

铸钢件焊接 及缺陷修复

沈阳晨 魏建军 主编

操作技巧 典型实例 实用指南



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



铸钢件焊接及缺陷修复

主 编	沈阳晨	魏建军			
副主编	黄智泉	宁德林	杨晓兵	潘 健	
参 编	许 健	王 欣	张永生	李军伟	尼军杰
	杨 威	谢军虎	袁流秀	张海燕	薛建春
	刘燕云	韩 露	蒋思涵	赵轩玮	



机械工业出版社

本书系统全面地介绍了铸钢件焊接及缺陷修复技术。其主要内容包括铸钢基础知识、铸钢件的焊接、铸钢件缺陷的修补、铸钢件焊接与补焊工艺规程的编制方法、铸钢件焊接与补焊缺陷的防止措施及质量管理、铸钢件的变形与矫正、铸钢件焊接与补焊操作技巧、常用铸钢材料的焊接与补焊、设备在线焊接修复实例、铸钢件产品缺陷焊接修复实例、铸钢件组焊或接管等构件的焊接。本书详细地介绍了铸钢件焊接与补焊的基本知识和操作技巧,并给出了典型的铸钢件焊接及缺陷补焊修复的应用实例。本书重点突出,具有较强的实用性、可靠性和可操作性。

本书可供从事铸钢件焊接生产的工程技术人员、管理人员和工人使用,也可供相关专业在校师生和科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

铸钢件焊接及缺陷修复/沈阳晨,魏建军主编. —北京:机械工业出版社,2015.11

ISBN 978-7-111-51606-4

I. ①铸… II. ①沈…②魏… III. ①铸钢件-焊接②铸钢件-铸件缺陷-修复 IV. ①TG4②TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 224215 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华 崔滋恩

版式设计:赵颖喆 责任校对:杜雨霏

封面设计:马精明 责任印制:李 洋

唐山丰电印务有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·21.75 印张·423 千字

0001—3500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-51606-4

定价:58.00 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

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

策 划 编 辑:010-88379734

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网: www.cmpbook.com

机 工 官 博: weibo.com/cmp1952

金 书 网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

铸钢件焊接及缺陷修复是铸钢件生产及应用过程中的重要工序，随着近年来铸钢件产量不断增加，迫切需求阐述简明、深入浅出和适用性强的铸钢件焊接及缺陷修复方面的技术书籍。为了进一步提高铸造、焊接技术人员和操作者的技术水平和操作技能，提高铸钢件焊接或补焊一次合格率，确保铸钢件补焊质量，我们编写了本书。

本书从实用性的角度，详细地介绍了铸钢件焊接或补焊的基本知识和操作技巧，并给出了典型的铸钢件焊接及缺陷补焊修复的应用实例。其主要内容包括铸钢基础知识、铸钢件的焊接、铸钢件缺陷的修补、铸钢件焊接与补焊工艺规程的编制方法、铸钢件焊接与补焊缺陷防止措施及质量管理、铸钢件的变形与矫正、铸钢件焊接与补焊操作技巧、常用铸钢材料的焊接与补焊、设备在线焊接修复实例、铸钢件产品缺陷焊接修复实例、铸钢件组焊或接管等构件的焊接共 11 章。本书突出了铸钢件焊接或补焊工艺特点，具有较强的实用性、可靠性和可操作性。

本书可供从事铸钢件焊接生产的工程技术人员、管理人员和工人使用，也可供相关专业在校师生和科研人员参考。

本书由沈阳晨、魏建军任主编，黄智泉、宁德林、杨晓兵、潘健任副主编，参加编写工作的有：许健、王欣、张永生、李军伟、尼军杰、杨威、谢军虎、袁流秀、张海燕、薛建春、刘燕云、韩露、蒋思涵、赵轩玮，陈永老师对全书进行了认真审阅。

在本书编写过程中，参考了大量专家学者的书籍和文献，在此表示诚挚的谢意。由于编者水平有限，错误和纰漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 铸钢基础知识 1

- 1.1 铸钢的主要特点及分类 1
 - 1.1.1 铸造碳钢 1
 - 1.1.2 铸造低合金钢 2
 - 1.1.3 铸造高合金钢 4
- 1.2 常用铸钢件材料分类 7
- 1.3 铸钢的特性 9
- 1.4 铸钢件常见缺陷及其产生原因 11
 - 1.4.1 铸钢件的铸造缺陷分类 11
 - 1.4.2 铸造缺陷产生原因分析 13
- 1.5 铸钢件的热处理 16
 - 1.5.1 铸钢件热处理的目的 16
 - 1.5.2 铸钢件热处理的主要方式 16
 - 1.5.3 铸钢件的表面淬火 17
 - 1.5.4 各种常用铸钢件的热处理 17
 - 1.5.5 铸钢件焊接或补焊后预防白点退火与去应力处理 18

第2章 铸钢件的焊接 21

- 2.1 概述 21
- 2.2 铸钢件的焊接性 22
 - 2.2.1 焊接性的定义 22
 - 2.2.2 铸钢件的焊接性特点 22
 - 2.2.3 焊缝热影响区宽度 23
- 2.3 常用铸钢材料的焊接性 23

