

感应炉冶炼 工艺技术

王振东 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

感应炉冶炼工艺技术

王振东 著

机械工业出版社

本书论述了不锈钢、双相不锈钢、模具钢、高速工具钢、高锰钢、耐热气阀钢、高氮钢、电热合金、耐蚀合金、软磁合金、高温合金等特殊钢与合金的感应炉、真空感应炉、增压感应炉,以及电渣重熔的冶炼工艺要点和操作要点;介绍了合金元素的精确控制、微量元素的控制、钢液的精炼、高纯合金的冶炼、相成分的控制、焊缝热裂纹的控制,以及钢锭组织的细化与均匀化等工艺技术。内容涵盖炼钢、金属材料的加工与热处理。

本书适于从事特殊钢生产和金属材料研制的工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

感应炉冶炼工艺技术/王振东著. —北京:机械工业出版社, 2011.11

ISBN 978-7-111-36033-9

I. ①感… II. ①王… III. ①感应炉—熔炼 IV. ①TG232.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第202073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: 邝 鸥 何月秋 责任编辑: 何月秋 蒋有彩

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛

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)

2012年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·32.5印张·669千字

0 001—3 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-36033-9

定价: 88.00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

策划编辑: (010) 88379732

社服务中心: (010) 88361066 网络服务

销售一部: (010) 68326294 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

自 1942 年四川綦江电化冶炼厂炼钢分厂，我国第一台中频感应电炉建成投产，至今已有 69 年的历史。69 年以来，我国特殊钢产业在几代人的共同努力下获得了巨大的发展，并促进了炼钢工艺技术的进步。特种冶炼已成为我国特殊钢生产的重要组成部分，感应炉冶炼是其主要分支。

特殊钢、特种合金品种的发展，促进了冶金工艺技术的进步。冶金工艺技术是在解决金属材料发展中出现的技术难关之后，才得到了快速的进步。例如：超低碳不锈钢的发明，促进了不锈钢冶炼氩氧脱碳（AOD）和真空吹氧脱碳（VOD）技术的发展；高温合金复杂合金化技术的出现，促进了真空感应炉、真空电弧重熔等技术的发展。很多事实表明，冶金学科与金属材料学科之间具有紧密的相互依存、相互关联、相互渗透的关系。

本书的内容既有炼钢学科的内容，又有金属材料学科的内容。希望本书能起到学习“冶金材料学”知识的作用。因为在炼钢实践或材料研制过程中，经常会遇到专业界限划分不清的技术问题。这种情况下，如果炼钢工作者能多了解一些金属材料学科的知识，或材料工作者也能多了解一些冶金学科的知识，对专业界限不清的问题就很容易取得共识，有利于问题的解决。作者撰写本书的目的：希望炼钢工作者要不断学习、扩展金属材料学科知识，通过对冶炼品种广义成分（包括化学成分、钢的洁净性、铸锭组织的均匀性及结晶结构等）的控制，达到控制钢的组织结构；然后通过组织结构去控制钢的性能，最终得到满意的结果。总之，炼钢工作者要扩大知识面，把视野放宽、放远。

书中的部分内容是作者长期从事特殊钢材料研制和特殊钢生产实践过程的经验与技术积累，其余部分来自文献资料。由于近年来技术文献的商业化现象，不少文献资料只谈效果，不谈实际内容，很难得到有用的数据信息。这种现象给论述技术问题带来了较多困难，从而妨碍了技术交流和科技进步。因此，书中少数论述缺少数据支持，请读者谅解。

