

中国铸造协会

铸造专业系列教材
铸造工程师认证培训用书

铸钢及其熔炼

李传栻 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国铸造协会

铸造专业系列教材
铸造工程师认证培训用书

铸钢及其熔炼

李传枋 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书分别以金属学理论和电冶金学理论为基础,对铸钢材料和熔炼工艺进行了介绍,着重于实际,讨论了生产作业中的要点,并介绍了国内外在铸钢及其熔炼领域的最新进展。

本书是铸造工程师认证培训用书,也可作为普通高等学校和大专院校铸造专业课程教材,还可供机械工程、冶金专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸钢及其熔炼 / 李传斌编. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

(铸造专业系列教材)

铸造工程师认证培训用书

ISBN 7-5084-4203-2

I. 铸… II. 李… III. ①铸钢—高等学校—教材②铸钢—熔炼—高等学校—教材 IV. TG142.2 TG243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 161585 号

书 名	铸造专业系列教材 铸造工程师认证培训用书 铸钢及其熔炼
作 者	李传斌 编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15 印张 360 千字
版 次	2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—3100 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

“铸造”是一种既经济又便捷的金属成形工艺。无论过去、现在还是将来，铸造都是机械制造业的重要组成部分，它对社会进步和经济发展始终起着重要的作用。

我国的铸造业不仅历史悠久，而且在 21 世纪初，铸件产量已连续 4 年跃居世界第一位，已成为名副其实的铸造大国。然而铸造大国并不就是铸造强国。目前，我国铸造技术水平与发达国家相比仍存在不小的差距，主要表现在铸件质量较差、铸件产品构成落后、企业专业化程度低、绿色环境意识和可持续发展观念不强等方面。究其根本原因，在于人才素质与现代铸造要求不相适应。可以说，没有我国铸造专业人才素质的全面提高，就不会有我国现代铸造技术的进步和发展。

培养专业人才，教育要先行，教材是基础。以往，铸造专业教学及培训用教材大都是 20 世纪 80 年代末编印的，已不能适应培养现代铸造技术人才的需求，因此，编写出版新教材的工作已成为当务之急。同时，为开展铸造工程师的认证工作，也需要一套适用的考试用书。有鉴于此，中国铸造协会主动担起这一重任，并于 2004 年制订了“铸造专业人才教育培训和教材建设规划”，设立“教育培训专项基金”，组织和邀聘国内知名铸造专家、学者编写铸造专业培训系列教材，首批入选规划的教材包括《铸造工艺学》、《造型材料》、《特种铸造》、《灰铸铁、球墨铸铁及其熔炼》、《铸钢及其熔炼》、《铸造非铁合金及其熔炼》、《铸造设备》、《铸造企业管理》共 8 本专业教程。

以上教材都是为了在 21 世纪之初，满足我国铸造专业人才教育培训的迫切需要而优先规划并出版的，这批教材的编写既要从国情出发，又要面向世界、面向未来；既要保证基础性、实用性，又要突出新颖性；要体现本专业的的新面貌、新特点，反映学科前沿，培养创新意识和创新精神。总之，应按精品教材的高标准来完成，希望这套铸造专业系列教材的问世，能够开创我国铸造专业技术培训的新局面，加速铸造队伍的专业水平和整体素质的提高，并为我国铸造行业的新发展作出贡献。

本套系列教材适用于大学、大专层次的铸造专业教学用书，也是铸造工程师认证的培训用书，同时亦可供从事铸造生产的管理与技术人员和其他相关专业技术人员参考。

郭树言

2005 年 10 月

前 言

本书是中国铸造协会为铸造行业培养专业技术人才而组织编写的系列教材之一，内容主要包括铸钢材料和熔炼工艺两部分。

本书着重于阐明有关铸钢及其熔炼的基本概念和实际作业要点，并介绍国内外在这方面的进步和发展。

铸钢材料方面，以金属学理论为基础，分别讲述了铸造碳钢、铸造低合金钢和铸造高合金钢的特点及其应用，并简要介绍了适用于各种铸钢件的热处理工艺。

熔炼工艺方面，以电冶金学为基础，讲述了电弧炉炼钢和感应电炉炼钢的基本原理和熔炼工艺要点，并介绍了炉外精炼技术的发展及其在铸钢行业中的应用。

在本书的第九章，还简单地介绍了超高功率电弧炉和直流电弧炉的概况。虽然这两种熔炼设备目前基本上未用于铸钢行业，但早已在炼钢行业中发挥了极其重要的作用。为了对今后的发展有所借鉴，铸钢行业中从事熔炼工作的技术人员不能不对其有所了解。

