

吴玖等著



双相 不锈钢

冶金工业出版社



双相不锈钢

吴 玫 等著

冶金工业出版社

2000

内 容 提 要

本书是一本介绍不锈钢的一个分支双相不锈钢的专业技术的书籍。内容包括双相不锈钢的发展史、相图、相组织转变、力学性能、耐腐蚀性能、焊接性能、工艺性能、国内外应用情况和经验、选用双相不锈钢的依据和应注意的问题，并且分钢种介绍了双相不锈钢主要牌号的各种技术性能数据。

本书可供冶金、化工(化肥等)、石油化工(炼油等)、轻工(纸浆)、核能、海洋和环保等工业部门有关不锈钢的科研、生产、使用、设计等单位的科研、工程技术人员和有关大专院校的师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

双相不锈钢/吴玖等著. —北京:冶金工业出版社, 1999.6
(2000.6重印)

ISBN 7-5024-2298-6

I. 双… II. 吴… III. 不锈钢, 双相 IV. TG142.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 38295 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 王成蓓 美术编辑 李 心 责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1999 年 6 月第 1 版; 2000 年 6 月第 2 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 16 印张; 430 千字; 494 页; 2001~3000 册

45.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64044283

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

双相不锈钢是不锈钢的一个重要分支。在 20 世纪 40 年代已出现个别含碳量较高的牌号用于铸件。双相不锈钢的特点之一就是耐局部腐蚀性能好。20 世纪 60 年代后随着不锈钢应用范围的扩大,以及应力腐蚀破裂事故的不断增多(这类事故多起因于不均匀的局部腐蚀),研制新型双相不锈钢材料又重新受到各国重视。精炼技术的进步使大量生产超低碳型双相不锈钢成为可能;双相不锈钢焊后一些问题的解决,更加促进了双相不锈钢作为结构材料的发展。20 世纪 80 年代初,在首届双相不锈钢国际会议上,专家们指出双相不锈钢的发展和应用十分迅速,已成为与奥氏体型、铁素体型不锈钢并列的一类不锈钢,在不锈钢的牌号系列中确立了双相不锈钢的地位。

瑞典、日本、法国、德国等国家都集中了不少力量从事双相不锈钢的研究和开发工作,发表的有关文献资料也很多。如苏联于 1974 年出版过一本“双相不锈钢”(“Двухфазные Стали”),书中重点介绍了相变和力学性能的研究成果,但缺少耐腐蚀性能、焊接性能等重要内容;再如,20 世纪 80 年代以来已专门开过四届双相不锈钢国际会议,并有文集出版,不过迄今还没有一本完整的、系统的有关双相不锈钢的书籍问世。

钢铁研究总院自 1974 年开始从事双相不锈钢材料及其焊接的研究,承担了多项国家和部级的课题研究任务,经过多年工作,目前已基本建立起中国的双相不锈钢系列,主要包括耐应力腐蚀、耐孔蚀和缝隙腐蚀、耐腐蚀疲劳和耐磨损腐蚀等 5 个牌号:1983 年曾组织编写了《00Cr18Ni5Mo3Si2 双相不锈钢》一书,1992 年又内部出版了《双相不锈钢论文集》。

鉴于国内外第二代双相不锈钢的应用迅速扩大和普及，尤其自 90 年代以来国外研制出的第三代超级双相不锈钢，在一些介质中的应用能与高合金奥氏体不锈钢相媲美，双相不锈钢的发展又进入了一个新的阶段。为了促进国内双相不锈钢材料的研究和发展，也为了更好地满足设计、生产、制造和使用部门的需要，我们以 20 年来国内在这领域里的科研、生产和应用实践及技术资料的积累为基础，并收集了有关的国外文献资料，特著成此书。

全书共分十章，内容包括双相不锈钢的发展史、相图、组织转变、各种性能、生产和制造工艺、国内外使用情况和经验，选用双相不锈钢的依据和应注意的问题，以及分钢种介绍了双相不锈钢主要牌号的化学成分与性能、应用范围和使用情况。

本书从机理方面探讨了双相不锈钢的组织转变，阐述了双相不锈钢的耐局部腐蚀的机理和特点，重点讨论了双相不锈钢焊接的冶金特性，上述诸多方面的研究成果，不仅指导了双相不锈钢的生产实践，并且已成为选用双相不锈钢的依据。本书不仅包括了国内外最新的一些科研成果，也包括了科研、生产和使用中所遇到的一些实际问题，可供科研、设计、教学、生产、制造及使用部门参考。

