

特殊钢丝

新产品新技术

TESHUGANGSI

XINCHANPIN XINJISHU

徐效谦 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

特殊钢丝新产品新技术

徐效谦 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

全书共分 14 章, 主要内容包括: 不锈钢中的沉淀硬化相; 沉淀硬化不锈钢和超马氏体不锈钢; 不锈钢弹簧钢丝; 光伏产业用切割钢丝; 高强度螺栓用非热处理钢和非调质钢; 油淬火-回火钢丝产品介绍; 油气井用不锈钢井钢丝; 高强度弹簧的延迟断裂; 钢丝索氏体化工艺探讨; 伸长率的种类、定义和换算; 强对流气体保护退火炉; 钢丝的热处理; 拉拔基础知识; 辊轮传输工作原理和应用实例。

本书可供从事金属加工、材料等专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

特殊钢丝新产品新技术/徐效谦著. —北京: 冶金工业出版社,
2016. 11

ISBN 978-7-5024-7268-9

I. ①特… II. ①徐… III. ①特殊钢—钢丝 IV. ①TG356.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 207125 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7268-9

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 11 月第 1 版, 2016 年 11 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 33.25 印张; 806 千字; 516 页

138.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

本书由

大连市人民政府资助出版

The published book is sponsored

by the Dalian Municipal Government

前 言

传统概念的特殊钢丝指以特殊钢热轧盘条为原料，经过一系列压力加工制成的金属制品。随着技术的进步和经济的发展，特殊钢丝的概念不断扩展，特殊钢丝品种日益增多，现在的特殊钢丝系指具有特定化学成分，特定力学性能、特定工艺性能、特定物理性能，特定形状和特定用途的钢丝。相对于普通钢丝而言，特殊钢丝的生产工艺流程长、工艺复杂、技术难度大、质量要求也更严格。一般说来，生产特殊钢丝的设备种类多、结构复杂、选用数量更多，因而生产成本较高，资金投入也较多，但产值和利润也相对丰厚。

进入 21 世纪以来，我国国民经济发展很快，目前制造业已成为我国国民经济的支柱产业之一。特殊钢丝是直接为制造业提供原料的产业，在制造业的带动下，多种所有制形式的特殊钢丝生产企业如雨后春笋般涌现，生产的特殊钢丝门类齐全，包括不锈钢丝、弹簧钢丝、冷镦钢丝、轴承钢丝、工具钢丝、结构钢丝、精密合金丝、高温合金丝、电热合金丝和银亮钢丝、胎圈钢丝、切割钢丝、异形钢丝及多种有特定成分和特殊性能要求的钢丝，产量已稳居世界第一。绝大部分新兴企业因建厂晚，投资充足，选择余地大，其设备配置水平已进入世界先进行列。

特殊钢丝生产企业要发展壮大必须把产品质量的提高和新产品的开发作为首要任务，技术工作是改进质量和开发产品的基础。特殊钢丝的复杂性决定了该行业的技术资料相对分散，多年前，中国金属学会特殊钢专业分会组织行业技术专家和高等院校教授编撰了《特殊钢钢丝》，介绍了特殊钢丝的基础知识、生产现状、技术关键和发展方向。本人受中国金属学会委托担任了该书主编。当时我国特殊钢丝正处于飞速发展的起步阶段，收集到的技术资料、积累的生产经验，精深程度明显不足。多年来我一直关注着国内外特殊钢钢丝的发展和进步，经历了东北特钢集团的异地搬迁和全面重建，主持了国家重点工程和专项工程用特殊钢丝的研究和开发，对特殊钢丝部分品种和技术的理解明显加深。逐步探索出新产品开发和新技术研究的规范程序：将各种使用要求转化为

可量化、可考核的性能指标→将各项性能指标转化为对钢的显微组织结构的控制目标→按控制目标选定钢的化学成分和生产工艺流程→围绕各生产环节进行工艺优化,对性能指标进行检测、验证→对成品进行综合检测和评价→跟踪用户产品使用结果,写出阶段性总结,为下一循环产品改进提供依据。

作者将重要专题研究成果整理成本书,全书共分14章。因为研究钢的显微组织结构时,首先要掌握钢的相变点,故将花费了30多年时间收集、积累、验证的工具性资料——“钢的临界温度参考值”作为附录4列于书后。