最后，向本书引用文献的学者表示衷心的感谢。由于作者水平所限，书中若有错误或不妥之处请读者批评指正。

著 者

目 录

前言

第 1 章 超低碳铁素体不锈钢的冶炼	1
1.1 超低碳铁素体不锈钢概况	1
1.1.1 超低碳铁素体不锈钢的含义	1
1.1.2 超低碳铁素体不锈钢的特点	1
1.1.3 超低碳铁素体不锈钢的化学成分	2
1.1.4 超低碳铁素体不锈钢的组织特点	2
1.2 超低碳铁素体不锈钢中合金元素的作用	2
1.2.1 铬元素的作用	2
1.2.2 钼元素的作用	5
1.2.3 钛、铌元素的作用	5
1.2.4 镍元素的作用	5
1.3 超低碳铁素体不锈钢的冶炼要点	6
1.3.1 铁素体不锈钢的感应炉冶炼方法与要点	6
1.3.2 中频感应炉冶炼钢中碳、氮含量的控制	6
1.3.3 中频感应炉冶炼钢液的稳定化处理	9
1.3.4 中频感应炉冶炼出钢与浇注操作要点	10
1.3.5 真空感应炉冶炼工艺操作要点	11
1.3.6 细化铁素体不锈钢钢锭的结晶组织	13
第 2 章 高纯高铬铁素体不锈钢的冶炼	15
2.1 高纯高铬铁素体不锈钢概况	15
2.1.1 高纯高铬铁素体不锈钢的含义	15
2.1.2 碳和氮对高铬铁素体不锈钢的危害	15
2.1.3 高纯高铬铁素体不锈钢的特点	16
2.1.4 高纯高铬铁素体不锈钢的化学成分	17
2.1.5 高纯高铬铁素体不锈钢的用途	18
2.2 高纯高铬铁素体不锈钢中合金元素的作用	19
2.2.1 铬元素的作用	19
2.2.2 钼元素的作用	20
2.2.3 镍元素的作用	21
2.2.4 铌和钛元素的作用	21
2.3 高纯高铬铁素体不锈钢的冶炼方法	22
2.3.1 真空感应炉一次冶炼工艺	22

2.3.2 真空感应炉加多次电子束炉精炼工艺	23
2.3.3 真空感应炉与多级电子束连续精炼工艺	24
2.3.4 炉外真空精炼 (VOD-PB) 工艺	25
2.3.5 不同冶炼工艺的精炼能力	26
2.4 真空感应炉直接冶炼高纯高铬铁素体不锈钢的工艺要点	26
2.4.1 冶炼用原材料的选择	27
2.4.2 合理匹配原始配料中的碳、氧含量	28
2.4.3 真空感应炉冶炼高纯高铬钢的工艺过程	30
2.4.4 真空感应炉冶炼高纯高铬钢钢液的降氮操作要点	31
2.4.5 真空感应炉冶炼高纯高铬钢钢液的降碳和脱氧操作要点	32
2.4.6 高纯高铬铁素体不锈钢的稳定化处理	34
第3章 马氏体铬不锈钢的冶炼	36
3.1 马氏体铬不锈钢概况	36
3.1.1 马氏体铬不锈钢的含义	36
3.1.2 马氏体铬不锈钢的分类	36
3.1.3 马氏体铬不锈钢的化学成分	36
3.1.4 马氏体铬不锈钢的特点	37
3.1.5 马氏体铬不锈钢的用途	38
3.2 马氏体铬不锈钢中合金元素的作用	38
3.2.1 铬元素的作用	38
3.2.2 碳元素的作用	39
3.2.3 钼元素的作用	40
3.3 马氏体铬不锈钢中频感应炉冶炼工艺要点	40
3.3.1 降低钢中氢含量的操作要点	40
3.3.2 钢中氮含量的控制	41
3.3.3 冶炼过程的造渣与脱氧操作	43
3.3.4 马氏体铬不锈钢的浇注工艺	43
3.3.5 马氏体铬不锈钢钢锭的冷却与退火	47
3.3.6 改善钢的高温塑性的冶金措施	49
第4章 马氏体镍铬不锈钢的冶炼	51
4.1 马氏体镍铬不锈钢概况	51
4.1.1 马氏体镍铬不锈钢的含义	51
4.1.2 马氏体镍铬不锈钢的分类及化学成分	51
4.1.3 马氏体镍铬不锈钢的特点	53
4.1.4 马氏体镍铬不锈钢的用途	54
4.2 马氏体镍铬不锈钢中合金元素的作用	55
4.2.1 碳元素的作用	55
4.2.2 镍元素的作用	56
4.2.3 铬和钼元素的作用	57

