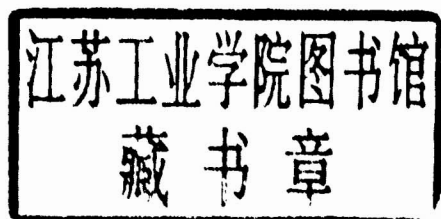


高强度超高强度不锈钢

赵先存 宋为顺 杨志勇 编著
梁剑雄 李文辉



北京
冶金工业出版社
2008

内 容 简 介

全书共分9章,内容涉及钢的强韧化、疲劳与断裂和耐腐蚀的理论基础;不同类型钢的成分、工艺、组织和性能;钢的生产工艺以及相关零部件的制造工艺技术。本书收集了大量技术资料,对航空、航天、舰艇、核技术、兵器和信息等使用部门的正确选材,合理用材;对科研院所、大专院校研发新材料以及特殊钢厂稳定和提高材料的性能、开发新产品均有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高强度超高强度不锈钢/赵先存等编著. —北京:冶金工业出版社,2008.5

ISBN 978-7-5024-4356-6

I. 高… II. 赵… III. 高强度钢—不锈钢 IV. TG142.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 023216 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 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 郭庚辰 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4356-6

北京百善印刷厂印刷

2008 年 5 月第 1 版,2008 年 5 月第 1 次印刷

787 mm×1092 mm 1/16; 73.75 印张; 1790 千字; 1165 页; 1-2030 册

260.00 元

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(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

2006年中国不锈钢粗钢的产量突破530万t,表观消费量达到595万t,而不锈钢的生产能力已达到1000万t。中国是世界不锈钢生产和消费第一大国。

高强度、超高强度不锈钢是不锈钢的重要组成部分,其产量不大,但品种规格多,对质量和性能要求高,技术含量高,尤其对国防和工业现代化具有重要意义。

回顾高强度、超高强度不锈钢的发展历程,20世纪40~60年代是沉淀硬化不锈钢,70~80年代是马氏体时效不锈钢的研发盛世。80年代前后开始铁素体时效不锈钢的研究。冷作硬化奥氏体不锈钢和马氏体不锈钢的发展与不锈钢的发展同步(自20世纪初开始)。

高强度、超高强度不锈钢是随航空、航天、舰船、核技术、兵器、信息等高新技术及其产业的高速度发展而发展起来的先进金属结构材料,由于其高强高韧、耐腐蚀、中温耐热、耐低温和超低温以及良好的工艺加工性,因此在新能源开发、海洋技术和先进制造技术等领域也开始应用。对国内外该领域研发概况进行归纳总结以作为国内科研、生产和使用部门的参考,是本书编著者的目的。

本书共分9章,涉及高强度、超高强度不锈钢的概况;强韧化、疲劳与断裂和耐腐蚀性的理论基础;冷作硬化奥氏体不锈钢;马氏体不锈钢;沉淀硬化不锈钢;时效不锈钢;相变诱导塑性不锈钢;高强度、超高强度不锈钢的生产、制造和应用中的若干问题以及钢的正确选材、合理用材等问题。

在本书编写过程中得到东北特钢、宝钢特钢、攀钢长城特钢等厂领导和同事的支持与鼓励,特别是攀钢长城特钢张红斌、刘春生等为本书的撰写提供了丰富的技术资料,作者在此一并表示衷心的感谢。

近50年来(1959年开始),参加钢铁研究总院高强度不锈钢研发工作的先后有王世章、魏振宇、蒋文理、刘正才、张梅清、赵英伟、宋诚一、佟荣贵、王维明、张荣久;廖子群、陆士英、吴玖、陈铿如、陈荣仙、吴光大;有于维乐、王文英、王飞、红野、傅俊岩、夏放、蔡立;有林师炎、易邦旺;有高唯、王大可、王琦安、马金平、孙卫红、马军、刘振宝、孙永庆先生等,本书编著者也是研发工作中的成员。

编著者要特别感谢以钢铁研究总院副院长兼结构材料研究所所长董瀚教授为首的所领导在本书的编写和出版过程中所给予的鼓励、支持和帮助。还要特别感谢结构材料研究所高合金超高强度钢研究室陈嘉砚主任,他为本书的撰

写提供了大量的技术参考资料。

感谢冶金工业出版社有关同志认真负责、卓有成效的工作。

由于书中内容涉及领域较广,编著者水平所限,错误和不当之处,欢迎批评指正。另外,编著者也特别期望与从事高强度、超高强度不锈钢的生产、设计、制造和使用单位加强联系,互相沟通,共同探讨、解决“正确选材、合理用材”当中所出现的技术问题。

谨以此书,奉献给所有从事高强度、超高强度不锈钢的研究、开发、生产、设计、制造和使用部门的同事们!

