

国外大型铸锻件制造技术发展状况

情报调研报告集

机电部重型机械科技情报网大型铸锻件制造分网
德阳大型铸锻件研究所

一九九一年

目 录

汽轮发电机护环生产技术的发展·····	郭会光 (1)
电渣重熔的大型化发展——近十年世界大型电渣重熔概况·····	向大林 叶允荷 (15)
发电机转子、低压汽轮机转子锻造技术的进展·····	吕茂寒 齐作玉 (24)
高温汽轮机转子锻件用钢的发展·····	何志勇 (31)
护环减压式液压胀形强化新技术·····	刘助柏 (36)
国外大型热锻模块锻件制造技术概况·····	傅耆寿 (39)
国内外不锈钢铸件生产的最新发展和应用·····	许秀萍 (49)
国外核反应堆压力容器用A508-3钢及其制造·····	马飞良 (55)
铸钢轧辊的材质和制造技术·····	王 孜 (67)
船用锻件·····	冯道武 (76)
连铸机拉矫辊情报研究·····	孟 威 (87)
国外船用螺旋桨的发展趋向·····	张以钟 (90)
高氮奥氏体护环钢的制造方法·····	何志勇 (96)
低合金耐热钢高中压转子锻件制造技术的改进·····	何志勇 (102)
大型轴承钢锻件发展概况·····	王晓利 王向明 (106)
国外大型混流式水轮机转轮的制造·····	钟慧仙 (115)
大型水轮机转轮的制造与发展·····	卢治义 吴冬梅 (122)
国内外高速载重齿轮锻件及其质量控制·····	牛万斌 司马钢 (128)

汽轮发电机护环生产技术的发展

太原重型机械学院 郭会光

【提要】 本文介绍了世界各国以及我国各重机厂矿护环的生产情况，并论述了护环的生产技术及其发展。

一、概 述

护环是汽轮发电机上的关键零件，热装在转子两端，用来紧压端部线圈，以防转子在高速运转时线圈飞逸损坏而造成电站灾难性的事故。护环的受力情况极为复杂。从国内外一些护环失效事故的分析证明，护环的破坏主要是由于应力腐蚀和疲劳失效而造成。因此，根据护环的工作状况，要求护环应具有高强度，一定的屈强比，最小的残余应力，良好的韧性，良好的抗应力腐蚀能力、耐疲劳性能和导热性能。为了减少电损失，护环还应无磁性。

目前，我国能生产 600MW 汽轮发电机护环，100MW 以上发电机护环还要从国外进口。国外优质护环具有以下特点：

(1) 超声波穿透力强（如日本生产的护环），晶粒度均匀，晶界干净，夹杂物少，碳化物析出少。

(2) 化学成分严格，Cr、Mn 含量提高，Ni、N 等含量高，化学稳定性好。

(3) 采用 18Mn-18Cr 钢，抗应力腐蚀性能强。

(4) 机械性能均匀，内外环强度差别小，周向强度、塑性差别小。

(5) 残余应力小，变形小。

从进口的大型护环质量看，其中以日

本、法国的质量最好，主要特点是性能稳定，组织结构均匀，晶界干净，变形小。

二、国外护环主要生产厂家的生产情况

1. 日本制钢所室兰制作所护环的生产情况

日本室兰厂是世界主要生产护环厂家之一。七十年代末已生产出材质为 Mn18Cr5N 钢，直径 1600mm、高 1000mm、屈服强度为 1230MPa 的护环。八十年代又生产出直径 1900mm、高 1250mm、壁厚 100mm、屈服强度 1100MPa 的护环。

护环的强化方式为冷楔扩或预热楔扩。楔块扩孔模具（见图 1），采用 10 块 7° 的楔块，也有的采用 12 块 4°20' 的楔块。采用 MoS₂ 基的润滑剂。护环扩孔，上砧的宽度应比环坯宽，以使扩孔时变形分布均匀，同时应采用小压下量不断反复转动护环，转动角要一致，转动速度要迅速。压下量起始为 30~50mm，而后为 20~30mm，最终为 10~20mm。锻完后立即入水，以细化晶粒度。为减少偏析，环坯热锻时要高温扩散加热（ESR 钢可以不进行高温扩散加热）。