4.2.4 氮元素的作用	57
4.2.5 铌元素的作用	58
4.3 马氏体镍铬不锈钢冶炼操作要点	60
4.3.1 钢中氢含量的控制	60
4.3.2 钢的微量氮合金化及冶炼操作	63
4.3.3 钢中 δ 铁素体含量的控制	66
4.3.4 钢中硫和磷含量的控制	68
第5章 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢的冶炼	71
5.1 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢概况	71
5.1.1 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢的含义	71
5.1.2 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢的化学成分	71
5.1.3 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢的用途	71
5.2 合金元素在焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢中的作用	74
5.2.1 碳元素的作用	75
5.2.2 铬元素的作用	75
5.2.3 镍元素的作用	76
5.2.4 钼元素的作用	77
5.2.5 铜元素的作用	77
5.2.6 氮元素的作用	78
5.3 超低碳奥氏体镍铬不锈钢焊缝金属的冶金特性	79
5.3.1 奥氏体不锈钢焊缝金属的组织结构	80
5.3.2 奥氏体不锈钢焊缝金属的裂纹敏感性	81
5.3.3 奥氏体不锈钢焊缝金属的耐蚀性	82
5.3.4 奥氏体不锈钢焊缝金属的脆化倾向	83
5.3.5 提高超低碳奥氏体不锈钢焊材冶金质量的途径	83
5.4 焊接用超低碳奥氏体镍铬不锈钢的冶炼工艺要点	84
5.4.1 焊接用超低碳奥氏体不锈钢冶炼工艺方法的选择	84
5.4.2 焊接用超低碳奥氏体不锈钢中碳含量的控制水平	85
5.4.3 双联法冶炼焊接用奥氏体不锈钢中碳含量的控制	86
5.4.4 真空感应炉冶炼焊接用超低碳奥氏体不锈钢中碳含量的控制	88
5.4.5 降低焊材钢中磷、硫、硼杂质元素的冶金措施	92
5.4.6 提高超低碳奥氏体不锈钢焊缝抗热裂纹能力的冶金措施	94
第6章 冷镦与冷顶锻用不锈钢的冶炼	101
6.1 冷镦不锈钢概况	101
6.1.1 冷镦不锈钢的含义	101
6.1.2 冷镦不锈钢应具备的特性	101
6.1.3 冷镦不锈钢的分类及其特点	104
6.1.4 冷镦不锈钢的化学成分	106
6.2 合金元素对不锈钢冷镦性能的影响	110

6.2.1 合金元素对铁素体不锈钢冷敏性能的影响	110
6.2.2 合金元素对马氏体不锈钢冷敏性能的影响	111
6.2.3 合金元素对奥氏体镍铬不锈钢冷敏性能的影响	112
6.3 冷敏不锈钢的冶炼工艺及操作要点	120
6.3.1 冷敏不锈钢化学成分的控制	120
6.3.2 冷敏不锈钢中频感应炉冶炼工艺	130
6.3.3 降低冷敏不锈钢中非金属夹杂物的措施	134
第7章 铁素体-奥氏体双相不锈钢的冶炼	137
7.1 铁素体-奥氏体双相不锈钢概况	137
7.1.1 铁素体-奥氏体双相不锈钢的含义	137
7.1.2 双相不锈钢的特性	137
7.1.3 双相不锈钢的化学成分与分类	139
7.1.4 双相不锈钢的用途	139
7.2 影响双相不锈钢耐蚀性的冶金因素	141
7.2.1 合金元素对双相不锈钢耐蚀性的影响	141
7.2.2 相比比例对双相不锈钢耐蚀性的影响	144
7.2.3 非金属夹杂物对双相不锈钢耐蚀性的影响	145
7.3 双相不锈钢的冶炼工艺要点	146
7.3.1 双相不锈钢冶炼方法的选择	146
7.3.2 双相不锈钢相比比例的冶金控制方法	147
7.3.3 双相不锈钢中氮含量的控制	152
7.3.4 双相不锈钢电渣重熔的操作要点	154
7.3.5 双相不锈钢中锰和硫含量的控制	155
7.3.6 双相不锈钢钢液的脱氧制度	159
第8章 高锰奥氏体铸钢的冶炼	162
8.1 高锰奥氏体铸钢的概况	162
8.1.1 高锰奥氏体铸钢的含义	162
8.1.2 高锰钢的特性	162
8.1.3 高锰钢的分类与化学成分	163
8.1.4 高锰钢的用途	164
8.2 高锰钢中合金元素的作用与冶金控制	165
8.2.1 碳元素的作用与控制	165
8.2.2 锰元素的作用与控制	167
8.2.3 硅元素的作用与控制	168
8.2.4 磷元素的作用与控制	169
8.2.5 高锰钢的合金化	172
8.3 高锰钢感应炉冶炼工艺及操作要点	175
8.3.1 中频感应炉熔化法冶炼高锰钢的操作要点	175
8.3.2 中频感应炉氧化法冶炼高锰钢的操作要点	176