编著者

2007年11月于中国钢研科技集团公司钢铁研究总院

目 录

1 高强度、超高强度不锈钢的概况	1
1.1 高强度、超高强度不锈钢的发展史	1
1.2 高强度、超高强度不锈钢的分类及其特点	5
1.2.1 高强度、超高强度不锈钢的分类	5
1.2.2 高强度、超高强度不锈钢的特点	5
参考文献	9
2 高强度、超高强度不锈钢的强韧化、疲劳与断裂和耐腐蚀的理论基础	11
2.1 高强度、超高强度不锈钢强韧化的理论基础	11
2.1.1 高强度、超高强度不锈钢的强化	11
2.1.2 高强度、超高强度不锈钢的韧化	23
2.2 高强度、超高强度不锈钢疲劳与断裂的理论基础	30
2.2.1 疲劳裂纹的扩展	31
2.2.2 疲劳裂纹扩展的物理模型	31
2.2.3 疲劳裂纹扩展的力学行为与特征	33
2.2.4 各种因素对疲劳强度的影响	35
2.3 高强度、超高强度不锈钢耐蚀性的理论基础	37
2.3.1 化学腐蚀	38
2.3.2 电化学腐蚀	43
2.3.3 应力作用下的腐蚀	51
参考文献	68
3 冷作硬化奥氏体高强度、超高强度不锈钢	69
3.1 冷作硬化机理	69
3.2 奥氏体不锈钢的冷作硬化性	69
3.2.1 不稳定奥氏体铬镍不锈钢中的马氏体相变	69
3.2.2 影响奥氏体不锈钢稳定性的因素	71
3.2.3 奥氏体稳定性对奥氏体不锈钢力学性能的影响	73

3.2.4	变形速率的影响	77
3.2.5	冷变形量对钢力学性能的影响	77
3.2.6	奥氏体不锈钢的加工成形性	78
3.3	奥氏体冷作硬化高强度、超高强度不锈钢质量的改进	89
3.3.1	提高冷作硬化高强度不锈钢质量和性能的基本措施	89
3.3.2	影响冷轧 Cr18-Ni8 型不锈钢带力学性能的因素	90
3.3.3	经济冷作硬化奥氏体不锈钢	92
3.4	形变热处理与冷作硬化奥氏体不锈钢性能的比较	95
3.5	负温轧制和负温处理高强度、超高强度不锈钢	96
3.5.1	负温轧制高强度、超高强度不锈钢	96
3.5.2	负温处理高强度、超高强度不锈钢	99
3.6	常用的冷作硬化高强度、超高强度不锈钢及其生产工艺技术	99
3.6.1	常用的冷作硬化高强度、超高强度不锈钢	99
3.6.2	冷作硬化奥氏体高强度、超高强度不锈钢的生产工艺技术	107
3.7	冷作硬化奥氏体高强度、超高强度不锈钢的进展	107
3.7.1	NSSHT 200 钢	107
3.7.2	S 系列节镍型高锰不锈钢 NTKS1、NTKS2、NTKS4	108
3.7.3	NTKH-1 钢	108
3.7.4	高强度弹簧用不锈钢 NAS-7N	109
3.7.5	耐蚀性高于 SUS 301 钢的高强弹簧钢 NTK301M	109
3.7.6	铁路车辆行业用 301L 不锈钢	109
3.7.7	车辆结构用高强度不锈钢 301LC	110
3.7.8	疲劳性能良好的弹簧用奥氏体不锈钢 R301R	113
3.7.9	高强度高延性亚稳奥氏体不锈钢	113
3.7.10	超高强度不锈钢	114
3.7.11	奥氏体不锈钢 PC 钢丝及多股绞合线	114
3.7.12	深冷硬化不锈钢	115
3.7.13	零下低温淬硬的不锈钢	115
3.7.14	冷处理硬化不锈钢 SUS 304	116
3.7.15	冷处理硬化型不锈钢 1Cr15Ni5Cu2Mo1	116
3.7.16	冷处理硬化型不锈钢 Cr12Ni5Cu3.5	117
3.7.17	高氮不锈钢丝 Nitronic 50	117
3.7.18	1Cr14Ni6Mn4 高强度不锈钢弹簧	118
3.7.19	11Cr14Ni6Mn4Cu1MoTiNbV	118
3.7.20	强度高且延性好的高强不锈钢	119
3.7.21	高强度耐松弛耐蚀不锈钢	120
3.7.22	高强度抗回火色冷轧不锈钢	120
3.7.23	热加工后采用急冷处理的高强度不锈钢	120
3.7.24	高锰奥氏体冷作硬化不锈钢	120

