

大型发电机护环 制造关键技术

DAXING FADIANJI HUHUAN
ZHIZAO GUANJIAN JISHU

何文武 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

大型锻件是国家重大技术装备、重大工程建设所必需的重要基础部件,广泛应用于火力、水力发电设备,核电设备,石油、化工设备,船舶、军工产品,大型科研装置等各个方面,其制造能力和技术水平是衡量一个国家重大技术装备生产能力的主要标志之一,对国民经济建设、国防力量和现代科学技术有着至关重要的意义。本书围绕大型发电机护环生产过程的质量控制与关键技术,对 50Mn18Cr5 和 Mn18Cr18N 钢的冶炼、电渣重熔、锻造热成形、固溶处理、冷强韧化、去应力处理和无损检测等整个生产环节中的关键技术要点进行阐述,着重介绍锻造过程的组织控制、裂纹消除、新技术手段和冷强化技术的发展和强化技术。本书不仅对大型发电机护环生产具有指导作用,而且对难变形、奥氏体不锈钢的生产也有一定的借鉴作用。

本书主要适用于大型企业护环生产及不锈钢生产厂家的工程技术人员,也适用于科研院所、高校等研究单位的研究人员。

图书在版编目(CIP)数据

大型发电机护环制造关键技术/何文武著. —北京:

国防工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-118-08395-8

I. ①大… II. ①何… III. ①大型发电机—护环—制造 IV. ①TM303.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 222013 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京市海淀区四季青印刷厂

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5½ 字数 201 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

60年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。60年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

前 言

本书围绕大型发电机护环生产过程的质量控制与关键技术, 针对目前用的 50Mn18Cr5 和 Mn18Cr18N 钢两种材料的冶炼、电渣重熔、锻造热成形、固溶处理、冷强韧化、去应力处理 and 无损检测等整个生产环节中的关键技术要点进行阐述, 着重介绍锻造过程的组织控制、裂纹消除、新技术手段和冷强化技术的发展和新的强化技术研究。

以 300MW 发电机护环热锻工艺为研究对象, 采用物理模拟与数值模拟相结合的方法, 深入系统地研究了 Mn18Cr18N 奥氏体钢微观组织的演变机制、控制方法以及热锻裂纹的变化模型和评价预测, 提出了护环热锻短流程的新技术, 即包套冲挤复合成形和芯棒控制扩孔工艺。300MW 护环热锻及产品试制表明, 该项新技术彻底解决了大型护环热锻开裂问题, 并且在锻造过程中应用控锻技术, 获得了细小均匀的晶粒组织。

在变形强化方面先简单介绍了护环半热锻强化技术、护环爆炸强化技术、楔块扩孔成形技术以及液压胀形强化技术, 在此基础上进一步提出压机加载密封超高压系统液压胀形强化技术, 系统分析了冲头工作锥角、密封力是影响胀形后环件形状及尺寸的重要工艺参数。这些技术能够实现胀形调控方便、通用性强、操作简便、先进适用、省力不占用大型设备等优点。

本书不仅对大型发电机护环生产具有指导作用, 而且对难变形、奥氏体不锈钢的生产也有一定的借鉴作用。

作 者
2012 年 6 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 发电机护环的工作条件及技术要求	1
1.2 发电机护环用钢的发展历程	3
1.3 护环材料的特性	7
1.4 护环的生产工艺流程	11
第 2 章 冶炼、浇注、电渣重熔对护环锻造的影响	16
2.1 冶炼	16
2.2 浇注	19
2.2.1 浇注速度	20
2.2.2 浇注温度	20
2.3 电渣重熔	21
2.3.1 电渣重熔过程的特点	22
2.3.2 电渣重熔的工艺参数	22
2.4 加压电渣重熔	25
第 3 章 Mn18Cr18N 护环钢热锻组织的控制	27
3.1 锻前加热保温过程	27
3.1.1 Mn18Cr18N 护环钢的晶粒长大组织	27
3.1.2 Mn18Cr18N 护环钢的晶粒长大规律	29
3.1.3 Mn18Cr18N 护环钢的晶粒长大模型	30