本书前面以产品为主线展开,可视为新产品研究开发。后面结合生产实践经验,分别对特殊钢丝工艺技术、力学性能、设备、辅助材料方面的基础知识和技术进步作了详细、系统的描述,应视为创新。如果真正理解这些基础知识、掌握相关技能,并能灵活运用,可少走许多弯路,新产品的开发可取得事半功倍的效果。以“钢丝绳索氏体化工艺探讨”为例,只要充分理解索氏体组织的特性、掌握索氏体组织转变特点,了解热传导的基本知识,再查阅相关淬火介质的比热容、热导系数、熔点等物理常数,完全可以对“铅淬火”的可取代性以及能取代到什么程度做出基本准确的判定,何须花费数亿元资金,一次次地掀起研究的热潮!再以日常生产为例,拉拔脆断是日常生产常见缺陷,运用拉拔和热处理基础知识,只要取一支有代表性的试样,检查钢丝表面质量,再通过拉伸试验,测出抗拉强度和断面收缩率,根据表面质量、抗拉强度和断面收缩率基本可以查明脆断原因,只要措施得当,问题很快就能解决。对基础知识不甚了解,基本技能有所缺失,综合分析能力不强,流程管理抓不住要点,是我国新兴特殊钢丝生产企业技术管理工作的软肋。出版本书的目的之一就是为金属冷加工工作者提供一本简明、易懂、有实用价值的参考资料,为青年工人自学和企业专业培训提供开卷有益的教材。

对特殊钢丝的专题研究是在中国金属学会特殊钢专业学会扶持下起步的,北京科技大学、东北特殊钢集团、首钢集团北京钢丝厂、天津兴冶线材工程技术公司、湘潭钢铁公司和陕西钢厂等单位的专家和学者们曾为特殊钢丝的研究做了大量基础性工作,谨向他们表示深深的敬意。本书内容得益于东北特殊钢集团的科研生产实践,书中提到的钢种和牌号,东北特殊钢集团完全有能力生产或试制。本书注重生产实践,许多专题内容都是以不同时期的技术工作总结

为基础编写的，几乎所有经验公式都建立在对生产和试验中积累的成千上万个检测数据进行系统分析，反复验证基础上。本书实际是大连钢丝两代人劳动成果的结晶。

本书各章节的内容有相对的独立性，但有些细节，如金属间化合物在不同钢种中的析出和演变过程往往有大同小异之处，具体描述时又必须将小异之处交代清楚，难免有重叠。为读者阅读方便，个别图表和公式，在不同章节中都要用到。

本书由大连市人民政府资助出版。在本书编写过程中唐律今教授、王铭琪高级工程师对全书进行了认真校阅，内蒙古科技大学刘宗昌教授，大连理工大学王来教授、张立文教授对全书进行了认真评审，提出许多宝贵意见，参与评审的人员还有：东北特殊钢集团高惠菊教授、曾新光教授、才丽娟教授，在此一并表示衷心感谢。

书中如有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

徐效谦

2015年5月15日

目 录

1 不锈钢中的沉淀硬化相	1
1.1 碳化物	3
1.1.1 碳化物的特性和形成元素	3
1.1.2 碳化物形成基本规律	4
1.1.3 碳化物的类型	4
1.1.4 碳化物相互溶解对稳定性的影响	7
1.1.5 合金元素对共析点的影响	8
1.1.6 合金钢的二次硬化相	8
1.1.7 回火碳化物的形态和演变规律	10
1.1.8 时间对马氏体钢回火碳化物演变的影响	14
1.2 氮化物	14
1.2.1 氮化物的特性和形成规律	14
1.2.2 高氮奥氏体不锈钢中氮化物析出行为研究	20
1.2.3 含钒微合金钢中氮化物析出行为研究	22
1.2.4 不锈钢中氮和氮化物的控制	26
1.3 硼化物	29
1.3.1 硼化物的特性和形成规律	29
1.3.2 硼化物在超临界机组用合金耐热钢中的应用	31
1.4 金属间化合物和有序相的特性和形成规律	34
1.4.1 γ' 相 (B_3A)	35
1.4.2 γ'' 相 (Ni_xNb)	36
1.4.3 β 相 (BA) 和 Ni_2TiAl 相	37
1.4.4 η 相 (B_3A)	37
1.4.5 δ 相 (Ni_3Nb)	38
1.4.6 σ 相 (BA)	39
1.4.7 拉维斯 (Laves) 相 (B_2A)	39
1.4.8 μ 相 (B_7A_6)	40
1.4.9 χ 相 ($Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$)	41
1.4.10 G 相 ($B_{16}A_6Si_7$)	41
1.4.11 α' 相 (富铬的 $FeCr$ 固溶体)	42
1.4.12 ε 相 (富铜的 $CuNi$ 固溶体)	42
1.4.13 Z 相 ($CrNbN$)	43