本书编写过程中，得到了北京科技大学钟雪友教授和毛卫民教授多方面的帮助，脱稿之后，又承钟雪友教授仔细审阅，提出了很多宝贵的意见，编者在此敬致谢忱。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处在所难免，尚望同行人士和广大读者批评、指正。

编 者

2006年11月

目 录

序 前言

第一章 绪 论

第一节 铸钢业的发展	1
一、铸钢件的出现和铸钢业的形成	1
二、第二次世界大战以后铸钢业的进步	3
第二节 铸钢件的优点及其局限	6
一、铸钢件与锻钢件	6
二、铸钢件与焊接结构件	6
三、铸钢件与铸铁件及其他合金铸件	6
第三节 铸钢件的应用	7
一、电站设备	7
二、铁路车辆	8
三、建筑、工程机械及其他车辆	8
四、冶金、矿山设备	8
五、船舶	8
六、航空、航天设备	8
第四节 铸钢件应用的前景	9

第二章 铸钢的基本知识

第一节 铸钢的结晶过程和铸态组织	10
一、铸钢的结晶过程及收缩特性	10
二、铸钢件的铸态组织	19
第二节 钢中的非金属夹杂物	28
一、夹杂物的来源和分类	28
二、钢中常见各类夹杂物的特点	30
三、夹杂物对铸钢性能的影响及其控制方法	31
第三节 钢中的气体	35
一、钢中的氢	35
二、钢中的氮	36

三、炼钢过程中氢、氮含量的变化及控制要点	38
四、炼钢过程中的氧	38
思考题	39

第三章 铸造碳钢

第一节 铸造碳钢的组成成分	40
一、铸造碳钢的基本成分	41
二、非故意加入的合金元素	42
三、有害元素	42
第二节 一般工程与结构用铸造碳钢	43
一、一般工程与结构用铸造碳钢的力学性能	44
二、一般工程与结构用铸造碳钢的化学成分	45
第三节 特殊用途的铸造碳钢	47
一、焊接结构件用铸造碳钢	48
二、强度较高的铸造碳钢	49
三、高温承压用铸造碳钢	49
四、低温承压用铸造碳钢	50
思考题	50

第四章 铸造低合金钢

第一节 合金化和铸造低合金钢的系列	51
一、低合金钢的性能和合金化	51
二、合金元素	54
三、铸造低合金钢的系列	59
第二节 铸造低合金钢的应用	69
一、焊接结构件用铸造低合金钢	69
二、耐磨件用铸造低合金钢	70
三、常温承压件用铸造低合金钢	71
四、高温承压件用铸造低合金钢	73
五、低温承压件用铸造低合金钢	74
思考题	76

第五章 碳钢、低合金钢铸件的热处理

第一节 铸钢件热处理的基本知识	77
一、钢加热时的组织转变	77
二、奥氏体冷却过程中的组织转变	79

三、回火转变	84
第二节 热处理工艺	87
一、均匀化处理	87
二、正火	87
三、退火	88
四、淬火	89
五、回火	91
思考题	91

第六章 铸造高合金钢

第一节 铸造不锈钢和耐蚀合金	92
一、腐蚀的产生及对不锈钢性能的要求	92
二、铸造不锈钢	95
三、铸造耐蚀合金	108
第二节 铸造耐热钢和耐热合金	110
一、作业条件对耐热材料的要求	110
二、铸造耐热钢	111
三、铸造耐热合金	115
第三节 铸造高锰钢	116
一、化学成分	117
二、力学性能	121
三、铸态组织和热处理	122
第四节 铸造工具钢	126
一、铸造模具的优点	127
二、美国的铸造工具钢标准	127
思考题	129