- 2.3.1 铸造碳钢的焊接性 23
- 2.3.2 铬钼系及铬钼钒系耐热钢的焊接性 25
- 2.3.3 其他低合金钢的焊接性 25
- 2.3.4 低碳马氏体不锈钢的焊接性 26
- 2.3.5 $w(\text{Cr}) = 9\% \sim 12\%$ 的超临界钢、超超临界和超高温钢的焊接性 26
- 2.3.6 奥氏体不锈钢铸钢的焊接性 29
- 2.3.7 铁素体-奥氏体双相不锈钢的焊接性 30
- 2.3.8 高锰钢的焊接性 31
- 2.3.9 低温用铸造低合金钢的焊接性 32
- 2.4 铸钢的组装焊接 33
 - 2.4.1 铸钢与铸钢接合的焊接结构 33
 - 2.4.2 铸钢与钢板制作的管道或锻钢管接头等的焊接 34
 - 2.4.3 在钢板结构件上采用铸钢件 35
 - 2.4.4 铸钢件组装焊接的特点 35
 - 2.4.5 铸钢件组焊操作技巧 35
- 2.5 铸钢件焊接或补焊常用的焊接方法及适用性 37



2.5.1 焊条电弧焊	38	4.3 工艺规程的编写依据	75
2.5.2 埋弧焊	39	4.4 工艺规程的编制方法	76
2.5.3 气体保护焊	40	4.4.1 铸钢件的焊接工艺	76
2.5.4 脉冲钨极氩弧焊技术	54	4.4.2 铸钢件的缺陷补焊工艺	78
2.5.5 精密脉冲冷焊技术	56	4.4.3 铸钢件焊接与补焊工艺 规程的有效性	89
2.5.6 常用焊接方法的适用性	57	4.4.4 工艺规程的执行和工艺 纪律检查	89
2.6 焊接材料	59	第5章 铸钢件焊接与补焊缺陷的 防止措施及质量管理	91
2.6.1 焊接材料的选用原则	59	5.1 铸钢件焊接与补焊的常见 缺陷及防止措施	91
2.6.2 焊缝成分的控制	59	5.1.1 外观形状和尺寸不符合要求 的产生原因及防止措施	92
2.6.3 焊条的选择	60	5.1.2 裂纹的产生原因及防止 措施	92
2.6.4 气体保护焊实心焊丝的 选择	61	5.1.3 气孔的产生原因及防止 措施	93
2.6.5 铸钢件焊接或补焊焊缝的 强度匹配	62	5.1.4 夹渣的产生原因及防止 措施	95
2.6.6 铸钢件补焊焊接材料消耗 的计算方法	63	5.1.5 未焊透与未熔合的产生 原因及防止措施	96
2.7 粘接（金属填补）技术	63	5.1.6 色差及硬度不均匀的产生 原因及防止措施	96
2.7.1 粘接技术基础	64	5.1.7 铸钢件补焊缺陷的产生 原因及防止措施	97
2.7.2 粘补工艺的一般过程	64	5.2 铸钢件焊接与补焊质量管理	98
2.7.3 粘接技术在铸钢件缺陷 修补中的应用	65	5.2.1 质量管理的基本概念	98
第3章 铸钢件缺陷的修补	67	5.2.2 铸钢件焊接与补焊质量 管理的控制环节	99
3.1 铸钢件缺陷修补的意义	67	5.2.3 质量管理与焊接检验的 关系	102
3.2 铸钢件缺陷修补的要求	67	5.3 铸钢件的焊接工艺评定	102
3.3 铸钢件缺陷修补的可行性及 可靠性	68	5.3.1 焊接工艺评定的目的及 影响因素	103
3.4 铸钢件缺陷修补的限制	68	5.3.2 焊接工艺评定报告与焊接 工艺规程的重要作用	104
3.4.1 主要缺陷的补焊规定	68	5.3.3 焊接工艺评定的规则、	
3.4.2 缺陷修补限制的必要性	69		
3.4.3 限制修补的条件	69		
3.5 铸造缺陷的焊接修补特点	70		
3.6 铸钢件缺陷的焊接修补程序	70		
3.7 铸钢件的缺肉堆焊	70		
第4章 铸钢件焊接与补焊工艺 规程的编制方法	73		
4.1 概述	73		
4.2 焊接与补焊工艺规程的文件 形式	74		



程序及注意事项	105
5.4 焊接与补焊质量的控制及 检验	107
5.5 铸钢件焊接与补焊质量的 检查及验收标准	109
5.5.1 焊接技术标准	109
5.5.2 焊接与补焊质量的检查 方法	110
5.5.3 铸钢件焊接或补焊区 无损检测有关要求	110
5.5.4 补焊区硬度测试检验 要求	111
5.6 影响铸钢件焊接与补焊质量的 不规范操作	111
5.7 铸钢件焊接与补焊过程中错误 的习惯认识	112
第6章 铸钢件的变形与矫正	119
6.1 铸钢件变形的特点	119
6.2 铸钢件变形的矫正	120
6.2.1 冷态矫正	120
6.2.2 局部加热加压矫正	121
6.2.3 火焰矫正	122
6.2.4 整体加热矫正	123
6.3 铸钢件矫正变形的常见缺陷 及防止措施	123
6.4 不同材料铸钢件变形矫正的 特点	124
6.4.1 马氏体不锈钢铸钢件变形 矫正的特点	124
6.4.2 奥氏体不锈钢铸钢件焊接 变形矫正的特点	125
6.4.3 碳素钢及一般合金钢铸钢 件变形矫正的特点	125
6.5 厚大截面铸钢件变形的火焰 局部矫正	125
6.5.1 火焰局部矫正的特点	125
6.5.2 火焰局部矫正的原理及 方法	125