1.4.14 R 相 ($\text{Fe}_{2.4}\text{Cr}_{1.3}\text{MoSi}$ 、18%Cr-51%Co-31%Mo)	43
参考文献	45
2 沉淀硬化不锈钢和超马氏体不锈钢	47
2.1 沉淀硬化不锈钢	47
2.1.1 马氏体沉淀硬化不锈钢	49
2.1.2 半奥氏体沉淀硬化不锈钢	83
2.1.3 奥氏体沉淀硬化钢	127
2.2 超马氏体钢	137
2.2.1 超马氏体钢的显微组织和化学成分	137
2.2.2 超马氏体不锈钢的特性	142
2.2.3 超马氏体钢的生产工艺	168
2.2.4 超马氏体不锈钢典型牌号的生产工艺和性能	172
参考文献	223
3 不锈钢弹簧钢丝	225
3.1 不锈钢弹簧钢丝的分类及牌号	225
3.2 不锈钢弹簧钢丝标准	228
3.2.1 GJB 3320—1998《航空用不锈钢弹簧钢丝规范》	228
3.2.2 GB/T 24588—2009《不锈钢弹簧钢丝》	231
3.2.3 YB/T 5135—1996《发条用高强度弹性合金 3J9 (2Cr19Ni9Mo)》	234
3.2.4 我国不锈钢弹簧钢丝标准演变及新国标解读	234
3.3 不锈钢弹簧钢丝牌号选择	244
3.3.1 耐蚀性能与化学成分	244
3.3.2 磁性与显微组织	246
3.3.3 物理性能	248
3.4 不锈钢弹簧钢丝生产	249
3.4.1 化学成分的控制	250
3.4.2 弹簧钢丝生产工艺流程	251
3.4.3 热处理工艺	252
3.4.4 拉拔工艺	254
3.5 不锈钢弹簧钢丝的其他强化途径	258
3.5.1 半奥氏体沉淀硬化不锈钢弹簧钢丝强化途径	258
3.5.2 马氏体沉淀硬化不锈钢弹簧钢丝强化途径	259
参考文献	260
4 光伏产业用切割钢丝	261
4.1 国内光伏产业的现状与发展	262
4.2 晶硅片切割技术的进步	264

4.2.1 晶硅片的传统切割方法	264
4.2.2 多线切割	265
4.3 切割钢丝的基本性能和生产工艺流程	265
4.3.1 切割钢丝的基本性能	266
4.3.2 切割钢丝生产工艺流程	267
4.4 切割钢丝用盘条和生产工艺流程	268
4.4.1 切割钢丝用盘条	268
4.4.2 切割钢丝用盘条生产工艺流程	269
4.5 切割钢丝和盘条生产发展动态	270
4.5.1 切割钢丝生产发展动态	270
4.5.2 切割钢丝用盘条生产发展动态	271
4.6 提高切割钢丝质量的工艺设想	272
4.6.1 强化方法	272
4.6.2 牌号的开发	273
4.6.3 冶炼工艺优化	275
4.6.4 连铸工艺特性	279
4.6.5 钢丝生产工艺控制	280
4.7 结束语	281
参考文献	282
5 高强度螺栓用非热处理钢和非调质钢	283
5.1 螺栓的分类和钢号的选择	283
5.1.1 螺栓的分类	283
5.1.2 冷锻钢必须具备的基本特性	284
5.1.3 冷锻钢的分类	285
5.2 高强度螺栓用非热处理钢的开发	285
5.3 高强度螺栓用非调质钢的开发	288
5.3.1 低碳铁素体-珠光体 (F-P) 非调质冷锻钢	288
5.3.2 低碳铁素体-贝氏体 (F-B) 非调质冷锻钢	291
5.3.3 低碳铁素体-马氏体 (F-M) 非调质冷锻钢	293
5.3.4 非调质冷锻钢的热加工	295
5.3.5 非调质冷锻钢丝的冷加工	298
5.3.6 加工软化与包辛格尔 (Bauschinger) 效应	299
5.3.7 时效处理	300
参考文献	301
6 油淬火-回火钢丝产品介绍	302
6.1 概况	302
6.2 油淬火-回火弹簧钢丝	303

