

“十二五”国家重点图书



特殊钢 丛书

Special Steel Book Series

铁素体不锈钢

康喜范 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 简 介

铁素体不锈钢是不锈钢的重要组成部分,具有价格低廉(不含 Ni 或含少量 Ni),强度高,弹性模量高、热导率高、热膨胀系数低的特点。本书分为 7 章,主要内容包括:铁素体不锈钢的冶金基础、铁素体不锈钢中的合金元素及其作用、铁素体不锈钢的特性、铁素体不锈钢的热处理、铁素体不锈钢典型牌号的性能和应用、超级铁素体不锈钢。

本书可供不锈钢企业的技术人员,设备设计的工程技术人员,材料研究开发及应用的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

铁素体不锈钢 / 康喜范编著. —北京: 冶金工业出版社, 2012. 4

“十二五”国家重点图书
(特殊钢丛书)

ISBN 978-7-5024-5713-6

I. ①铁… II. ①康… III. ①铁素体钢: 不锈钢
IV. ①TG142. 71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 033572 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

策 划 曹胜利 张 卫 责任编辑 郭冬艳 美术编辑 李 新

版式设计 孙跃红 责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5713-6

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 4 月第 1 版, 2012 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 23.25 印张; 452 千字; 357 页

79.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

《特殊钢丛书》

编辑委员会

主 编 徐匡迪

编 审 刘嘉禾 杨树森

编 委 （按姓氏笔画为序）

马绍弥 王一德 王洪发 王剑志 兰德年

刘正东 刘 宇 刘 苏 刘振清 孙开明

李士琦 李正邦 李依依 李国忠 李鹤林

张晓刚 陈 列 陈国良 陈思联 林慧国

洪及鄙 钱 刚 殷国茂 董学东 董 瀚

谢 蔚

《特殊钢丛书》序言

特殊钢是众多工业领域必不可少的关键材料,是钢铁材料中的高技术含量产品,在国民经济中占有极其重要的地位。特殊钢材占钢材总量比重、特殊钢产品结构、特殊钢质量水平和特殊钢应用等指标是反映一个国家钢铁工业发展水平的重要标志。近年来,在我国社会和经济快速健康发展的带动下,我国特殊钢工业生产和产品市场发展迅速,特殊钢生产装备和工艺技术不断提高,特殊钢产量和产品质量持续提高,基本满足了国内市场的需求。

目前,中国经济已进入重工业加速发展的工业化中期阶段,我国特殊钢工业既面临空前的发展机遇,又受到严峻的挑战。在机遇方面,随着固定资产投资和汽车、能源、化工、装备制造和武器装备等主导产业的高速增长,全社会对特殊钢产品的需求将在相当长时间内保持在较高水平上。在挑战方面,随着工业结构的提升、产品高级化,特殊钢工业面临着用户对产品品种、质量、交货时间、技术服务等更高要求的挑战,同时还在资源、能源、交通运输短缺等方面需应对日趋激烈的国内外竞争的挑战。为了迎接这些挑战,抓住难得发展机遇,特殊钢企业应注重提高企业核心竞争力以及在资源、环境方面的可持续发展。它们主要表现在特殊钢产品的质量提高、成本降低、资源节约型新产品研发等方面。伴随着市场需求增长、化学冶金学和物理金属学发展、冶金生产工艺优化与技术进步,特殊钢工业也必将日新月异。

从20世纪70年代世界第一次石油危机以来,工业化国家的特殊钢生产、产品开发和工艺技术持续进步,已基本满足世界市场需求、资源节约和环境保护等要求。近年来,在国家的大力支持下,我国科研院所、高校和企业的研发人员承担了多项国家科技项目工作,在特殊钢的基础理论、工艺技术、产品应用等方面也取得了显著成绩,特别是近20年来各特钢企业的装备更新和技术改造促进了特殊钢行业进步。为了反映特