第7章 铸钢件焊接与补焊操作 技巧	127
7.1 铸钢件焊接与补焊存在的主要 问题	127
7.2 铸钢件严重疏松性缺陷的修复 要点	130
7.2.1 缺陷的清除	130
7.2.2 坡口要求及处理	131
7.2.3 补焊修复操作要点	132
7.3 采用奥氏体不锈钢焊接材料焊 接与补焊非奥氏体铸钢件的 要点	133
7.4 铸钢件大（深）坡口的补焊操 作技巧	134
7.4.1 存在的主要问题	134
7.4.2 缺陷原因分析	134
7.4.3 补焊操作技术及要求	135
7.4.4 修补后的去应力处理	137
7.5 坡口形状对铸钢件补焊质量的 影响	138
7.5.1 铸钢补焊常用的未穿透性 坡口形状	138
7.5.2 铸钢补焊常用的穿透性 坡口形状	140
7.6 铸钢件完全精加工状态下的 缺陷修复	140
7.7 焊接与补焊操作注意事项	142
第8章 常用铸钢材料的焊接与 补焊	148
8.1 铸造碳钢	148
8.1.1 铸造碳钢的碳当量及 焊接性	148
8.1.2 铸造碳钢的焊接或补 焊特点	148
8.1.3 铸造碳钢的焊接或补 焊要点	149
8.1.4 焊接方法与焊接材料	150
8.1.5 焊后去应力处理	150



8.2 铸造低合金钢	151	8.6.3 Cr22 型双相不锈钢的焊接 要点	163
8.2.1 铸造低合金钢的碳当量与 热处理类型	151	8.7 超（超）临界和超高温钢 铸钢	163
8.2.2 退火、正火 + 回火的 铸钢件	152	8.7.1 焊接或补焊工艺特点	163
8.2.3 调质处理的铸钢件	153	8.7.2 超（超）临界铸钢件补焊 工艺要点	164
8.3 铬钼及铬钼钒耐热铸钢	156	8.7.3 常用超（超）临界铸钢件 焊接材料的选用	164
8.3.1 铬钼及铬钼钒低合金耐 热铸钢的焊接特点	156	8.8 高锰钢铸件	164
8.3.2 对铬钼及铬钼钒耐热铸钢件 焊接接头或补焊区的基本 要求	157	8.8.1 高锰钢铸件的焊接特点	164
8.3.3 铬钼及铬钼钒耐热铸钢的 焊接与补焊要点	157	8.8.2 高锰钢铸件的焊接与补焊 要点	165
8.3.4 常用铬钼及铬钼钒耐热铸 钢焊接材料的选用	158	8.8.3 常用高锰钢铸件焊接材料 的选用	165
8.3.5 焊后去应力热处理	158	8.9 低温铸钢件的焊接与补焊 要点	165
8.4 低碳马氏体不锈钢	159	第 9 章 设备在线焊接修复 实例	167
8.4.1 低碳马氏体不锈钢铸钢件 的焊接特点	159	9.1 M16T 锤砧座的焊接修复	167
8.4.2 低碳马氏体不锈钢铸钢件 的焊接与补焊要点	159	9.2 DLA180 机床主轴的堆焊 修复	170
8.4.3 常用马氏体不锈钢焊接 材料的选用	160	9.3 上梁裂纹的焊接修复	171
8.4.4 Ar + CO ₂ 富氩混合气体 保护焊的应用	160	9.4 120MN 水压机活动横梁断裂 焊接修复	173
8.5 奥氏体不锈钢铸钢	161	9.5 水压机底座裂纹的焊接修复	177
8.5.1 奥氏体不锈钢铸钢件的 焊接特点	161	9.6 水压机主缸衬套裂纹的焊接 修复	179
8.5.2 奥氏体不锈钢铸钢件的 焊接与补焊要点	161	9.7 转炉耳轴支块裂纹的在线焊接 修复	181
8.5.3 常用奥氏体不锈钢铸件 焊接材料的选用	162	9.8 ZG270-500 三联液压缸缸体的 焊接修复	185
8.6 双相不锈钢	162	9.9 ZG270-500 三联液压缸缸体的 冷焊修复	186
8.6.1 Cr18 型双相不锈钢的焊接 要点	162	9.10 热模锻压力机机架的焊接 修复	188
8.6.2 Cr25 型双相不锈钢的焊接 要点	162	9.11 热模锻压力机机架焊接修复 工艺评定试验	193



第10章 铸钢件产品缺陷焊接修

复实例	199
10.1 低碳马氏体不锈钢铸钢件的 焊接修复	200
10.1.1 叶片缺陷的焊接修复	200
10.1.2 水轮机上冠的焊接 修复	206
10.1.3 水轮机下环的焊接 修复	212
10.1.4 水轮机导叶的焊接 修复	215
10.1.5 水电、风电铸钢件产品 缺陷的焊接修复	218
10.2 铰座、铰链的焊接修复	226
10.2.1 铰座的焊接修复	226
10.2.2 铰链加工失误的补焊 修复	230
10.3 轧机铸钢件产品的焊接 修复	232
10.3.1 支承辊轴承座的焊接 修复	232
10.3.2 工作辊轴承座缺陷的补焊 修复	235
10.3.3 轧机牌坊（机架）的补焊 修复	238
10.3.4 立辊机架的焊接修复	250
10.4 火电气缸铸钢件缺陷的焊接 修复	254
10.4.1 气缸缺陷的焊接修复	254
10.4.2 高压外缸缺陷的补焊 修复	264
10.4.3 气缸缺陷的焊接修复	273
10.5 火电阀壳、阀体、导流环等的 缺陷焊接修复	277
10.6 锻压设备铸钢件缺陷的焊接 修复	281
10.6.1 模锻锤下锤头缺陷的焊接	