3.7.25	无磁不锈弹簧钢 DSN6 及 DSN8	123
3.7.26	高强度耐蚀耐热弹簧钢	123
3.7.27	クテイオ——S 钢	123
3.7.28	冷轧硬化奥氏体高强度、超高强度不锈钢的发展动向	123
	参考文献	128
4	马氏体不锈钢	130
4.1	马氏体不锈钢的强韧化机理	130
4.1.1	马氏体不锈钢的强化机理	130
4.1.2	马氏体不锈钢的回火过程与二次硬化	139
4.1.3	影响马氏体不锈钢强度和韧性的主要因素	144
4.2	合金元素对马氏体不锈钢组织和性能的影响	151
4.2.1	铬的影响	151
4.2.2	碳的影响	156
4.2.3	镍的影响	158
4.2.4	钼和钨的影响	160
4.2.5	钒的影响	161
4.2.6	钴的影响	161
4.2.7	氮的影响	162
4.2.8	残留元素和微量元素的影响	163
4.2.9	多元合金元素的综合影响	164
4.3	马氏体不锈钢的热处理	165
4.3.1	淬火	165
4.3.2	退火	173
4.3.3	均匀化热处理	179
4.3.4	化学热处理	179
4.4	马氏体不锈钢的马氏体形态和亚结构	181
4.4.1	板条马氏体的形态与亚结构	181
4.4.2	影响马氏体亚结构的因素	181
4.4.3	马氏体不锈钢的相变及析出相	185
4.5	常用的马氏体不锈钢	189
4.5.1	1Cr17Ni2 钢	189
4.5.2	1Cr11Ni2W2MoV 钢	194
4.5.3	9Cr18MoV 钢	202
4.5.4	1Cr10Co6MoVNbBN 钢	203
4.5.5	0Cr16Ni6 钢	208
4.5.6	0Cr16Ni5Mo1 钢	211
4.5.7	1Cr14Ni3W2VB 钢	216

4.5.8	1Cr12NiWMoV 钢	218
4.5.9	25Cr12Ni2W2Mo2V 钢	219
4.5.10	13Cr15Ni4Mo2.5N 钢	221
4.5.11	23Cr12NiMoWV 钢	223
4.5.12	18Cr13Ni2W3Mo 钢	224
4.6	马氏体不锈钢的进展	226
4.6.1	材料的进展	226
4.6.2	工艺技术的进展	238
4.6.3	发展趋势与展望	239
	参考文献	241
5	沉淀硬化不锈钢	244
5.1	沉淀硬化不锈钢的概况	244
5.1.1	沉淀硬化不锈钢的分类及其性能特点	244
5.1.2	沉淀硬化不锈钢的发展史	247
5.1.3	沉淀硬化不锈钢的发展现状及展望	248
5.2	沉淀硬化不锈钢的强韧化机理	252
5.2.1	沉淀硬化不锈钢的强化机理	252
5.2.2	沉淀硬化不锈钢的韧化机理	262
5.3	沉淀硬化不锈钢的热处理和金相组织	269
5.3.1	沉淀硬化不锈钢的热处理	269
5.3.2	沉淀硬化不锈钢的金相组织	276
5.4	奥氏体沉淀硬化不锈钢	292
5.4.1	奥氏体沉淀硬化不锈钢的典型牌号及其化学成分	293
5.4.2	合金元素对奥氏体沉淀硬化不锈钢组织和性能的影响	293
5.4.3	热处理对奥氏体沉淀硬化型不锈钢组织和性能的影响	306
5.4.4	典型奥氏体沉淀硬化不锈钢大型锻件的力学性能及其影响因素	310
5.4.5	常用的奥氏体沉淀硬化不锈钢及其生产工艺技术	315
5.4.5.1	常用的奥氏体沉淀硬化不锈钢	315
A	0Cr15Ni25Mo1Ti2VB 钢	315
B	3Cr18.5Ni9.5Mn3.5P 钢	319
C	0Cr12Ni20Ti3AlB 钢	322
D	0Cr12Ni22Ti3Mo1B 钢	323
E	1Cr20Ni26Mo1.5NbTiAlB 钢	325
5.4.5.2	奥氏体沉淀硬化不锈钢的生产工艺技术	326
5.4.6	奥氏体沉淀硬化不锈钢的进展	339
5.5	半奥氏体沉淀硬化不锈钢	347
5.5.1	半奥氏体沉淀硬化不锈钢的特性	347

