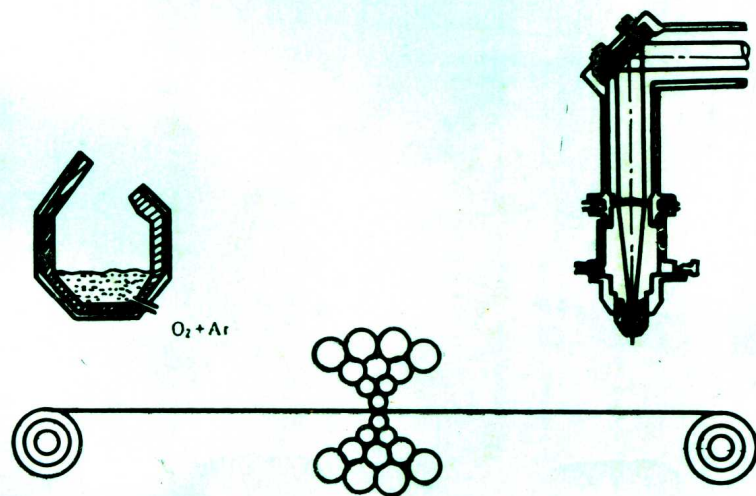


不锈钢生产和加工技术

康显澄 白士杰 于雅志 温礼厚 康 庄 译
于世忠 魏文光 于金泉 于雅志 康显澄 校



长城特殊钢公司第一钢厂科协

序

1910年前后，几乎同时由德国、英国和美国开发出不锈钢以来，到现在为止，不锈钢的发展历史仅只八十余年。因此，可以说不锈钢还是一种非常年轻的钢种。在这短短的发展历程中，不锈钢经发明到初期工业化和现在的工业化大生产，其产量和生产技术都有着突飞猛进的增加和发展，当今世界不锈钢产量已占总钢产量的1%。不锈钢取得如此高迅发展，其主要原因是，不锈钢自身具有很多优异的特性，如耐蚀性，可焊接性等。正是这些特点促进了不锈钢的各种生产技术的飞速进步，以及不锈钢的应用范围不断扩大。不锈钢在开发和工业化初期，它主要用于军事工业。但在六十年代由德国的Witten公司开发VOD法和美国的 Union Carbide 公司开发AOD法问世，并实现工业化以来，不锈钢的产量才得到大幅度提高，生产成本大幅度降低，致使不锈钢不再是“梦的金属”，而逐渐进入民用工业，并以很快的步伐，以各种产品形式进入了千家万户。不锈钢的发展，可以说是以一个发明和发现为开端，经过各国许许多多知名的和不知名的研究工作者所进行的辛勤研究，共同努力所取得的结晶。现在仍有大量的科学工作者，仍在不遗余力的对不锈钢进行着多方面的研究和开发工作，正是这些努力才迎来了现在不锈钢业的兴旺发达，使不锈钢制品成为大众所喜爱的产品。

《不锈钢生产和加工技术》这本书全面阐述了不锈钢的生产制造技术，如精炼技术，铸造技术，板材、管材、棒线材的生产技术；不锈钢最重要的加工性能，如冷加工性，焊接性；以及不锈钢的耐蚀性等。书中还介绍了不锈钢的发展现状和未来，主要介绍了不锈钢的各种用途和新开拓的各种用途，以及今后的发展等方面。因此，这本书可以使我们全面了解不锈钢的生产技术和性能，这对于从事不锈钢的生产、科研、教学、以及使用和二次加工不锈钢的单位都是十分必要的。国外不锈钢的发展已进入成熟阶段，今后在不锈钢的精炼技术上，要开发比AOD和VOD法更好的方法，在板带材的生产上要开发比森吉米尔式轧机更好的轧制方法，其可能性都很小。因此，就这方面而言今后仅只是完善其周边技术。开发新钢种是使不锈钢业不断繁荣兴旺的支柱，开拓更广扩的应用范围是不锈钢发展的基础。在一些发达的国家中，不锈钢正在高速的进入家庭和服务业用的设备和器具，建筑业用的内外装饰材料 and 车辆三大主要应用领域。这种发展趋

势方兴未艾，与日俱增。

我国不锈钢的生产和加工已有多年历史，特别是自改革开放以来，由于自行研究和设计，以及从国外引进先进设备和技术，使不锈钢的产量，品种，规格等都有了较快的发展。但与国外相比，存在的差距仍很大，特别是在质量和成本上。但我国具有生产不锈钢用的主要资源铬，镍和钼，所以随着科学技术的发展，特别是不锈钢用途的扩大，市场的需要，可以预计今后我国不锈钢的生产和应用前景是十分乐观的，