6.2.1	GB/T 18983—2003《油淬火-回火弹簧钢丝》的主要技术要求	304
6.2.2	EN 10270-2: 2011 (E)	308
6.3	预硬化模具钢丝	310
6.3.1	YB/T 095—2015《合金工具钢丝》	312
6.3.2	订货	314
	参考文献	314
7	油气井用不锈钢录井钢丝	315
7.1	不锈钢录井钢丝牌号	315
7.1.1	氢脆断裂	315
7.1.2	抗点腐蚀性能	316
7.1.3	抗应力腐蚀性能	318
7.1.4	抗 H ₂ S 应力腐蚀试验	318
7.2	不锈钢录井钢丝规格	320
7.3	不锈钢录井钢丝力学性能	321
7.4	不锈钢录井钢丝生产	322
7.5	不锈钢录井钢丝的研究方向	323
7.5.1	尽早制订行业标准	323
7.5.2	编制录井钢丝使用手册	324
7.5.3	录井钢丝商品化及辅助装置的研制	324
	参考文献	324
8	高强度弹簧的延迟断裂	325
8.1	延迟断裂实例	325
8.2	延迟断裂机理	327
8.3	防止延迟断裂的途径	328
8.3.1	降低弹簧内部氢含量	328
8.3.2	改善弹簧组织结构	328
8.3.3	改善弹簧晶界、相界结构	329
8.3.4	消除内应力、控制使用应力	330
	参考文献	330
9	钢丝索氏体化工艺探讨	331
9.1	索氏体组织的特性	331
9.2	索氏体转变特点	333
9.3	铅浴处理的不可取代性	334
9.4	水浴处理的局限性	336
9.5	几种索氏体化处理方式比较	339
9.5.1	正火 (初期强风冷)	339

9.5.2 盐浴处理	341
9.6 铅浴处理的可取代性研究	342
9.7 结论	342
参考文献	343
10 伸长率的种类、定义和换算	344
10.1 伸长率种类、定义和用途	344
10.1.1 断后伸长率	344
10.1.2 断裂总伸长率	345
10.1.3 最大力塑性伸长率	345
10.1.4 最大力总伸长率	345
10.1.5 残余伸长率	346
10.1.6 屈服点伸长率	346
10.1.7 伸长率应用实例	346
10.2 影响伸长率的因素	347
10.2.1 金属材料锭坯内部存在各类冶金缺陷	347
10.2.2 拉伸试验速率	347
10.2.3 试样的几何形状、标距、直径	348
10.2.4 试样表面粗糙度、拉力试验机的夹具、引伸计精度、试样对中状况 和热耗等	348
10.3 伸长率的换算	348
10.3.1 伸长率 (A) 与断面收缩率 (Z) 关系	349
10.3.2 弹性伸长率 ($A_{\text{弹}}$)	349
10.3.3 包氏 (Bauschinger) 关系式	349
10.3.4 奥氏 (Oliver) 公式	350
10.4 同牌号、不同标距钢材断后伸长率换算	350
10.4.1 GB/T 17600—1998 (等效于 ISO 2566: 1984) 《钢的伸长率换算 第 1 部分》规定的适用范围	350
10.4.2 GB/T 17600—1998 《钢的伸长率换算 第 2 部分》规定的适用范围 ...	351
10.5 不同牌号、不同标距钢丝的实测数据	351
参考文献	353
11 强对流气体保护退火炉	354
11.1 热交换的基本方式	354
11.2 强对流气体保护退火炉传热计算的经验公式	355
11.3 强对流气体保护退火炉的结构	355
11.3.1 强对流气体保护罩式退火炉	356
11.3.2 强对流气体保护井式退火炉	357
11.4 强对流气体保护退火炉的特性	359