殊钢技术方面的进展,中国金属学会特殊钢分会、先进钢铁材料技术国家工程研究中心和冶金工业出版社共同发起,并由先进钢铁材料技术国家工程研究中心和中国金属学会特殊钢分会负责组织编写了新的《特殊钢丛书》,它是已有的由中国金属学会特殊钢分会组织编写《特殊钢丛书》的继续。由国内学识渊博的学者和生产经验丰富的专家组成编辑委员会,指导丛书的选题、编写和出版工作。丛书编委会将组织特殊钢领域的学者和专家撰写人们关注的特殊钢各领域的技术进展情况。我们相信本套丛书能够在推动特殊钢的研究、生产和应用等方面发挥积极作用。本套丛书的出版可以为钢铁材料生产和使用部门的技术人员提供特殊钢生产和使用的技术基础,也可为相关大专院校师生提供教学参考。本套丛书将分卷撰写,陆续出版。丛书中可能会存在一些疏漏和不足之处,欢迎广大读者批评指正。

《特殊钢丛书》编委会主编

中国工程院院长

徐匡迪

2008 年夏

前 言

铁素体不锈钢是不锈钢家族中的重要成员,就产量而言,仅次于奥氏体不锈钢,处于第2位。铁素体不锈钢与马氏体不锈钢同时问世,是最古老的不锈钢钢种之一。从铁素体不锈钢诞生至今大约经历了近百年历史,在这一个世纪中,铁素体不锈钢的发展和应用远不及铬-镍奥氏体不锈钢,其主要原因是铁素体不锈钢的脆性和工艺性能等存在难以克服的技术难题——碳和氮含量过高,尽管这一结论是在20世纪50年代得出的,但在相当一段时期内,限于冶金技术水平难以将钢中的碳和氮控制在较理想的水平(如要求18% Cr铁素体不锈钢中 $w(C+N) \leq 150 \times 10^{-6}$),因此制约了此类钢的发展和应用。与18Cr-8Ni奥氏体不锈钢相比,铁素体不锈钢的高强度、高弹性模量、高热导系数、低的热膨胀系数,对应力腐蚀免疫或不敏感以及低镍或无镍等特点,长期以来从未离开冶金学家和材料专家的视线,在某些时期甚至成为被关注的焦点,尤其是在奥氏体不锈钢应力腐蚀破裂事故频发,镍价飙升的大环境以及20世纪60年代中期,AOD、VOD、SS-VOD等冶金技术引入不锈钢生产领域后将铁素体不锈钢中的碳和氮降到一个较为合理水平已成为现实的条件下,加速了现代铁素体不锈钢的研究和发展,使其应用领域不断扩大。至目前为止,已形成了不同纯度(C+N含量)的低铬、中铬、含钼中铬、高铬钼($w(Cr) \geq 25\%$, $w(Mo) = 2\% \sim 4\%$)超级铁素体不锈钢的完整钢种系列。

在AOD、VOD和SS-VOD以及恰当的组合冶金工艺引入不锈钢生产领域后,为价格合理的现代铁素体不锈钢市场供应提供了装备条件,保证了汽车、铁路货车、水处理、建筑、发电设备以及不锈钢制品等工业对各类铁素体不锈钢的需求。

我国涉足于铁素体不锈钢的研究和发展大约开始于20世纪50年代末期,但限于当时的冶金装备条件和水平,徘徊达40年之久,但研究开发工作一直未曾停顿。直到20世纪末期和21世纪初期,太原钢铁

(集团)有限公司和宝钢集团有限公司两条后现代化不锈钢板、带生产线相继投产,在提高我国不锈钢整体水平的同时,为现代铁素体不锈钢提供了工艺装备条件,在可大量生产和满足不同领域对铁素体不锈钢需求的条件下,使铁素体不锈钢的产量不断提升,市场覆盖面也在不断扩展。据 2006 ~ 2010 年的统计,我国继 2006 年不锈钢产量超过日本跃居世界首位后,5 年来我国不锈钢产量呈井喷式的发展态势,不锈钢产量和消费量一直处于世界首位,2010 年不锈钢产量超过 1000 万吨,占世界不锈钢总产量的份额高达 36.7%,成为名副其实的不锈钢生产大国。

我国不锈钢业界,在产量高速发展的同时,钢种结构也更趋于合理,已由 20 世纪 80 年代前的奥氏体不锈钢(以 18Cr-8Ni 为代表)占 90%,铁素体不锈钢仅占 10% 的落后局面转变成铁素体(400 系)不锈钢的份额大幅提高,达到世界的平均水平,2009 年和 2010 年铁素体不锈钢份额分别达到 29% 和 30%。年产量高达 260 万 ~ 315 万吨。一些大型企业,铁素体不锈钢的比例高达 45% ~ 50%,跻身世界先进水平的行列。