本书由吴玖主笔，第四章由姜世振执笔，第九章有关国内双相不锈钢牌号的性能和应用部分由韩俊媛、张宝林执笔，第六章焊接部分由刘廷材作了必要的修改和补充。

本书的写作工作历时两年，但是双相不锈钢在国内从开发到生产和使用历经了 20 多年，除了钢铁研究总院先后有十余名高级科研人员参加了工作外，有关特殊钢厂和机器制造厂，如重庆特殊钢厂、大连钢厂、抚顺钢厂、上海第五钢铁厂、上海第三钢铁厂、太原钢铁公司、长城钢铁公司和上海大隆机器厂铸锻厂等多名高中级工程技术人员参与了双相不锈钢的开发、试制和生产工作，为双相不锈钢在国内的发展做出了贡献。还值得指出的是

在撰写和出版本书过程中，著者得到了钢铁研究总院和本专业同行们的支持和帮助，得到了生产、设计和使用单位同行们的鼓励和支持，在此一并表示感谢。

由于作者的水平有限，书中错误和不当之处在所难免，希望读者批评指正。

著 者

1998年4月于钢铁研究总院

目 录

1 概 论

- 1.1 双相不锈钢的性能特点 1
- 1.2 双相不锈钢的发展历史 2
- 1.3 双相不锈钢的分类及代表牌号 4

2 相 组 成

- 2.1 不锈钢的相图 8
- 2.2 合金元素对相组成的作用 8
- 2.3 合金元素在两相间的分配 15

3 组织转变

- 3.1 组织转变的特点 18
- 3.2 双相不锈钢中的相 18
 - 3.2.1 二次奥氏体 (γ_2) 18
 - 3.2.2 碳化物和氮化物 27
 - 3.2.3 金属间相 31
- 3.3 α 铁素体转变过程的动力学 49
 - 3.3.1 α 铁素体等温转变的影响因素 49
 - 3.3.1.1 合金元素的作用 49
 - 3.3.1.2 加热温度及冷却方式的影响 53
 - 3.3.1.3 冷、热变形的影响 55
 - 3.3.2 几种典型双相不锈钢的等温转变动力学曲线 56
 - 3.3.3 α 铁素体的非等温转变——连续冷却时的析出行为 58

4 力学性能

4.1 力学性能特点及其强化机制	65
4.2 双相不锈钢的力学性能	66
4.3 力学性能的影响因素	68
4.3.1 合金元素的作用	68
4.3.2 晶粒度的影响	71
4.3.3 相比例的影响	74
4.4 双相不锈钢的韧性	80
4.4.1 高铬铁素体不锈钢的三种脆性在双相不锈钢中的表现	80
4.4.2 钢的脆性转变温度	84
4.4.3 方向性对韧性的影响	86
4.4.4 冲击功与断裂韧性 (CTOD) 的对应关系	88
4.5 双相不锈钢的超塑性	90
4.5.1 形成超塑性的条件及影响因素	90
4.5.2 超塑性双相不锈钢钢种	96

5 耐腐蚀性能

5.1 耐孔蚀性能	100
5.1.1 孔蚀机制及孔蚀试验的评定方法	101
5.1.2 孔蚀性能的影响因素	102
5.1.2.1 合金元素的影响	102
5.1.2.2 合金元素的综合作用和 PRE 值	117
5.1.2.3 组织的影响	212
5.1.3 常用双相不锈钢的耐孔蚀性能	130
5.2 耐缝隙腐蚀性能	133
5.2.1 缝隙腐蚀机制及缝隙腐蚀试验的评定方法	133
5.2.2 缝隙腐蚀性能的影响因素	135
5.2.2.1 环境因素的影响	135