我们组织翻译这本书的目的，旨在使国内不锈钢生产和加工的厂家，有关高等院校，科研部门，以及应用和使用不锈钢的单位，了解和掌握八十年代国外不锈钢生产和加工的技术水平和发展动态，以利于提高国内生产水平和产品质量，开展科学试验，降低生产成本，以及开拓不锈钢的应用领域。积极开发新的不锈钢种，特别是节约资源和能源的不锈钢种。探讨与其它材料共存共荣，相互适应，协调发展的道路。我们希望这本书的翻译和出版，能对我国不锈钢业的进一步发展起到促进和推动作用。

科协主席、副总工程师 魏文光

一九九二年十二月

目 录

序	(1)
---------	-------

第一章 不锈钢的精炼技术

1 绪 言	(1)
2 不锈钢的精炼反应	(1)
2.1 脱碳反应	(1)
2.1.1 脱碳反应和精炼方法	(1)
2.1.2 炉渣对脱碳反应的影响	(4)
2.2 脱氮反应	(5)
2.2.1 脱氮反应和精炼方法	(5)
2.2.2 控制[N]浓度的方法	(6)
2.3 脱硫反应	(6)
2.4 脱氧反应	(7)
2.5 脱磷反应	(8)
3 不锈钢的精炼方法	(10)
3.1 VOD 法	(10)
3.1.1 设备和操作	(10)
3.1.2 最新的技术发展动向	(13)
3.2 RH—OB 法	(15)
3.2.1 设备和操作	(15)
3.2.2 最新的技术发展动向	(17)
3.3 AOD 法	(17)
3.3.1 设备和操作	(17)
3.3.2 最新的技术发展动向	(20)
3.4 顶底吹转炉法	(22)
3.4.1 设备和操作	(22)
3.4.2 最新的技术发展动向	(23)
4 不锈钢的高纯精炼方法	(24)
4.1 杂质元素对不锈钢材质的影响	(24)
4.1.1 碳和氮的影响	(24)
4.1.2 硫和氧的影响	(26)
4.1.3 磷的影响	(27)
4.2 不锈钢的高纯化精炼方法	(27)
4.2.1 超低碳不锈钢的精炼方法	(27)
4.2.2 超低氮不锈钢的精炼方法	(28)
4.2.3 超低硫不锈钢的精炼方法	(29)

4.2.4 超低氧不锈钢的精炼方法	(30)
4.2.5 超低磷不锈钢的精炼方法	(30)
5 结束语	(32)
参考文献	(34)

第二章 不锈钢的连铸技术

1 绪 言	(40)
2 不锈钢连铸技术的变迁	(40)
3 中间包冶金	(42)
3.1 钢包与中间包之间的密封技术	(42)
3.2 中间包中夹杂物的上浮分离技术	(42)
4 钢水和铸坯在结晶器内的行为	(44)
4.1 连铸机垂直部分对铸坯质量的影响	(44)
4.2 结晶器材料和结晶器内冷却水对铸坯质量的影响	(44)
4.3 浸入式水口与夹杂物之间的关系	(46)
4.4 结晶器振动对板坯表面质量的影响	(47)
5 铸坯凝固技术	(49)
5.1 二次冷却水与铸坯表面质量	(49)
5.2 电磁搅拌技术	(49)
6 特殊不锈钢的连铸技术	(51)
6.1 高碳马氏体不锈钢的连铸技术	(51)
6.2 含钛不锈钢的连铸技术	(51)
6.3 高纯度铁素体不锈钢的连铸技术	(52)
6.4 高合金奥氏体系不锈钢和双相不锈钢的连铸技术	(53)
7 大方坯和小方坯的连铸技术	(54)
7.1 大方坯和小方坯的电磁搅拌技术	(54)
7.2 铸坯形状	(55)
8 特殊连铸技术	(56)
8.1 水平连铸技术	(56)
8.2 薄带连铸技术	(57)
8.3 其它的快速凝固技术	(58)
8.4 应用粉末冶金法	(60)
9 特殊铸锭技术	(61)
9.1 复合锭的铸造技术	(61)
9.2 中空钢锭的浇注技术	(62)
9.3 其它特殊铸锭技术	(62)
10 结束语	(63)
参考文献	(83)