修复	281
10.6.2 快锻压机铸钢件缺陷的 焊接修复	282
10.6.3 热模锻压力机铸钢件缺陷的 焊接修复	285
10.6.4 活动横梁下垫板裂纹的焊接 修复	289
10.6.5 侧梁下部裂纹缺陷的焊接 修复	290
10.7 工作台缺陷的补焊修复	291
10.8 齿圈、齿轮缺陷的补焊 修复	294
10.9 其他铸钢件缺陷的焊接 修复	297
10.10 环形铸钢件变形的矫正与 修复	315
10.10.1 大型整铸环型铸钢件 变形的火焰热矫	316
10.10.2 大型整铸环型铸钢件 变形的加压火焰热矫	317

第11章 铸钢件组焊或接管等

构件的焊接	319
11.1 挖斗体与斗唇、磨损套、 中间套的装焊	319
11.2 高压外缸排气管的焊接	321
11.3 转轮体不锈钢堆焊及肋板的 焊接	323
11.4 球体与面板的组焊	326
11.5 塔柱封板的装焊	328
11.6 高压外缸与钢管的焊接	330
11.7 中压排气缸构件的焊接	332
11.8 高压主气阀阀壳进气连管的 组焊	333
11.9 高压外缸构件的装焊	335
参考文献	339

第1章

铸钢基础知识

铸钢是一种很重要的金属结构材料，它具有优良的力学性能和物理化学性能。由于熔铸工艺的发展和许多适于铸造的新钢种的出现，使铸钢件在工业上得到了广泛的应用。据统计，2014 年我国铸钢件占钢铁产品的 28%。但是由于铸钢产品是在复杂的生产过程制造，并且在苛刻的使用条件下长期运行的，因此会造成铸钢件出现裂纹、缩孔、缺肉等铸造缺陷或损坏，在许多情况下需要对铸钢件的铸造缺陷或损坏进行修复。有些铸钢件因产品设计结构的需要，要进行铸钢组装焊接。随着科学技术的发展，优质高效的焊接新工艺、新材料不断涌现，再加上严格的检验手段，使得铸钢焊接或铸造缺陷焊接修复完全可以满足铸钢产品的技术条件和使用要求。

1.1 铸钢的主要特点及分类

铸钢是冶炼后直接铸造成形而不需要锻轧成形的钢种，铸钢的碳含量一般为 0.12% ~ 0.62%（质量分数）。铸钢产品按其化学成分分为三大类：铸造碳钢、铸造低合金钢及铸造高合金钢。

1.1.1 铸造碳钢

铸造碳钢根据碳含量的不同，可分为铸造低碳钢（碳的质量分数 $< 0.20\%$ ）、铸造中碳钢（碳的质量分数为 $0.20\% \sim 0.50\%$ ）和铸造高碳钢（碳的质量分数 $> 0.50\%$ ）。

（1）铸造低碳钢（ZG200-400） 铸造低碳钢具有较高的塑性和韧性，但强



度较低。这类钢由于碳含量低、铸造性能差、熔点高，因而给熔炼、浇注带来很大的困难。在同样的浇注温度下，钢液的流动性差，易产生浇注不足，形成疏松、气孔、非金属夹渣等缺陷。另外，铸造低碳钢还比较容易氧化，有较高的形成热裂倾向。因此，铸造生产中很少采用铸造低碳钢。

(2) 铸造中碳钢 (ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570) 铸造中碳钢的铸造性能比低碳钢好，铸钢件中的气孔和非金属夹杂物较少，抗热裂倾向的能力较强，由于较低的熔点、较好的流动性而易于获得成形铸钢件。但随着碳含量的增加，其导热性也随之降低，这将引起较大的铸造应力，易使铸钢件变形。由于中碳钢具有较高的强度、良好的塑性和韧性等综合性能，广泛应用于要求承受一定静载荷与动载荷的零件。

(3) 铸造高碳钢 (ZG340-640) 铸造高碳钢具有较高的强度、硬度和耐磨性，但塑性较低，多用于冲击载荷不大的耐磨零件。铸造高碳钢的铸造性能良好，但由于导热性能差和较大的脆性，铸钢件有产生巨大应力而形成冷裂的危险。

1.1.2 铸造低合金钢

铸造低合金钢是在铸造碳钢的基础上，适当提高 Mn、Si 含量，以发挥其合金化的作用，另外还可添加 Cr、Mo 等合金元素，其合金元素的总含量一般不超过 5% (质量分数)。铸造低合金钢的综合力学性能明显优于铸造碳钢，大多用于承受较重载荷、冲击和摩擦的零部件。