楔扩变形率按护环中径计算，变形率与强度的关系见表 1。

冷扩孔后加工余量（单面）内、外径取 6mm，高度取 15mm（不含试棒留量）。

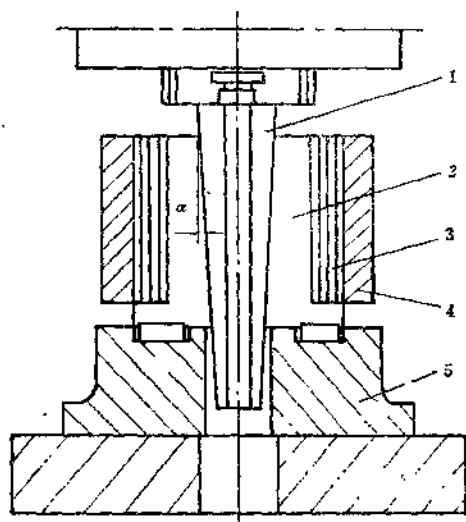


图1 护环楔块扩孔示意图

1—锥形冲头 2—楔块 3—垫片
4—护环坯 5—底座

表1 护环冷扩中径变形率与强度的关系

材 质	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	中径变形率(%)	
		大气浇注电炉钢	电渣重熔钢
Mn18Cr5N (低氮型)	840	29.5	31.5
	910	36.0	38.0
	1020	—	43.6
Mn18Cr5N (高氮型)	1090	—	45.5

2. 日本神户制钢所高砂厂

该厂所生产的楔扩护环(Mn18Cr5型钢)尺寸见表2。

表2 高砂厂所生产护环的尺寸

外径 (mm)	内径 (mm)	高度 (mm)	重量 (kg)
795	690	661	529
1026	883	511	850
1060	910	700	1200
1125	960	800	1650

早在七十年代,高砂厂就公布外锥面楔块扩孔专利。外锥面楔块扩孔的过程如图2所示: I→II 压下,环坯上端扩口, II→IV 反复多次压下,环坯中段逐环扩张, V 最后扩张下端,达到全部胀形的目的。这种方法的主要优点是大幅度省力,而且润滑均匀,但是变形不均匀。

3. 法国C. L 公司帕米埃(Creusot-Loire Pamiers)工厂

该厂从1945年开始生产护环(所生产护环的尺寸和性能见表3),至今已生产了上万只(最大直径为1800mm),其中95%出口供应世界各地。

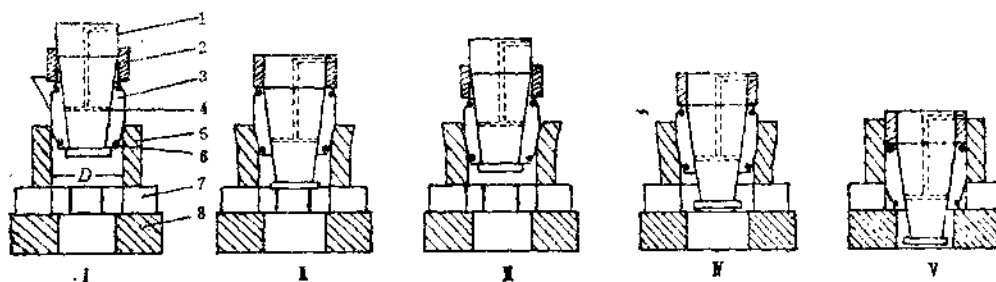


图2 外锥面楔块扩孔过程

1—上冲头 2—限位环 3—楔块 4—油孔 5—护环坯 6—弹性元件 7—滑动底座 8—底座

表3 法国C.L公司用Mn18-Cr4型钢制造的护环尺寸及性能

发电机类型	护环直径 (mm)	厚度 (mm)	高度 (mm)	护环重量 (kg)	中 环 机 械 性 能				
					$\sigma_{0.002}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ_5 (%)	ψ (%)	a_K (J/cm ²)
2 级	910	61	466	590	1030	1200	28	41	100
	1247	96	1150	3100	980	1170	29	38	115
	1270	95	890	2340	1190	1340	18	31	60
	1186	95	810	2030	1280	1470	16	28	50
4 级	1172	86	566	2050	1050	1290	24	39	110