3.2	Mn18Cr18N 护环钢的热变形行为及组织演变规律	32
3.2.1	Mn18Cr18N 护环钢的应力应变曲线及高温 流变应力模型	33
3.2.2	Mn18Cr18N 钢的动态再结晶组织演变及模 型的建立	37
3.2.3	Mn18Cr18N 钢的静态再结晶组织演变及模 型的建立	45
3.2.4	Mn18Cr18N 钢的亚动态再结晶组织演变及模 型的建立	51
3.2.5	Mn18Cr18N 钢的功率耗散图	55
第 4 章	Mn18Cr18N 护环钢热锻裂纹的预防与控制	57
4.1	Mn18Cr18N 钢高温塑性的测定与分析	57
4.2	热塑性的影响因素	60
4.2.1	热变形温度	60
4.2.2	晶粒尺寸	61
4.2.3	应变速率	62
4.3	Mn18Cr18N 钢的韧性断裂准则	63
4.4	自由锻造芯棒拔长开裂分析	69
4.4.1	芯棒拔长工艺特点	69
4.4.2	模拟参数的设定	70
4.4.3	计算结果及分析	71
第 5 章	大型护环热锻短流程新技术	73
5.1	护环热锻短流程新工艺原理	73
5.1.1	冲挤复合成形机理	73
5.1.2	护环热锻新工艺变形基本规律	74

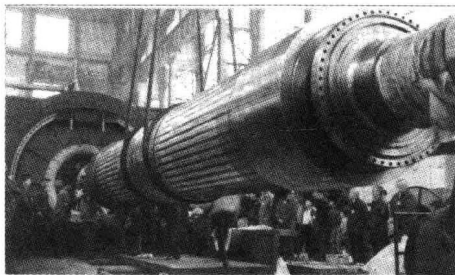
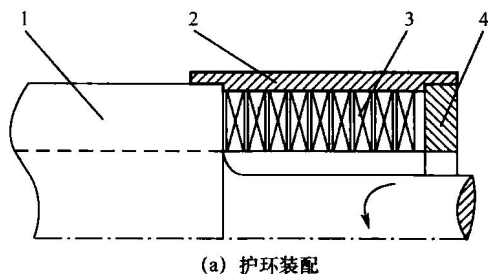
5.2	护环包套冲挤复合成形工艺优化	77
5.2.1	包套厚度	77
5.2.2	冲头工作角	78
5.2.3	坯料与模具间隙	78
5.3	芯棒扩孔工艺优化	83
5.3.1	芯棒扩孔圈数的优化	83
5.3.2	单圈压下量对变形的影响	85
5.4	300MW 护环热锻新工艺	87
5.4.1	300MW 护环热锻新工艺试验	87
5.4.2	芯棒扩孔成形工艺	94
第 6 章	护环强化技术	96
6.1	护环半热锻强化技术	97
6.2	护环爆炸强化技术	104
6.2.1	爆炸加工的特点	104
6.2.2	爆炸强化的装置	106
6.2.3	爆炸强化的工艺参数	108
6.2.4	提高护环爆炸强化质量的措施	114
6.3	护环楔块扩孔成形技术	115
6.3.1	护环楔块扩孔原理	115
6.3.2	楔块扩孔的工艺参数	117
6.4	石墨为传力介质的强化护环方法	120
6.5	护环液压胀形强化技术	121
6.5.1	全液压法强化技术	121
6.5.2	减压法强化技术	122
6.5.3	外补液强化技术	124
6.5.4	内增压法	126

第 7 章 压机加载密封超高压系统液压胀形试验及模拟研究	127
7.1 超高压系统液压胀形强化技术	127
7.1.1 大型护环超高压泵液压胀形规律研究	128
7.1.2 冲头工作锥角对胀形质量的影响	132
7.1.3 上冲头压力对胀形质量的影响	143
7.2 超高压泵液压胀形 1:5 试验及模拟研究	148
7.2.1 NO.1 样品的液压胀形试验与模拟	149
7.2.2 NO.2 样品的液压胀形试验与模拟	156
7.2.3 NO.3 样品的液压胀形试验与模拟	158
7.2.4 NO.4 样品的液压胀形试验与模拟	161
7.3 300MW 护环试制产品性能检测	163
参考文献	164