第三章 不锈钢板的生产技术

1 绪 言	(88)
2 不锈钢板的生产过程	(88)
2.1 冷轧不锈钢板	(88)
2.2 复合不锈钢板	(90)
3 不锈钢板的热轧	(90)
3.1 不锈钢的种类和特性	(90)
3.2 热轧机的种类	(94)
3.3 最新的技术发展动态	(96)
3.3.1 提高热轧板卷的单重和薄规格化	(96)
3.3.2 不锈钢板的中心凸厚和质量	(98)
3.3.3 开发的其它技术	(99)
4 不锈钢板的冷轧	(100)
4.1 冷轧机的种类	(100)
4.1.1 二十辊森吉米尔冷轧机	(100)
4.1.2 二十辊森吉米尔轧机的纵列化	(101)
4.2 最新的技术发展动向	(102)
4.2.1 自动控制板厚	(103)
4.2.2 钢板形状控制	(105)
4.2.3 超薄不锈钢带的轧制技术	(108)
5 不锈钢板材的退火酸洗	(108)
5.1 退火酸洗线的种类	(109)
5.2 最新的技术发展动向	(110)
5.2.1 节能	(110)
5.2.2 自动化	(110)
5.2.3 计量技术	(113)
6 不锈钢板的精整技术	(114)
6.1 最新的技术发展动向	(114)
6.1.1 张力矫平机	(114)
7 结束语	(115)
参考文献	(115)

第四章 不锈钢管的生产技术

1 绪 言	(117)
2 不锈钢管的生产量和用途	(117)
3 不锈钢管生产方法的概述	(119)
3.1 生产方法概述	(119)

3.2	无缝钢管的生产方法及其特点	(119)
3.3	焊管的生产方法及其特点	(120)
3.4	冷加工钢管及其特点	(122)
4	不锈钢无缝管生产技术的进步	(123)
4.1	坯料	(123)
4.1.1	炼钢技术	(123)
4.1.2	连铸的应用	(124)
4.2	挤压管	(124)
4.3	轧管	(125)
4.3.1	概要	(125)
4.3.2	斜轧穿孔方法的应用	(126)
4.4	粉末制管	(127)
5	不锈钢焊管生产技术的进步	(129)
5.1	电弧焊接法	(129)
5.1.1	焊接技术的改进	(129)
5.1.2	内表面焊道的处理	(129)
5.2	电阻焊接法 (ERW)	(130)
5.3	UOE 法	(131)
6	不锈钢管冷加工方法的进步	(131)
6.1	拉拔法	(131)
6.1.1	直接润滑拉拔法	(131)
6.1.2	高压润滑拉拔法	(133)
6.2	轧制法	(133)
6.2.1	孔型形况的改进	(134)
6.2.2	温轧	(134)
7	双金属管及异型管	(135)
7.1	双金属管	(135)
7.2	异型管	(135)
8	热处理、精整及其它	(138)
8.1	热处理	(138)
8.1.1	锅炉用含铌不锈钢管的加工——热处理	(138)
8.1.2	感应加热热处理	(139)
8.2	矫直及研磨	(139)
9	结束语	(139)
	参考文献	(140)

第五章 不锈钢棒、线材的生产技术

1	结 言	(143)
---	-----	-------

2	不锈钢棒、线材的生产过程和用途	(143)
3	轧制	(144)
3.1	不锈钢的轧制	(144)
3.2	棒、线材轧制设备概要	(145)
3.3	轧制坯料	(145)
3.4	加热	(145)
3.4.1	加热炉	(148)
3.4.2	加热温度	(148)
3.5	孔型和孔型设计图表	(148)
3.6	轧制后的冷却	(150)
3.7	直接热处理	(150)
3.8	热检查	(150)
3.8.1	热涡流探伤机	(150)
3.8.2	热尺寸测量仪	(150)
3.9	今后的新技术	(151)
3.9.1	三辊轧制	(151)
3.9.2	张力控制	(151)
4	热处理	(152)
4.1	热处理方案	(152)
4.1.1	奥氏体系不锈钢	(152)
4.1.2	铁素体系不锈钢	(153)
4.1.3	马氏体系不锈钢	(153)
4.2	固溶化热处理设备	(154)
4.3	退火热处理设备	(155)
4.4	最新的技术	(155)
4.4.1	改善线材的除氧化皮性	(155)
4.4.2	提高线卷式固溶化热处理炉中的冷却速度	(156)
4.4.3	开发小批量多品种用的热处理炉	(156)
5	氧化皮的清除	(156)
5.1	不锈钢氧化皮的组成和清除方法	(157)
5.2	用酸洗法清除不锈钢氧化皮	(157)
5.3	机械方法	(159)
5.4	电气方法	(160)
5.5	最新的技术动向	(160)
5.5.1	振动酸洗	(160)
5.5.2	超声波酸洗	(160)
5.5.3	硝酸和氢氟酸的自动分析	(160)
5.5.4	回收废酸	(161)