第七章 电弧炉炼钢

第一节 电弧炉炼钢的特点及相关的技术进步	130
一、电弧炉炼钢的特点	130
二、电弧炉炼钢的发展	132
第二节 交流电弧炉的结构和辅助设备	134
一、交流电弧炉的结构	134
二、电弧炉的辅助设备	140
第三节 有关炼钢的一些基本知识	143
一、有关的物理化学概念	143
二、炉渣及其作用	145

三、炼钢过程中的主要冶金反应	147
第四节 碱性电弧炉炼钢	155
一、烤炉	155
二、补炉、装料	157
三、熔化期	158
四、氧化期	161
五、还原期	168
六、出钢	177
第五节 碱性电弧炉的快速炼钢方式	178
一、单渣法炼钢	178
二、不氧化法炼钢	178
三、返回吹氧法炼钢	179
第六节 酸性电弧炉炼钢	182
一、酸性电弧炉炼钢的特点	182
二、冶炼工艺要点	183
思考题	185

第八章 感应电炉炼钢

第一节 坩埚式感应电炉的设备概要及其特点	186
一、坩埚式感应电炉的工作原理	186
二、坩埚式感应电炉的特点	188
三、坩埚式感应电炉的电气设备	189
四、坩埚式感应电炉炉体的重要构件	191
第二节 感应电炉炼钢的工艺要点	193
一、坩埚式感应电炉所用的耐火材料和筑炉	193
二、感应电炉炼钢的特点	197
三、炼钢操作要点	200
思考题	202

第九章 超高功率交流电弧炉和直流电弧炉

第一节 超高功率交流电弧炉	203
一、超高功率电弧炉炼钢的特点	203
二、超高功率电弧炉的技术难点及相应的措施	204
第二节 直流电弧炉	205
一、直流电弧炉的优点	206
二、直流电弧炉设备概要	207
三、直流电弧炉的操作特点	210

第三节 偏心底出钢方式	211
一、传统出钢方式的特点	211
二、偏心底出钢方式及其优点	212
思考题	213

第十章 炉 外 精 炼

第一节 概述	214
一、真空炉外精炼	214
二、非真空炉外精炼	217
第二节 比较适用于铸钢行业的精炼方法	219
一、钢包吹氩精炼	219
二、真空氧脱碳精炼 (VOD 法)	221
三、氩氧脱碳精炼 (AOD 法)	222
四、钢包炉精炼 (LF 法)	224
五、喷射粒状精炼剂精炼	227
思考题	229
参考文献	230

第一章 绪 论

“铸造”是历史最悠久的金属成形工艺，经历了 5000 多年而长盛不衰，且能不断汲取其他学科的新成果而改善传统工艺。至今，它仍是最经济而且便捷的金属成形工艺。各行各业都需用大量铸件，铸造业是制造业中的基础行业。

钢是目前最重要的工程材料，可用于各种不同的工况条件，其适用范围之广、需求数量之多任何其他工程材料所不能比拟的。碳钢和低合金钢兼有高强度、高韧性和良好的焊接性能，并能经不同的热处理在相当宽的范围内调整其力学性能，是用途最广的工程材料。对于一些特殊的使用条件，如要求抗磨、耐热、耐腐蚀、耐低温等，则有各种不同类型的高合金钢可供选用。

铸钢件是铸造成形工艺和钢质材料的结合，兼有两方面的优点，既可制成用其他工艺难以得到的复杂形状，又能保持钢所特有的各种性能，对许多工业部门来讲，都是不可缺少的。

虽然铸钢工业的历史并不很长，但其发展却很快。就产量来讲，全世界铸钢件年生产能力曾达到 1300 万 t，目前年产量在 600 万 t 左右。就产品质量来讲，铸钢件的性能及其可靠性已可满足特别严格的要求，在矿山冶金机械、运输车辆、工程机械、电站设备及各种装备中都已占有相当重要的地位，飞机、火箭和航天器也都需用铸钢件。

第一节 铸钢业的发展

铸钢业的发展体现在炼钢技术的进步、造型材料的发展、生产工艺的改善、工艺过程控制的强化和生产设备的现代化等方面。

在掌握液态炼钢技术之前，虽然可用“炒钢”技术制成钢质器件，但不可能制造铸钢件。在液态炼钢技术实用化的初期，由于未能掌握铸锭及钢锭加工技术，钢液是倾注于砂型中成型的，尽管当时所用的工艺十分简陋，但所制成的产品仍应认为是铸钢件。