第1章 概述

1.1 发电机护环的工作条件及技术要求

护环是汽轮发电机组中的关键构件之一，它用热套的方法装在转子的两端，一端紧压在支承环上，另一端靠在转子本体上，固定励磁绕组线圈的端部，将转子端部线圈紧压在转轴上，保护电机转子两端的线圈在离心力的作用下不向外飞出，防止变形、位移和偏心，如图 1.1 所示。护环随着转子做高速旋转，承受转子绕组端部及自身的巨大离心力及槽端线圈绕线对护环的迭加载荷，护环除受



(b) 现场安装

图 1.1 护环装配示意图及现场安装照片

1—发电机转子；2—护环；3—端部线圈；4—中心环。

线圈和自身的离心力作用外，还受弯曲应力、热装应力等的作用，它是汽轮机组承受应力最高的部件^[1, 2]。由于护环特殊的工况和使用条件，即在强磁场和腐蚀介质中工作，因此需要其具有较高的抗应力腐蚀能力。20 世纪 80 年代前，护环基本用 50Mn18Cr4 系列钢制造，经过几十年的运行实践，发现 50Mn18Cr4 系列钢的抗应力腐蚀能力较差，出现过多起应力腐蚀开裂事故。为此，国内外相继开发了 Mn18Cr18N 系列钢，塑性和抗应力腐蚀能力有较大提高。目前国内的 300MW 以上发电机护环基本上均采用 Mn18Cr18N 系列钢，有关标准对其性能作了明确规定^[3]。

护环在高速旋转中受力复杂，不但要承受巨大的离心力，同时还要承受热装时的装配应力、不均负荷引起的附加应力、由转子传来的交变应力和由于结构上的要求造成的集中应力。汽轮发电机的转速较高，额定转速为 3000rad/min，试验转速为 3600rad/min，转子尺寸较大，故圆周线速度高达 170m/s~200m/s，因此，端部线圈及护环在运转中均会出现巨大的离心力。例如，护环每千克产生的离心力，有的竟高达 35t。在高速运行中，护环还承受很大的应力，如 25MW 护环所受的应力高达 42MPa，同时护环还承受周期运动产生的交变应力、复杂的装配应力、弯曲应力以及结构不均匀产生的集中应力作用，受力状况极其复杂，工况特殊，制造难度极大，是火电发电设备的关键构件之一。一旦护环所受应力的总和超过材料的屈服极限，则护环发生松动，会破坏转子的动平衡，当应力再增加，可能造成飞逸爆炸事故。

为了保证机组的安全运转，要求护环具有较高的屈服强度、高的塑性指标、均匀的力学性能和最小的残余应力，同时还要避免护环在强磁场、潮湿的腐蚀介质中工作时因电磁感应造成护环发热，影响发电机效率及安全性^[4]。考虑到减小电机端部漏磁和涡流损失而提高效率的要求，大多采用奥氏体无磁性钢制造，而这种材料不能通过传统的相变热处理方式来提高强度，只能通过冷变形强化来达到提高力学性能的目的。如在 Mn-Cr 系、Ni-Cr-Mn 系以及 Cr-Ni 钢中，根据我国的资源情况，目前采用 Mn-Cr 系为主。一般容量在 300MW 以上的大型机组护环，其屈服强度都在 1000MPa

以上，其中 300MW~1000MW 护环的技术要求见表 1.1^[5]，1000MW 护环的屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 高达 1300MPa。护环制造以其严格的技术要求和特殊的制造工艺方法，一直被世界各国护环制造行业予以高度的重视。

表 1.1 Mn18Cr18N 护环钢的技术要求^[5]

名称	切向试样			试验温度/℃	取样位置
	300MW	600MW	1000MW		
强度极限 σ_b /MPa	≥1030	1070	≥1300	95-105	中环
屈服极限 $\sigma_{0.2}$ /MPa	1030~1170	1070~1210	1300~1450		
延伸率 δ_5 %	≥15	≥15	≥12		
断面收缩率 ψ / %	≥53	≥52	≥35		
冲击能量 A_{KV} /J	≥82	≥75	≥35	20-27	内环
导磁率 μ / (10^{-7} H/m)	≤13.2	≤13.2	≤1.05		中环