6	剥皮	(161)
6.1	线材的剥皮加工	(163)
6.2	棒材的剥皮加工	(163)
6.2.1	设备概要	(163)
6.2.2	不锈钢棒材剥皮的质量	(163)
6.2.3	加工技术的进步	(164)
7	拉拔加工	(165)
7.1	设备概要	(165)
7.2	不锈钢的组合拉拔技术	(166)
7.2.1	拉模	(166)
7.2.2	拉拔润滑油	(166)
7.2.3	坯料的表面状态	(167)
7.2.4	坯料保护膜	(167)
7.3	不锈钢组合拉拔产品的质量	(167)
8	质量检查和保证	(168)
8.1	不锈钢棒材的检查过程	(168)
8.2	今后要开发的新的检查方法	(169)
9	结束语	(171)
	参考文献	(171)

第六章 不锈钢的耐蚀性能

1	绪言	(173)
2	不锈钢的耐蚀性能	(173)
3	点蚀和缝隙腐蚀	(174)
3.1	评价方法	(175)
3.1.1	三氯化铁试验法	(175)
3.1.2	成分与CPT, CCT, V/C 之间的关系	(175)
3.1.3	过纯化电压 E_R	(178)
3.2	缝隙腐蚀机理	(178)
3.2.1	氧的消耗速度	(179)
3.2.2	缝隙内的溶液	(179)
3.2.3	钝化覆膜的破坏、缝隙腐蚀的发展	(179)
4	晶间腐蚀	(180)
4.1	碳化物析出的预测	(180)
4.2	动态敏化行为	(181)
4.3	判定法	(183)
4.3.1	电化学再活性法(EPR法)	(183)
4.3.2	双相不锈钢的晶界腐蚀	(184)

4.4	成分的影响	(184)
5	应力腐蚀裂纹	(185)
5.1	试验环境和成分效果	(185)
5.2	中性环境中的应力腐蚀裂纹	(187)
5.2.1	产生裂纹的环境条件	(187)
5.2.2	局部腐蚀的作用	(189)
6	从材料方面评价耐蚀性能	(190)
6.1	焊接部位的耐蚀性能	(190)
6.2	材料的最近发展动向	(191)
6.2.1	氮元素的影响	(191)
7	结束语	(194)
	参考文献	(194)

第七章 不锈钢的冷加工性能

1	前言	(200)
2	不锈钢的加工硬化	(201)
2.1	奥氏体相的加工硬化	(201)
2.2	加工诱发马氏体相变产生的加工硬化	(202)
2.3	δ 马氏体的影响	(202)
2.4	铁素体不锈钢的加工硬化	(203)
3	奥氏体不锈钢的自然裂纹敏感性	(204)
4	织构	(207)
4.1	铁素体系不锈钢的织构	(207)
4.2	奥氏体系不锈钢的织构	(209)
5	拉伸	(211)
6	膨胀	(216)
7	剪断	(218)
8	结束语	(220)
	参考文献	(220)

第八章 不锈钢的焊接性

1	绪言	(223)
2	种类	(223)
3	焊接方法和焊接材料	(223)
3.1	手工电弧焊接法和焊接材料	(223)
3.2	埋弧焊接法和焊接材料	(226)
3.3	气体保护焊接法和焊接材料	(229)
3.4	等离子电弧焊接法	(229)

3.5	电子束焊接法	(231)
3.6	激光焊接法	(231)
4	热切割法	(232)
4.1	等离子体电弧切割法	(232)
4.2	激光切割法	(233)
5	焊接性	(235)
5.1	焊接金属的凝固组织	(235)
5.2	焊接裂纹	(238)
5.2.1	高温裂纹	(238)
5.2.2	低温裂纹	(241)
5.3	焊接部的韧性	(243)
5.3.1	δ -铁素体的数量	(243)
5.3.2	杂质元素	(244)
5.3.3	σ 相脆化	(245)
5.3.4	475℃的脆化	(247)
5.3.5	碳化物	(248)
5.4	异种材料焊接部的特性	(249)
5.4.1	焊接部金属组织的推定	(249)
5.4.2	剥离裂纹	(251)
5.4.3	脱碳层和渗碳层	(251)
5.4.4	焊缝的延展性	(252)
6	用激光改善焊接部位的表面性质	(252)
6.1	利用激光抛光奥氏体系不锈钢焊接金属改善其耐点蚀性	(253)
6.2	用激光照射对SUS304不锈钢焊接热影响区进行去敏化处理	(256)
7	结束语	(257)
	参考文献	(257)