8.3.3	高锰钢氧化脱磷工艺的改进	177
8.3.4	高锰钢的稀土处理	178
8.3.5	高锰钢浇注温度的控制	181
8.3.6	高锰钢铸件的冶金缺陷与控制	182
8.3.7	真空感应炉冶炼高锰钢的操作要点	184
第9章	模具钢的冶炼	185
9.1	模具钢概况	185
9.1.1	模具钢的含义	185
9.1.2	模具钢的基本特性	185
9.1.3	模具钢的化学成分	187
9.2	模具钢中合金元素的作用	192
9.2.1	冷作模具钢中合金元素的作用	192
9.2.2	热作模具钢中合金元素的作用	194
9.2.3	塑料模具钢中合金元素的作用	195
9.3	模具钢的冶炼工艺与操作要点	196
9.3.1	模具钢冶炼工艺的选择	196
9.3.2	改善高碳高铬模具钢中碳化物的不均匀性	198
9.3.3	模具钢中非金属夹杂物的控制	201
9.3.4	模具钢中硫和磷含量的控制	205
9.3.5	稀土元素改善模具钢的性能	212
9.3.6	模具钢钢锭的冷却与退火处理	214
9.3.7	真空感应炉与电渣重熔双联法冶炼模具钢	215
第10章	高速工具钢的冶炼	220
10.1	高速工具钢概况	220
10.1.1	高速工具钢的含义	220
10.1.2	高速工具钢的用途	220
10.1.3	高速工具钢的分类	220
10.1.4	高速工具钢的化学成分	221
10.1.5	高速工具钢的特性	223
10.2	合金元素在高速工具钢中的作用	224
10.2.1	碳元素的作用	224
10.2.2	钼元素的作用	226
10.2.3	钨元素的作用	226
10.2.4	铬元素的作用	227
10.2.5	钒元素的作用	227
10.2.6	钴元素的作用	228
10.2.7	铝元素的作用	228
10.3	高速工具钢的冶炼工艺与操作要点	229
10.3.1	高速工具钢冶炼工艺的评价	229

10.3.2	高速工具钢碳含量的控制	232
10.3.3	高速工具钢中钨和钼元素的控制	236
10.3.4	高速工具钢中磷和硫含量的控制	237
10.3.5	高速工具钢中微量有害杂质元素的控制	240
10.3.6	改善高速工具钢钢锭的铸态组织缺陷	242
10.3.7	高速工具钢钢锭的脱模、冷却和退火处理	245
10.3.8	合理利用高速工具钢返回料	246
第 11 章	气阀用奥氏体耐热钢的冶炼	249
11.1	气阀用奥氏体耐热钢概况	249
11.1.1	气阀钢的含义	249
11.1.2	气阀的工作条件	249
11.1.3	气阀钢的用途	250
11.1.4	气阀钢的使用特性	250
11.1.5	奥氏体气阀钢的化学成分	254
11.2	合金元素在奥氏体气阀钢中的作用	254
11.2.1	碳元素的作用	254
11.2.2	氮元素的作用	255
11.2.3	铬元素的作用	255
11.2.4	镍和锰元素的作用	256
11.2.5	钨、钼、钒、铌的作用	256
11.3	影响奥氏体气阀钢质量的冶金因素	257
11.3.1	严格控制钢的化学成分	257
11.3.2	控制钢中非金属夹杂物的数量	258
11.3.3	控制钢中碳化物和氮化物的不均匀性	258
11.3.4	细化钢的晶粒度	258
11.4	奥氏体气阀钢的冶炼工艺及操作要点	259
11.4.1	中频感应炉冶炼奥氏体气阀钢的操作要点	259
11.4.2	电渣重熔奥氏体气阀钢的操作要点	266
11.4.3	降低奥氏体气阀钢中非金属夹杂物的途径	270
11.4.4	奥氏体气阀钢晶粒度的冶金控制	271
11.4.5	真空感应炉冶炼奥氏体气阀钢的工艺要点	273
11.4.6	改善奥氏体气阀钢碳化物的不均匀性	274
第 12 章	高氮钢的冶炼	275
12.1	高氮钢的概况	275
12.1.1	高氮钢的含义	275
12.1.2	高氮钢的发展简况	275
12.1.3	高氮钢的化学成分及用途	276
12.2	高氮钢的特性	276
12.2.1	高氮马氏体钢的特性	276