1.2 发电机护环用钢的发展历程

火电设备是逐步由低功率、低效率向高参数、大容量发展的，因此大型汽轮发电机组对护环提出了更高的要求。护环的材料必须满足以下要求：高的屈服强度、适宜的塑性、不太低的热膨胀率、较低的导磁率。由于相当大的离心力和装配的原因，因此前三个条件是必需的。希望有低的导磁率，是因为当铁磁体材料通过磁场运动时会产生涡流，导致能量损耗，并使复杂的发电机冷却系统增加负荷。护环是在强磁场中工作，为减小端部的电流损失和避免工作温度过高，要求护环无磁性。在工作过程中因电机电晕使空气解离造成臭氧与氮作用产生硝酸盐介质，使受力的护环发生应力腐蚀。护环的抗应力腐蚀能力要高，所以选材要同时满足电工性能和抗应力腐蚀的要求。提高奥氏体钢的含氮量不仅可以提高强度，而且可以提高抗应力腐蚀能力，还能改善奥氏体钢的冷作强化能力。近年来用 18-18 钢制作的护环已列为标准，从表 1.2 可以看出，部分电厂护环失效的主要原因是应力腐蚀和疲劳裂纹，还有晶粒粗大不均匀、残余应力超标等^[6, 7]。

表 1.2 部分电厂事故表

国 别	电 厂	发电机规格	年 代	事 故 类 型
加拿大	Toronto	100MW	20 世纪 50 年代	应力腐蚀裂纹
南非	Vall	125MW	1957 年	应力腐蚀裂纹
丹麦	Skaerback	250MW	20 世纪 70 年代	应力腐蚀裂纹
西德	Scholven	300MW	1978 年	应力腐蚀裂纹
瑞典	Barsebaok	610MW	1979 年	应力腐蚀裂纹
中国	江油电厂	200MW	1976 年	疲劳裂纹及应力腐蚀裂纹

20 世纪 80 年代以前,国外一直采用 50Mn18Cr4 系列钢生产护环,但 70 年代后期,世界各地相继出现了几起因护环开裂导致的电站事故,护环开裂均因 50Mn18Cr4 钢的抗应力腐蚀差而产生表面裂纹。80 年代初期,国外研究开发了具有较高抗应力腐蚀能力的新护环材料。国外先后有德国 VSG 公司、Krupp 钢厂和美国 GM 公司开发出 Mn18Cr18N 护环钢,德国 VSG 公司在初期 P900 钢的基础上,陆续在 1988 年和 1999 年开发出 P900-N 和 P2000 系列钢种, P2000 钢的含 N 量达 0.9%,制造的护环屈服强度达 1600MPa。国外护环材料经历了由 50Mn18Cr4 (18-4) 向 Mn18Cr18N (18-18 或双 18, 国外称 R900、P2000) 钢的转变,国外 18-18 护环钢成分和型号见表 1.3。

Mn18Cr18N 钢的化学成分与 50Mn18Cr4 钢相比,含氮量由 0.4% 提高到 0.6% 以上,而含碳量则明显降低,这样可以避免晶界碳化物,但降低含碳量会使奥氏体的稳定性和强度下降。日本制钢所室兰工厂在 1987 年试验证明 Mn18Cr18N 钢比 50Mn18Cr4 钢具有更高的屈服比及塑性,且比 50Mn18Cr4 钢具有更优的抗腐蚀性。日本名古屋的楚部电能集团和东芝公司在 2001 年 11 月共同开发生产出世界最大的涡轮发电机组,发电机护环使用含氮 0.76% 的 Mn18Cr18N 钢制造。法国铸锻公司 (C3F) 提出采用先进的护环钢材料和合理的制坯工艺,提高产品质量。故现在国外护环生产厂大都采用 Mn18Cr18N 钢制造 300MW 以上大型机组的护环锻件^[8,9]。

