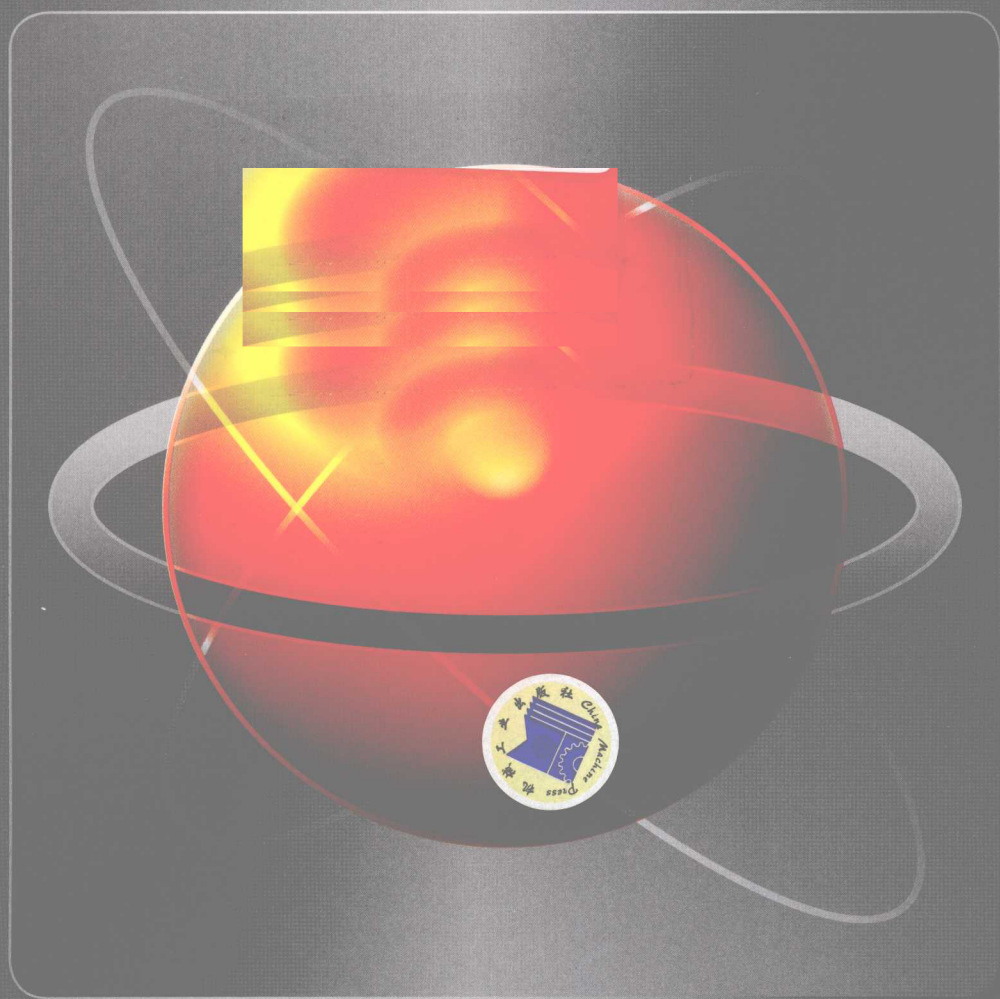


不锈钢的应用 及热处理

赵昌盛 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

不锈钢的应用及热处理

赵昌盛 孙桂良 闵令平 等编著
王学福 李玉芹



机械工业出版社

本书以国家最新不锈钢和耐热钢标准中的钢材为基础,较全面地介绍了传统不锈钢、新研制的不锈钢的性能及应用;在热处理部分介绍了不锈钢热处理的基本原理、基本工艺、化学热处理及不锈钢表面强化技术,并介绍了典型不锈钢和不锈钢零件的热处理工艺,以及不锈钢的表面处理技术。

本书侧重于实用性,可供不锈钢生产、应用和热处理生产一线的技术人员阅读使用。对于科研、设计和教学单位的工程技术人员和师生也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

不锈钢的应用及热处理/赵昌盛等编著. —北京:机械工业出版社, 2010. 3

ISBN 978 - 7 - 111 - 29821 - 2

I. ①不… II. ①赵… III. ①不锈钢 - 应用②不锈钢 - 热处理 IV. ① TG142. 71②TG161

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 028744 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:刘彩英 责任编辑:张淑杰

版式设计:霍永明 责任校对:姚培新

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 30.75 印张 · 620 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 29821 - 2

定价:47.00 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

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

不锈钢具有优越的耐蚀性、耐热性、耐磨性和强韧性，以及良好的可加工性和外观精美性，是一种绿色环保材料，广泛地应用于航空航天、海洋、化工、军工和能源等方面，以及建筑装潢、家庭器具、交通车辆及医药器械等众多领域。