5.5.2	半奥氏体沉淀硬化不锈钢的合金化	348
5.5.3	半奥氏体沉淀硬化不锈钢的热处理	361
5.5.4	半奥氏体沉淀硬化不锈钢的金相组织	385
5.5.5	半奥氏体沉淀硬化不锈钢合金设计中的若干问题	389
5.5.6	常用的半奥氏体沉淀硬化不锈钢	399
5.5.6.1	0Cr17 Ni7Al 钢	399
5.5.6.2	0Cr15Ni7Mo2Al 钢	407
5.5.6.3	0Cr12Mn5Ni4Mo3Al 钢	419
5.5.6.4	0Cr16.5Ni4.5Mo3N 钢	430
5.5.6.5	1Cr15.5 Ni4.5Mo3N 钢	435
5.5.7	半奥氏体沉淀硬化不锈钢的进展	440
5.6	马氏体沉淀硬化不锈钢	458
5.6.1	马氏体沉淀硬化不锈钢的强韧化机理	458
5.6.2	合金元素对马氏体沉淀硬化不锈钢组织和性能的影响	478
5.6.3	马氏体沉淀硬化不锈钢相变的若干问题	496
5.6.4	马氏体沉淀硬化不锈钢的热处理	514
5.6.5	马氏体沉淀硬化不锈钢的失效	524
5.6.6	常用的马氏体沉淀硬化不锈钢	539
5.6.6.1	0Cr17Ni4Cu4Nb 钢	539
5.6.6.2	0Cr15Ni5Cu4Nb 钢	548
5.6.6.3	0Cr13Ni8Mo2Al(PH13-8Mo) 钢	552
5.6.6.4	0Cr15Ni5Cu2Ti 钢	557
5.6.7	马氏体沉淀硬化不锈钢的进展	559
	参考文献	583
6	马氏体时效不锈钢	591
6.1	马氏体时效钢	591
6.1.1	马氏体时效钢的发展史及其特点	591
6.1.2	马氏体时效钢的发展趋势及展望	595
6.2	马氏体时效不锈钢	601
6.2.1	马氏体时效不锈钢的发展史及其特点	601
6.2.2	合金元素对马氏体时效不锈钢的组织 and 性能的影响	604
6.2.3	热处理对马氏体时效不锈钢的组织 and 性能的影响	663
6.2.4	马氏体时效不锈钢的强韧化	738
6.2.5	马氏体时效不锈钢的若干金属学问题	775
6.2.6	马氏体时效不锈钢的耐蚀性	802
6.2.7	马氏体时效不锈钢的焊接性	826
6.2.8	马氏体时效不锈钢的应用	833

6.2.9 常用的马氏体时效不锈钢	855
6.2.9.1 00 Cr11Ni10Mo2TiAl 钢	855
6.2.9.2 00 Cr12Ni8Cu2AlNb 钢	857
6.2.9.3 00 Cr13Ni8Mo2TiNbAl 钢	860
6.2.9.4 00 Cr12 Co12Ni4Mo4Ti 钢	863
6.2.9.5 00 Cr11Ni10Mo2Ti1 钢	866
6.2.9.6 00 Cr14Ni16Mo2NbAl 钢	867
6.2.9.7 00 Cr15Ni6Nb 钢	869
6.2.9.8 00 Cr16Ni5Al 钢	872
6.2.9.9 00 Cr12Ni11Mo1Ti1.65 钢	873
6.2.9.10 00 Cr11Ni8Co8.5Mo5Al1 钢	879
6.2.10 马氏体时效不锈钢的进展	881
6.3 铁素体时效不锈钢	924
6.3.1 铁素体时效不锈钢的发展背景	924
6.3.2 铁素体时效不锈钢的合金设计思路及其合金化	926
6.3.3 $\sigma_{0.2} \geq 880$ MPa 耐海水腐蚀铁素体时效不锈钢	929
6.3.4 $\sigma_{0.2} \geq 685$ MPa 耐海水腐蚀铁素体时效不锈钢	940
6.3.5 铁素体时效不锈钢的进展	946
参考文献	951
7 相变诱发塑性不锈钢	960
7.1 相变诱发塑性不锈钢的发展概况	960
7.2 相变诱发塑性不锈钢的理论基础	961
7.2.1 钢的形变诱发马氏体相变	961
7.2.2 形变对奥氏体稳定化的影响	965
7.2.3 相变诱发塑性	966
7.3 相变诱发塑性和相变诱发塑性不锈钢的应用	972
7.3.1 TRIP 钢性能的获得	972
7.3.2 TRIP 和残余奥氏体体积分数的关系	973
7.3.3 奥氏体预变形对 TRIP 的影响	973
7.3.4 用形变热处理和其他方法强化	973
7.3.5 高合金 TRIP 钢和 TRIP 半不锈钢的化学成分、形变热处理和性能	974
7.3.6 以形变诱发马氏体相变强化奥氏体钢	980
7.3.7 奥氏体可成形性的改善	980
7.4 相变诱发塑性不锈钢的进展	980
参考文献	981