关于铸钢工业发展的概况，大致可以第二次世界大战的结束为界分为两个阶段。

一、铸钢件的出现和铸钢业的形成

铸钢和铸铁都是铁碳系合金，明显的不同点是后者的熔点比前者高 300℃ 以上。

从铁器时代开始到首次炼出液态的钢，其间经历了大约 2000 年。从冶铁到炼钢，虽然只是产品的碳含量有所区别，但技术上却要跨越很大的难度，其主要的障碍是缺乏足够高温的熔炼设备和相应的耐火材料。

有的文献提到，最早的液态炼钢大约在公元 500 年出现于印度，但有可靠记载的是 1750 年英国人 Benjamin Huntsman 的工作，他在坩埚炉及耐火材料方面做出了重要改进，

从而炼成了钢，但其具体情况不详。

正式生产铸钢件，最早是在 19 世纪中叶，几乎是在欧洲一些国家和美国同时制出。

有报道说，瑞士的冶金学家 J. C. Fisher 于 1845 年首先用坩埚炉炼钢，制成了铸钢件。

1847 年前后，奥地利和普鲁士交战期间，德国 Alfred Krupp 工厂用坩埚炉熔炼钢液，制造了铸钢炮管。由于当时对炼钢技术和铸钢的工艺特点知之甚少，虽然炮管表面上未见重大缺陷，但却因脱氧加铝不当而致 AlN 脆性，钢的韧性很低，未能经受住实弹试射的考验。结果，他们认为铸钢是不甚可靠的材料，仍回过头去用青铜制造炮管。

1847 年，美国 John Deere 公司授权匹兹堡的 Jones and Quiggs 钢厂制造钢犁。

1951 年前后，德国 Bochum 钢厂的 Jacob Mayer 用坩埚炉熔炼，铸造了教堂用的钢钟。此后几年中，铸造的钢钟曾在欧洲的几次国际性展览会上展出。由于其响声清脆而且造价仅为青铜铸钟的一半，引起了颇大的轰动。有人认为，首次制成有实用价值的铸钢件者，当推 Mayer。

从工艺技术角度来讲，坩埚炉炼钢是不易掌握的，而且坩埚炉的生产效率低，钢的价格昂贵，不能认为是工业生产的方法。

实际上，直到转炉和平炉投入生产，才是炼钢工业的真正起点。

英国的 Henry Bessemer 经多年的研究，于 1855 年制成了侧吹转炉并用以炼钢。1856 年 8 月，Bessemer 正式公布其发明，立即受到了各国冶炼行业的关注。于是，也有人按 Bessemer 的姓氏将这种炼钢炉命名为“贝氏炉”。

平炉的发明基本上与转炉在同一时期。初期平炉的研制大约完成于 1845 年，但是，直到 1857 年，将热交换器用于平炉从而大幅度提高了冶炼温度后，平炉才具有了实用的工程价值。发明平炉的是德国的 Wilhelm Siemens 和法国的 Pierre Martin，所以，欧洲也将平炉称为西门子—马丁炉。

电弧炼钢炉的问世是铸钢业发展史上的一件大事。采用电弧炉炼钢，除钢的冶金质量大为提高外，更重要的是其在安排生产方面的灵活性优于转炉和平炉。多年来，电弧炼钢炉一直是铸钢工业中应用最广泛的冶炼设备。

最早发明电弧炉的也是 Wilhelm Siemens，于 1878 年获得专利，但其发明未能推广应用。后经法国的 Paul Heroult 和 Girod、Kelles 等先后加以改进，才开始用于生产。Heroult 研制的电弧炉，1894 年起用于炼制碳化钙，1899 年开始用于炼钢。现今用于炼钢的电弧炉基本上都是 Heroult 型或以此为基础的改进型，所以，通常也称之为 Heroult 电炉。

继电弧炉之后，1916 年美国 Princeton 大学的 Edwin Northrup 发明了无心感应电炉。此后，又陆续开发了真空感应电炉、等离子熔炉、直流电弧炉和电渣重熔炉，所有这些炼钢炉都在一定的铸钢生产条件下得到了应用。