铸造低合金钢的钢种和牌号繁多，其中主要可分为普通铸造低合金钢、超高强度铸造低合金钢、高温用铸造低合金钢、低温用铸造低合金钢及抗磨用铸造低合金钢等。

1. 普通铸造低合金钢

(1) 铸造低锰钢 (ZG25Mn、ZG30Mn 等) 普通碳钢中含有 0.5% ~ 0.8% (质量分数) 的 Mn，其作用是脱氧及消除硫的有害作用。当钢中锰含量大于 0.8% (质量分数) 时就成为低锰钢。常用低锰钢的锰含量 > 0.8% ~ 1.5% (质量分数)，因为在这个范围内锰可使钢的强度和硬度升高，而不降低塑性，锰含量大于 1.5% (质量分数) 以后就会损害钢的塑性。

锰在铸造低合金钢中的主要作用是提高淬透性，使正火组织中的珠光体数量增加，分散度变大；使淬火钢易获得马氏体组织，经高温回火后，获得良好的力学性能。

(2) 铸造硅锰钢 (ZG20MnSi、ZG30MnSi 等) 铸造硅锰钢是将锰钢中的硅含量提高至 0.6% ~ 1.0% (质量分数) 而成的，以获得更好的性能，当硅含量小于 1% (质量分数) 时能使锰钢产生明显的强化作用，而塑性几乎不降，同时



锰和硅的共同作用使钢的淬透性进一步提高。硅还提高了锰钢的耐磨性和耐蚀性。硅锰系铸钢主要缺点是易发生回火脆性，回火后应速冷。

(3) 铸造铬钢 (ZG40Cr1) 铸造铬钢的牌号主要是 ZG40Cr1。铬使该钢淬透性及耐回火性提高，它还能使钢在回火中碳化物的析出和聚集缓慢，因而这种铸钢是调质状态下使用的钢种，调质处理后具有较高的力学性能。铬钢的导热性差，并且在一次结晶中易得到粗大树枝晶，故增大铸钢件的热裂倾向，同时具有回火脆性。

(4) 铬钼系铸钢 (ZG35Cr1Mo、ZG42Cr1Mo 等) 铬钼系铸钢是以铬为主要元素，加少量钼，可减弱铬钢的回火脆性，进一步提高其淬透性及耐回火性，并能提高钢的高温强度，改善钢的抗蠕变性能。经调质或正火和回火热处理后，可以获得优良的力学性能。

在铬钼钢中加入少量钒，能显著细化晶粒，使钢的强度、韧性都得到提高。但由于钒在钢中所形成的碳化物难溶于奥氏体，故降低了钢的淬透性。

2. 铸造低合金高强度钢 (ZG34CrNiMo、ZG30CrMnMo 等)

这类钢的屈服强度达 600MPa 以上，钢中的碳含量较高，并加入合金元素 (如 Mn、Si、Cr、Ni、Mo 等) 以保证钢的淬透性，消除回火脆性，再通过调质处理以获得综合性能良好的高强度钢。

(1) 高温用铸造低合金钢 (ZG15Cr2Mo1、ZG15Cr1Mo1V 等) 这类钢具有较强的抗高温软化能力，广泛用于制作在 600℃ 以下工作的阀类铸钢件和汽轮机铸钢件。其主要合金元素为 Mn、W、V 和 Mo，这些元素能提高铸钢的蠕变抗力及应力断裂抗力。其中锰的作用最差，钼的作用最强。而铬的加入是为了提高钢的抗氧化能力，并提高钢中碳化物的稳定性，防止它们在长期工作中发生石墨化，损害钢的性能。

大多数高温用铸造低合金钢中 Mo 的质量分数为 0.5% ~ 1.0%，Cr 的质量分数为 3% 以下。这些钢中的碳含量一般控制在 0.20% (质量分数) 以下，因为低碳可以获得较高的塑性及焊接性能，若碳含量过高，既损害了上述两方面的性能，又不能提高钢的蠕变强度，因而是有利的。如果在 Cr-Mo 钢中，再加入 0.5% ~ 0.25% (质量分数) 的 V，就是铬钼钒铸钢，钒提高晶粒开始急剧粗化的温度，可进一步提高钢的耐热性能，因此铬钼钒铸钢具有较高的持久强度和热强性能。

(2) 低温用铸造低合金钢 (低温钢) 一般把在将 -10℃ 下使用的钢都看作是低温钢。

1) 低温钢按照其成分、材料厚度和最低使用温度的不同，大体上可分为调质和非调质的两种。

① 非调质低温钢母材的组织是铁素体-珠光体，镍含量则限定在 3.5% (质



量分数) 以下, 它只限于铝脱氧钢。因此它能在 $\geq -45^{\circ}\text{C}$ 的温度下使用。

② 调质低温钢则是指铝脱氧钢、低温高强钢、3.5% (质量分数) Ni 钢、5% (质量分数) Ni 钢和 9% (质量分数) Ni 钢等。施加淬火 + 回火处理, 可改善非调质型铝脱氧钢的强度与低温韧性, 这是由于显微组织中出现了铁素体与贝氏体两相组织。这样就可使它在 -60°C 的温度下使用。

在低温下使用的钢, 往往出现脆性, 这种低温脆性是由于零件的工作温度低于钢的韧-脆性转变温度, 而处于脆性状态的缘故。要改善钢的低温性能, 就必须设法降低钢的韧-脆性转变温度。

2) 低温钢的主要特点如下:

① 碳含量低, 主要是为了防止在晶界上形成碳化物膜、减少碳的偏析及限制珠光体数量 (因为珠光体会提高钢的低温脆性), 低温钢的碳含量一般都小于 0.20% (质量分数)。