第九章 不锈钢的现状和未来

1	前言	(261)
2	不锈钢的现状	(261)
2.1	不锈钢的简要历史	(261)
2.2	产量的变化	(263)
2.3	用途和各种不同用途订货量的发展过程	(265)
2.3.1	钢板的用途	(265)
2.3.2	钢管的用途	(274)
2.3.3	钢丝的用途	(275)
2.3.4	铸件和锻件的用途	(275)
2.3.5	型材的用途	(275)

2.4	与不锈钢相竞争的材料	(275)
2.5	不锈钢的制造技术	(275)
2.5.1	精炼方法	(276)
2.5.2	铸锭技术(连续铸造方式)	(278)
2.5.3	热轧技术	(278)
2.5.4	冷轧技术	(278)
2.5.5	周边技术	(279)
2.6	新钢种的开发	(279)
2.6.1	JIS 标准钢	(279)
2.6.2	新钢种的开发	(282)
3	不锈钢的未来	(287)
3.1	需求动向	(287)
3.2	制造技术	(288)
3.2.1	精炼技术	(288)
3.2.2	铸锭技术	(288)
3.2.3	热轧	(288)
3.2.4	冷轧	(288)
3.2.5	其它技术(粉末冶金的应用)	(288)
3.3	新钢种和新规格不锈钢开发的动向	(288)
3.4	原料问题	(290)
4	结束语	(291)
	参考文献	(292)

第十章 不锈钢的资源

1	铬资源	(293)
1.1	铬矿石	(293)
1.2	铬铁	(294)
2	镍资源	(296)
2.1	镍的储藏量和镍矿床	(296)
2.2	不同品种镍的消耗	(298)
2.3	不锈钢与镍的关系	(299)
2.4	用于生产不锈钢的镍资源	(300)
2.5	镍的供需情况	(300)
2.5.1	镍的需求	(300)
2.5.2	镍的供给	(300)
2.5.3	供需的平衡	(300)
2.6	镍的价格	(300)

第一章 不锈钢的精炼技术

竹内英磨

(新日本制铁公司光技术研究部)

1 绪 言

现时,发达国家不锈钢的产量每年已达700万吨。日本不锈钢年产量的增长,自1970年超过美国位居世界第一以来,1983年达到230万吨/年,占发达国家总产量的三分之一^[72]。随着工业、建筑和家庭用具对各种不锈钢的需求日益增长,因此,建立起了与之相对应的不锈钢生产体制。

特别是,在七十年代初期,对不锈钢的冶炼技术的开发,以及引进了新的精炼技术使之得到了飞速的发展。所开发和引进的这些新的精炼技术主要是真空氧脱碳法(VOD法)和氩氧脱碳法(AOD法)等。

这些新技术的采用,使之在不锈钢生产中不需要使用价格昂贵的低碳铬铁,不需要进行高温精炼,以及提高了铬的回收率(减少还原用硅铁),从而大幅度的降低了成本。与此同时,钢中的非金属夹杂物(碳、氮、硫等)的含量也降低,从而可以大量向市场提供质量稳定的不锈钢。作为开发这些精炼技术的背景是对材质提出高纯度的要求,该要求促进了不锈钢高纯化精炼方法的发展。

本章将综合叙述不锈钢新精炼方法的理论基础的精炼反应;以提高生产率和节约能源为目标的改善不锈钢精炼技术的措施;为实现产品质量多样化的有关高纯化精炼技术的最新进展和今后需要研究的课题。

2 不锈钢的精炼反应

2.1 脱碳反应

2.1.1 脱碳反应和精炼方法

不锈钢象Fe-Cr合金熔液一样,因含大量的铬而使[C]的活度下降,与碳素钢相比脱碳变得很困难。不锈钢的脱碳反应机理是^[1-5],将氧气吹入钢水熔池中,将钢中的[Cr]氧化生成铬的氧化物,该氧化物再与钢中的[C]反应,生成一氧化碳气体从而达到脱碳的目的。

该反应的综合反应式可由下式(1)和(2)表示:



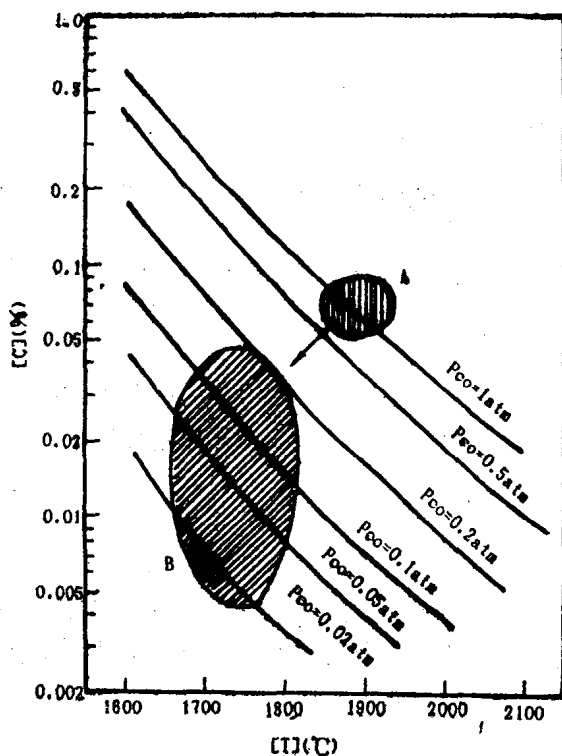
$$K_1 = \frac{a_{\text{Cr}}^3 \cdot P_{\text{CO}}^4}{a_{\text{C}}^4 \cdot a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中： K_1 是(1)式的反应平衡常数； a_{Cr} ， a_C 是钢中[Cr]和[C]的活度； $a_{Cr_2O_3}$ 是渣中(Cr_2O_3)的活度； P_{CO} 是气相中CO气体的分压。

D.C.Hilty 等^[6]对各种[Cr]浓度范围求出了(2)式的平衡常数。对于不锈钢中[Cr]浓度范围来说，假定所生成的铬的氧化物为(Cr_2O_3)，并用如下(3)式表示。

$$4\log[\%C] + 1432/T \cdot [\%C] = 3\log[\%Cr] + (160/T - 0.0476) \cdot [\%Cr] + 57100/T - 35.16 + 4\log P_{CO} \quad (3)$$

假定[Cr]=18%，按(3)式计算出的[C]与钢水温度T之间的关系如图1所示^[7]。



A: 吹氧操作的条件

B: 降低 P_{CO} 的操作条件

图1 在18%Cr钢中C%-温度- P_{CO} 之间的关系^[7]

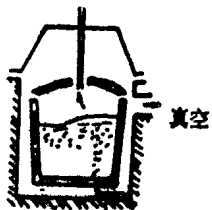
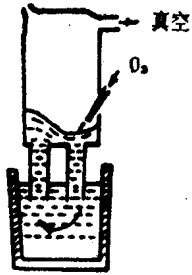
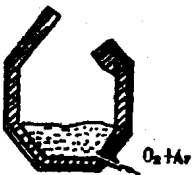
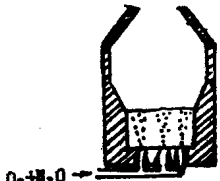
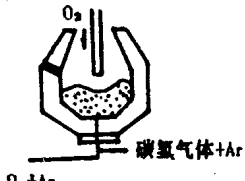
由图1可见，要想采用氧化[Cr]来进行脱碳，就必须提高钢水的温度和降低 P_{CO} 。

提高钢水温度的方法有向电弧炉吹氧的方法，但这种方法存在着如下问题：

- ①由于钢水温度升高，耐火材料的烧损增大；
- ②如果限制钢水温度，要将[C]脱到 $\leq 0.02\%$ 以下又相当困难；
- ③因搅拌强度差，需要较长的精炼时间，从而生产率较低。

由于以上问题，现时主要是采用降低 P_{CO} 的方法。这类方法中有降低气相压力的减压脱碳法和往钢水中吹送Ar， N_2 等惰性气体的稀释脱碳法。这些方法如表1所示。

表 1 不锈钢水精炼脱碳方法

减压脱碳法	名 称	VOD法 ^[11]		RH-OB(真空提升脱气-吹氧)法 ^[12]
	发明的公司	witten		新日铁
	方 法			
吹送稀释气体的稀释脱碳法	名 称	AOD法 ^[13]	CLU ^[14]	K-BOP ^[10]
	发明的公司	Union Carbide	Creusot-Loire和 Udeholm	川崎制铁(千叶)
	方 法			
复合脱碳法	名 称	VODC法 ^[8]		
	发明公司	TEW(witten)		
	方 法			