20 世纪 20 年代，德国的 W. I. Rohn 就开展了真空熔炼的研究工作。30 年代中期，他所在的公司建造并装设了世界上第一台真空感应电炉，容量为 3t，但由于当时技术和装备方面的限制，未能推广应用。

钢液的炉外真空处理，是炉外精炼技术的重要方面。20 世纪初，E. T. Lake 即提出

在真空室内铸钢锭。1940年,前苏联的Л. М. Новик和А. М. Самарин提出将盛有钢液的钢包置于特定的容器中,然后抽真空,让钢液在真空条件下保持,以降低其中的O、N和H的含量。但是,这种处理方法经过若干年后才进行生产性试验,而且,由于钢液温度下降和缺乏搅拌,未能推广应用。

二、第二次世界大战以后铸钢业的进步

第二次世界大战以后,科学技术迅猛发展,经济增长之快是前所未有的。在这一总的形势下,铸钢业也有了全方位的发展,表现在铸件质量改善、产量增长、劳动生产率提高、能耗下降等方面,现简述几点如下。

1. 铸钢材料方面不断创新

由于对合金化和微合金化的研究不断深入,各种合金钢铸件所占的比重日益增长,这是现代铸钢工业的特点之一。

低合金高强度钢在铸钢工业中的应用日益广泛。加入少量合金元素,配合适当的热处理,可在保证综合力学性能良好的条件下,使钢的强度提高一倍或更多一些。对于要求强度高的结构件,用低合金高强度钢代替铸造碳钢,可使结构的重量减轻、可靠性改善。而且,由于许多工业国家都根据自己的资源条件开发了一些低合金高强度钢体系,目前已有多种低合金高强度钢体系可供设计者选用。

对于各种有特殊性能要求的高合金钢,如抗磨钢、耐热钢或热强钢、耐蚀钢、低温条件下使用的钢,或基于进一步改善其性能,或着眼于降低成本,各工业国都进行了大量的研究工作,有了许多重大的改进和发展。

铸钢的微量合金化也是受到普遍关注的课题。所谓微量合金化,迄今尚无明确的界定,一般是指合金元素加入量在0.1%^①以下,有的情况下(如加入稀土元素),也可能稍高于此值。加入微量的Nb和V,可使铸钢的力学性能明显改善,Ti、Zr、B及稀土元素也都能作为微量合金化元素。目前,微量合金化铸钢的实际应用还较少,其作用的机制和工艺控制条件尚有待进一步研究。

2. 冶炼技术的发展

目前,电弧炼钢炉仍是铸钢业中的主要熔炼设备,电弧炉向大型化发展以后,原采用平炉冶炼的铸钢厂基本上都已改用电弧炉。同时,由于小型铸钢企业的增多和精密铸造的发展,我国铸钢业中感应电炉的应用也相当可观。

从20世纪70年代起,高功率和超高功率电弧炉的应用日益受到重视。由于其熔化过程加速,并在氧化期造成活跃的沸腾,可以提高生产率、降低能耗、提高冶金质量,因而很快就得到推广、应用。新的电弧炉系列,配用的变压器容量已由过去的300~500kVA/t_{容量}提高到了700~1000kVA/t_{容量}。应该提到,高功率和超高功率电弧炉主要适用于连续生产的炼钢作业,对铸钢件生产并不十分适宜,但随这类炼钢炉的发展而出现的新炼钢技术却值得铸钢业者借鉴。

炉外精炼是炼钢技术的一项重要进步,其基本点是将钢的精炼过程转移到炉外的设备

① 本文中化学成分均为质量分数。

中完成,不仅可以缩短炉内冶炼的时间、提高熔炼炉的生产率,而且可以使钢的质量大为改善。

真空处理是炉外精炼的主要方式之一。20 世纪 40 年代末到 50 年代初,前苏联就曾致力于将钢液置于真空容器中脱气的试验。用这种处理方式,钢包上部的钢液有明显的沸腾脱气作用,但是,对于深部的钢液,则因其受上部钢液静压头的作用而效果甚微。同时,处理过程中钢液温度下降也是一个大问题。因此,真空处理工艺的改进和发展,主要在于提高温度和加强搅拌两个方面。