近年来，我国各地不锈钢生产和加工企业如雨后春笋般地发展起来，我国已成为世界上不锈钢生产和消费的大国。但在过去，由于种种原因，不锈钢技术资料缺乏，特别是专门介绍不锈钢热处理技术的书更是奇缺。近几年来，国内出版了一些不锈钢材料方面的书籍，由于编写的角度和侧重点不同，其内容和读者的适用面也有所不同。本书根据最新国家标准，在认真总结实践经验的基础上，收集和整理最新文献资料，把不锈钢材料的应用和热处理技术方面的知识结合起来，以满足广大读者的需要。本书较全面地介绍了最新国家标准中传统的和新研制的不锈钢材料的性能、应用及热处理工艺，可供在生产一线从事不锈钢材料生产、应用和热处理的工作者阅读使用，也可供大专院校的师生参考。

采用正确和先进的热处理技术，可以充分发挥不锈钢材料的特性，延长不锈钢零件的使用寿命，保证不锈钢零件、模具和机械设备的高精度。随着科学技术的发展，不锈钢热处理技术也有了飞速发展，如真空热处理、离子热处理、激光热处理、电子束热处理、气相沉积强化、强韧化热处理、可控气氛热处理以及各种复合热处理等，大大提高了不锈钢零件的质量和使用寿命。

本书重点介绍不锈钢材料的性能、不锈钢材料的选择和应用、不锈钢热处理基础和先进的不锈钢热处理技术，以及不锈钢零件的热处理，并简要介绍了铸造不锈钢的性能和不锈钢表面处理技术。

参加本书编写工作的还有：安徽省宿州职业技术学院孙桂良、李玉芹、刘艳明、马军、石启飞，安徽省煤田地质局宿州机械厂闵令平、卓震、张守国，安徽省宿州市第一职业高级中学王学福，温州热处理厂居建村，温州乐清强力机械有限公司孔康祥，温州职业技术学院晁拥军，以及冯立文、施家山、吴杰、任红光、赵伟、马健博、任萌玉等同志，对他们的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于在新的国家标准中，新的不锈钢牌号增加较多，一些资料缺乏，给本书的编写带来了一定的困难。本人长期在生产一线工作，收集的资料有限，并限于本人水平，因此本书难免有不足和错漏之处，敬请广大读者批评指正。

本书引用了一些最新不锈钢资料，在此向资料的作者表示衷心的感谢！愿我们为不锈钢的技术发展共同努力。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 不锈钢的发展	1
一、概述	1
二、不锈钢的发展史	2
三、不锈钢的新发展	3
第二节 不锈钢的分类、特点和用途	9
一、不锈钢的分类	9
二、各类不锈钢的特点和用途	10
第三节 合金元素对不锈钢的作用	12
一、铬的作用	12
二、碳在不锈钢中的两重性	13
三、镍的影响	13
四、锰的影响	14
五、氮的影响	14
六、钼的影响	15
七、钛的影响	15
八、铌的影响	15
九、钨的影响	15
十、铜的影响	15
十一、铝的影响	15
十二、硅的影响	16
十三、钴的影响	16
十四、硼的影响	16
十五、磷的影响	16
十六、硫和硒的影响	16
十七、稀土元素的影响	16
第二章 不锈钢材料的选择及应用	18
第一节 不锈钢选择的原则	18
一、满足工件的耐蚀性	18
二、不锈钢的力学性能	21
三、不锈钢的工艺性能	26
四、不锈钢的物理性能	29

五、不锈钢的冶金质量	29
六、不锈钢的使用环境	30
七、材料的成本和货源	31
第二节 按不锈钢钢种特性选择材料	31
第三节 不锈钢的应用	44
一、不锈钢在模具中的应用	44
二、不锈钢在化工设备上的应用	46
三、不锈钢在交通运输业的应用	53
四、不锈钢在人们日常生活中的应用	55
五、不锈钢在其他行业中的应用	59
第三章 不锈钢热处理及表面强化技术	63
第一节 不锈钢热处理基础	63
一、铁碳合金相图	63
二、Fe-Cr 合金相图	63
三、合金元素对合金相图的影响	67
第二节 不锈钢热处理特点	69
一、马氏体不锈钢及热处理	70
二、奥氏体不锈钢及热处理	72
三、铁素体不锈钢及热处理	74
四、奥氏体-铁素体不锈钢及热处理	75
五、沉淀硬化不锈钢及热处理	76
第三节 不锈钢热处理工艺规范	78
一、热处理方法与选择	79
二、设备	79
三、工艺材料	80
四、工艺过程	81
五、工艺规范	82
第四节 不锈钢零件表面强化处理	86
一、不锈钢的化学热处理	87
二、不锈钢表面涂覆处理	110
三、表面气相沉积强化	112
四、高能束表面强化技术	119
五、其他表面强化技术	123
第四章 马氏体不锈钢及热处理	128
第一节 马氏体不锈钢的特点及分类	128
一、马氏体不锈钢的特点	128
二、马氏体不锈钢的分类	132
第二节 马氏体不锈钢性能介绍	135