我国不锈钢产业的大发展不是偶然的,它得益于不锈钢业界科技工作者长期不懈的科研生产实践的成果积淀;得益于我国企业家远见卓识的早期战略投资;得益于一批训练有素的从事不锈钢产业的工人。三者同时给力,助推了我国不锈钢产业的腾飞。尽管我国不锈钢产业得到长足发展,若达到全方位的世界领先水平还有很长的路要走。

我国不锈钢的高速发展,特别是铁素体不锈钢突破性进展,激发了撰写铁素体不锈钢的激情并成为完成此书的驱动力。本书成书大约经历了 2 年时间,在写作期间,得到钢铁研究总院同事的多方指导、支持和鼓励,也得到国内不锈钢业界同行的大力支持。在此一并致以深深的谢意!

本书共 7 章,作者试图较详尽地介绍铁素体不锈钢的发展历程、冶金基础,合金化原则、物理冶金、性能特点以及工业牌号的应用等。但限于作者的学识水平,错误和不足之处在所难免,望读者予以批评指正。

作 者

2011 年 6 月于钢铁研究总院

目 录

1 概论	1
1.1 铁素体不锈钢的定义	1
1.2 铁素体不锈钢的分类	1
1.3 铁素体不锈钢的性能特点	2
1.4 铁素体不锈钢的发明和发展	3
1.5 铁素体不锈钢牌号标准、产品类型和产量	8
1.5.1 铁素体不锈钢的牌号标准	8
1.5.2 不同组别铁素体不锈钢主要特点和产量	8
1.5.3 产品类型和产量	9
1.6 铁素体不锈钢的性能优势及应用的一些约束条件	14
1.6.1 力学性能	14
1.6.2 物理性能	14
1.6.3 耐蚀性	16
1.6.4 冷成形性能	17
1.6.5 应用的约束条件	18
参考文献	19
2 铁素体不锈钢的冶金基础	20
2.1 Fe - Cr 合金平衡图	20
2.1.1 Fe - Cr 二元合金相图特征	20
2.1.2 碳和氮对 Fe - Cr 二元合金平衡图的影响	22
2.1.3 镍对 Fe - Cr 合金($\alpha + \gamma$)/ α 相区的影响	23
2.1.4 钼的影响	24
2.2 铁素体不锈钢中的第二相	24
2.2.1 碳化物	24
2.2.2 氮化物	28
2.2.3 铁素体不锈钢中的马氏体	30
2.2.4 金属间化合物	31

参考文献	48
3 铁素体不锈钢中的合金元素及其作用	50
3.1 铬的作用	50
3.1.1 铬对铁素体不锈钢组织结构的影响	50
3.1.2 铬对铁素体不锈钢力学性能的影响	51
3.1.3 铬对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	55
3.1.4 铬对铁素体不锈钢的不利影响	63
3.2 钼的作用	65
3.2.1 钼对铁素体不锈钢组织结构的影响	65
3.2.2 钼对铁素体不锈钢力学性能的影响	66
3.2.3 钼对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	67
3.3 碳和氮的作用	78
3.3.1 碳、氮对铁素体不锈钢组织结构的影响	79
3.3.2 碳和氮对铁素体不锈钢韧性和塑-脆转变温度的影响	79
3.3.3 碳和氮对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	84
3.3.4 碳和氮对铁素体不锈钢冷成形性能的影响	86
3.4 钛和铌作用	87
3.4.1 钛和铌对铁素体不锈钢组织结构的影响	88
3.4.2 铌和钛的强化效果	88
3.4.3 铌和钛对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	89
3.4.4 铌和钛对铁素体不锈钢塑、韧性和塑-脆转变温度的影响	94
3.4.5 铌和钛对铁素体不锈钢冷成形性能的影响	97
3.4.6 稳定化元素的选择和加入量的控制	99
3.5 铝的作用	102
3.5.1 铝对铁素体不锈钢组织结构的影响	102
3.5.2 铝对铁素体不锈钢脆性行为的影响	105
3.5.3 铝对铁素体不锈钢冷成形性能的影响	106
3.5.4 铝对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	107
3.6 铜的作用	109
3.6.1 铜对铁素体不锈钢组织结构的影响	109
3.6.2 铜对铁素体不锈钢力学性能和脆性转变温度的影响	110
3.6.3 铜对铁素体不锈钢冷成形性能的影响	111
3.6.4 铜对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	112
3.7 镍的作用	115

