然后出炉。共振法是将铸件在其共振频率下震动 $10 \sim 60\text{min}$,以消除铸件中的残留应力。

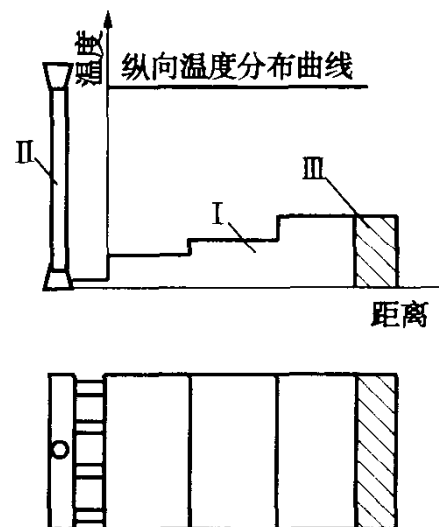


图 1-1-9 同时凝固示意图
I-铸件 II-浇道 III-冷铁

2)铸件的变形与防止

如前所述,在热应力的作用下,铸件薄的部分受压应力,厚的部分受拉应力,但铸件总是力图通过变形来减缓其内应力。因此,铸件常发生不同程度的变形。

图 1-1-10 为车床床身,其导轨部分因较厚而受拉应力,床壁部分因较薄而受压应力。变形结果,导轨面向下凹。

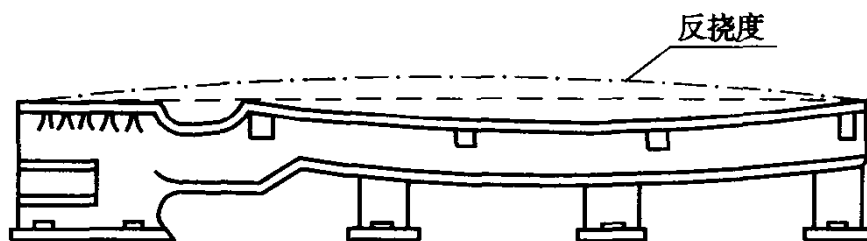
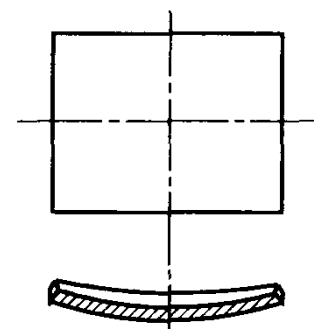


图 1-1-10 床身导轨面挠曲变形

图 1-1-11 为平板铸件,其中心部分比边缘部分散热慢,受拉应力,边缘受压应力,而铸型的上部比下部冷却快,于是平板发生如图所示的变形。

铸件的变形往往使铸件精度降低,严重时可以使铸件报废,应予以防止。因铸件变形是由铸造应力引起,前面介绍的减小和防止铸造应力的办法,是防止铸件变形的有效措施。此外,生产中也常采用反变形法防止铸件的变形。对图 1-1-10 床身铸件,预先将模样做成与铸件变形方向相反的形状,模样的预变形量(反挠度)与铸件的变形量相等,待铸件冷却后变形正好抵消。



1-1-11 平板形铸件的变形

(3)铸件的裂纹与防止

当铸造内应力超过金属的强度极限时,铸件便产生裂纹。裂纹是严重的铸造缺陷,必须设法防止。裂纹按形成的温度范围分为热裂和冷裂两种。

①热裂 热裂一般是在凝固末期,金属处于固相线附近的高温时形成的。其形状特征

是裂缝短,缝隙宽,形状曲折,缝内呈氧化颜色。

铸件结构不合理,合金收缩大,型(芯)砂退让性差以及铸造工艺不合理等均可引发热裂。钢和铁中的硫、磷降低了钢和铁的韧性,使热裂倾向增大。因此,合理地调整合金成分(严格控制钢和铁中的硫、磷含量),合理地设计铸件结构,采用同时凝固的原则和改善型(芯)砂的退让性,都是防止热裂的有效措施。