5.2.2.2	合金元素的作用	135
5.2.2.3	合金元素的综合作用 (CCT 值)	141
5.2.2.4	组织的影响	143
5.2.3	在常温海水中的局部腐蚀行为	144
5.2.4	常用双相不锈钢的耐缝隙腐蚀性能	146
5.3	耐应力腐蚀性能	148
5.3.1	应力腐蚀机理及应力腐蚀试验方法	148
5.3.1.1	应力腐蚀机理	148
5.3.1.2	应力腐蚀试验方法	152
5.3.2	双相不锈钢在各种介质中的应力腐蚀敏感性	155
5.3.2.1	在氯化物溶液中的 SCC	155
5.3.2.2	在碱溶液中的 SCC	159
5.3.2.3	在高温水中的 SCC	160
5.3.2.4	在 H_2S-Cl^- 和 $H_2S-CO_2-Cl^-$ 酸性环境 中的 SCC	163
5.3.3	应力腐蚀性能的影响因素	165
5.3.3.1	冶金因素的影响	165
5.3.3.2	环境因素的影响	178
5.4	耐晶间腐蚀性能	183
5.4.1	晶间腐蚀机理及晶间腐蚀敏感性的评价方法	183
5.4.1.1	晶间腐蚀机理	183
5.4.1.2	晶间腐蚀敏感性的评价方法	184
5.4.2	几种敏化态双相不锈钢的晶间腐蚀	187
5.5	耐均匀腐蚀性能	194
5.5.1	均匀腐蚀机理——两相的选择腐蚀问题	194
5.5.2	双相不锈钢在一些介质中的耐腐蚀性能	199
5.5.2.1	在酸性溶液中	199
5.5.2.2	在碱溶液中	205
5.5.2.3	在酸、碱溶液中的腐蚀数据	207
5.6	耐腐蚀疲劳性能	208

5.6.1	腐蚀疲劳的特点和形式	208
5.6.2	腐蚀疲劳机理和试验方法	209
5.6.2.1	腐蚀疲劳裂纹的形核位置	209
5.6.2.2	腐蚀疲劳裂纹源的形成机制	211
5.6.2.3	腐蚀疲劳裂纹的扩展机制	213
5.6.2.4	腐蚀疲劳的试验方法	215
5.6.3	腐蚀疲劳的影响因素	215
5.6.3.1	载荷循环频率	215
5.6.3.2	环境的 pH 值	216
5.6.3.3	外加电位	218
5.6.4	双相不锈钢在一些特殊介质中的腐蚀疲劳性能	220
5.6.4.1	在尿素甲铵液中	220
5.6.4.2	在合成“白液”，合成海水中	221
5.6.4.3	在浓硫酸中	223
5.7	耐磨损腐蚀性能	224
5.7.1	磨损腐蚀机理和试验方法	224
5.7.2	磨损腐蚀的影响因素	226
5.7.2.1	冶金因素的影响	226
5.7.2.2	环境因素的影响	229
5.7.3	双相不锈钢在一些介质中的耐磨损腐蚀性能	230
5.7.3.1	在流动 3.5%NaCl 溶液中	230
5.7.3.2	在湿法磷酸生产介质中	232
5.7.3.3	在烟气脱硫 (FGD) 石灰浆液中	232

6 双相不锈钢的焊接性及焊接材料

6.1	焊接接头的冶金特性	240
6.1.1	相图	240
6.1.2	焊接热影响区 (HAZ) 的组织	241
6.1.2.1	焊接 HAZ 的组织转变	241
6.1.2.2	影响焊接 HAZ 组织转变的因素	243

6.1.2.3	双相不锈钢与超级双相不锈钢的焊接 HAZ 组织转变的差别	250
6.1.3	焊缝金属组织	252
6.1.3.1	焊缝金属的组织转变	252
6.1.3.2	焊接材料中提镍和保护气体中加氮	259
6.2	焊接材料与焊接方法	260
6.2.1	焊接材料	260
6.2.2	焊接方法	263
6.3	双相不锈钢的工艺可焊性	264
6.3.1	焊接裂纹敏感性	264
6.3.1.1	熔合区的凝固裂纹敏感性	264
6.3.1.2	固态裂纹(冷裂纹)敏感性	266
6.3.2	气体的影响	267
6.3.2.1	氮	267
6.3.2.2	氢	268
6.3.3	多层焊和工艺焊缝	268
6.4	双相不锈钢的使用可焊性	269
6.4.1	几种含氮双相不锈钢焊接接头的力学和耐 腐蚀性能	269
6.4.2	Cr25 型双相不锈钢和 Cr25 型超级双相不锈钢 焊接接头的性能对比	271
6.5	双相不锈钢复合板的焊接	273
6.5.1	复合钢板焊接特点	273
6.5.2	焊接材料及焊接工艺	274
6.5.3	工艺可焊性—刚性抗裂试验	275
6.5.4	使用可焊性	275
6.5.4.1	焊接接头的力学性能	275
6.5.4.2	焊接接头的耐腐蚀性能	276