一、Cr13 型马氏体不锈钢	136
二、Cr17 型马氏体不锈钢	159
三、马氏体耐热钢	176
第三节 马氏体不锈钢的热处理	191
一、概述	191
二、Cr13 型马氏体不锈钢的热处理	192
三、低碳铬镍型马氏体不锈钢的热处理	194
四、高碳高铬型马氏体不锈钢的热处理	195
五、马氏体耐热钢的热处理	197
第五章 奥氏体不锈钢及热处理	199
第一节 奥氏体不锈钢的特点及分类	199
一、奥氏体不锈钢的特点	199
二、奥氏体不锈钢的分类	202
第二节 奥氏体不锈钢的性能介绍	208
一、铬镍奥氏体不锈钢的性能	208
二、铬锰氮奥氏体不锈钢的性能	236
三、铬硅钼铜奥氏体不锈钢的性能	243
第三节 奥氏体不锈钢的热处理	293
一、概述	293
二、铬镍奥氏体不锈钢的热处理	294
三、铬锰氮奥氏体不锈钢的热处理	295
四、含钼、硅、铜的奥氏体不锈钢的热处理	296
五、奥氏体耐热钢的热处理	298
第六章 铁素体不锈钢及热处理	301
第一节 铁素体不锈钢的特点及分类	301
一、铁素体不锈钢的特点	301
二、常用铁素体不锈钢的分类	304
第二节 铁素体不锈钢性能介绍	306
第三节 铁素体不锈钢的热处理	323
一、概述	323
二、低铬铁素体不锈钢的热处理	324
三、中铬铁素体不锈钢的热处理	324
四、高铬铁素体不锈钢的热处理	324
第七章 奥氏体-铁素体不锈钢及热处理	326
第一节 奥氏体-铁素体不锈钢的特点及分类	326
一、奥氏体-铁素体不锈钢的特点	326
二、奥氏体-铁素体不锈钢的分类	328
第二节 奥氏体-铁素体不锈钢性能介绍	330

第三节 奥氏体-铁素体不锈钢的热处理	350
一、概述	350
二、铬镍奥氏体-铁素体不锈钢的热处理	351
三、铬锰氮奥氏体-铁素体不锈钢的热处理	354
第八章 沉淀硬化不锈钢及热处理	355
第一节 沉淀硬化不锈钢的特点及分类	355
一、沉淀硬化不锈钢的特点	355
二、沉淀硬化不锈钢的分类	357
第二节 沉淀硬化不锈钢性能介绍	359
第三节 沉淀硬化不锈钢的热处理	377
一、概述	377
二、马氏体沉淀硬化不锈钢的热处理	377
三、奥氏体沉淀硬化不锈钢的热处理	379
四、半奥氏体沉淀硬化不锈钢的热处理	379
五、马氏体时效钢的热处理	381
第九章 铸造不锈钢及热处理	382
第一节 铸造不锈钢的特性	382
一、概述	382
二、铸造马氏体不锈钢的特性	382
三、铸造铁素体不锈钢的特性	383
四、铸造奥氏体不锈钢的特性	383
第二节 铸造不锈钢的热处理	384
一、铸造不锈钢的分类	384
二、铸造不锈钢的热处理及力学性能	386
第三节 铸造耐热钢的性能及热处理	398
一、铸造耐热钢的分类及性能	398
二、耐热铸钢的热处理及力学性能	401
第十章 不锈钢零件的热处理及表面处理	404
第一节 不锈钢零件的热处理	404
一、马氏体不锈钢零件的热处理	404
二、奥氏体不锈钢零件的热处理	408
三、铁素体不锈钢零件的热处理	411
四、奥氏体-铁素体不锈钢零件的热处理	412
五、沉淀硬化不锈钢零件的热处理	413
第二节 不锈钢零件的表面处理	416
一、不锈钢零件的预处理	416
二、不锈钢零件氧化皮的清除和酸洗	420
三、不锈钢零件的抛光	423

四、不锈钢零件的钝化	426
五、不锈钢零件的发黑	429
六、不锈钢零件化学着色	435
七、不锈钢零件电化学着色	439
八、不锈钢表面涂装	443
附录	444
附录 A 中国 GB 标准不锈钢和耐热钢	444
附录 B 各国不锈钢和耐热钢牌号对照	457
附录 C 不锈钢热处理制度及力学性能	465
附录 D 不锈钢耐热钢的热处理制度及力学性能	470
附录 E 典型不锈钢耐蚀性	480
参考文献	483

第一章 绪 论

第一节 不锈钢的发展

一、概述

不锈钢是指以不锈性和耐蚀性为主要特性， $w(\text{Cr})$ 至少为 10.5%、 $w(\text{C})$ 最大不超过 1.2% 的钢。

腐蚀是机械零件受周围介质的化学和电化学作用而失效的主要原因。一般的碳钢和合金钢在腐蚀介质的作用下，金属表面会形成氧化膜，就是人们常说的生锈。氧化膜不能阻止金属和腐蚀介质的接触，氧化继续进行，锈蚀不断扩大，致使机械零件继续生锈、腐蚀，直至完全失效。