② S 和 P 要求低, S 和 P 在钢中可形成晶界夹杂物, 加大钢的脆性。

③ 加 Ni 或 Mn、V、Nb 等元素来细化晶粒。

④ 采用调质热处理细化晶粒, 使其获得较好的低温性能。

1.1.3 铸造高合金钢

高合金钢中加入的合金元素总量在 10% (质量分数) 以上。钢中加入大量合金元素后, 钢的组织发生了根本变化, 在常温下的组织已不再是铁素体-珠光体组织, 而是单一的铁素体、单一的奥氏体、单一的马氏体、铁素体-奥氏体 (或马氏体) 组织了。由于有了大量的合金元素, 使得钢具有了抗磨、耐热、耐蚀等特殊的使用性能。铸造高合金钢主要有铸造高锰钢、铸造马氏体不锈钢、超临界、超超临界和超高温铸钢、铸造奥氏体不锈钢和铸造铁素体-奥氏体双相不锈钢。

1. 高锰钢

高锰钢是一种耐磨钢, 钢中锰含量为 13% (质量分数), 碳含量为 0.9% ~ 1.3% (质量分数)。高锰钢的牌号有 ZGMn13、ZGMn14、ZGMn13Cr2 等。这种钢具有奥氏体组织, 韧性很好。高锰钢本身的硬度并不高, 一般在 200HBW 左右, 但这种奥氏体钢具有加工硬化性质, 铸钢件在经受强烈的冲击或重力的挤压情况下, 其表层发生加工硬化现象, 硬度比原来大为提高, 可达 450 ~ 550HBW。铸造高锰钢的铸态组织是有奥氏体和碳化物所构成的, 铸造高锰钢中的碳化物对钢的性能是有害的, 它降低了钢的强度并使钢发脆。因此, 必须设法消除已经形成的碳化物。为此可将钢重新加热至奥氏体区的温度并保温一段时间, 使碳化物溶解在奥氏体中, 然后在水中淬火快速冷却, 使碳化物来不及析出, 这种由于高锰钢通过水淬而得到高韧性的热处理方法称为水韧处理。



铸造高锰钢通过水韧处理后,可以使碳化物完全溶解,因而得到单一的奥氏体组织。

应该指出,铸造高锰钢不适宜在高温($>500^{\circ}\text{C}$)下工作,因为在高温下会从奥氏体中重新析出碳化物,钢又会变脆,而且由于再结晶的作用使得加工硬化的现象消失。

2. 铸造低碳马氏体不锈钢

铸造低碳马氏体不锈钢是在 Cr13 马氏体不锈钢的基础上,通过大幅度降低碳含量,以便提高马氏体不锈钢的韧性,从而消除冷裂纹的敏感性,同时添加 4%~6% (质量分数) 的镍可以使镍当量增加,从而使 δ 铁素体的含量减少而马氏体的含量增加,并加入适量的合金元素 Mo 而形成的。因此,该钢不但强度、硬度较高,而且具有较好的韧塑性、焊接性及耐磨性,同时还具有良好的耐蚀性。

(1) δ 铁素体 铸造低碳马氏体不锈钢在室温下的组织为板条状马氏体,随成分和热处理工艺不同,其回火后的组织中还可能出现逆变奥氏体和 δ 铁素体。 δ 铁素体一般沿奥氏体晶界分布,逆变奥氏体分布在马氏体板条间。当钢中某些铁素体形成元素(如 Si、Cr)等偏近上限,而某些奥氏体形成元素(如 Ni)等偏近下限,就容易造成 Ni 当量余量偏低,产生一定数量的 δ 铁素体。低碳马氏体不锈钢中一旦有 δ 铁素体生成,用热处理或再加工等方法均无法消除。由于 δ 铁素体与马氏体基体之间化学成分、力学性能及热稳定性等方面的差异,它的出现一般会对钢的性能带来不利影响。它不但降低钢的强度,还影响其大截面性能,此处还会成为疲劳和腐蚀源。

铬、镍是降低 M_f 点和增加淬透性的元素。铬还保证该钢具有高的耐腐蚀和耐空蚀能力,如果铬含量过低,便降低其耐蚀性;如果铬含量偏高,就会出现残留奥氏体并增加 δ 铁素体。镍是减少 δ 铁素体的元素,它可在回火中使该钢产生逆变奥氏体,且逆变奥氏体量随镍含量的增加而增加。

(2) 逆变奥氏体 马氏体不锈钢具有较好的淬透性,其正火组织以马氏体为主。回火时,当回火温度超过 A_{c3} 时将发生马氏体向奥氏体的转变,对一般钢来说这种奥氏体通常是不稳定的,在冷却过程中会重新形成新生马氏体,但对马氏体不锈钢而言,在 A_{c3} 以上不太高的温度范围内回火形成的奥氏体却是稳定的,这部分奥氏体称为逆变奥氏体。通常认为逆变奥氏体有益于提高材料的塑、韧性。低碳马氏体不锈钢回火温度应在 A_{c3} 以上较窄的温度范围内进行。随着回火温度的升高,逆变奥氏体量增加,但回火温度过高,会导致奥氏体总量过大,使奥氏体内奥氏体化元素含量相对减少,奥氏体的稳定性降低。该钢种的回火温度一般以 $590\sim 620^{\circ}\text{C}$ 为佳。在回火冷却过程中,奥氏体过多的转变成新生马氏体,逆变奥氏体量反而会降低,使韧塑性恶化。一般情况下低碳马氏体不锈钢须