11.4.1	保护气氛	359
11.4.2	气体流动状况	360
11.4.3	强对流风机特性	360
11.4.4	装料区的尺寸	362
11.4.5	电加热功率	363
11.4.6	炉胆壁厚	364
11.4.7	保护气的选择	364
11.5	强对流气体保护退火炉使用注意事项	366
11.5.1	装料架的选择	366
11.5.2	工艺曲线的设置	366
11.5.3	双速风机的转换	368
11.5.4	保护气体用量	368
11.5.5	退火保温时间	368
11.5.6	躲峰电用谷电	369
	参考文献	369
12	钢丝的热处理	370
12.1	热处理基本原理	370
12.1.1	显微组织	371
12.1.2	铁-碳平衡图	373
12.1.3	等温转变与连续冷却转变	375
12.1.4	晶粒度	378
12.2	钢丝的组织结构与性能	379
12.2.1	组织结构	379
12.2.2	组织结构与使用性能	380
12.3	钢丝热处理方法	384
12.3.1	软化处理	384
12.3.2	球化处理	385
12.3.3	强韧化处理	386
12.4	钢丝热处理工艺的制定	388
12.4.1	周期炉热处理工艺	389
12.4.2	连续炉热处理工艺	391
12.5	几种钢丝热处理实例	405
12.5.1	弹簧钢丝	405
12.5.2	工具钢丝	407
12.5.3	莱氏体钢丝	408
12.5.4	冷顶锻钢丝	409
12.5.5	轴承钢丝	409
12.5.6	易切削钢丝	410

12.5.7	高硅钢丝	410
12.5.8	纺织行业用针丝	411
12.5.9	高镍结构钢丝	411
12.6	软态碳素钢丝抗拉强度测算	412
12.6.1	徐氏经验公式	412
12.6.2	测算结果	413
12.7	热处理工艺的分类及代号	413
12.7.1	分类原则	414
12.7.2	代号	415
	参考文献	417
13	拉拔基础知识	418
13.1	丝材变形程度表示方法及计算	418
13.1.1	延伸系数	418
13.1.2	减面率	419
13.1.3	延伸系数自然对数	419
13.1.4	伸长率	419
13.1.5	延伸系数和减面率的计算	421
13.2	拉拔时丝材受力状况及变形条件	422
13.2.1	拉拔时丝材所受的外力	422
13.2.2	实现拉拔变形的条件	423
13.2.3	模具的压缩作用	423
13.3	拉拔时丝材应力分布及塑性变形	424
13.3.1	应力状态	424
13.3.2	塑性变形理论	426
13.3.3	拉拔时丝材应力分布	427
13.3.4	拉拔时丝材塑性变形	429
13.3.5	反张力对塑性变形的影响	431
13.3.6	残余应力分布	433
13.3.7	降低残余应力的一般方法	436
13.4	拉拔力	436
13.4.1	测定拉拔力的方法	436
13.4.2	拉拔力计算公式	437
13.4.3	计算举例	439
13.5	变形功和变形效率	441
13.5.1	拉拔所需的功	441
13.5.2	变形效率	442
13.5.3	影响变形效率的主要因素	443
13.6	影响拉拔的工艺因数	443

13.6.1	模具	443
13.6.2	摩擦力和摩擦状态	446
13.6.3	润滑方式和润滑剂	447
13.6.4	拉拔时的温升和冷却	449
13.6.5	拉拔速度	452
13.6.6	工艺流程和道次减面率的分配	457
13.7	拉拔常见缺陷	464
13.7.1	内裂	464
13.7.2	应力裂纹	464
13.7.3	扭曲	465
13.7.4	拉拔断裂	466
13.8	拉拔时钢丝性能变化的一般规律	467
13.8.1	力学性能	467
13.8.2	工艺性能	469
13.8.3	物理性能	472
13.9	拉丝配模计算	472
13.9.1	非滑动拉丝机配模计算	473
13.9.2	滑动拉丝的原理及配模计算	475
	参考文献	479
14	辊轮传输工作原理和应用实例	480
14.1	钢丝传输过程中保持挺直的条件	480
14.2	钢丝平立辊式矫直器的选用	481
14.3	回旋式矫直机	482
14.4	包角与张紧力	483
14.5	倒立式收线装置	484
14.6	机械弯曲去皮机	485
14.7	拉丝卷筒	485
	参考文献	486
	附录	487
	附录 1 超马氏体钢的典型热处理工艺及性能参数	487
	附录 2 工艺环节简称	490
	附录 3 伸长率相关系数的测定及数据汇总	491
	附录 4 钢的临界温度参考值	495
	参考文献	516