7 冷、热加工工艺性能

7.1 热加工工艺性能	280
7.1.1 双相不锈钢热塑性特点	280
7.1.2 相比比例及微量元素对钢热塑性的影响	281
7.1.2.1 相比比例的影响	281
7.1.2.2 微量元素的影响	282
7.1.3 典型钢种的热加工工艺性能	286
7.2 冷加工工艺性能	291
7.2.1 双相不锈钢的冷变形特点	291
7.2.2 冷成型工艺的特点	293
7.2.2.1 冷变形硬化曲线和应变硬化指数 (n 值) ...	293
7.2.2.2 薄板的塑性应变比 (r 值)、冷弯和深冲	293
7.2.2.3 两相比比例对钢管胀管率 (H) 的影响	296

8 生产工艺的基本特点和要求

8.1 冶炼工艺	298
8.2 加工工艺	298
8.2.1 热加工工艺	299
8.2.2 冷加工工艺	299
8.3 铸造工艺	301
8.4 复合板的生产工艺和性能	302
8.5 粉末冶金和热等静压 (P/M+HIP) 工艺	306
8.6 获取超细 (微晶) 双相组织的形变热处理工艺	309

9 典型双相不锈钢的牌号、化学成分与性能

9.1 低合金型双相不锈钢——00Cr23Ni4N	313
9.1.1 化学成分和显微组织	313
9.1.2 力学性能	313
9.1.3 耐腐蚀性能	314

9.1.4	物理性能	320
9.1.5	焊接性能	320
9.1.6	冷、热加工性能	320
9.1.7	00Cr23Ni4N 双相不锈钢的应用	321
9.2	中合金型双相不锈钢	322
9.2.1	0Cr21Ni5Ti, 1Cr21Ni5Ti	322
9.2.1.1	化学成分和显微组织	322
9.2.1.2	力学性能	324
9.2.1.3	耐腐蚀性能	326
9.2.1.4	物理性能	327
9.2.1.5	焊接性能	327
9.2.1.6	冷、热加工性能	329
9.2.1.7	0Cr21Ni5Ti 和 1Cr21Ni5Ti 双相不锈钢 的应用	329
9.2.2	00Cr18Ni5Mo3Si2, 00Cr18Ni5Mo3Si2Nb	330
9.2.2.1	化学成分和显微组织	331
9.2.2.2	力学性能	332
9.2.2.3	耐腐蚀性能	335
9.2.2.4	物理性能	343
9.2.2.5	焊接性能	343
9.2.2.6	冷、热加工性能	345
9.2.2.7	Cr18 型双相不锈钢的应用	346
9.2.3	00Cr22Ni5Mo3N	346
9.2.3.1	化学成分和显微组织	346
9.2.3.2	力学性能	351
9.2.3.3	耐腐蚀性能	354
9.2.3.4	物理性能	366
9.2.3.5	焊接性能	366
9.2.3.6	冷、热加工性能	366
9.2.3.7	00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢的应用	367

9.3	高合金型双相不锈钢	369
9.3.1	00Cr25Ni6Mo2N, 00Cr25Ni7Mo3N	370
9.3.1.1	化学成分和显微组织	370
9.3.1.2	力学性能	371
9.3.1.3	耐腐蚀性能	372
9.3.1.4	物理性能	382
9.3.1.5	焊接性能	382
9.3.1.6	冷加工性能	382
9.3.1.7	Cr25型含氮双相不锈钢的应用	384
9.3.2	00Cr25Ni7Mo3WCuN	386
9.3.2.1	化学成分和显微组织	386
9.3.2.2	力学性能	387
9.3.2.3	耐腐蚀性能	389
9.3.2.4	物理性能	397
9.3.2.5	焊接性能	397
9.3.2.6	冷、热加工性能	398
9.3.2.7	00Cr25Ni7Mo3WCrN 双相不锈钢的应用	399
9.3.3	0Cr25Ni6Mo3CuN	400
9.3.3.1	化学成分和钢的组织稳定性	401
9.3.3.2	力学性能	402
9.3.3.3	耐腐蚀性能	404
9.3.3.4	物理性能	412
9.3.3.5	焊接性能	412
9.3.3.6	冷、热加工性能	413
9.3.3.7	0Cr25Ni6Mo3CuN 钢的应用	414
9.4	超级双相不锈钢	416
9.4.1	00Cr25Ni7Mo4N	416
9.4.1.1	化学成分和显微组织	417
9.4.1.2	力学性能	418
9.4.1.3	耐腐蚀性能	418