3.7.1 镍对铁素体不锈钢组织结构的影响	115
3.7.2 镍铁素体不锈钢对室温力学性能和韧性的影响	115
3.7.3 镍对铁素体不锈钢耐蚀性的影响	118
3.8 钨的作用	123
3.9 硅、锰、磷、硫的影响	124
参考文献	126
4 铁素体不锈钢的特性	129
4.1 铁素体不锈钢的脆性	129
4.1.1 σ 相脆性	129
4.1.2 475℃脆性	132
4.1.3 高温脆性	134
4.2 铁素体不锈钢的韧性和塑-脆转变行为	138
4.2.1 退火态铁素体不锈钢的韧性	138
4.2.2 铁素体不锈钢的塑-脆转变行为	140
4.3 铁素体不锈钢的冷成形性和抗皱折性	154
4.3.1 连铸坯等轴晶比对铁素体不锈钢皱折行为的影响	155
4.3.2 热轧工艺条件的影响	156
4.3.3 热轧带热处理的影响	162
4.3.4 冷轧条件的影响	165
4.3.5 冷带最终退火工艺的影响	169
4.4 铁素体不锈钢的耐蚀性	170
4.4.1 在大气中的耐蚀性	170
4.4.2 铁素体不锈钢的均匀腐蚀	177
4.4.3 铁素体不锈钢的耐点蚀性能	182
4.4.4 铁素体不锈钢的耐缝隙腐蚀性能	191
4.4.5 铁素体不锈钢的耐应力腐蚀性能	203
4.4.6 铁素体不锈钢的氢脆	215
4.4.7 铁素体不锈钢的晶间腐蚀	219
4.5 铁素体不锈钢的焊接	227
4.5.1 铁素体不锈钢的焊接性	227
4.5.2 铁素体不锈钢的工艺焊接性	231
4.5.3 铁素体不锈钢的使用焊接性	232
4.5.4 焊接类型的选用	236
4.5.5 铁素体不锈钢用焊接材料的选择	237

4.5.6 铁素体不锈钢焊接接头的脆化	239
4.5.7 铁素体不锈钢焊接接头的晶间腐蚀	240
4.5.8 焊前预热和焊后热处理	242
参考文献	243
5 铁素体不锈钢的热处理	248
5.1 退火温度的选择	248
5.1.1 在高温存在 $\alpha + \gamma$ 双相结构的铁素体不锈钢	248
5.1.2 低碳、氮和高纯铁素体不锈钢	251
5.1.3 超级铁素体不锈钢	252
5.2 铁素体不锈钢热、冷带卷的退火装备和工艺特点	253
5.2.1 热轧带卷退火设备的选择	253
5.2.2 冷轧带卷退火设备的选择	253
参考文献	253
6 铁素体不锈钢典型牌号的性能和应用	254
6.1 $w(\text{Cr}) = 10\% \sim 15\%$ 的低铬系铁素体不锈钢	254
6.1.1 0Cr11Ti(409)、00Cr11Ti(409L)和 00Cr11TiNb(466)	254
6.1.2 0Cr13Al (AISI405, S40500)	264
6.1.3 00Cr14Nb	267
6.1.4 00Cr14MoNb	271
6.1.5 00Cr12 (410L)	274
6.2 中铬($w(\text{Cr}) = 16\% \sim 21\%$)铁素体不锈钢	276
6.2.1 1Cr17 (AISI430, S43000)、0Cr18Ti (439 S43035)	276
6.2.2 高纯和超高纯 Cr17Ti 铁素体不锈钢	287
6.2.3 00Cr19CuNb (SUS430J1L)	293
6.2.4 00Cr18Nb(441)	295
6.2.5 00Cr21CuTi(JFE443CT)	297
6.3 含 $w(\text{Mo}) \leq 2.5\%$ 的 Fe - Cr($w(\text{Cr}) = 17\% \sim 26\%$) - Mo 铁素体不锈钢	301
6.3.1 00Cr18Mo1Ti (SUS436L)	301
6.3.2 00Cr18Mo2Ti (S44400) 和超高纯 Cr18Mo2Ti	306
6.3.3 00Cr22Mo1Nb (Ti)	312
6.3.4 00Cr22Mo2Ti(Nb) - SUS445J2	315
6.3.5 Cr26Mo1 铁素体不锈钢	318