②冷裂 冷裂是铸件冷却到低温处于弹性状态时所产生的热应力和收缩应力的总和,如果大于该温度下合金的强度,则产生冷裂。冷裂是在较低温度下形成的,其裂缝细小,呈连续直线状,缝内干净,有时呈轻微氧化色。壁厚差别大、形状复杂的铸件,尤其是大而薄的铸件易于发生冷裂。凡是减小铸造内应力或降低合金脆性的措施,都能防止冷裂的形成。例如:钢和铸铁中的磷能显著降低合金的冲击韧性,增加脆性,容易产生冷裂倾向,因此在金属熔炼中必须严格加以限制。

4)铸件中的气孔及防止

气孔是铸造生产中最常见的缺陷之一。据统计,铸件废品中约三分之一是由于气孔造成的。气孔是气体在铸件内形成的孔洞,表面常常比较光滑、明亮或略带氧化色,一般呈梨形、椭圆形等。气孔减小了合金的有效承载面积,并在气孔附近引起应力集中,降低铸件的力学性能。同时,铸件中存在的弥散性气孔还可以促使疏松缺陷形成,从而降低了铸件的气密性。气孔对铸件的耐蚀性和耐热性也有不利影响。按气孔产生的原因和气体来源不同,气孔大致可分为侵入气孔、析出气孔和反应气孔三类。

(1)侵入气孔

侵入气孔是浇注过程中熔融金属和铸型之间的热作用,使砂型或型芯中的挥发物(水分、粘结剂、附加物)挥发生成以及型腔中原有的空气侵入熔融金属内部所形成的气孔。侵入的气体一般是水蒸气、一氧化碳、二氧化碳、氧气、碳氢化合物等。

防止侵入气孔产生的主要措施有:减小型(芯)砂的发气量、发气速度,增加铸型、型芯的透气性;或是在铸型表面刷涂料,使型砂与熔融金属隔开,阻止气体侵入等。

(2)析出气孔

溶解于熔融金属中的气体在冷却和凝固过程中,由于溶解度的下降而从合金中析出,在铸件中形成的气孔,称析出气孔。析出性气孔分布较广,有时遍及整个铸件截面,影响铸件的力学性能及气密性。

防止析出性气孔的主要措施有:减少合金的吸气量;对金属进行除气处理;提高冷却速度或使铸件在压力下凝固,阻止气体析出等。

(3)反应气孔

浇入铸型的熔融金属与铸型材料、芯撑、冷铁或熔渣之间发生化学反应产生的气体在铸件中形成的孔洞,称反应气孔。由铸型、芯撑、冷铁等与合金反应形成的气孔,多位于铸件皮下1~2mm处,直径约1~3mm,称皮下气孔或针孔。反应气孔形成的原因和方式较为复杂。不同合金防止的方法也有所区别,但芯撑、冷铁表面无油、无锈并保持干燥,是防止反应气孔出现的主要措施之一。

1.1.2 常用合金的熔铸特点

1)铸铁件

(1)灰铁件的熔铸特点

普通灰铸铁一般是共晶型合金,具有良好的流动性。同时,由于灰铸铁结晶时伴有石墨化,石墨析出时体积发生膨胀而抵消了部分收缩,因此灰铸铁的线收缩较少,一般为 0.9% ~ 1.3% 左右,碳含量愈接近共晶点,灰铸铁的铸造性能愈好。灰铸铁通常在冲天炉中熔炼。一般不需要炉前处理可直接浇注,无需冒口和冷铁,铸造工艺较为简单。但经孕育处理的灰铸铁,由于处理过程引起碳、硅含量降低,铸造性能比普通灰铸铁差,铸造工艺较复杂,浇注温度高,线收缩率较大,有时需设置冒口补缩。

孕育处理 为了提高灰铸铁的力学性能,生产中常进行孕育处理。铁液经孕育处理后,获得的亚共晶灰铸铁,称为孕育铸铁。其组织特点是珠光体基体上均匀分布着细小石墨片,强度和硬度明显高于普通灰铸铁,但塑性和韧性仍比较差。孕育处理的目的在于促进石墨化,降低白口倾向,适当提高共晶团数,使石墨片的尺寸及分布状况得到改善。