不锈钢是在普通低碳钢和低合金钢的基础上添加一定量的铬元素冶炼而成的，其不锈性与钢中的铬含量有关。当钢中的 $w(\text{Cr})$ 超过 10.5% 时，钢再与大气接触时，其表面会生成一层致密的、不易脱落的氧化膜，称作钝化膜 (Cr_2O_3)。这层致密的富铬氧化膜可以隔离金属与外界腐蚀介质的接触，从而有效地保护了不锈钢表面。这层氧化膜极薄，只有几微米，像是披上一层透明的外衣。透过它可以看到依然是银白色的金属表面，使不锈钢具有了独特的表面。当表面钝化膜一旦遭到破坏，钢中的铬会与腐蚀介质中的氧发生反应重新生成钝化膜，继续起保护作用。不锈钢表面钝化膜的成分、形态及结构越均匀，钢的不锈性和耐蚀性就越好。

不锈钢的耐蚀性，主要取决于不锈钢中铬元素的含量和组织结构，但也与腐蚀介质的种类、温度、浓度、压力、流动速度以及钢中其他合金元素的含量等因素有关。不锈钢遇到特殊环境，也会出现局部腐蚀，如点腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀和电偶腐蚀等。为了使不锈钢克服这些腐蚀，提高其耐蚀性，同时也为了使不锈钢具有良好的力学性能、工艺性能和其他性能，根据不同的要求，在钢中除了添加较高含量的铬元素以外，还应分别加入镍、铝、锰、氮、钛、铌等合金元素。这样，不仅可以改变钝化膜的化学组成，提高它在苛刻腐蚀介质中的耐蚀性，而且也可以使不锈钢具有足够的强度、韧性、塑性和耐磨性，以及良好的工艺性能，如可锻性、焊接性、切削加工性和压力加工成形性等。

了解金属的腐蚀特点及提高不锈钢的耐蚀性是很重要的。因为金属的腐蚀是有害的，它会给国民经济造成巨大的损失。钢生锈及高温下的氧化，石油管道、化工设备、机械设备和船舶壳体的损坏都是与腐蚀有关的。据不完全统计，全世界因腐

蚀而损坏的金属制品约占当年钢产量的 10%。因此采取措施,更广泛地应用不锈钢代替普通钢,并提高不锈钢的耐蚀性对国民经济的发展有着十分重要的意义。

耐热钢是在高温条件下具有良好的化学稳定性或较高强度的钢。过去,我国标准将不锈钢同耐热钢分开,并分别有各自的国家标准。在新的国家标准 GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》中,把这两类钢结合在一起,因此本书也将把这两类钢一起介绍。重点介绍不锈钢的特性及应用,并适当介绍一些传统不锈钢和一些新研制的未纳入新的国家标准的不锈钢,同时也介绍一些不锈钢耐热钢的性能及应用。

二、不锈钢的发展史

“科学最激动人心的一件事是你永远也不知道明天会发生什么”。自从几千年以前,我们的祖先用金属代替木器及石器开始,对金属和合金的需求就一直在增长。当发现 $w(\text{Cr}) \geq 13\%$ 的钢具有耐蚀性和防氧化的能力时,不锈钢就诞生了,从此不锈钢在恶劣及高温环境中开始了应用。不锈钢发展的时间表如下:

1821 年,法国人 Berthier 提出了在钢中加入铬元素。

1817 年,法国人开始生产低铬、低合金钢。

1904 ~ 1909 年,法国和德国生产了 $w(\text{Cr}) = 13\%$ 和 $w(\text{Cr}) = 17\%$ 的合金钢。

1912 年,西方国家提出 18-8 型不锈钢专利,并用于制造刀叉餐具。

从 1913 年到 1935 年,英国、法国、美国及德国等西方国家出现的不锈钢是当时使用量最大的标准不锈钢。1930 年,开始用于军事工业和建筑业。

1950 年,不锈钢在炼油工业、造纸工业、家用器具及服装工业等行业得到广泛应用。

从 1960 年开始,不锈钢的生产和应用有了突飞猛进的发展,不锈钢开始应用于核工业和交通车辆、建筑业、电子工业、纺织工业、环境保护技术、能源工业以及海上运输等。

1990 年以后,新钢种的使用范围更加广泛。

我国生产不锈钢的历史,也已经有 60 年了。1950 年初,我国开始生产 Cr13 型马氏体不锈钢,1952 年开始大量生产 18-8 型 Cr-Ni 奥氏体型不锈钢,例如 12Cr18Ni9Ti 钢。后来为了适应国内化学工业的发展,又开始生产 $w(\text{Mo}) = 2\% \sim 3\%$ 的奥氏体不锈钢,例如 10Cr18Ni12Mo2Ti 和 10Cr18Ni12Mo3Ti 等钢。1960 年以后,一大批适应于化工、石油、航海、航天、航空及核能等工业发展需要的新钢种相继研究成功,并开始生产使用,我国的不锈钢体系也初步形成。

在 1960 ~ 1990 年三十年间,我国不锈钢产量提高了 20 倍。改革开放以来,我国不锈钢产量和应用更是有了突飞猛进的发展,产量从 1988 年的 21.7 万 t 增加到 2006 年的 500 万 t,增长了 20 多倍。