12.2.2 高氮奥氏体钢的特性	277
12.3 合金元素在高氮钢中的作用	280
12.3.1 铬元素的作用	280
12.3.2 锰元素的作用	281
12.3.3 氮元素的作用	281
12.3.4 其他合金元素的作用	282
12.4 增压感应炉冶炼高氮钢的工艺及操作要点	282
12.4.1 增压感应炉设备及冶炼工艺简况	282
12.4.2 增压感应炉冶炼工艺要点	284
12.4.3 增压感应炉的安全作业	288
第13章 镍铬(铁)电热合金的冶炼	290
13.1 镍铬(铁)电热合金概况	290
13.1.1 镍铬(铁)电热合金的含义	290
13.1.2 镍铬(铁)电热合金的化学成分	290
13.1.3 镍铬(铁)电热合金的特性	291
13.2 合金元素在镍铬(铁)电热合金中的作用	296
13.2.1 铬元素的作用	296
13.2.2 硅元素的作用	297
13.2.3 稀土元素的作用	298
13.3 杂质元素对镍铬(铁)电热合金性能的影响	300
13.3.1 碳和氮元素对镍铬(铁)电热合金性能的影响	300
13.3.2 磷、硫、铅、铋元素对镍铬(铁)电热合金性能的影响	301
13.4 镍铬(铁)电热合金的冶炼工艺与操作要点	304
13.4.1 镍铬(铁)电热合金的冶炼方法	304
13.4.2 中频感应炉冶炼镍铬(铁)电热合金的工艺操作要点	305
13.4.3 电渣重熔镍铬(铁)电热合金的工艺操作要点	315
13.4.4 真空感应炉冶炼镍铬(铁)电阻电热合金的工艺操作要点	318
第14章 铁铬铝电热合金的冶炼	324
14.1 铁铬铝电热合金概况	324
14.1.1 铁铬铝电热合金的含义	324
14.1.2 铁铬铝电热合金的分类	324
14.1.3 铁铬铝电热合金的化学成分	324
14.1.4 铁铬铝电热合金的特性	325
14.2 合金元素在铁铬铝电热合金中的作用	332
14.2.1 铬元素的作用	332
14.2.2 铝元素的作用	333
14.2.3 硅、锰、钼元素的作用	335
14.2.4 微量合金化元素的作用	335
14.2.5 杂质元素和非金属夹杂物对铁铬铝合金性能的影响	339