减压精炼法中的VOD法, RH-OB法已实际采用, 这些方法具有如下特点:

①由于采用了与[C]浓度相对应的真空度, 有可能在完全抑制[Cr]的氧化情况下进行脱碳, 因此还原脱碳后还原渣中的(Cr_2O_3)所需要的还原剂用量较少。

②精炼是在钢包中进行, 因精炼后钢水吸收[N], [C]量很少, 故可生产超低碳和超低氮的不锈钢。

③为了防止在减压下钢水突然沸腾造成设备的事故, 而需限制送氧速度, 故这些方法要从高碳范围进行脱碳是有困难。

稀释脱碳精炼方法中的AOD法, CLU 法, K-BOP 法等都已工业化, 这些方法具有如下特点:

- ①因可以吹送大量的气体, 故可从高碳范围进行脱碳, 从而可提高生产率。
- ②因这些方法的热效率高, 故可添加大量的冷料。
- ③脱碳时阻止[Cr]的氧化大多采用减压法, 故还原剂的添加量较多。
- ④由于这些方法具有强力的气体搅拌, 故容易生产超低碳不锈钢。
- ⑤这些方法在出钢时由于钢水会溶解吹炼时粘附于炉壁上的溅疤而使钢水增碳, 还会吸收大气中的氮, 故要生产超低碳和超低碳氮不锈钢是很困难的。

综合减压脱碳法和稀释脱碳法的优缺点, 将两种方法进行组合构成复合脱碳方法, 早已进行了试验, VODC法^[8]就是这种复合法的典型事例。另外, 最近还有报道说^[9, 10], 将脱碳期的部分或全部采用气体稀释精炼脱碳法, 将碳脱到低碳范围, 而后再用减压脱碳法进行还原和精炼, 也就是将脱碳与还原及精炼分段进行的方法。

2.1.2 炉渣对脱碳反应的影响

与碳素钢相比, 在精炼不锈钢时, 脱碳期所存在的炉渣的性状和数量是十分重要的。譬如, 如图2所示, 脱碳速度与炉渣中的(Cr_2O_3)浓度有着十分密切的关系^[16]。如图所示, 当渣中(Cr_2O_3) $\approx 10\%$ 时, 钢水的脱碳速度最高。而且, 岩岡等^[16]有报道, 如果将炉渣中的(Cr_2O_3)提高到 10% 以上, 则钢水的脱碳速度又会下降。其后, 岩岡等^[17]还阐述了富集(SiO_2)的炉渣有促进脱碳的作用, 但与此相反, 丸桥等^[18]报导, 碱性炉渣对脱碳是有效的。另外, 如图3所示, 炉渣的 Cr_2O_3 - CaO - SiO_2 组成对脱碳有密切的关系, 根据中尾^[19]的报导, 形成液体, 而且炉渣中(Cr_2O_3)浓度越高, 它的脱碳速度就越快。

如上所述, 现时有关炉渣组成对脱碳速度的影响还没有取得一致的见解, 尽管如此, 对于在有高(Cr_2O_3)的固态炉渣的条件下, 钢水脱碳速度会明显下降, 对此大家的意见是一致的^[17, 20, 21]。

关于渣量, 希望采用适量的具有流动性的炉渣, 有报道^[21]说, 如果完全倒去炉渣则会抑制脱碳。

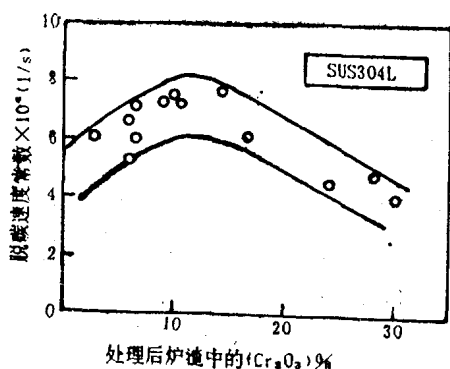


图2 炉渣中的(Cr_2O_3)含量对不锈钢脱碳速度常数的影响^[16]