1 不锈钢中的沉淀硬化相

钢的种类繁多、性能迥异。但钢有一个共同点：都是在 Fe 中加入各种合金元素形成的固溶体。不同合金元素加入钢中会析出不同的沉淀硬化相，使钢具备了各种特定性能。

研究沉淀硬化相的类型、结构、形态、尺寸、分布、交互作用和演变规律，可为金属材料工作者改进生产工艺，优化钢的性能，为研发更理想的钢种提供有力的技术支持。由于不锈钢中所用的合金元素种类最多，含量较高，本章从分析不锈钢中的沉淀硬化相着手，研究沉淀硬化相的基本特性、析出过程和形态演变规律。

要弄清沉淀硬化不锈钢和超马氏体不锈钢的作用机理和生产工艺操作要点，必须先从不锈钢中的沉淀硬化相说起。沉淀硬化的机理是共格理论，即在特定条件下，溶质原子在特定晶面上偏聚，形成薄层并与基体点阵共格，两种晶格相互协调，点阵间距差引发基体应变，产生硬化效果。沉淀硬化在有些合金钢中又称为时效硬化或时效强化。在特定温度区间进行时效处理，析出沉淀硬化质点；温度继续升高，质点长大，共格应变随之增大，达到临界值时导致滑移和剪切应变，共格应力得到释放，硬化效果减小，称为过时效。

获得沉淀硬化相的基本条件是：钢中应含有一种或多种在基体中溶解度可变，或可引发显微组织结构变化的合金元素，通过适当的热处理，使该元素以碳化物、氮化物或金属间化合物的形式析出，这些合金元素称为沉淀强化元素。目前广泛应用的沉淀强化元素有：Al、Ti、Nb、V、Zr、Cu、W、Mo、Si、N、B 等。可能形成的沉淀硬化相可分为两类：一类是 Al、Ti、V、Nb、Zr、Cr、Mo、W 的碳、氮、硼化合物；另一类是金属间化合物。到底形成哪种沉淀硬化相，主要取决于合金元素的原子半径和其在基体中的溶解度，半径较小的碳原子、氮原子和硼原子会进入到过渡金属晶体的间隙中，当碳、氮、硼的含量小于过渡金属溶解度时会形成相应的化合物：碳化物、氮化物和硼化物，原金属晶格不发生变化；当碳、氮、硼的含量大于过渡金属溶解度时则会形成金属间化合物（或间隙化合物），原金属晶格也就发生了变化。原子半径大于 130pm 的过渡金属才能与碳、氮、硼形成间隙化合物，其共同特点是：不透明，有金属光泽，熔点极高，硬度大，导电、导热性能较好，有良好的化学稳定性，但比较脆。

沉淀硬化不锈钢和超马氏体不锈钢的碳含量一般比较低，主要依靠析出金属间化合物来强化。不锈钢全部为铁基合金，铁在加热和冷却过程会产生如下同素异型转变：



钢中合金元素对 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$ 和 $\delta\text{-Fe}$ 及多型转变温度 A_3 和 A_4 均有重大影响，对于那些在 $\gamma\text{-Fe}$ 中有较大溶解度，并稳定 $\gamma\text{-Fe}$ 的合金元素，称之为奥氏体形成元素；对于那些在 $\alpha\text{-Fe}$ 中有较大溶解度，并稳定 $\alpha\text{-Fe}$ 的合金元素，称之为铁素体形成元素。在形成铁的固溶体时，d 层电子是主要参与金属键结合的电子，由钛到铜，3d 层电子由 2 个增加到 10