14.3 铁铬铝电热合金的冶炼工艺及操作要点	341
14.3.1 铁铬铝电热合金的冶炼方法及其评价	341
14.3.2 中频感应炉冶炼铁铬铝电热合金的工艺操作要点	342
14.3.3 电渣重熔铁铬铝电热合金的工艺操作要点	347
14.3.4 真空感应炉冶炼铁铬铝电热合金的工艺操作要点	350
第15章 高纯铁铬铝合金的冶炼	353
15.1 高纯铁铬铝合金概况	353
15.1.1 高纯铁铬铝合金的含义	353
15.1.2 汽车尾气净化器的工作原理	353
15.1.3 净化器用载体材料的技术要求	353
15.1.4 高纯铁铬铝合金的化学成分	354
15.1.5 高纯铁铬铝合金的基本性能	355
15.2 合金元素在高纯铁铬铝合金中的作用	356
15.2.1 铬和铝元素的作用	356
15.2.2 稀土元素的作用	356
15.2.3 钛、铌、锆元素的作用	357
15.3 真空感应炉冶炼高纯铁铬铝合金的工艺操作要点	359
15.3.1 真空感应炉炉子容量的选择	359
15.3.2 真空感应炉冶炼用原材料的选择	360
15.3.3 真空感应炉冶炼合金的配料与平衡	360
15.3.4 真空感应炉冶炼合金用坩埚材质的选用	362
15.3.5 真空感应炉冶炼高纯铁铬铝合金时的降碳、脱氧和降氮操作	363
15.3.6 真空感应炉冶炼高纯铁铬铝合金时的脱硫操作要点	364
15.3.7 真空感应炉冶炼高纯铁铬铝合金时的合金化操作	365
第16章 镍基和铁镍基耐蚀合金的冶炼	366
16.1 镍基和铁镍基耐蚀合金概况	366
16.1.1 耐蚀合金的含义	366
16.1.2 耐蚀合金的分类、化学成分及用途	366
16.2 合金元素在耐蚀合金中的作用	370
16.2.1 镍元素的作用	370
16.2.2 铬元素的作用	370
16.2.3 钼元素的作用	372
16.2.4 铜元素的作用	373
16.2.5 铌和钽元素的作用	373
16.2.6 铝和钛元素的作用	374
16.2.7 钨、钴、钒元素的作用	374
16.3 杂质元素对耐蚀合金性能的影响	375
16.3.1 碳元素的影响	375
16.3.2 硅元素的影响	375

16.3.3 铁元素的影响	376
16.3.4 硫元素的影响	376
16.3.5 非金属夹杂物的影响	377
16.4 耐蚀合金的冶炼方法	378
16.4.1 耐蚀合金对冶金质量的要求	378
16.4.2 耐蚀合金适用的冶炼方法	378
16.4.3 低硫耐蚀合金的冶炼操作要点	380
16.4.4 极低碳、硅耐蚀合金的冶炼操作要点	384
16.4.5 耐蚀合金电渣重熔工艺要点	387
16.4.6 耐蚀合金的稳定化处理	388
第 17 章 铁镍系软磁合金的冶炼	390
17.1 铁镍系软磁合金概况	390
17.1.1 软磁合金的含义	390
17.1.2 铁镍系软磁合金的特性	390
17.1.3 铁镍系软磁合金的分类和用途	390
17.1.4 铁镍系软磁合金的化学成分	391
17.1.5 铁镍系软磁合金的组织结构	393
17.1.6 铁镍系软磁合金的物理与力学性能	394
17.2 合金元素与杂质对铁镍系软磁合金磁性能的影响	395
17.2.1 合金元素对纯铁磁性能的影响	395
17.2.2 杂质元素对铁镍系软磁合金磁性能的影响	396
17.2.3 非金属夹杂物对铁镍系软磁合金磁性能的影响	398
17.3 铁镍系软磁合金的冶炼工艺要点	398
17.3.1 铁镍系软磁合金的成分设计	398
17.3.2 铁镍系软磁合金纯净度的控制	402
17.3.3 真空感应炉冶炼提高合金纯净度	404
17.3.4 中频感应炉冶炼铁镍系软磁合金的工艺操作要点	409
17.3.5 铁镍系软磁合金返回料的合理利用	412
第 18 章 高温合金的冶炼	414
18.1 高温合金概况	414
18.1.1 高温合金的含义	414
18.1.2 高温合金的特性	414
18.1.3 高温合金的应用范围	415
18.1.4 高温合金的分类	415
18.1.5 高温合金的牌号与表示方法	415
18.1.6 高温合金的化学成分	416
18.2 高温合金的强化和韧化方法	427
18.2.1 高温合金的强化方法	427
18.2.2 高温合金的韧化方法	429