6.4 常用铁素体不锈钢的物理性能	325
参考文献	327
7 超级铁素体不锈钢	329
7.1 超级铁素体的化学成分和特点	330
7.2 超级铁素体不锈钢的脆性	333
7.2.1 σ 相脆性	333
7.2.2 475℃ 脆性	334
7.2.3 高温脆性	334
7.3 超级铁素体不锈钢的脆性转变温度	334
7.4 超级铁素体不锈钢的力学性能和物理性能	336
7.4.1 力学性能	336
7.4.2 抗振性能	338
7.4.3 物理性能	339
7.5 超级铁素体不锈钢的耐蚀性	340
7.5.1 耐均匀腐蚀性能	340
7.5.2 耐晶间腐蚀性能	341
7.5.3 耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能	342
7.5.4 应力腐蚀	348
7.6 超级铁素体不锈钢的应用	350
7.6.1 超级铁素体不锈钢在发电厂冷凝器中的应用	350
7.6.2 超级铁素体不锈钢在化学加工工业中的应用	353
7.6.3 00Cr30Mo2 在建筑业中的应用	355
7.7 超级铁素体不锈钢应用中必须重视的技术问题	355
7.7.1 避开产生 σ 相、 χ 相脆性和 475℃ 脆性的温度	355
7.7.2 限制材料的截面厚度	355
7.7.3 管板材料的选择	355
7.7.4 阴极保护	356
参考文献	356

1 概 论

1.1 铁素体不锈钢的定义

铁素体不锈钢是指在高温和室温均具有完全铁素体或以铁素体为主体结构，其铬含量 $w(\text{Cr})$ 大于 10.5% 的一系列铁基合金，为了赋予此类合金一些特定性能，还常常加入适量的 Mo、Ni、Nb、Ti 或 Nb + Ti 等元素。如果不计稳定化元素，目前的铁素体不锈钢主要是由 Fe - Cr 和 Fe - Cr - Mo 两大体系组成。

1.2 铁素体不锈钢的分类

铁素体不锈钢可按其合金元素构成或按钢中的铬含量的多少进行分类。

(1) 按合金元素构成可分为 Fe - Cr 系铁素体不锈钢和 Fe - Cr - Mo 系铁素体不锈钢两大类。

1) Fe - Cr 系。主要以 Cr 为合金元素，为了赋予钢的一些力学、耐蚀特性，在某些牌号中加入 Ti、Nb 或两者复合加入。如 0Cr11Ti (409)、00Cr11TiNb、1Cr17 (430)、00Cr17Ti、00Cr19Nb 等。

2) Fe - Cr - Mo 系。在 Fe - Cr 系铁素体不锈钢中加入 Mo，Cr、Mo 的协同作用，使钢的耐点蚀、耐缝隙腐蚀和耐均匀腐蚀性能进一步提高，从而形成了 Fe - Cr - Mo 系铁素体不锈钢。如：00Cr17Mo1Ti、00Cr18Mo2Ti、00Cr22MoTi、00Cr25MoNiTi (Nb)、00Cr27Mo4Ni2Nb (海优)、00Cr28Mo4Ni2Nb、00Cr30Mo2Nb 等。

(2) 按钢中的 Cr 含量多少进行分类，大体上可分为低铬型、中铬型和高铬型铁素体不锈钢三类。

1) 低铬型。钢中的 Cr 含量 $w(\text{Cr})$ 在 10.5% ~ 16% 之间，如 0Cr11Ti、00Cr13、0Cr15MoTi 等。

2) 中铬型。钢中的 Cr 含量 $w(\text{Cr})$ 在 16% ~ 25% 之间，如 1Cr17 (430)、00Cr17Ti、00Cr19Nb、00Cr21Ti (443)、00Cr22MoTi (445) 等。