1952 年,德国 Bochumer Verein 公司开始使用液流脱气工艺。将经预热的钢包置于真空室内,抽真空后,将钢液经真空室顶部的中间包注入钢包,使液流在真空中分散下落,以达到脱气的目的。以液流脱气方法为基础的,有德国 Dortmund-Hörder 冶金联合公司于 1956 年推出的 DH 法、Ruhrstahl 公司和 Heracus 公司合作研发的 RH 法。

除液流脱气法外,用加强搅拌方式以增强真空处理效果的方法还有:装设电磁搅拌器,在钢包底部装多孔塞吹入惰性气体,将吹气管自顶部插入钢液吹入惰性气体等。目前,炼钢所用的惰性气体都是氩气。

在真空处理过程中,钢液的温度明显下降,例如,15min 的液流处理可能导致钢液温度下降 100℃ 左右。为补偿热量的损失,出现了多种加热方式,有碳质电热器加热、感应加热、电弧加热和吹氧脱碳加热等。

真空氧脱碳(VOD)法是真空处理的进一步发展。在真空容器内向钢包顶部吹氧,使钢液脱碳,一方面有进一步精炼的效果,对冶炼超低碳钢和不锈钢极为有利,另一方面又可利用氧化产生的热量补偿处理过程中的热损失。在吹氧的同时,还自钢包底部的多孔塞向钢液中吹入少量氩气,搅拌钢液,以加强精炼作用,故也称为真空氩氧脱碳法。用旋转摇包进行真空氩氧脱碳处理的方法(VODC)是 VOD 法的改进。

氩氧脱碳(AOD)法是继真空处理之后在炉外精炼方面的重要发展。20 世纪 60 年代初,美国联合碳化物公司和 Joslyn 不锈钢公司联合进行了 AOD 法的研究,1968 年, Joslyn 公司装设了第一台容量为 15t 的 AOD 炉。1973 年,美国 ESCO 公司建造了一套容量为 4t 的 AOD 装置,1976 年又增添了一套 20t 的装置。1978 年,ESCO 公司开始用 AOD 法精炼低合金钢,用以制造铸件。目前,AOD 法已成为铸钢工业中最重要炉外精炼工艺之一。AOD 法的优点是不需要配备真空系统,从而使设备及工艺操作相对简单。

钢包炉(LF)精炼法,目前也是铸钢工业中应用较广的炉外精炼工艺。

20 世纪 70 年代发展起来的喷射精炼工艺,也是值得重视的炉外精炼方法。用惰性气体为载体,将硅钙合金或硅钙钡铝合金粉末喷射入钢液中,可使钢中的溶氧量和非金属夹杂物显著减少,必要时,还可在喷射过程中同时加入少量合金元素。

近年来,喂线精炼工艺也逐步在铸钢业中推广应用。

3. 造型材料和造型工艺方面的进步

20 世纪 40 年代中期起,壳型工艺和水玻璃砂造型工艺陆续在铸钢生产中得到应用,以“化学硬化”的方式使铸造工作者的耳目为之一新,铸造工艺从而有了突破性的进展。此后,各种新型化学黏结剂不断出现,不同的砂型硬化工艺(自硬、加热硬化和吹气雾硬化)和相关设备也逐步完善。原来,大多数铸钢件都是用黏土干型生产的,化学硬化砂推

广泛应用以后，铸钢生产中所用的黏土干型很快就逐步被化学硬化砂型取代。目前，铸钢行业中，化学硬化砂在型砂总用量中所占的比重比铸铁行业高得多。

目前，铸钢行业中，造型工艺及造型材料的应用情况大致可作如下的概括：

小型铸钢件大部分仍用黏土湿型砂造型，其中用手工造型者已不多见，大都用机器造型，高压造型工艺也在铸钢生产中得到了应用。

一部分要求尺寸精度高的小型铸钢件，则采用熔模精铸工艺或壳型铸造工艺。

中型铸件以采用化学硬化砂为主，黏土砂干型已基本被淘汰。其中，我国用水玻璃砂者为最多，一般用简单的机器造型或手工造型。水玻璃砂中加入黏土、提高湿态强度，以便于造型后立即取模的工艺方法，由于落砂困难，废砂无法再生，现已很少采用。目前应用最广的工艺仍是吹 CO_2 硬化。酯硬化水玻璃砂的应用也在不断扩大。