表 1.3 国外 18-18 无磁性护环钢成分表

No	Steel	C	si	Mn	Cr	Ni	P	S	N	V	Mo
1	R900	0.03-0.08	0.3-0.31	18.9-19.1	18.7-19.0		0.023	0.006	0.57-0.74		
2	R900	>0.1	0.3	17-20	17-19				>0.4		
3	23Mn10Cr3Mo3Ni	0.3-0.8	>1.5	17-23	6-10	2.75			>0.8	1.7	>3.5
4	12Kh18AG18	0.08	0.55	21	17.11	0.1	0.009	0.025	0.64	0.1	
5	18Mn18Cr	0.07-0.12	0.3-0.34	18.36-18.82	17.36-17.66		0.015-0.019	0.030	0.552-0.573		
6	18Mn18Cr	0.46-0.55	0.37-0.8	17.5-19.4	17.5-20.0		0.031	0.001	0.4-0.713		
7	15Mn20Cr2Mo	>0.4	1.5-2.0	13-15	12-20			0.002	0.5-1.0		1.0-2.5
8	16Mn20Cr	0.1-0.15	0.3-0.8	14-16	16.5-20.5				0.2-0.35		
9	12Kh18AG18	0.08	0.11	19.4	18.56	0.2	0.026	0.001		0.05	0.56
10	12Kh18AG18	0.008	0.11-0.55	19-21	17-19			0.003			
11	08G19AKh19	0.08	0.50	19.05	19.64		0.028	0.007	0.71		
12	07G19AKh19	0.07	0.30	19.54	19.25		0.028	0.004	0.72	0.03	0.01
13	R900	0.05		18.0	18.0	0.6			0.6-1.1		
14	R900	0.031	0.31	19.1	19.0		0.023	0.060	0.74		
15	08G18Kh19A0.55	0.08	0.23	18.45	19.55		0.024	0.009	0.55	0.02	
16	07G19Kh18FA0.42	0.07	0.49	18.9	17.48		0.031	0.007	0.42	1.04	
17	07G18Kh19FA0.73	0.07	0.35	18.02	18.78		0.031	0.008	0.73	1.07	
18	R900	0.061	0.62	19.5	18.0	0.74	0.035	0.01	0.61		0.11
19.1	R921	0.06		18.4	17.5	0.13			1.02	0.14	2.08
19.2	R920	0.06		18.0	18.0				0.65		
20	10Kh18AG18	0.07		21.0	17.6				0.49		

近几十年来,关于无磁性钢的研究文献很多,我国关于护环钢也积累了一定的生产实践经验。国内起初采用的 Mn-Cr 系护环钢主要是 18-4 钢,奥氏体非常稳定(纯奥氏体的导磁率为 1.003),通过变形强化,电磁性能变化不大。例如: Mn18Cr4 型钢,奥氏体化处理后 $\sigma_{0.2}=30\text{MPa}\sim 40\text{MPa}$,变形强化后 $\sigma_{0.2}\geq 65\text{MPa}$ 。当屈服点 $\sigma_{0.2}$ 值由 30MPa 提高到 80MPa 时,导磁率由 1.01 提高到 1.1,仍满足护环的技术要求。我国各重机厂的实践证明:对于小型机组护环含碳量对强化效果有着非常明显的影响。含碳量由 0.4% 降至 0.34% 时,变形程度比前者大 6.5%,强化效果还不及前者,而 $\sigma_{0.2}$ 值竟相差 7MPa $\sim$ 7.5MPa。当屈服强度要求在 65MPa $\sim$ 80MPa 时,采用 50Mn18Cr5 材料,当屈服强度要求大于 80MPa 时,采用 Mn18Cr18N 材料。