3) 高铬型。钢中 Cr 含量 $w(\text{Cr})$ 大于 25%，如 00Cr26Mo1Ti (26 - 1)、00Cr25Mo3Ni3Nb (Ti)、0Cr27Mo4Ni2Nb (Ti)、00Cr28Ni4Mo2Nb、00Cr28Mo4Ni2Nb、00Cr29Mo4Ni2Nb、00Cr30Mo2Nb 等。

1.3 铁素体不锈钢的性能特点

铁素体不锈钢与奥氏体不锈钢由于基体结构不同,在某些性能方面呈现出不同的特点,概括起来,其主要特点如下:

(1) 铁素体不锈钢具有高的屈服强度和较低的塑性,一些高 Cr 铁素体不锈钢的屈服强度可达通用 Cr - Ni 奥氏体不锈钢 (0Cr18Ni9) 的 2 倍,但其伸长率却仅为后者的 50%,但这种塑性是工程应用可以接受的。

(2) 铁素体不锈钢较 Cr - Ni 奥氏体不锈钢具有更高的热导率 (约为奥氏体不锈钢的 1.3 ~ 1.6 倍),其倍率的差别与铁素体不锈钢的合金化程度有关,这一特征使其特别适用于热交换器,可提高热交换的效率。

(3) 铁素体不锈钢具有低的线 [膨] 胀系数 (仅为奥氏体不锈钢的 60% ~ 70%),接近普通碳素钢。

(4) 铁素体不锈钢具有优异的耐应力腐蚀破裂性能,在一些含氯的水介质中,甚至在高浓度的氯化物中几乎是免役的。而奥氏体不锈钢对应力腐蚀十分敏感。在 20 世纪 60 年代,美国因 Cr - Ni 奥氏体不锈钢所产生的灾难性的应力腐蚀事故每年所造成的经济损失约 3000 万美元。

(5) 铁素体不锈钢具有良好的耐均匀腐蚀、耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能,其耐蚀程度主要由钢中的 $w(\text{Cr}) + 3.3 \times w(\text{Mo})$ 这一指数所控制,在相同的指数下,铁素体不锈钢的耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能优于奥氏体不锈钢。但在还原性酸性介质中铁素体不锈钢不如奥氏体不锈钢。

(6) 铁素体不锈钢的深拉成形性能优于奥氏体不锈钢而胀形成形性能不如奥氏体不锈钢。

(7) 铁素体不锈钢是铁磁性的,而奥氏体不锈钢是无磁性的。

(8) 铁素体不锈钢不含 Ni,一些特殊牌号仅含少量的 Ni,属节 Ni 不锈钢,因此其成本相对低廉,且不受 Ni 价波动的影响。

(9) 475℃ 脆性。这是 $w(\text{Cr})$ 高于 15% 铁素体不锈钢的固有特性,其本质是在 400 ~ 540℃ 长期停留或缓慢冷却通过此温度区间,形成富 Cr 的 α' 相所致, α' 相的析出随钢中 Cr 含量的提高愈加敏感,它的析出极大地降低了钢的韧性和耐蚀性,此种特性致使铁素体不锈钢不能在此温度长期服役且给高 Cr 铁素体不锈钢热板卷的生产带来许多麻烦。

(10) σ 相脆性。对于中、高 Cr 铁素体不锈钢,在 600 ~ 980℃ 范围内加热停留易形成 σ 相,其结果使钢变脆并降低其耐蚀性,通常称作 σ 相脆性或中温脆性。 σ 相 (χ 相) 的析出行为与钢的成分有关,随 Cr 含量的提高其形成的孕育期变短。

(11) 高温脆性。对于一般纯度的高 Cr 铁素体不锈钢在 950℃ 以上加热时,

在冷却过程中常使钢变脆并伴随着耐蚀性的下降，而这种受热条件在焊接和热轧生产中是不可避免的。

1.4 铁素体不锈钢的发明和发展

关于 Fe - Cr 合金的耐蚀性和不锈性以及 Cr 对 Fe 的钝化能力的贡献，早在 20 世纪初期就已被发现和确认，这是不锈钢赖以发明和发展的基础。

铁素体不锈钢的商业牌号几乎与含 13% Cr 的马氏体不锈钢同时问世，铁素体不锈钢应以丹齐曾 (C. Dantsizen) 1911 ~ 1914 年在美国所开发的含 14% ~ 16% Cr, 0.07% ~ 0.15% C (质量分数) 的钢为铁素体不锈钢的首创钢种，这是目前广泛应用的 Cr17 型 (430) 铁素体不锈钢的原型钢。