自 20 世纪 80 年代起，铸钢件用树脂自硬砂造型工艺者日见增多，这种工艺很适合铸钢生产的特点，有很好的发展势头。

大型铸钢件目前仍以用水玻璃砂造型为主，大都用手工造型，树脂自硬砂的应用也正在发展。

20 世纪 70 年代初，由日本阿基塔公司和长野县工业试验场共同开发的真空密封造型工艺（V 法）问世。1985 年，我国山海关桥梁厂开始采用此工艺制造高锰钢辙岔铸件，产品质量很好，现已有批量出口。

20 世纪 80 年代后期，前日本铸物技术协会着手研究水玻璃砂的真空替代硬化法（VRH 法），1991 年开始用于生产。我国张家口煤矿机械厂和宁国耐磨材料厂都已用此工艺生产中型铸钢件。

4. 监控和测试手段的发展

生产过程中的测试和监控，对保证铸件质量有特别重要的作用。近 30 年来，这方面有了很大的进展，已使铸钢工业的面貌大为改观。可以说，这是铸钢业现代化的一个重要方面。

在炼钢作业中，用直读光谱仪，可很快得知钢液的化学成分，再加以快捷的测温技术，能准确而主动地控制炼钢过程。还可以在此基础上借助于计算机实现冶炼过程的自动控制。

在型砂管理方面，型砂各种性能的测定和砂处理过程的控制也在不断完善。

在工艺设计方面，采用计算机模拟技术，可对铸型中的温度场和铸件的凝固过程有更深入的了解，这对改善铸件质量和提高工艺出品率是十分重要的。

各种无损检测技术，如磁粉探伤、渗透探伤、射线探伤、超声波探伤和涡流探伤等，已在许多工厂应用。

超声波探伤是相当便宜而又简便易行的方法。过去，因一些干扰因素不易排除，此法曾被认为准确度不高而较少用于铸件的检测；现在，由于仪器性能改善和正确地使用液浸介质，在缺陷定位、定量和定性等方面都有进步，此法已成为重要的无损检测手段之一。

射线探伤技术也有了很大的进步。从射线源来讲，除 X 射线、 γ 射线外，也有铸钢厂装设了电子加速器，用高能射线对厚大铸件进行检测。

由于铸件质量检测手段的改善和铸件缺陷矫正技术的提高，对铸件质量的检查已不仅

是防止不良品出厂的消极防范措施,而且是引导工艺改进、确定技术创新课题、不断提高产品质量的重要环节。

由测定枝晶间距(DAS)判断铸件关键部位的实际力学性能,也是无损检测技术的发展。在材质相同、热处理规范不变的情况下,材料的强度与枝状晶二次分枝晶轴间的距离有良好的相依关系。这对于重要的铸件,不失为一种有益的辅助检测手段。

第二节 铸钢件的优点及其局限

铸钢件既保有钢质材料所特有的优异性能,又有由液态金属成形的一切优点。为使读者对此有较具体的了解,下面将铸钢件与用其他成形方法制造的钢结构件、他种合金铸件作一些简单的比较。

一、铸钢件与锻钢件

铸钢件的浇注温度比钢锭的浇注温度高,形状又比钢锭复杂,凝固条件的控制比钢锭困难得多,而且此后又不经锻压加工,一般说来,铸钢件的晶粒比较粗大,热节处和枝状晶晶间的疏松难以避免。因此,铸钢的力学性能往往稍逊于锻钢。但是,如果铸钢件的工艺设计良好,凝固过程控制得当,再予以适当的热处理(特别重要的铸件还可以采用等静压处理),则铸钢的性能也可接近于锻钢。

铸钢力学性能的各向异性并不显著,在这方面优于锻钢。研究工作表明:轧制钢材的纵向力学性能略高于铸钢,横向性能则稍逊于铸钢,平均起来,质量良好的铸钢基本上与锻钢相近。目前,有些高质量产品往往要考虑材料在3个坐标轴方向的性能,铸钢件的长处就更值得重视了。在有特殊要求的情况下,还可制成定向凝固的柱状晶或单晶铸件。如航空发动机的涡轮叶片,制成定向柱状晶铸件后,热疲劳性能和高温抗蠕变性能大为改善,制成单晶铸件后,消除了晶界的影响,性能又进一步提高。