18.3 合金元素在高温合金中的作用	430
18.3.1 镍元素的作用	430
18.3.2 钴元素的作用	431
18.3.3 铁元素的作用	431
18.3.4 铬元素的作用	432
18.3.5 钼元素的作用	432
18.3.6 钨元素的作用	433
18.3.7 铌和钽元素的作用	433
18.3.8 铝和钛元素的作用	433
18.3.9 钒和铪元素的作用	434
18.3.10 镁元素的作用	434
18.3.11 硼元素的作用	435
18.3.12 稀土元素的作用	435
18.4 高温合金的冶炼工艺	436
18.4.1 高温合金冶炼工艺路线的确定	436
18.4.2 真空感应炉冶炼高温合金的基本工艺条件	441
18.4.3 真空感应炉冶炼合金中微量硼的控制	447
18.4.4 双真空工艺冶炼合金中微量硼的控制	450
18.4.5 真空感应炉冶炼合金时微量镁的控制	451
18.4.6 真空感应炉冶炼合金中铝和钛含量的控制	456
18.4.7 高温合金二次精炼过程铝和钛元素的回收率	459
18.4.8 真空感应炉冶炼合金中氧和氮含量的控制	459
18.4.9 真空感应炉冶炼合金中磷、硫、硅含量的控制	463
18.4.10 高温合金中微量有害杂质元素的控制	470
18.5 合理利用高温合金返回料	476
18.5.1 高温合金返回料的分类	476
18.5.2 高温合金返回料的管理	477
18.5.3 合理利用高温合金返回料	477
第19章 感应炉冶炼用原材料	482
19.1 原材料在感应炉冶炼中的重要性	482
19.1.1 原材料为生产优质冶金产品提供物资基础	482
19.1.2 原材料的纯度可以弥补冶炼精炼能力的不足	482
19.2 感应炉冶炼用原材料	482
19.2.1 冶炼用的纯金属材料	482
19.2.2 冶炼用铁合金	492
19.2.3 脱氧剂和微合金化用合金	498
19.2.4 冶炼用造渣材料	500
参考文献	503

第 1 章 超低碳铁素体不锈钢的冶炼

1.1 超低碳铁素体不锈钢概况

1.1.1 超低碳铁素体不锈钢的含义

钢中成分（质量分数）： $C \leq 0.030\%$ 、 $N \leq 0.040\%$ 、 $Cr = 11.0\% \sim 30.0\%$ ，以及少量的 Mo、Ni、Ti、Nb 等元素，在室温下具有稳定的铁素体组织的铬系不锈钢，称为超低碳铁素体不锈钢。

1.1.2 超低碳铁素体不锈钢的特点

与普通铁素体不锈钢相比，超低碳铁素体不锈钢具有以下特点。

1. 良好的冷加工性能

由于降低了碳、氮含量，该钢具有较低的屈服强度和较高的塑性，而且加工硬化倾向小，冷变形性能得到改善。表 1-1 列出铁素体不锈钢的室温力学性能。

表 1-1 铁素体不锈钢的室温力学性能

钢号	碳含量 (质量分数,%)	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ (%)
1Cr17	0.12	333	490	30
0Cr17Ti	0.08	317	475	28
00Cr17Ti	0.03	274	470	33

2. 良好的焊接性

随着钢中 C、N 含量的降低和稳定化元素 Ti、Nb 的加入，钢的焊后塑性得到了显著改善。表 1-2 列出碳、氮含量对 Cr18Mo 钢焊接性的影响。

表 1-2 碳、氮含量对 Cr18Mo 钢焊接性的影响

C、N 含量 (质量分数,%)	Ti、Nb 加入量 (质量分数,%)	钢的伸长率 (%)	
		焊接前	焊接后
0.030	0	31	8
0.060	0.50	28	21
0.070	0.60	34	30