自铁素体不锈钢原型钢问世至今已有近 100 年的时间，在这一个多世纪的时期内，铁素体不锈钢的研究和发展从未间断过，其开发研究活动大体可分为 4 个阶段，每一个阶段均有不同的针对性。

第 1 阶段 (1914 ~ 1960)，重点是研究铁素体不锈钢中 Cr 含量对其耐蚀性的影响，并对这类钢的脆性本质以及钢中的 C、N 含量对 DBTT 和晶间腐蚀的影响进行了深入的研究，同时研究了铁素体不锈钢的热处理工艺与析出行为和耐晶间腐蚀性能之间的关系，1951 年公布了 Fe - Cr 系铁素体不锈钢的系统研究结果，并确定了第 1 代铁素体不锈钢的合金成分 (见表 1-1)。这一代铁素体不锈钢 $w(\text{Cr}) = 15\% \sim 26\%$ ，基本涵盖了中、高铬铁素体不锈钢的不同牌号。因碳无法降到较低水平，所以 Cr13 型铁素体不锈钢尚不能工业生产。第 1 代铁素体不锈钢的另一值得关注的特点是钢中的碳、氮含量不是很低，其原因是限于当时的冶金装备水平和缺乏有效的脱碳手段，钢中 $w(\text{C})$ 上限为 0.12%，钢中的氮含量也不能严格限制。实际上，第 1 代铁素体不锈钢不是真正意义上的铁素体不锈钢，从熔点到室温不是完全的铁素体结构，在某些温度区间会出现奥氏体，即便是含铬量 $w(\text{Cr}) = 26\%$ 的 446 也难以避免奥氏体的出现，奥氏体含量受钢中的 Cr 含量和碳、氮含量的制约。例如原型钢 430，其典型成分是含 0.12% C 和 17% Cr (质量分数)，在平衡状态下，约 1250℃ 以上为全铁素体，1250 ~ 1030℃ 处于双相区，奥氏体和铁素体将共存，随后出现 $\delta + \gamma + \text{C}_1$ 共存区。约在 920℃ 以下，此钢中的奥氏体将不出现，钢的组织为铁素体和碳化物，并一直保持到室温，含 25% Cr, 0.20% C (质量分数) 的 446 型钢也具有类似行为，仅仅是所形成的奥氏体量不同而已，见图 1-1。在第 1 代铁素体不锈钢中所存在的奥氏体既具有好的影响，也具有不利作用。奥氏体的存在限制了钢晶粒的长大，对钢的塑韧性有益，此外一定的奥氏体含量可降低 Cr17 型铁素体不锈钢冷成形时的突耳效应，降低 Δr 。其不利作用在于这些奥氏体至一定的受热和冷却条件下会转变为马氏体，例如在焊后所产生的硬点，

即因为这种马氏体转变所致，因此，第 1 代铁素体不锈钢焊后必须进行热处理。

表 1-1 第 1 代铁素体不锈钢的典型化学成分

UNS No.	AISI	化学成分 (质量分数) /%						
		C	P	S	Cr	Mo	Nb	Se
S42900	429	≤0.12			14.0 ~ 16.0	—	—	—
S43000	430	≤0.12			16.0 ~ 18.0	—	—	—
S43020	430F	≤0.12			16.0 ~ 18.0	≤0.6	—	—
S43023	430FSe	≤0.12			16.0 ~ 18.0	—	—	≥0.15
S43400	434	≤0.12	≤0.06	≥0.15	16.0 ~ 18.0	0.75 ~ 1.25	—	—
S43600	436	≤0.12			16.0 ~ 18.0	0.75 ~ 1.25	>5 × C	—
S44200	442	≤0.20			18.0 ~ 23.0	—	—	—
S44300	443	≤0.20			18.0 ~ 23.0	≤0.5Ni	0.9 ~ 1.25	Cu
S44600	446	≤0.20			23.0 ~ 27.0	—	—	—