8 高强度、超高强度不锈钢的生产、制造和应用中的工艺技术	982
8.1 生产工艺技术	982
8.1.1 精料是生产高强度、超高强度不锈钢的前提条件和重要的技术基础	982
8.1.2 真空感应炉熔炼(VIM)	988
8.1.3 真空自耗炉重熔(VAR)	990
8.1.4 电渣重熔(ESR)	993
8.1.5 等离子电弧炉重熔(PMR)	999
8.1.6 等离子感应炉(PIE)	1000
8.1.7 电子束炉重熔(EBR)	1001
8.1.8 高氮不锈钢的加氮工艺技术与装备	1006
8.1.9 钢锭(含重熔锭)的高温扩散退火(均匀化处理)	1013
8.1.10 快锻机开坯	1014
8.1.11 精锻机成材	1015
8.1.12 快速冷凝技术	1017
8.1.13 其他先进成形制造技术	1017
8.2 焊接工艺技术	1018
8.2.1 马氏体不锈钢的焊接	1018
8.2.2 沉淀硬化不锈钢的焊接	1021
8.2.3 马氏体时效不锈钢的焊接	1036
8.3 切削和研磨机加工技术	1036
8.3.1 切削机加工技术	1036
8.3.2 磨削机加工技术	1047
8.4 制造和使用环境方面的考虑	1049
8.4.1 制造方面的考虑	1050
8.4.2 使用环境方面的考虑	1052
参考文献	1052
9 高强度、超高强度不锈钢的选择	1054
9.1 高强度、超高强度不锈钢的选择原则	1054
9.1.1 全面掌握零部件的服役条件和制造工艺技术	1054
9.1.2 根据零部件的服役条件选择钢的强度级别和相应的韧性和塑性	1055
9.1.3 材料的不锈性、耐腐蚀性与抗氧化性是选材极为重要的依据	1076
9.1.4 现有零部件成功的用材经验是设计的首选材料	1097
9.1.5 必须高度重视材料的工艺制造性能	1100
9.1.6 物理性能是选材必要的技术数据	1106
9.1.7 订货的难易程度与价格因素	1117

9.2 高强度、超高强度不锈钢选择应注意的问题	1118
9.2.1 要综合考虑材料的强韧性及其变化的可能性	1118
9.2.2 材料的不锈性和耐蚀性的相对性	1118
9.2.3 失效分析为选材提供重要的信息	1119
参考文献	1120
附 录	1122
附录 1 我国有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1122
附录 2 美国有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1123
附录 3 前苏联和俄罗斯有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准、 钢号和标准中的代号解释及部分牌号对照	1143
附录 4 日本有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1148
附录 5 德国有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1149
附录 6 法国有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1150
附录 7 英国有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1150
附录 8 欧洲标准中有关高强度、超高强度不锈钢的不锈钢、耐热钢标准目录	1150
附录 9 国际标准(ISO)中有关高强度、超高强度不锈钢的标准目录	1154
附录 10 《Alloy Digest》杂志中有关高强度、超高强度不锈钢牌号的成分、工艺、 组织、性能及用途等技术资料目录	1163
参考文献	1165

1.1 高强度、超高强度不锈钢的发展史

材料是人类进步的里程碑,钢铁材料是最重要的金属结构材料。

20 世纪后半叶,高技术新材料有了高速的发展,但是在可以预见到的将来(例如 2050 年)还不会有任何一种新材料能够代替资源丰富、综合性能良好、物美价廉、使用可靠、可以大量返回利用、环境友好的钢铁结构材料。