个：Ti 为 2 个、V 为 2 个、Cr 为 5 个、Mn 为 5 个、Fe 为 6 个、Co 为 7 个、Ni 为 8 个、Cu 为 10 个；4d 层电子 Zr 为 2 个、Nb 为 4 个、Mo 为 5 个；5d 层电子 Ta 为 3 个、W 为 4 个。看来 d 层电子 < 5 个的元素使 A_3 点上升、 A_4 点下降，是缩小奥氏区的铁素体形成元素。而 5d 层电子 > 5 个的元素使 A_3 点下降、 A_4 点上升，是扩大奥氏区的奥氏体形成元素。介于 V 和 Mn 之间的 Cr 和 Mo 具有过渡性，钢中 Cr < 7.5% 时使 A_3 点下降，Cr ≥ 7.5% 时使 A_3 点上升，但 Cr 使 A_4 点强烈下降，和 Mo 一起属于铁素体形成元素。总之，在不锈钢中属于奥氏体形成元素的有：C、N、Mn、Ni、Cu、Co；属于铁素体形成元素的有：Cr、Mo、V、W、Al、Ti、Zr、Nb、Ta、Ce、B、Si、P、S、As、Sn、Sb。

合金元素除 C、N、B 以外，都可与铁形成置换固溶体，不同元素在铁中的溶解度与其在周期表中位置、晶体点阵类型、原子直径以及相对于铁的电负性有关。Ni、Mn、Co 在 γ -Fe 中无限固溶，Cr、V 在 α -Fe 中无限固溶；电负性与铁差别大的元素，如 Ti、Al、Nb、Si、P 在钢中溶解度有限，倾向与铁形成金属化合物。尺寸因素对溶解度起重要影响，在 C 和 N 与铁形成的间隙固溶体中，面心立方体的间隙比体心立方体大得多，所以 C 和 N 在 γ -Fe 中溶解度也比 α -Fe 中溶解度大得多。B 的原子半径 (0.088nm) 比 C (0.077nm) 和 N (0.071nm) 大，无论与铁形成间隙固溶体，还是置换固溶体，都会引起较大的畸变能，所以 B 在 γ -Fe 和 α -Fe 中的溶解度都很小。合金元素和常存元素在铁中的溶解度见表 1-1。

表 1-1 合金元素和常存元素在铁中的溶解度^[1-4]

元素	最大溶解度/%				元素	最大溶解度/%			
	温度/℃	α -Fe	温度/℃	γ -Fe		温度/℃	α -Fe	温度/℃	γ -Fe
C	727	0.0218	1148	2.11	Zr	926	0.8	1308	约 2
Si		18.5	约 1150	约 2	B		0.008 ^[2]	1161 ^[3]	0.021
Mn	<300	约 3		无限	Co	600	76		无限
P	1049	2.55	1152	0.3	Be ^[3]	1165	7.4	1100	0.2
S	914	0.020	1370	0.065	Pd ^[3]	816	6.1		无限
Cr		无限	约 1050	12.8	As ^[3]	841	11.0	1150	1.5
Ni		10		无限	Sn ^[3]	751	约 17.9	1100	约 1.5
Mo	1450	37.5	约 1150	约 4	Sb ^[3]	1003	约 34	1154	2.5
W	1540	33	700	4.5	N ^[4]	590	0.087	650	2.82
Cu	700	2.1	1096	约 9.5		25	0.04		
Al	1094	36		1.1	O	910	0.03	910	0.002
Ti	1291	9	1150	0.70				1390	0.003
V		无限	1120	约 1.4	H	327	0.18×10 ⁻⁶	910	4.30×10 ⁻⁶
Nb	989	1.8	1220	2.6		910	2.70×10 ⁻⁶	1400	8.34×10 ⁻⁶

注：[H] 1ppm = 1.117cm³/100g = 1.117mL/100g 或 1cm³/100g = 0.895×10⁻⁶。

不锈钢中各种元素种类多、含量大，除常规采用的含量大的合金元素外，还有两大类含量很少的元素，一类是因生产工艺要求有意加入，又很难完全去除的，或为使钢具有某种特殊性能有意加入的元素，称为常存元素或微量元素。另一类是并非有意加入到钢中的