①铁液中碳硅量要低。一般为 2.8% ~ 3.2%,厚件取下限,薄件取上限。

②铁液出炉温度要高,出炉温度应不低于 1420℃ ~ 1440℃,因为较高的过热度使铁液纯净,孕育效果好,流动性提高。低碳、低硅铁液本来流动性就差,孕育处理时还会降温,流动性更差。

③孕育剂 常用的孕育剂为含硅 75% 的硅铁或 30% Ca、65% Si 的硅钙合金,粒度大小随浇包大小而定(一般是 5 ~ 10mm),其加入量大约为铁液的 0.2% ~ 0.7% (厚件取下限,薄件取上限)。

④孕育处理方法 最常用的方法是在出铁槽内加入孕育剂,铁液应在此后 15 ~ 20min 内浇完。此方法简单易行,孕育剂消耗大,且很容易发生孕育衰退现象。为此,近几年来发展了许多瞬时孕育(后孕育)的技术。方法是尽量缩短从孕育到凝固时间,可极大程度地防止孕育作用衰退,最大程度地发挥孕育的作用。

(2)球墨铸铁的熔铸特点

球墨铸铁一般为过共晶型合金。球墨铸铁的凝固过程、铸造性能和灰铸铁有明显不同:

①流动性比灰铸铁差 因为球化和孕育处理,使铁水温度大大下降。因此球墨铸铁要较高的浇注温度及较大的浇口尺寸。

②收缩较灰铸铁大 球墨铸铁共晶凝固范围比灰铸铁宽,是糊状凝固特征。凝固时,铸件形成硬外壳时间较晚,当砂型刚度小时,石墨的膨胀引起铸件外形胀大,结果原有浇、冒口失去补缩作用,易产生缩孔缩松。因此,球墨铸铁一般需用冒口和冷铁,采用顺序凝固原则。

③球墨铸铁容易出现夹渣(MgS、MgO)和皮下气孔缺陷,浇注系统一般采用半封闭式,以保证铁液迅速平稳地流入型腔,并多采用滤渣网、集渣包等结构加强挡渣措施。

球墨铸铁在一般铸造车间均可生产,但在熔炼技术、处理工艺上比灰铸铁要求更高。

①严格控制成分 球墨铸铁化学成分的要求比灰铸铁严格,碳、硅含量比灰铸铁高,锰、磷、硫含量比灰铸铁低。其大致成分为: 3.6% ~ 3.9% C、2.0% ~ 2.8% Si、0.6% ~ 0.8% Mn,小于 0.07% S、小于 0.1% P。硫是相当有害的元素,而球化元素是强有力的脱硫剂,硫含量高会消耗较多的球化剂,严重影响球化,引起球化衰退。

②较高的出铁温度 铁液处理过程中要下降 50 ~ 100℃,为保证浇注温度,出铁温度至少在 1400 ~ 1420℃ 以上。

③球化处理和孕育处理 球化处理的目的是使石墨结晶时呈球状析出。常用球化剂主要是稀土镁合金。其加入量为铁液量的 1.3% ~ 1.8%。球化处理一般采用冲入法(图 1-1-

12a)),将球化剂放入堤坝式浇包内,上面覆盖硅铁粉和稻草粉,铁液分两次冲入,第一次冲入 $2/3 \sim 1/2$,待球化作用后,再冲入其余铁水,经孕育处理、搅拌、扒渣后即可浇注。此外,还有型内球化法(如图 1-1-12b)),将球化剂放置浇注系统内的反应室中,流经此室的铁液和球化剂作用后进入型腔。此法优点是石墨球细小,球化率很高,球化剂消耗较少,球墨铸铁的力学性能高。关键问题是反应室的结构设计及浇注系统的挡渣措施要合理。

由于镁、铈等都是强烈阻碍石墨化的元素,球化处理的同时必须加入一定量的孕育剂促进石墨化,防止白口倾向。孕育剂还可使石墨球圆整、细小,并增加共晶团数量,改善球铁力学性能。