在不锈钢品种方面,近二十年来也发展得很快。1984年制订的GB 1220—1984中不锈钢品种是55种,加上GB 1221—1984中的耐热钢22种(重复的不算),共77种。而在2007年3月9日发布的GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢牌号及化学成分》标准中已增加至143个,而且还淘汰了一些旧钢种。从中可以看出,新钢种有了较大发展。

三、不锈钢的新发展

不锈钢是一种特殊材料,其优点是不生锈、耐蚀、耐热、易加工、易清洁、可回收以及全寿命周期成本低,同时又是一种绿色环保材料,可广泛应用于工业生产及人们的日常生活。

随着科学技术的发展,不锈钢的品种和质量也在迅速发展。而随着不锈钢应用的日益广泛,各国正在研究和开发更多的适应新要求的不锈钢品种。

目前,使用量较大的集中于7大类不锈钢,现将其发展状况概述如下。

1. 马氏体不锈钢的发展

马氏体不锈钢是基体为马氏体组织,有磁性,通过热处理可调整其力学性能的不锈钢。马氏体不锈钢主要有Cr13、Cr17两种,常用的马氏体不锈钢有12Cr13、20Cr13、30Cr13、40Cr13、14Cr17Ni2、95Cr18、90Cr18MoV及32Cr13Mo等。马氏体不锈钢的耐蚀性稍差,但它的力学性能却可以通过热处理进行强化。随着碳含量的增加,其强度、硬度和耐磨性显著提高,因此在腐蚀性较弱的介质中(如水蒸气),而且力学性能又要求高的条件下得到了广泛的应用。

但是传统的马氏体不锈钢存在延展性差、冷加工成形困难以及焊接性差的缺点,影响了马氏体不锈钢的应用范围,因此国内外又开始研究一种抗拉强度高、延展性好、焊接性能优良的马氏体不锈钢,也就是人们说的超级马氏体不锈钢。

该类马氏体不锈钢是在Cr13和Cr17钢的基础上适当降低碳含量($w(C) < 0.03\%$)和硫含量($w(S) < 0.01\%$),增加镍含量($w(Ni) = 4.0\% \sim 6.5\%$)和钼含量($w(Mo) \leq 2.5\%$),从而改善钢的韧性、耐蚀性和焊接性能,特别是在含 H_2S 和 CO_2 气氛中的性能,可用于石油化工、天然气的储运装置。同时,超级马氏体不锈钢可以代替奥氏体-铁素体双相不锈钢制作结构件,因为强度高,可以减少零件的壁厚,减轻零件的重量,节约成本。国外研发的几种超级马氏体不锈钢的化学成分见表1-1。

表 1-1 几种超级马氏体不锈钢的化学成分(质量分数)(%)

牌号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	N	Ti	V	生产厂
11P ₃ Cr	<0.03	13	4	1	<0.4	<0.3		0.05			川崎厂
13-5-2	0.02	12.5	5	2	0.4	0.2		<0.08			佳友金属
13-6-2.5-Ti	<0.01	12	6.2	2.5	0.4	0.3		<0.01	0.07		佳友金属

(续)

牌号	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	N	Ti	V	生产厂
12-5-2	0.02	12.2	5.5	2	0.5	0.2	0.2	0.02		0.2	英钢联
CRS (>95ksi)	0.02	12.5	4.5	1.5	0.5	0.3	1.5	0.05			新日联
CRS (>110ksi)	0.02	12.8	5.9	2	0.5	0.3	1.5	0.02			新日联
X80.11Cr-2Ni	<0.015	11	2	<0.5	<2	0.15	0.4	<0.012			沙勒洛伊
X80.12Cr-6.5	<0.015	12	6.5	2.5	<2	<0.15	0.4	<0.012			沙勒洛伊
Ni-2.5Mo248SV	0.03	16	5	1							阿·谢菲尔德

注: 1ksi = 1000lb/in² = 6.89N/mm² = 6.89MPa。

2. 奥氏体不锈钢的发展

奥氏体不锈钢的发展是从 18-8 型 Cr-Ni 不锈钢开始, $w(\text{Cr}) \approx 18\%$, $w(\text{Ni}) = 8\% \sim 10\%$, 是最典型最基本的代表钢种。其他奥氏体不锈钢均是在 18-8 型钢的基础上发展起来的。

在 20 世纪 70 年代初, 为了固定奥氏体不锈钢中的碳, 防止晶间腐蚀发生, 在 18-8 型钢中加入了钛, 含 Ti 稳定化钢 10Cr18Ni9Ti 是第二代奥氏体不锈钢。在一段时间内, 10Cr18Ni9Ti 在不锈钢中占有主导地位, 产量最大, 应用最普及, 至今仍在大量生产和应用。另外, 在 18-8 钢的基础上添加 2% (质量分数) 左右的钼生成的奥氏体不锈钢, 称作 18-8Mo 钢, 如我国生产的 06Cr17Ni12Mo2Ti (0Cr18Ni12Mo2Ti)、06Cr17Ni12Mo2 (0Cr17Ni12Mo2) 钢, 这些 18-8Mo 钢均属常用钢种或通用钢种, 也是大量生产的基本钢种。