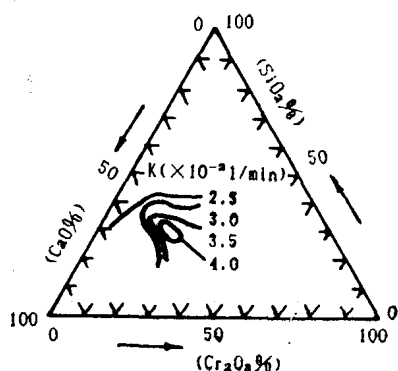


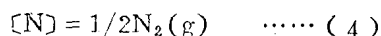
图3 炉渣组成对不锈钢脱碳速度常数的影响^[19]

2.2 脱氮反应

2.2.1 脱氮反应和精炼方法

图4所示为Fe-Cr合金中[N]的溶解度^[7]。如图所示,与碳素钢相比,不锈钢的脱氮,因[N]浓度随钢中[Cr]浓度的增加其平衡浓度也增加,所以不锈钢的脱氮是困难的。

脱氮反应机理是,当向钢水中吹送氮气,或者有由于脱碳所产生的CO气体时,钢水中的[N]会扩散到这些气体所形成的气泡中,并随气泡一起排出到系统之外。该反应可用如下(4),(5)式所表示的综合反应式来表达。



$$K_4 = P_{\text{N}_2}^{1/2}/a \quad \cdots \cdots (5)$$

其中: K_4 是反应式(4)的平衡常数; a_{N} 是钢水中[N]的活度; P_{N_2} 是气相中 N_2 的分压。

如果脱氮反应是在保持(5)式的平衡下进行的,则脱氮时所必须吹入的气体量可用(6)式来表示^[22]。

$$V_{\text{p}} = 8/\alpha \{ [\% \text{N}]_{\text{e}}^2 \cdot (1/[\% \text{N}]_{\text{f}} - 1/[\% \text{N}]_{\text{i}}) - ([\% \text{N}]_{\text{f}} - [\% \text{N}]_{\text{i}}) \} \quad \cdots \cdots (6)$$

式中: V_{p} 是必须吹入气体的数量; α 是脱氮效率; 下标 e, f, i 是平衡值、最终值和初始值。

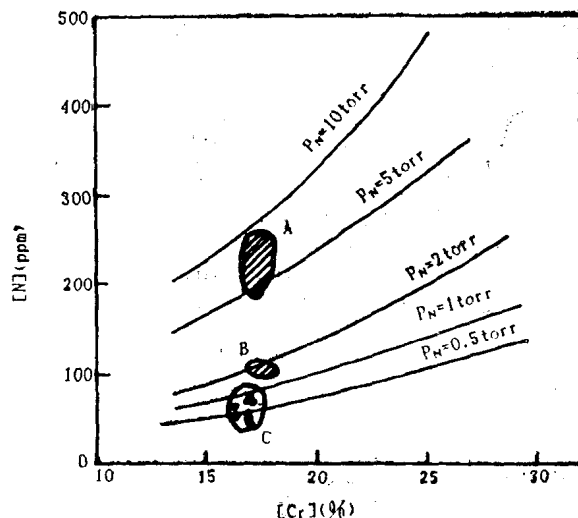
(6)式中的 $[\% \text{N}]$ 是用(7)式表示的^[23]。

$$\begin{aligned} \log [\% \text{N}] = & -188/T - 1.25 - [(3280/T - 0.75)(0.13[\% \text{C}] \\ & + 0.047[\% \text{Si}] + 0.01[\% \text{Ni}] - 0.01[\% \text{Mo}] - 0.023[\% \text{Mn}] \\ & - 0.045[\% \text{Cr}]) + 1/2 \log P_{\text{N}_2} \quad \cdots \cdots (7) \end{aligned}$$

图5所示为[O]浓度对脱氮速度的影响^[24]。如图所示,因为脱氮速度随着[O]浓度的增加而下降,故脱氮效率 α 受[O]和[S]浓度的影响,在AOD脱碳期的脱氮效率为0.2~0.4,在还原期为0.6~0.9^[25]。

要想冶炼超低氮不锈钢,采用如下作业是十分有效的^[26,27],即不出钢进行减压精炼;脱氮处理前升高[C]浓度^[15];降低漏气量^[20]和使用 $[\text{N}] \leq 50\text{ppm}$ 的铬铁。对于25%Cr钢,已达到 $[\text{N}] = 15 \sim 28\text{ppm}$ 的水平。

另一方面,现正积极对采用AOD精炼法精炼超低氮不锈钢的技术进行开发,例如



A: 电炉法冶炼SUS304钢的情况

B: AOD法精炼SUS304钢的情况

C: VOD法, RH-OB法精炼SUS430钢的情况

图4 Fe-Cr合金中氮的溶解度