我国从 20 世纪 70 年代初开始研究并生产护环,采用 Cr-Mn 系钢,如 40Mn18Cr4、50Mn18Cr4、50Mn18Cr5 及 50Mn18Cr4WN 等。Mn18Cr4 护环钢的最高加热温度若选的低,则塑性差,变形抗力大;若选的高,又会因为晶粒粗化造成塑性下降,甚至引起开裂。实践证明:最高加热温度由 1050℃ 提高到 1200℃ (指料温) 时,使碳化物充分溶入奥氏体中,提高了可锻性。由于无磁性护环钢的导热率在 800℃ $\sim$ 900℃ 以后和一般钢的导热率趋向一致,此时钢已具有相当好的塑性,热钢锭应快速加热,热坯料允许装入高温(1180℃ $\sim$ 1200℃) 炉。在最高加热温度下的保温时间不宜过长,以防止晶粒长大,坯料的晶粒度一般为 2 $\sim$ 3 级。护环强化变形前,需要进行奥氏体化处理,得到单相的奥氏体组织,从而提高变形强化效果,获得良好的机械性能。由于 Cr-Mn 系钢抗应力腐蚀能力较差,国内在 20 世纪 80 年代后期引进 Mn18Cr18N 钢,并进行相关塑性变形基本工艺参数的研制工作。Mn18Cr4 钢在 850℃ 的变形抗力约为 1200℃ 时的 4.3 倍,而 Mn18Cr18N 钢在 850℃ 的变形抗力约为 1200℃ 的 8.7 倍,表明 18-18 钢变形抗力随着温度下降的增幅比 18-4 钢的更大。上海重型机器厂有限公司(以下简称上重)研究了 Mn18Cr18N 钢不同含 N 量特别是 N 的行为对冶金质量、工艺因素的影响,开发了该钢种的电渣重熔技术。1992 年 7 月,中国第一重型机械集团公司(以下简称一重)、中国第

二重型机械集团公司（以下简称二重）和上重分别生产了 300MW 护环，且通过国家鉴定。2002 年二重集团在提高 Mn18Cr8N 钢中含 N 量方面有所进展，获得国内目前含氮量最高为 0.689% 的 Mn18Cr18N 钢锭。总之，在生产大型机组的护环时国内外均采用 Mn18Cr18N 钢制造，且含氮量有进一步增大的趋势^[10, 11]。

1.3 护环材料的特性

18-5 钢已广泛应用于制造无磁性护环，为改善其对应力腐蚀的敏感性，研究了一些新材料，考虑到晶界碳化物的影响，可降低 18-5 钢的含碳量，但降低含碳量会使奥氏体的稳定性和强度下降，利用另一种间隙元素氮代替碳，增加铬可以提高钢中氮的溶解度，固溶体中的氮使奥氏体 Mn18Cr18N 钢具有许多良好的性能，它增加面心立方晶格的稳定性，改善材料对点腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀裂纹的抗力，提高蠕变强度并保持了奥氏体的高韧性。图 1.2 所示是 Mn18Cr18N 钢在 1050℃ 固溶处理后铬当量和 δ 铁素体的关系曲线^[12]，可以看出，为避免出现 δ 铁素体，Mn18Cr18N 钢的（50+铬）当量应小于 13。

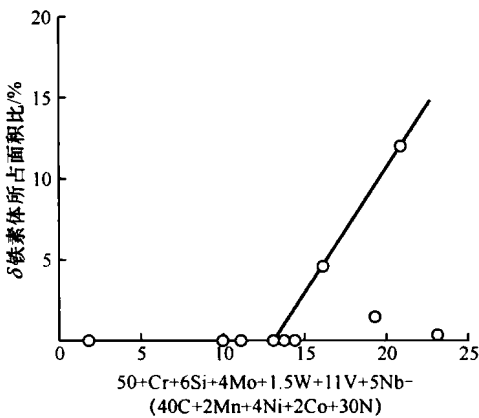


图 1.2 Mn18Cr18N 钢在 1050℃ 固溶处理后铬当量和 δ 铁素体的关系曲线

国外生产的 18-18 型大型护环的屈服强度最高已达 1400MPa。要达到这样的高屈服强度可以采用两种手段来实现：①在含氮量一定的情况下，提高护环的冷变形率。但由此带来因冷变形量大，易造成护环开裂致废的危险。又由于强度的提高是以牺牲塑韧性为代价，会造成护环的塑韧性达不到标准要求。而要兼顾塑韧性，就达不到高的强度等级，故这种方法存在着矛盾。②提高护环材料中氮的含量来提高护环的屈服强度。