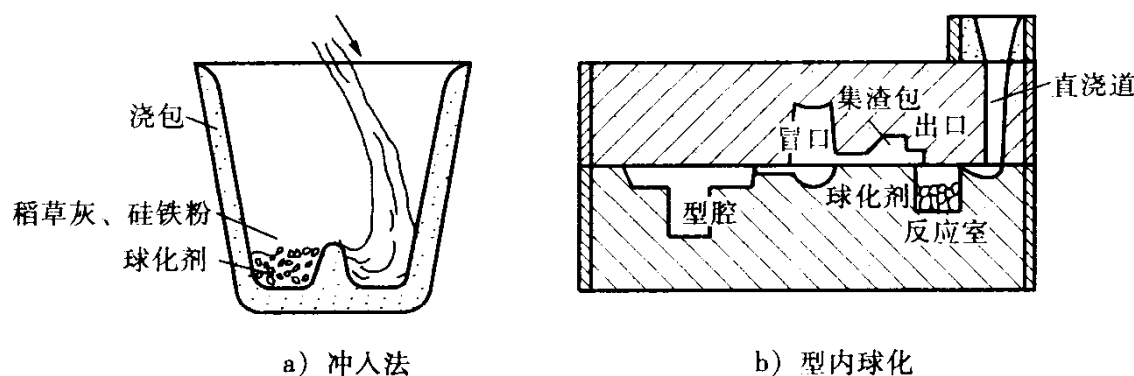


图 1-1-12 球化处理办法

(3)可锻铸铁和蠕墨铸铁

白口铸铁通过石墨化或氧化脱碳可锻化处理,改变其金相组织或成分而获得的有较高韧性的铸铁称可锻铸铁。为获得可锻铸铁,首先必须获得 100% 的白口铸铁坯件。因此,可锻铸铁的碳硅量很低(成分为: $2.4\% \sim 2.8\% \text{C}$, $0.8\% \sim 1.4\% \text{Si}$, $0.3\% \sim 0.7\% \text{Mn}$, $\text{S} < 0.2\%$, $\text{P} < 0.1\%$),铁水流动性差,收缩大,容易产生缩孔、缩松和裂纹等缺陷。铸造时铁液的温度应较高($> 1360^\circ\text{C}$);铸型及型芯应有较好的退让性;并设置冒口。

蠕墨铸铁的组织为金属基体上均匀分布着蠕虫状石墨。蠕墨铸铁的制造过程及炉前处理与球墨铸铁相同,不同的是以蠕化剂代替球化剂。蠕化剂一般采用稀土镁钛、稀土镁钙和稀土硅钙等合金。加入量为铁水质量的 $1\% \sim 2\%$,加入方法也是采用冲入法,和球墨铸铁一样,也要进行孕育处理。

蠕墨铸铁的化学成分与球墨铸铁的要求基本相似,大致成分范围为 $3.5\% \sim 3.9\% \text{C}$, $2.2\% \sim 2.8\% \text{Si}$, $0.4\% \sim 0.8\% \text{Mn}$, $\text{P}, \text{S} < 0.06\% \sim 0.1\%$ 。

蠕墨铸铁有良好的流动性和较小的收缩特性。铸铁由灰铸铁改为蠕墨铸铁时,一般需重做木模和浇注系统,工艺较为简单。

2)铸钢件

铸钢的熔点高,流动性差,收缩大,钢液易氧化、吸气,易产生粘砂、冷隔、浇不到、缩孔、变形、裂纹等缺陷,铸造性能差。因此,在铸造工艺上应采取相应措施,以确保铸钢件的质量。铸钢所用型(芯)砂必须具有较高的耐火性、高强度、良好的透气性和退让性。为了提高铸型强度、退让性,型砂中常加糖浆、木屑等,而且多用水玻璃快干型。为了防止粘砂,铸型表面要涂以耐火度较高的石英粉或锆砂粉涂料。为了防止铸件产生缩孔、缩松,铸钢大部分采用定向凝固原则,冒口、冷铁应用较多。对容易产生裂纹的薄壁铸钢件,应采用同时凝固原则,通常开设多道内浇道,让钢液均匀、迅速地充满铸型。必须严格掌握浇注温度,防止过