但是 10Cr18Ni9Ti 钢也存在一定问题, 如钢液粘稠, 连铸坯表面质量差, 必须进行剥皮修磨, 成材率很低, 成品钢材含有 TiN 夹杂, 纯净度低, 表面抛光性能差, 拉细丝断头多等, 因此国内外相继开发了一系列低碳和超低碳奥氏体不锈钢, 逐步取代了含 Ti 稳定化奥氏体不锈钢。目前, 我国除少数传统产业仍在使用 10Cr18Ni9Ti 外, 06Cr19Ni10 (0Cr18Ni9)、06Cr17Ni12Mo2 (0Cr17Ni12Mo2) 已成为奥氏体不锈钢的主导牌号。

我国镍资源不足, 以锰-氮代镍, 开发和推广了 200 系列不锈钢, 可以降低不锈钢成本, 具有深远的战略意义。

随着含镍量的降低, 为保持奥氏体的组织状态, 必须有足够的锰、氮来替代镍当量。降碳降镍, 保证必要的镍当量, 提高氮、锰、铜含量, 确保了奥氏体不锈钢的耐蚀性、组织稳定性及良好的冷加工成形性, 而且降低了成本。国内已开发出完全无镍的高氮医用不锈钢, 它与含 Ni 不锈钢相比, 具有强度与韧性的良好结合, 耐蚀性耐磨性及生化性能好, 并且能完全消除 Ni 对人体的危害, 可以放心植入人体使用等优点。

为了提高奥氏体不锈钢的耐蚀性, 冶金工作者又开发了超级奥氏体不锈钢, 它

是在普通奥氏体不锈钢的基础上显著提高钢中 Cr、Mo、N 的含量，如 $w(\text{Mo}) = 6\%$ 的奥氏体不锈钢，具有非常好的耐蚀性，并具有良好的抗点蚀性能和较好的抗应力腐蚀性能，是镍基合金和钛合金的代用材料。超级奥氏体不锈钢的化学成分见表 1-2。

表 1-2 超级奥氏体不锈钢的化学成分 (质量分数) (%)

钢 号	C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	其他	P1	CCT/°C
254SMo	≤0.02	20	18	6	0.2	0.6		45.8	>16
456S	≤0.02	24	17	4.5	0.45			52.4	>0
654SMo	≤0.02	24	22	7.3	0.5	0.5	Mn3.0	63.1	>30
AL6X	≤0.01	20	25	6.5				41.4	>22
HAYNESNo20	≤0.03	22	26	5.0			Ti4XC	38.5	>5
NEWA63	≤0.03	17	16	6.3	0.15	1.6		42.3	>20

注：点蚀指数 $P1 = w(\text{Cr}) + 3.3w(\text{Mo}) + 30w(\text{N})$ 。临界缝隙腐蚀温度 $CCT = -(45 \pm 5) + 11w(\text{Mo})$ 。

3. 含氮不锈钢的发展

高氮钢属于不锈钢的一个种类。对一般钢种而言，钢中的氮含量超过一定限度就认为是有害成分，而高氮不锈钢却并非如此。这类特殊材料由于其优异的力学性能及耐蚀性、抗氧化、耐磨损性能，越来越广泛地应用于化工、石化、能源、化肥生产、石油天然气、采矿及交通运输等领域。氮资源丰富而价廉，在奥氏体不锈钢中能替代昂贵的镍而保持奥氏体相的稳定。

在 20 世纪以前，人们怀疑氮在钢中会使钢变脆，并且存在向钢中加氮困难的问题，所以刚开始，在钢中一般不进行氮合金化。氮的有利作用直至 20 世纪初才被认可，Andrew 在 1912 年首次研究了氮加入钢中的作用，通过这项重要工作，首次在文献中记载了氮对钢力学性能及奥氏体稳定性的重大影响。

20 世纪 50 年代，开始开发氮合金钢的潜在性能及工艺技术。当 AOD 工艺使氮作为气体代替不同的合金成为可能时，就开始普遍用氮进行不锈钢的合金化。现在氮不仅常用在奥氏体钢中，也用在奥氏体-铁素体双相不锈钢中。用氮和锰的复合合金代替昂贵的镍还具有提高氮溶解度的优点，并且通过这个研究结果标准化了 AISI200 系列新合金。这类钢的典型成分是 18Cr-5Ni-8Mn-0.15N，它比 AISI 标准中的 304 牌号的不锈钢具有更高的强度和耐蚀性。现在印度是 AISI200 系列不锈钢最大的生产者，几乎占全世界 50 万 t 产量的 70%。

最近国外又推出了 19Cr-10Mn-1Ni-0.5N 和 18Cr-18Mn-1Ni-4Mo-0.6N 的高氮奥氏体不锈钢，其最明显的特点是集高强度、高韧性、高延展性、良好的加工硬化及耐蚀性于一体，已成功地应用于冶金、煤炭及电力工业材料，在潮湿、高冲击摩擦环境中使用，明显优于其他不锈钢。