铸造是由液态金属成形的,可按设计者的构思制成形状复杂、刚度高、应力集中不显著的结构件,这方面,锻造是不能与之比拟的。

二、铸钢件与焊接结构件

在结构件的形状和尺寸方面,焊接结构件的灵活性优于锻钢件,但与铸件相比,仍有以下的不足之处:①焊接过程中易于变形;②难以制成流线型的外形;③结构件的内应力较高;④施焊部位影响结构件的外观。

当然,制造焊接结构件还有生产准备周期短的优点,而且,不像制造铸件那样必须准备模样和芯盒。

值得注意的是,现在的工程与结构用铸钢件一般都具有良好的可焊性,设计者可采用铸钢件与焊接件相结合的铸焊结构,兼取两者之长。

三、铸钢件与铸铁件及其他合金铸件

铸钢件能用于多种不同的工况条件,其综合力学性能优于其他铸造合金,而且有多种

适用于不同特殊用途的高合金钢。

一切承受高拉伸应力或动负荷的部件、重要的承压容器铸件、在低温或高温下承受较大负荷的部件，原则上都应优先考虑采用铸钢件。在冲击磨损条件下工作的零部件则应采用高锰钢铸件。

铸钢件的吸震性能、耐摩擦、耐磨损性能和其他铸造性能都较铸铁差，铸钢件的生产成本也高于铸铁件。

铸钢件的比强度低于铝合金铸件，即：在强度、刚度相同的条件下，铸钢件的重量大致是铝合金铸件的2倍。但是，铸钢件的价格比铝合金铸件低得多。

第三节 铸钢件的应用

因为铸钢件具有以上特点，几乎所有的产业部门都需要铸钢件，在船舶、运输车辆、建筑机械、工程机械、冶金矿山设备、采油及化工设备、航空及航天设备等方面的应用尤为广泛。至于铸钢件在各产业部门的分配比例，则因各国的具体情况不同而有很大的差异。

美国的幅员辽阔、铁路网络稠密，线路总长度约31.8万km，而且轨道车辆的车轮都是石墨型重力铸造或石墨型低压铸造的铸钢件，因而铁路系统每年消费的铸钢件约占其铸钢件总产量的47%。此外，由于高速公路线路很长，建筑及工程机械行业的铸钢件用量也相当可观，约占全国总产量的15%左右。

日本的情况就与美国大不相同，造船业发达而铁路线路短，铁路运输系统铸钢件的年消费量只占全国产量的2%左右，造船行业的消费量则占19%。建筑机械行业和矿山设备行业的用量占17%左右。

我国虽然幅员广阔，但目前铁路线路还不长，只有7.5万km左右。近年来，由于铁路运输多次提速，车辆补充和更新的量很大，铁路系统每年铸钢件用量约占全国铸钢件总产量的20%~23%。我国钢铁及有色冶金工业迅猛发展，拉动了矿山、冶金设备行业对铸钢件的需求，这一行业目前是铸钢件用量最大的行业，约占总产量的30%左右。

铸钢件的重量可在很大的范围内变化，小的可以是重量仅数克的熔模精密铸件，大的可达数吨、数十吨乃至数百吨。铸钢件的品种繁多，不胜枚举。为使读者对诸多的用途有概括的了解，下面就几个主要产业部门使用的铸钢件的情况作简要的介绍。

一、电站设备

电站设备是高技术产品，其主要零部件都在高负荷下长时间连续运转，铸钢件的质量至关重要。

火电站和核电站的设备中，不少零部件需耐受高温作用和高压蒸汽的腐蚀，因而，对零部件的可靠性有十分严格的要求。铸钢件能最大限度地满足这些要求，在火电站和核电站中广为采用，如汽轮机的高、中压缸体，主汽阀，高压阀体等。但是，一些重要铸件往往要对多处进行射线探伤。

水电站的水轮机装设在主结构的下面，更换零部件十分困难，因而对零部件的质量要