高或过低,以免产生缺陷。铸钢件铸后晶粒粗大,组织不均,常常出现魏氏组织,有较大的铸造应力,使铸钢件的塑性下降,冲击韧性降低。为了细化晶粒,消除魏氏组织,消除铸造应力,铸钢件铸后必须进行热处理。

3) 有色合金

(1) 铸造铝合金

铝合金在熔炼时常具有以下特点:

①铝是活泼金属元素,熔融状态的铝易于氧化和吸气。铝氧化生成的 Al_2O_3 熔点高 (2050°C),密度比铝液稍大,呈固态夹杂物,在悬浮的铝液中很难清除,容易在铸件中形成夹渣。在冷却过程中,熔融铝液中的气体常被表面致密的 Al_2O_3 薄膜阻碍,在铸件中形成许多针孔,影响铸件的致密性和力学性能。为避免氧化和吸气,常用熔点低的熔剂 (NaCl 、 KCl 、 Na_3AlF_6 等)将铝液与空气隔绝,尽量减小搅拌,并在熔炼后期对铝液进行去气精炼。精炼是向铝液中通入氯气,或加六氯乙烷、氯化锌等,以形成 Cl_2 、 AlCl_3 、 HCl 等气泡,使溶解于铝液中的氢气扩大到气泡内析出。在气泡上浮的过程中,将铝液中的气体、 Al_2O_3 杂物带出液面,使铝液得到净化。

②铝硅合金的变质处理 变质处理大致可分三类,第一类主要用来细化固溶体合金的 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒,如 $\text{Al}-\text{Cu}$ 类、 $\text{Al}-\text{Mg}$ 类合金应用较为普遍;第二类是共晶体变质,用来改变共晶体组织,广泛应用于 $\text{Al}-\text{Si}$ 共晶合金;第三类是改善杂质的组织或消除易熔杂质相,如加铍、锰等改善粗大的富铁相等。变质处理一般在精炼后进行,变质剂一般是由钠的卤盐组成 $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$ 。处理时,用压瓢把变质剂压入液面下 $100 \sim 150\text{mm}$ 处 $3 \sim 5\text{min}$ 后,取样检验变质处理效果,效果良好即可浇注。

③铸造铝合金熔点低,一般用坩锅熔炼,砂型铸造时可用细砂造型,以降低铸件表面粗糙度。为防止铝液在浇注过程中的氧化和吸气,通常采用开放式浇注系统,并多开内浇道。直浇道常用蛇形或鹅颈形,使合金迅速平稳充满型腔,不产生飞溅、涡流和冲击。各种铸造方法都可用于铝合金铸件,当生产数量较少时可以用砂型铸造;大量生产或重要铸造,常采用特种铸造。金属型铸造效率高、质量好,低压铸造适用于要求致密性高的耐压铸件;压力铸造可用于薄壁复杂小件生产。

(2) 铸造铜合金

各种成分的铜合金,其结晶特征、铸造性能、铸造工艺特点彼此不同。

锡青铜的结晶温度范围宽,以糊状凝固的方式凝固,所以合金流动性差,易产生缩松,故其铸造时首要考虑疏松问题。对壁厚较大的重要铸件,如蜗轮、阀体,必须采取定向凝固;对形状复杂的薄壁件和一般壁厚件,若气密性要求不高,可采用同时凝固。

铝青铜、铝黄铜等含铝较高的铜合金,结晶温度范围很小,呈逐层凝固特征,故流动性较好,易形成集中缩孔,且极易氧化。

铸造时需解决的主要问题是防氧化和吸气,常采用如下措施:

①覆盖 用熔剂(木炭、碎玻璃、苏打和硼砂等)覆盖铜合金液表面。

②脱氧 铜氧化后易生成氧化亚铜(Cu_2O),使塑性变差。一般铜合金熔炼时加入 $0.3 \sim 0.6\%$ 的磷铜(含磷 $8\% \sim 14\%$)脱氧,使 Cu_2O 还原。普通黄铜和铝青铜由于锌和铝本身就是优良的脱氧剂,所以不需要加磷脱氧。

③除气 主要是除氧。锡青铜常用吹氮除气法,吹入铜液中的大量氮气泡上浮时,带走