钢铁结构材料的固有弱点一是比强度低,二是耐蚀性差。为了提高其比强度,发展了一系列高强度和超高强度钢,例如低合金高强度钢,二次硬化型超高强度钢,马氏体时效钢,基体钢,高合金超高强度钢,高强度、超高强度不锈钢等。为了提高其耐蚀性,除开发了一系列涂镀层钢材外,发展了一系列不锈钢耐酸钢、耐蚀钢、耐候钢以及铁镍基耐蚀合金等。

20 世纪 40 年代末期,为适应军用飞机、火箭、导弹等的需要而发展起来的高强度、超高强度不锈钢,既提高了钢材的比强度,又提高了钢材的耐蚀性,只是由于成本偏高,仅在国防军工方面得到广泛应用,而在民用方面尚未得到普遍推广。

在第二次世界大战期间,由于迫切要求高强度耐腐蚀材料,因而促进了第一个沉淀硬化不锈钢的发展,这就是马氏体沉淀硬化不锈钢 Stainless W。1946 年美国 Carnegie Illi noio 钢铁公司发表了有关 Stainless W 的资料。1948 年另一个马氏体沉淀硬化不锈钢 17-4PH 由美国 Armco 钢铁公司首次生产。由于马氏体型沉淀硬化不锈钢存在冷作成形性能差的缺点,在制造形状复杂,要求冷作成形性能好的结构件时,早已被 1948 年后开发的半奥氏体沉淀硬化不锈钢代替。目前马氏体沉淀硬化不锈钢主要使用的钢号是 17-4PH,主要是以棒材、铸件、锻件等来制造飞机紧固件、销、汽轮机长叶片、起落架部件等机器零件。长期以来该类型钢虽然已有很大发展,但应用范围较广且有较大批量生产的钢号主要还是 17-4PH,其改进型 15-5PH 钢的应用范围也在不断扩大并且有逐步取代 17-4PH 钢的趋势。

上述马氏体沉淀硬化不锈钢虽有较高的强度和一定的韧性,但由于其固溶状态是碳含量 $w(C) \leq 0.07\%$ 的马氏体,因而在冷作成形性方面难以满足冷作成形性好、结构形状复杂的结构件的要求。因而半奥氏体沉淀硬化不锈钢应运而生,并且弥补了其冷作成形性不足的缺点,半奥氏体沉淀硬化不锈钢集高强度、高韧性、耐腐蚀性、优良的冷作塑性变形以及可焊性于一身,在 20 世纪 40 年代末期在航空结构材料上备受重视,目的是在超音速飞行器中代替铝合金和钛合金。1948 年美国 Armco 钢铁公司首先供应第一个半奥氏体沉淀硬化不锈钢 17-7PH 并采用双重时效的硬化工艺。此钢号一开始就在航空工业受到很大的关注并得到广泛应用。1954 年美国 Allegheny Ludlum 钢铁公司开始供应 AM350 钢,并采用温度在零度以下的负温处理工艺。AM355 钢于 1955 年、PH15-7Mo 钢于 1957 年前后发明和应用。1967 年发表了 PH14-8Mo、PH14-4Mo 等。

前苏联对半奥氏体沉淀硬化不锈钢的发展也极为重视,并进行了大量研究开发工作,1956

年研究成功了与 17-7PH 钢成分类似的 X17H7IO(CH-1) 钢。1957 年研究成功了 X15H8M2IO (CH-2) 钢, 1958 年研究成功了 X17H5M3IO(CH-3) 钢与 X15H8M2IO(CH-4) 钢。

早在第二次世界大战中, 德国就发明了 Tinidur —— 含钛、铝的沉淀硬化相的铬镍奥氏体不锈钢 (0Cr15Ni30Ti1.75Al0.4), 用来制造高温耐蚀承力结构件。1951 年美国 Allegheny Ludlum 钢铁公司开始供应 A-286 钢。在此后不久的美国 crucible 钢铁公司发明了另一个奥氏体沉淀硬化不锈钢 HNM。这类钢原来发展的目的是为了研究开发无磁性的高强度钢, 但由于其高温性能良好, 很快被作为耐热钢或 Fe-Ni 基高温合金而广泛用于航空发动机以及其他承受高温耐蚀结构件。本类钢基本上又分成两个小类: 第一类包括 A-286、Discaloy、W545、Unitemp 212 等钢号, 基本上属于德国 Tinidur 钢的变种, 其中还包括以锰代镍的 AF-71, 其强化元素用钼和钒; 第二类是用磷产生点阵应变加强沉淀硬化的钢包括 HNM、17-10P 等钢号。