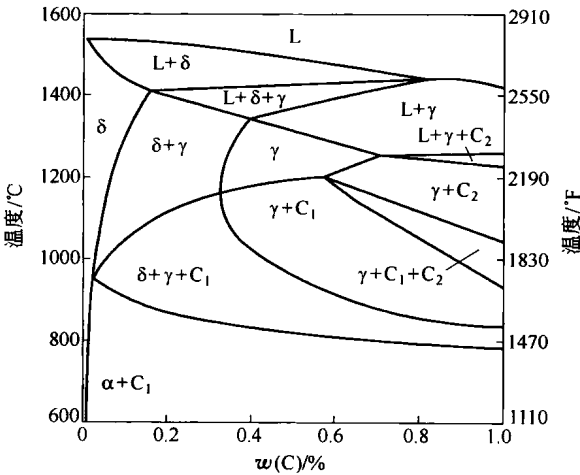


图 1-1 $w(\text{Cr}) = 17\%$ 的三元 Fe-Cr-C 状态图的浓度截面图^[1]

第 2 阶段（20 世纪 50 ~ 70 年代）。在确认了铁素体不锈钢的塑韧性及耐晶间腐蚀性能与钢中的碳、氮含量之间的关系之后，明确了间隙元素碳和氮是引起此类钢塑韧性不良和耐晶间腐蚀性能不足的根源，加之 18-8 型奥氏体不锈钢在含氯水介质中的应力腐蚀破坏事故频出，进一步刺激了对铁素体不锈钢的关注。

在此时期不锈钢的冶炼技术，尤其是脱碳技术也取得了极大的进步，如 AOD 和 VOD 脱碳技术的确立等，均为将铁素体不锈钢中的碳降到较低水平创造了基本条件，但将钢中的氮降到较低的水平尚不具备经济有效的手段。由于受脱碳所能达到的水平限制，钢中的碳尚不能降低到此类钢允许的上限值，为了降低碳和氮的有害作用，必须加入适量的稳定化元素。在这种背景下，于是产生了第 2 代铁素体不锈钢，见表 1-2。

表 1-2 第 2 代铁素体不锈钢的化学成分

UNS No.	合金名称	化学成分 (质量分数)/%						
		C	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	Nb
S40500	405	≤0.08	11.5 ~ 14.5	—	—	0.10 ~ 0.30	—	—
S40900	409	≤0.08	11.5 ~ 11.75	—	≤0.5	—	≥6 × C ≤0.75	—
—	409Cb	0.02 ^①	12.5 ^①	—	0.2 ^①	—	—	0.4 ^①
—	AL446	0.01 ^①	11.5 ^①	—	0.2 ^①	—	0.1 ^①	0.2 ^①
S43035	439	≤0.07	17.00 ~ 19.00	—	≤0.5	—	≥0.20 + 4(C + N) ≤1.0	—
—	AL443	0.02 ^①	19.0 ^①	—	0.3 ^①	—	—	0.4 ^①
—	AL468	0.01 ^①	18.2 ^①	—	—	—	0.1 ^①	0.2 ^①
—	YUS436S	0.01 ^①	17.00 ~ 19.00	1.2	≤0.5	—	—	0.2 ^①
S44100	441	0.02 ^①	18.0 ^①	—	0.3 ^①	—	0.3 ^①	0.7 ^①
EN1.4511	430Ti	≤0.05	16.0 ~ 18.0	—	—	—	≤0.6	—
EN1.4513	434	≤0.08	16.0 ~ 18.0	0.9 ~ 1.4	—	—	—	—
EN1.4526	434	≤0.08	16.0 ~ 18.0	0.8 ~ 1.4	—	—	—	7 × (C + N) + 0.1 ~ 1.0

① 典型值。

第 2 代铁素体不锈钢的研究方向是集中开发低 Cr 型和中 Cr 型铁素体不锈钢，相比第 1 代铁素体不锈钢的碳含量已降低到较低的水平，钢中的氮仍保持在常规水平，为使钢的塑韧性、焊后的塑韧性和耐晶间腐蚀达到工程应用的允许值，加入了 Al、Ti、Nb 等稳定化元素，以减小固溶体中 C、N 的有害作用，提高有效铬的水平。低 Cr 型铁素体不锈钢之所以能够发展和工业化，得益于当时的冶金手段足以将低 Cr 型 Fe-Cr 合金中的碳降到较低水平，此外汽车工业对低 Cr 型尾气排放系统的强烈需求也极大地推进了这种经济型不锈钢的发展。第 2 代低