经过两次回火，一次回火的目的是为了获得最大量的逆变奥氏体，二次回火的目的是促使第一次回火中的新生马氏体进一步分解，组织进一步软化，以获得适量稳定的逆变奥氏体及最佳综合力学性能。

(3) 残留奥氏体 淬火过程并不能完全将奥氏体转变为马氏体，即使过冷到 M_f 以下温度，仍有少量的奥氏体存在，这部分未发生马氏体转变的奥氏体，称为残留奥氏体。残留奥氏体也称不稳定奥氏体，它经过适当的热处理或在以后的加工过程中会相变为马氏体，从而降低钢的韧塑性，且膨胀系数也较铁素体马氏体大，在热加工和焊接过程中产生较大的内应力，引起制品变形或裂纹，特别对焊缝影响更大。因此，该类钢决不允许存在残留奥氏体。为达此目的，其马氏体相变终了点 M_f 必须在室温之上，最好高于 30°C 或更高。

3. 铸造奥氏体不锈钢

铸造奥氏体不锈钢铬含量高，流动性差，铸钢件易产生热粘砂、冷隔、表面皱皮等缺陷，并且易形成热裂和夹渣缺陷。铸造奥氏体不锈钢在常温下应为 $\gamma + \alpha$ + 碳化物（如 CrC 、 NbC 、 TiC 等），但在铸造冷却条件下，共析转变来不及发生，因此得到 γ + 碳化物。将这样组织的钢加热到 1200°C ，使碳化物溶解于 γ 相中，然后淬火使碳化物来不及析出，从而可以获得单相奥氏体。这样的组织是过饱和的，常温下是稳定的，但在高温下碳化物有析出。因此，这种钢不能在高温条件下焊接和使用。

4. 铸造铁素体-奥氏体双相不锈钢

铸造铁素体-奥氏体双相不锈钢在常温下的组织中铁素体奥氏体各占 50%（体积分数）左右。和奥氏体不锈钢相比，双相不锈钢具有强度高、对晶间腐蚀不敏感、良好的抗疲劳性、良好的焊接性及优良的抗腐蚀裂纹性能。

1) 双相不锈钢类型有 Cr18 型、Cr23（不含 Mo）型、Cr22 型、Cr25 型共四种，我国生产的只有 Cr18 型和 Cr25 型两种。

2) 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢（Cr22 型），其化学成分见表 1-1，力学性能见表 1-2。

表 1-1 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.020	22.0 ~ 23.0	3.0 ~ 3.5	4.5 ~ 6.5	≤ 0.30	0.14 ~ 0.20

表 1-2 022Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢的力学性能

$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A(\%)$	$Z(\%)$	硬度 HBW	热处理方法
≥ 450	≥ 655	≥ 25	—	≤ 293	固溶处理



5. 超临界、超超临界和超高温铸钢

超临界、超超临界和超高温铸钢主要是指 Cr 的质量分数为 9% ~ 12% 的马氏体耐热钢, 又称为新型马氏体耐热钢, 主要包括 T91/P91 钢、E911 钢、T92/P92 钢, 属于中合金耐热钢, 是美国 20 世纪 70 年代末 80 年代初开发的新型马氏体耐热钢, 具有高温强度高、抗氧化性能和抗蠕变性能好, 以及相对高的热导率与低的热膨胀系数等特点, 主要用于气缸、主气阀、调节阀、喷嘴室和隔板套等火电耐热钢铸钢件。

该钢可分为普通型、改良型和新型马氏体耐热钢 (Cr 的质量分数为 9% ~ 12%)。在标准的 9Cr-1Mo 钢化学成分的基础上, 采取适当措施降低碳、硫、磷, 添加微量钒、铌、氮等碳化物促进元素, 通过优化热处理规范显著提高材料的持久强度, 这就是改良型耐热钢 (Cr 的质量分数 9% ~ 12%); 在改良型耐热钢的基础上, 减少钼含量, 添加钨或硼、钴等元素, 进行优化热处理后蠕变强度更高的钢种, 即为新型耐热钢 (Cr 的质量分数 9% ~ 12%)。当使用环境是蒸汽且温度为 593 ~ 610℃ 时, 一般选用改良型耐热钢为主 (Cr 的质量分数 9% ~ 12%)。

新型 9Cr、12Cr 马氏体耐热钢成分的共同特点是碳含量低, 纯净度高及经过微合金化 Nb、Al、N、B 和较低 V 的处理。碳含量不大于 0.1% (质量分数), P、S 的含量控制在 0.010% (质量分数) 以内。在力学性能方面, 具有明显高的常温和高温强度, 并同时具有高韧性、高塑性、较高的高温强度和高温蠕变强度。

超超临界材料的性能一般采用正火喷雾加风冷工艺来实现, 其热处理工艺为正火后两次高温回火。铸钢件在正火保温奥氏体化后, 得到完全的奥氏体组织; 正火后用喷雾风冷至一定温度得到足够大的冷却速度, 使奥氏体能完全转变为马氏体。

(1) T91/P91 钢 M_s 点为 380 ~ 400℃, M_f 点为 100 ~ 120℃, 正火温度为 1040 ~ 1080℃, 回火温度为 750 ~ 780℃, 长时间的使用温度极限为 593℃。