1912~1913 年在英国开发了 $w(\text{Cr}) = 12\% \sim 13\%$ 的马氏体不锈钢。简单的有 1Cr13、2Cr13 钢, 由于其高的室温和高温强度以及良好的抗振性、低的线(膨)胀系数, 已广泛在汽轮机及燃气轮机行业应用, 因强度较低不在本书讨论的范围内。复杂的 $w(\text{Cr}) = 12\%$ 马氏体不锈钢是在第二次世界大战后期逐步发展起来的钢类, 主要是在 AISI 420 的基础上添加足够数量的钼、钨、钒、钛、铌、氮、硼以及镍、钴等合金元素, 来提高钢的高温组织稳定性和高温强度。

美国典型的马氏体不锈钢为 AISI 431 和 AISI 422 等。

英国典型的马氏体不锈钢为 Firth Vickers 不锈钢公司开发的 FV 448, 它与 Bristol 航空公司合作制造 Bristol 188 超音速试验机用结构件。

前苏联典型的马氏体不锈钢是 13X12HBMΦA 及 13X14HBΦPA 等。

本书所涉及的冷作强化奥氏体超高强度不锈钢不是常规的奥氏体不锈钢, 而是 M_s 点(马氏体开始转变温度)及 M_d 点(冷变形诱发马氏体相变温度)较高、奥氏体稳定性较差, 冷变形时屈服强度提高很快而延性下降较为缓慢, 因而在冷变形后不但可以得到高强度超高强度, 而且还具有可以接受的延展性的介稳定奥氏体不锈钢。

美国国际镍公司于 1959 年发布了马氏体时效钢, 后来逐步优化为强度级别为 1400 MPa、1750 MPa、2100 MPa 的 18Ni-9Co-5Mo 系列, 其主要特点是在很高强度的条件下具有很好的韧性, 当时在许多超高强度钢中, 在同样强度级别时, 它具有最高的断裂韧性, 因此它自问世以后, 就大量用于航天结构, 尤其是作为大型固体火箭发动机的壳体。主要马氏体时效钢发表年代见表 1-1。

表 1-1 主要马氏体时效钢号的发表年代

国 家	钢号(代号)	主要成分	发表年代
美 国	18Ni(200 级)	00Ni18Co9Mo3AlTi	1960
	18Ni(250 级)	00Ni18Co8Mo5AlTi	1960
	18Ni(300 级)	00Ni18Co9Mo5AlTi	1960
	18Ni(铸造)	00Ni17Co10Mo5AlTi	1963
	15Ni-9Co	00Ni15Co9Mo5AlTi	1963
	12Ni-2Mn	00Ni12Co8Mo9Mn2Al	1966
	18Ni(350 级)	00Ni18Co12Mo4AlTi1.5	1968

续表 1-1

国 家	钢号(代号)	主要成分	发表年代
美 国	13Ni(400 级)	00Ni13Co15Mo10Ti	1968
	8Ni(500 级)	00Ni8Co18Mo14Ti	1968
	15Ni-15Co	00Ni15Co15MoTi	1971

马氏体时效钢的主要缺点之一,是耐腐蚀性较差,再加上含 Ni、Co、Mo 高,特别是含 Co 高,其价格太贵,从而促进了普通马氏体时效不锈钢的发展。促进马氏体时效不锈钢发展的另一个原因,是半奥氏体沉淀硬化不锈钢的一些缺点,例如热处理工艺十分复杂,对化学成分区间的控制要求十分严格,以及由于主要是利用碳化物和碳氮化物等进行强化,大大损害了钢的韧性,特别是钢的断裂韧度。马氏体沉淀硬化不锈钢工艺性能差也是促使马氏体时效不锈钢发展动力之一。