在奥氏体不锈钢中氮和碳有许多共同性，如增加奥氏体稳定性，能有效提高钢

的冷加工强度等。加适量的氮能在提高钢的强度和耐氧化性能的同时，不降低不锈钢的耐晶间腐蚀性。以氮代碳，开发含氮不锈钢已成为热门话题。

目前，应用的含氮不锈钢在我国新的国家标准中已有 36 种，占不锈钢总数的 1/4，其中奥氏体不锈钢中已有 22 种，占奥氏体不锈钢总数的 1/3，双相不锈钢中的含氮不锈钢已占 80% 以上，马氏体不锈钢、铁素体不锈钢及沉淀硬化型不锈钢中均有含氮不锈钢。而含氮不锈钢又可分为控氮型、中氮型和高氮型三种。控氮型奥氏体不锈钢是在超低碳 ($w(C) = 0.02\% \sim 0.03\%$) 铬镍奥氏体不锈钢中加入 $0.05\% \sim 0.10\%$ (质量分数) 氮，用以提高钢的强度，使之达到含稳定化元素钛的奥氏体不锈钢或普通低碳 ($w(C) \leq 0.08\%$) 奥氏体不锈钢的水平，同时耐晶间腐蚀和晶间应力腐蚀性能优良；中氮型奥氏体不锈钢是 $w(N) = 0.10\% \sim 0.40\%$ ，在正常大气压力条件下冶炼和浇注，所得到的氮合金化奥氏体不锈钢 (包括铬镍氮、铬锰氮和铬锰镍氮型钢)。我国含氮奥氏体不锈钢基本上属于中氮型奥氏体不锈钢，如 022Cr17Ni7N、022Cr19Ni10N、05Cr19Ni10Si2CeN、12Cr17Mn6Ni5N、10Cr17Mn9Ni4N、20Cr15Mn15Ni2N 等奥氏体不锈钢的氮含量都在 $0.10\% \sim 0.30\%$ (质量分数) 之间，这类钢以耐蚀性为主要目的，同时具有较高的强度；高氮型奥氏体不锈钢的 $w(N) > 0.40\%$ ，该类钢既具有高强度，又具有耐蚀性。目前，国内含氮钢中只有 53Cr21M9Ni4N 钢中的 $w(N) = 0.35\% \sim 0.50\%$ ，基本上达到高氮钢标准。现在 $w(N) = 0.8\% \sim 1.0\%$ 的高氮奥氏体不锈钢已开始工业化生产，并获得了实际应用。

由于高氮合金钢具有较高的强度及良好的耐蚀性，可作为重要的工程材料，因此具有广阔的发展前景。高氮钢的发展潜力和应用极具吸引力，并且含氮不锈钢的使用和需求已扩大并迅速增长。

4. 铁素体不锈钢的发展

铁素体不锈钢一般不含镍，主要合金元素是铬，这类钢含有相当低的碳，生产成本低，在强烈的腐蚀介质中具有良好的耐蚀性和抗氧化性，尤其是耐应力腐蚀性能优于奥氏体不锈钢。这类钢还可以抵抗硝酸、热磷酸与亚氯酸等强烈腐蚀性溶液的腐蚀，并且在还原性介质或含硫的介质中具有高的热稳定性。因此，在家电、电子工业、汽车排气系统等领域有着广泛的应用，而且在一些领域已取代 06Cr19Ni10 (0Cr18Ni9) 系列奥氏体不锈钢。为此，世界各国均在致力于发展铁素体不锈钢，我国也在提高铁素体不锈钢的比重。

但是铁素体不锈钢存在着脆性倾向大、晶间腐蚀敏感性大、焊接性差等缺点，在生产和使用上受到限制。目前，国内外科学家通过降低铁素体不锈钢中碳和氮的质量分数，添加 Ti、Nb、Ta、Zr 等稳定元素，添加 Cu、Al、V 等焊缝金属韧化元素等，来改善铁素体的脆性和焊接性，从而扩大了铁素体不锈钢的应用范围。

我国已研制出 $w(C) \leq 0.02\%$ 的高纯铁素体不锈钢，如 015Cr18Mo2Ti 和

015Cr30Mo2 钢。铁素体不锈钢已用于新型火车车体材料、汽车排气系统、大型热水槽和冷藏集装箱用冷轧板。

5. 奥氏体-铁素体不锈钢的发展

奥氏体-铁素体不锈钢的显微组织是由两相所组成的，因此兼有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的特征，而且双相不锈钢比普通 Cr-Ni 不锈钢具有更好的耐蚀性。

早在 20 世纪 30 年代，法国和美国就率先开发了奥氏体-铁素体双相不锈钢；法国发现双相不锈钢具有优良的耐晶间腐蚀等性能；美国发现在焊接奥氏体不锈钢时，焊缝中若含有少量的铁素体（例如体积分数为 5% 的 δ 相），不仅能改善晶间腐蚀敏感性，还可以防止焊接热裂缝的产生。因而对双相不锈钢的深入研究，主要着眼于抗晶间腐蚀性能。