(2) E911 钢 M_s 点为 370 ~ 400℃, M_f 点大约为 100℃, 正火温度为 1040 ~ 1080℃, 回火温度 750 ~ 780℃, 长时间的使用温度极限为 600 ~ 620℃。

(3) T92/P92 钢 T92/P92 钢的 M_s 点为 370 ~ 400℃, M_f 点大约在 100℃, 正火温度为 1040 ~ 1080℃, 回火温度为 750 ~ 780℃, 长时间的使用温度极限为 600 ~ 620℃。

1.2 常用铸钢件材料分类

常用国内外铸钢材料牌号分类见表 1-3。



表 1-3 常用国内外铸钢牌号分类

类别	材 料	铸 钢 牌 号
铸造碳钢	低碳钢	ZG230-450、SC410、SC450、WCB、G400、GE200、GS-25N、GS240 + N、GS38、GE24、GS-45、GS45N、GP280CH、GP240GR + N、GP240、GP240GH + N、ASTM216GrWCC、ZG230-450H、ZG230-450B
	中碳钢	ZG270-500、SCPH2、GS-52、30F、SC480、ASTMA2770-40、ASTMA352GLCC、ZG310-570、GS-60、GE300
	高碳钢	ZG340-640
低合金钢	低锰及锰硅系(低锰钢)	ZG20Mn(ZG20SiMn)、ZG25Mn、GS20Mn5、G20Mn5 + N、ZC1、ZC4 LR200、GS24Mn6、G20Mn5 + QT、GS20Mn5V、410W(挪威)、ZG35Mn(ZG35SiMn)、ZG30Mn、ZG30Mn2、GS30Mn5V、GS30Mn5 ZG40Mn、ZG40Mn2、GS30Mn5LV(风冷)、ASTM A148 80-50、ASTM A148 90-60、ZG45Mn2、G28Mn6
	高温用铸造低合金钢	ZG15Cr1MoA、SCPH21、GS17CrMo55、G20Mo5、GS20CrMo54、ZG20CrMo、G17CrMo5-5 + QT、ZG15Cr2Mo1、ZG15Cr1Mo1、KT5106BS8、KT5100BS17、KT5103KS24、G17CrMoV5-10、G17CrMoV9-10、B64J-V、10B15BR、10B15BM、B57J-V、ZG12Cr1MoV、ZG20CrMoV、ZG20CrMoV-II、ZG13Cr1Mo1V、ZG15Cr1Mo1V、KT5102KS21、ZG17Cr1Mo1V、GS-17CrMoV511
	铬钼钢	ZG35CrMo、ZG42CrMo、GX23CrMoV12-1、G23Cr12Mo1NiVG、ZGCr5Mo、ZG16Cr5-MoG
	铬镍钼钢	ZG25CrNiMo、ZG34CrNiMo、GS34CrNiMo6V、GS-8MnMo74、GS-20MnMoNi55、ZG30CrNiMo、GS20CrNiMo4、ZG35CrNiMo、GS-25CrNiMo4V1、ZG34Cr2Ni2Mo、GS35CrNiMo6-6、ASTM A148 Gr105-85-QT、G18NiMoCr3-6
	铬锰钼钢	ZG60Cr2MnMo、ZG30CrMnMo
	模具用钢	ZG55CrMnMo、ZG55CrNiMo
	低温钢	ASME A352/A352M-06Gr-LC3(Ni的质量分数为3.5%)
	高锰钢	ZGMn13-1、ZGMn13-2、ZGMn13-3、ZGMn14、ZGMn13Cr2、SCMnH11、SC-MnH2
高合金钢	马氏体不锈钢	ZG0Cr13Ni4Mo、ZG0Cr13Ni5Mo、ZG0Cr13Ni6Mo、ZG0Cr16Ni5Mo、G-X5CrNi13 4V1、ASTM A743-CA6NM、G-X4CrNi13-4 + QT1、ASTM A487 CA-6NM、ZG1Cr13、SCS1、KT5311CS5
	奥氏体不锈钢	ZGCr25Ni20Si2、ZG1Cr18Ni9Ti、ZG1Cr18Ni9、ZG0Cr18Ni9、ZG0Cr18Ni9Ti、ASTMA743CF-3、ZGCr18Ni25Si2、ZG12Cr22Ni12、ZG30Cr25Ni20Si2、ZGCr25Ni20Si2
	超临界、超超临界、超高温用钢	ZG1Cr10MoNiVNbN、ZG1Cr11Mo1NiWVNbN、GX12CrMoVNbN9-1、GX12CrMoWVNbN10-1-1、LA-STG9T、KT5316AS3、KT5917S0、ASTM A217GrC12A、ZG13Cr9Mo2Co1VNbNB、ZG12Cr9Mo1Co1VNbNB
	双相不锈钢	UNS S32205(ASTM A240)

注：1. SC、KT表示是日本材料。

2. GS、GP、G、GE表示是德国材料。

3. LR200、ZC4、410W是挪威船用铸钢件材料牌号。

4. WCB美国材料牌号，ASTM、ASME(美国机械工程学会)是美国标准。

5. B57J-V、B64J-V是北京北重汽轮机有限责任公司材料牌号(转自法国阿尔斯通标准)。

6. LA-STG9T是法国阿尔斯通材料标准牌号。

7. 10B15BR、10B15BM是DW810A东方汽轮机有限公司材料牌号(转自MHI WTC标准)。