表 1-2 是国外发展的一些马氏体时效不锈钢的发表年代。

表 1-2 国外一些马氏体时效不锈钢的发表年代

国 家	钢 号	主要成分	发表年代
美 国	Pyromet X-12	0Cr10.5Mo4.8Cu1.3Co6N	1961
美 国	AM-367	00Cr14Ni3.5Mo2Co15.5Ti	1963
美 国	AFC-77	0Cr14.5Mo5Co13.5V	1963
	D70	00Cr12Ni4.3Mo4Co14TiAlBZr	1964
	Custom 455	00Cr11.5Ni8.5Cu2.2Ti1.2Nb	1966
美 国	AFC-260(C50)	0Cr15.5Ni2Mo4Co13Nb	1967
美 国	Pyromet X-15	00Cr15Mo3Co20	1967
前联邦德国	Ultrafort 401	00Cr12Ni8Mo2Co5TiBZr	1969
前联邦德国	Ultrafort 402	00Cr12.5Ni7.6Mo4Co5TiAl	1969
美 国	Alloy B	0Cr14NiMo5Co13Nb	1971
前联邦德国	Ultrafort 403	00Cr11Ni7.7Mo4.5Co9TiAl	1973
美 国	Pyromet X-23	00Cr10Ni10Mo5.5Co10	1973
美 国	Custom 465	00Cr11Ni11Mo1Ti1.6	1997
美 国	Custom 475	00Cr11Ni8Mo5Co8Al1.2	2003

铁素体时效不锈钢研究开发始于 20 世纪 80 年代前后,一些国家,主要是美国、日本等发表了一些专利,但至今尚未见到商业牌号特别是大量应用的报道。

20 世纪 50 年代末(1959 年)钢铁研究总局根据国防军工的需求就在新钢种研究室成立了我国第一个高强度不锈钢专业组并且先后与特殊钢厂,例如大连钢厂、抚顺钢厂、上钢三厂、上钢五厂、长城钢厂、本溪钢铁公司第一钢厂、江西钢厂等开展高强度不锈钢的研制工作,而且研究领域不断地扩大到民用部门,至今我国基本上已建立了我们自己的高强度、超高强度不锈钢体系,基本上满足了我国国防军工,高新技术、国民经济发展的要求。我国主要研制高强度、超高强度不锈钢钢号及研制年代列入表 1-3。

表 1-3 我国主要研制的高强度、超高强度不锈钢钢号(根据钢铁研究总院不完全统计资料)

序 号	牌 号	代 号	研 制 年 代
1	0Cr15Ni7Mo2Al		1959~1964
2	0Cr13Mn5Ni4Mo3Al		1961~1964
3	1Cr11Ni2W2MoV	(961)	1965~1966
4	00Cr16Ni14Mo2NbAl	(108)	1966~1971
5	00Cr15Ni6Nb	(112)	1969~1981
6	00Cr24Ni11SiMnAl	(150)	1972~1984
		(108)	1973~1980
7	00Cr10Ni10	(151)	1974~1984
8	1Cr10NiCo6MoVNbBN	(S/SAV)	1975~1986
9	00Cr13Ni8Mo2TiNbAl		1976~1983
10	00Cr12Ni8Cu2AlNb		1976~1983
11	00Cr10Ni10Mo2TiAl	(736)	1976~1984
12	0Cr21Ni6Mn9N		1977~1981
13	0Cr17Ni7		1977~1979
14	00Cr11Ni10Mo2TiAl		1977~1983
15	00Cr14Ni6Mo3Al	(109)	1978~1985
16	0Cr17Ni7Al	(BD-5)	1980~1986
17	0Cr13Ni5Mo	(817)	1980~1983
18	0Cr17Ni7MoAl		1980~1986
19	00Cr14Ni6Mo2AlNb		1981~1984
20	00Cr12Ni9Cu2TiNbBeRE		1984
21	0Cr21Ni5Ti(脆性改进)		1981~1984
22	Cr9Ni35Ti4		1982~1988
23	00Cr12Co12Ni4Mo4Ti		1983~1988
24	00Cr11Ni10Mo2Ti1		1984~1990
25	1Cr17Ni3		1986~1992
26	1Cr12NiMo3V		1986~1992
27	00Cr27Ni8Mo3Ti		1988~1995
28	00Cr26Ni6Mo4CuTi		1991~1995
29	0Cr16Ni5Mo1		1991~1994
30	0Cr13Ni8Mo2Al		1995~2000
31	0Cr15Ni5Cu2Ti		1999~2002
32	0Cr17Ni5Mo3N		1999~2002
33	0Cr15Ni4Mo3N		1999~2002
34	ZG0Cr14Ni5Mo2Cu		1999~2002
35	00Cr12Co13Ni5Mo5Ti _x		2001~2005
36	00Cr15Ni6Mo3CuTiAl		2001~2005