我国生产和应用双相不锈钢已有近五十年的历史，但发展速度较慢。直到 1992 年，纳入国家标准的双相不锈钢也只有 4 种（GB/T 1220—1992）。最近十几年来，由于交通运输业的发展，特别是海上运输业的发展，对双相不锈钢的需求与日俱增。2001 年中国建造的首批化学品运输船就消耗 022Cr25Ni5Mo3N 双相不锈钢 1400t。双相不锈钢具有较奥氏体不锈钢更高的耐应力腐蚀开裂性能。正是由于双相不锈钢性能的优越和工业上需求量的增加，双相不锈钢的品种由旧标准的 4 种增加到新标准的 11 种（GB/T 20878—2007）。

为了提高双相不锈钢的强度、耐蚀性和抗氧化性能，标准中新增加的 8 种奥氏体-铁素体双相不锈钢全部添加 0.10% ~ 0.30%（质量分数）的氮。

双相不锈钢优越的力学性能与耐蚀性等综合性能，受到了使用者的欢迎，已成为减轻设备重量、节约成本、延长使用寿命的最佳材料，发展趋势较好，为开拓石化装备打下了良好的基础；为化学品船的发展，创造了有利条件。

6. 沉淀硬化型不锈钢的发展

沉淀硬化型不锈钢兼有马氏体不锈钢的高强度和奥氏体不锈钢的耐蚀性。一些沉淀硬化型不锈钢的强度达到超高强度的水平，而且有较高的高温强度。因此在要求高强度、高耐蚀性和抗氧化的机械零部件上获得了广泛的应用。

沉淀硬化型不锈钢是 20 世纪 40 年代为适应航空、航天工业迅速发展的需要而开发的钢种，其化学成分一般不超过 18-8 型钢种中 Cr、Ni 的含量，并添加硬化元素铝、钛、铌、铜、钼等，在最终形成马氏体后，经过时效处理，析出金属间化合物和某些少量碳化物以产生沉淀硬化。

20 世纪 60 年代我国开始生产沉淀硬化型不锈钢，至今已有 50 年了，但在 GB/T 1220—1992 标准中也只有 3 种。近十几年来，由于精密耐蚀设备和精密耐蚀模具的需要，沉淀硬化型不锈钢的产量和品种数量有较大发展。一方面沉淀硬化型不锈钢有较高的强度和耐蚀性；另一方面，沉淀硬化型不锈钢固溶处理后，钢材硬

度较低，便于切削加工成形和冷变形成形。而且之后通过低温时效产生的沉淀硬化可以提高零件的硬度，减少精密零件的热处理变形，因此在精密、高强度、耐腐蚀的模具和机械零件上得到广泛应用。

目前，沉淀硬化型不锈钢已由旧标准的 3 种发展到新标准的 10 种（GB/T 20878—2007）。而且为了适应工业发展需要，科技工作者已经和正在研发新的沉淀硬化型不锈钢。

在纳入新标准的沉淀硬化型不锈钢中尚无马氏体时效不锈钢。马氏体时效不锈钢碳含量很低（ $w(\text{C}) < 0.03\%$ ），具有优良的塑性、韧性和冷加工成形性（冷变形量可达 80%），通过时效处理析出金属间化合物可达到高强度。马氏体时效不锈钢因具有优良的力学性能和工艺性能（包括焊接性），并兼有一定的耐蚀性，已成为析出硬化型不锈钢的主要发展方向。目前，已研制成功并已应用的马氏体时效不锈钢有 022Cr16Ni6MoCuNb 和 022Cr14Ni6Mo2N1Nb 等，相信不久的将来，一定会成为新一代高强度不锈钢。

7. 抗菌不锈钢的发展

随着国民经济的发展和人们生活水平的提高，在家庭生活品和食品工业餐饮行业中不锈钢的应用越来越广泛，人们对不锈钢的要求也越来越高，不仅要生锈钢、美观，而且还要求不锈钢制品有抗菌、杀菌功能。

人们早就知道，一些金属，如银、铜、铋等具有抗菌、杀菌功能。利用此原理，科技工作者就在生产生活用品的不锈钢中添加适量的铜或银，生产出的不锈钢经抗菌性热处理后，具有较好的加工性能和良好的抗菌性能。

日本日新制钢株式会社为适应市场需要，已研制开发了一系列抗菌不锈钢，其化学成分见表 1-3。

表 1-3 几种抗菌不锈钢的化学成分（质量分数）（%）

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	N	类别
NSSAM1	0.01	0.30	0.20	17.0		1.5	0.01	F
NSSAM2	0.30	0.50	0.50	13.0		3.0	0.02	M
NSSAM3	0.04	0.50	1.80	18.0	9.0	3.8	0.03	A

其中，铁素体钢类中加铜 1.5%（质量分数），马氏体钢中加铜 3.0%（质量分数），奥氏体钢中加铜 3.8%（质量分数）。

铜与细菌直接接触是抗菌杀菌的先决条件，因此抗菌不锈钢首先要进行热处理，使高浓度的铜从基体中析出，以 $\Sigma\text{-Cu}$ 相均匀弥散分布，再经表面抛光处理，使 $\Sigma\text{-Cu}$ 显露在金属表面，从而起抗菌作用。

抗菌不锈钢具有不锈钢的优点和良好的抗菌性能，深受用户欢迎，预计在不久的将来，会有一个较大的发展。