3. 较高的耐蚀性

由于降低了钢中 C、N 含量，钢的耐蚀性得到明显提高。例如：Cr17Ti 钢在稀

硫酸中的腐蚀临界浓度，由于碳的质量分数从 0.08% 降低到 0.03% 而提高了一倍；焊后，金属对晶间腐蚀敏感性也因钢中 C、N 含量的降低而消失。

总之，由于降低了钢中碳、氮含量而使其塑性、耐蚀性和焊接性得到明显改善，从而扩大了铁素体不锈钢的使用范围。

1.1.3 超低碳铁素体不锈钢的化学成分

根据铬含量的高低，可将超低碳铁素体不锈钢分为低铬、中铬、高铬三种类型。现将我国 GB/T 4237—2007 标准中和美国 UNS 编号系统中的相关牌号汇集列于表 1-3。

1.1.4 超低碳铁素体不锈钢的组织特点

尽管钢中 $C \leq 0.03\%$ （质量分数，下同）、 $N \leq 0.04\%$ ，但仍然高于在铁素体中的溶解度。多余的 C、N 在冷却过程中，以铬的碳化物和氮化物的形式析出。同时，不同铬含量的钢中，还会析出金属间化合物而使钢脆化。

1. 钢的金相组织

室温下超低碳铁素体不锈钢的基体为铁素体加碳化物、氮化物（ $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、CrN、 Cr_2N ）。这些化合物沿晶界析出会降低钢的塑性和耐蚀性。

2. 钢的组织脆性

普通铁素体不锈钢存在的低温脆性（400 ~ 500℃）、中温脆性（500 ~ 925℃）和高温脆性（高于 950℃），超低碳铁素体不锈钢都存在，只是程度稍轻而已。只要制成品不在上述温区长期使用，就没有产生脆化的可能。

3. 钢的马氏体转变

钢中 $(C + N) \geq 0.03\%$ （质量分数）时，自 900℃ 以上冷却会发生 $\gamma \rightarrow \alpha'$ 转变而产生少量马氏体，使钢的硬度升高，塑性下降，即产生轻度的冷加工硬化倾向。

1.2 超低碳铁素体不锈钢中合金元素的作用

1.2.1 铬元素的作用

1. 形成和稳定钢的铁素体组织

铬是铁素体的形成元素，可以扩大铁素体区域、稳定铁素体组织，是组成超低碳铁素体不锈钢的基本元素。

2. 保持不锈钢性、提高耐蚀性

钢中含 $Cr > 10.5\%$ （质量分数）时，铬在钢的表面形成能防大气锈蚀的 Cr_2O_3 钝化膜，保护金属不被继续锈蚀。铬是保持钢耐氧化和耐蚀性的主要元素。

表 1-3 超低碳铁素体不锈钢的化学成分

钢类	牌 号	化学成分(质量分数,%)											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Nb	Ti	其他
低 铬	00Cr11(S40945)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.030	10.50 ~ 11.75	—	0.50	0.030	0.18 ~ 0.40	0.05 ~ 0.20	—
	00Cr11Ti(409)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.040	10.50 ~ 11.75	—	—	—	—	6 × C ~ 0.75	—
	00Cr12(410L)	0.030	1.00	1.00	0.035	0.030	11.0 ~ 13.5	—	0.60	—	—	—	—
	00Cr15Nb(R429EX)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.040	13.0 ~ 16.0	—	—	—	0.30 ~ 0.70	—	—
	00Cr17(430L)	0.025	1.00	1.00	0.035	0.030	16.0 ~ 18.0	—	—	—	—	—	—
中 铬	00Cr17Ti(430LX)	0.030	0.80	0.80	0.035	0.030	16.0 ~ 19.0	—	—	—	—	0.1 ~ 1.0	—
	00Cr17Mo	0.025	1.00	1.00	0.035	0.030	16.0 ~ 19.0	0.75 ~ 1.25	—	0.025	—	—	Ti + Nb = 8(C + N) ~0.80
	00Cr18(S44100)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.030	17.5 ~ 19.5	—	1.00	0.030	—	0.10 ~ 0.50	Nb = 0.3 + 9C ~0.90
	00Cr18Mo1(434)	0.030	1.00	1.00	0.040	0.030	16.0 ~ 18.0	0.75 ~ 1.25	—	—	—	—	—