氮合金化引起 18-18 型奥氏体钢力学性能的改善，是由于形成了氮过饱和的固溶体，和奥氏体中氮溶解度随着温度降低而降低所产生的氮化物沉淀。奥氏体晶格间氮原子的存在，引起晶格畸变。晶格畸变的总效果提高了抗拉强度性能。在这方面氮的作用显著地超过其他溶入的间隙元素。氮合金化使力学性能显著改善，同时又不影响材料对无磁性、抗腐蚀性等其他优良性能的要求。此外，高的氮含量还能改善奥氏体钢的冷作强化能力。氮能够稳定奥氏体，还可以在很大程度上减缓甚至阻止不希望有的马氏体之类磁性组织的出现。另外，高氮含量还使奥氏体钢保持或者只是极少地降低了良好的韧性，氮的这些优点促进了无磁性抗腐蚀奥氏体高氮护环材料的开发，同时冶炼出的高含氮的 18-18 型护环钢也就成为制造高等级护环的关键^[13]。含氮奥氏体钢的屈服强度由基体强度、晶界强度和固溶强度构成，固溶强度是由于氮原子溶入奥氏体面心立方晶格的间隙所致；基体强度主要是在非间隙奥氏体晶格中的位错产生的摩擦应力，基体强度低，受温度影响小；含氮量越高，晶界强度越明显。在较低温度范围，氮对晶粒大小的强化效果有很大影响，而在较高温度范围，氮的影响就不明显，如图 1.3 所示。随着含氮量的增加，屈服强度显著增加，低于 400K 时，强度对温度的依赖关系非常明显。

冷作强化是提高固溶处理奥氏体不锈钢屈服强度的一个有效的方法，含氮量较高的钢，具有明显的应变强化率，如图 1.4 所示，这是由于氮引起堆垛层错能的降低，塑性变形后不仅产生稳定的位错作用，且经较大变形后，还形成许多细小的变形孪晶^[14]。

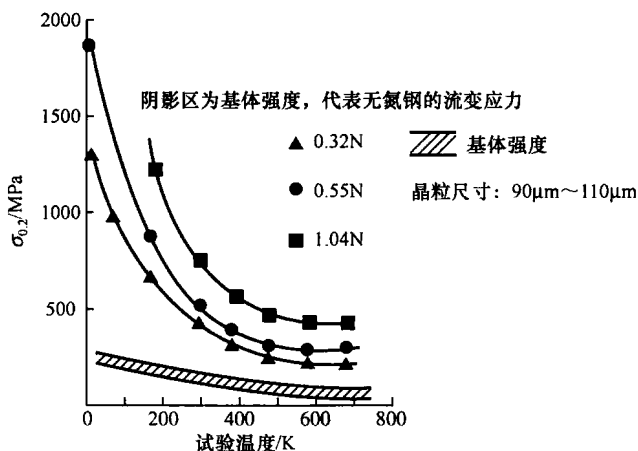


图 1.3 试验温度对不同含氮量的 Mn18Cr18N 钢屈服强度的影响

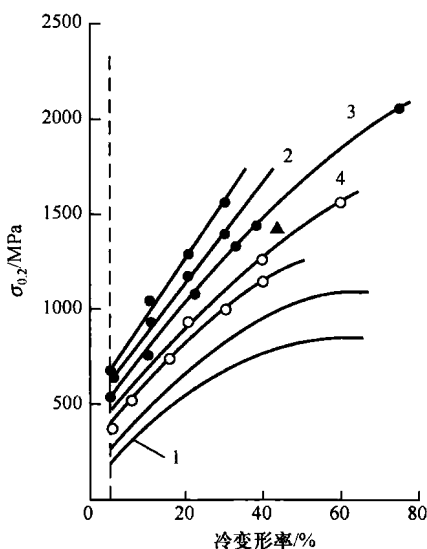


图 1.4 冷变形对不同奥氏体钢的屈服强度的影响

●—1.07N、18Cr、18Mn；○—0.25N、18Cr、7Mn；1—304、310、316 合金；
2—0.79N、18Cr、18Mn；3—0.59N、18Cr、18Mn；4—0.31N、18Cr、12Mn。

为了得到高的氮含量及收得率，国内外厂家主要采用的方法是：苏联采用开式感应炉法、真空电弧重熔法、等离子体电弧重熔法等；