9.4.1.4	物理性能	426
9.4.1.5	焊接性能	426
9.4.1.6	热处理	428
9.4.1.7	00Cr25Ni7Mo4N 超级双相不锈钢的应用	428
9.4.2	00Cr25Ni7Mo3.5WCuN	428
9.4.2.1	化学成分和显微组织	429
9.4.2.2	力学性能	430
9.4.2.3	耐腐蚀性能	431
9.4.2.4	焊接性能	438
9.4.2.5	00Cr25Ni7Mo3.5WCuN 超级双相不锈钢 的应用	438
9.4.3	00Cr25Ni6.5Mo3.5CuN	439
9.4.3.1	化学成分和显微组织	439
9.4.3.2	力学性能	440
9.4.3.3	耐腐蚀性能	440
9.4.3.4	物理性能	445
9.4.3.5	焊接性能	445
9.4.3.6	冷、热加工性能	446
9.4.3.7	00Cr25Ni6.5Mo3.5CuN 超级双相不锈钢 的应用	446
9.5	几个主要国家的双相不锈钢牌号和牌号的近似对照	447

10 双相不锈钢的应用

10.1	双相不锈钢安全使用的几点限制和要求	459
10.2	双相不锈钢在主要领域中的应用	461
10.2.1	中性氯化物环境	461
10.2.2	炼油工业	465
10.2.2.1	常减压装置	465
10.2.2.2	催化裂化装置	467
10.2.2.3	加氢裂化, 加氢处理装置	467

10.2.3	石油化学和化学工业	470
10.2.3.1	聚氯乙烯 (PVC) 汽提塔和热交换器	470
10.2.3.2	氯乙烯生产装置	470
10.2.3.3	甲醇合成反应器	471
10.2.3.4	羧基合成醇环形反应器	472
10.2.3.5	醋酸等有机酸的生产装置	472
10.2.3.6	化学工业用输送管道	473
10.2.4	石油和天然气工业	473
10.2.5	纸浆和造纸工业	478
10.2.5.1	连续式硫酸蒸煮装置	479
10.2.5.2	间歇式蒸煮器	479
10.2.5.3	二氧化氯漂白液筒	479
10.2.5.4	造纸压力滚筒机	479
10.2.6	化肥工业	480
10.2.6.1	尿素工业	480
10.2.6.2	磷肥工业	484
10.2.7	海水环境	486
10.2.8	能源与环保工业	487
10.2.9	轻工和食品工业	490
10.2.9.1	盐化工装置	490
10.2.9.2	食品和制药工业的设备	490
10.2.10	高强度结构件	491

1 概 论

1.1 双相不锈钢的性能特点

所谓双相不锈钢是在它的固溶组织中铁素体相与奥氏体相约各占一半，一般较少相的含量最少也需要达到 30%。

根据两相组织的特点，通过正确控制化学成分和热处理工艺，将奥氏体不锈钢所具有的优良韧性和焊接性与铁素体不锈钢所具有的较高强度和耐氯化物应力腐蚀性能结合在一起，使双相不锈钢兼有铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的优点。正是这些优越的性能使双相不锈钢作为可焊接的结构材料发展十分迅速，80 年代以来已成为和马氏体型、奥氏体型和铁素体型不锈钢并列的一个钢类。双相不锈钢有以下性能特点：

(1) 含钼双相不锈钢在低应力下有良好的耐氯化物应力腐蚀性能。一般用在 60℃ 以上中性氯化物溶液中的 18-8 型奥氏体不锈钢容易发生应力腐蚀破裂，在微量氯化物及硫化氢的工业介质中用这类不锈钢制造的热交换器、蒸发器等设备都存在着产生应力腐蚀破裂的倾向，而双相不锈钢却有良好的抵抗能力。

(2) 含钼双相不锈钢有良好的耐孔蚀性能。在具有相同的孔蚀抗力当量值 ($PRE = Cr\% + 3.3 \times Mo\% + 16 \times N\%$) 时，双相不锈钢与奥氏体不锈钢的临界孔蚀电位相仿。含 18%Cr 的双相不锈钢的耐孔蚀性能与 AISI316L 相当。含 25%Cr 的，尤其是含氮的高铬双相不锈钢的耐孔蚀和缝隙腐蚀性能超过了 AISI316L。

(3) 有良好的耐腐蚀疲劳和磨损腐蚀性能。在某些腐蚀介质条件下适用于制作泵、阀等设备。

(4) 综合力学性能好。有较高的强度和疲劳强度，屈服强度是 18-8 型奥氏体不锈钢的两倍。