法国是最早采用液压胀形工艺生产护环的国家,早在1960年就公布了全液压胀形(如图3所示)的专利技术。它是以油或其他液体为传压介质,护环坯内端缘有软金属

密封环。随着大吨位压力机的启用,这种全液压胀形法具有一定的现实意义。但是这种方法能量消耗大,需要用大吨位水压机,是不经济的。

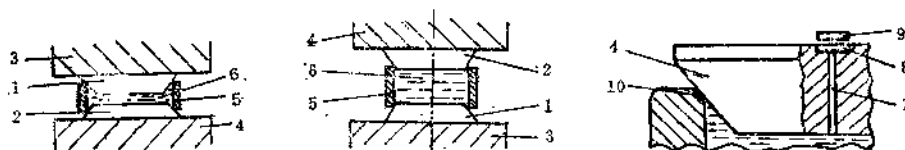


图3 全液压胀形示意图

1、2—上、下冲头 3、4—上、下砧子 5—护环坯 6—油 7—导孔 8—凹口
9—销塞密封垫 10—软金属密封垫圈

表4 克虏伯公司护环用钢的发展情况

年度	钢 号	化 学 成 分 (%)							
		C	Si	Mn	Ni	Cr	V	W	N
1901	BRUY	0.79	0.24	0.48	16.0	—	—	—	—
1910	MBR22C	0.27	0.20	0.44	21.8	3.0	—	—	—
1926	P323	0.56	0.18	8.22	10.1	4.15	—	—	—
1928	EFC212G	0.55	0.40	5.0	12.5	3.6	—	—	—
1938	EFC212W	0.58	0.40	7.5	8.5	4.0	—	0.60	—
1939	CF6724	0.32	0.38	18.0	—	1.0	—	—	—
1954	P750(UKR)	0.53	0.80	18.0	—	4.5	0.1	—	—
1979	P900	<0.1	<0.80	17.5	—	17.5~20.0	—	—	>0.4
1980	UKR-N	0.50	0.60	19.0	<1.0	4.5	0.1	—	0.3

表5 我国各重机厂护环的制造情况

生产厂家	生产时期	发电机规格 (MW)	护环材料	制造技术特征
一重厂	1964~1965	25~100	50Mn18Cr4 WN	半热锻马杠扩孔
	1965	25	20Mn14Cr20N	合金化强化
	1971	3~125	50Mn18Cr4 WN	球面模具冷扩孔
	1973~1975	300~600	50Mn18Cr4 WN	半热锻
	1979	100~200	50Mn18Cr4 WN	液压胀形强化
	1984	300	50Mn18Cr4 WN	液压胀形强化
二重厂	1970~1973	75~125	50Mn18Cr5 N	球面模具冷扩孔
		2~25	50Mn18Cr5 N	半热锻极套环
		50~200	50Mn18Cr5 N	爆炸成形强化
	1975~1988	200~600	50Mn18Cr5 N	楔块扩孔强化
	1988~1989	3~12	50Mn18Cr5 N	减压法液压胀形强化
太重厂	1960~1965	6~25	50Mn18Cr4	半热锻马杠扩孔
	1965~1977	6~125	50Mn18Cr5	爆炸成形强化
	1978~1989	3~12	50Mn18Cr5	减压法液压胀形强化
上重厂	1964	—	—	楔块扩孔
	1965~1978	3~125	50Mn18Cr4	爆炸成形强化 (254只)
	1979~1989	12~300	50Mn18Cr5 N	减压法液压胀形强化
北重厂	1972	6	40Mn18Cr3	半热锻马杠扩孔
	1972~1984	1~100	50Mn18Cr5	爆炸成形强化
	1984~1989	25~50	50Mn18Cr5	减压法液压胀形强化
洛矿厂	1988~1989	3~6	50Mn18Cr5	减压法液压胀形强化
广重厂	1988~1989	3~6	50Mn18Cr5	楔块扩孔强化
沈重厂	1965~1977	6~300	50Mn18Cr4 WN	爆炸成形
	1988	—	—	液压胀形试验

4. 西德克虏伯公司包胡姆厂

克虏伯公司生产护环的历史较早, 护环所采用的钢种的发展情况见表4。包胡姆厂曾用AKMC钢 (C0.5%, Mn>16%, Cr>3.5%) 生产过外径最大为1650mm、内径

1360mm、高750mm、 $\sigma_{0.2}$ 为900MPa的护环。该公司早就采用过半热锻法和楔扩方法生产护环。还曾采用电渣熔铸制坯, 经粗车和固溶化处理后, 在60MN压机上楔扩的方法来生产护环。

5. 苏联的护环制造情况

1942~1950年苏联的乌拉尔重机厂等, 主要采用半热锻马杠扩孔法制造发电机容量在800MW以下的护环。1960年苏联采用了楔扩工艺, 1984年以后应用液压胀形强化制造护环, 而至今尚不能生产Mn18-Cr18材质的护环。屈服强度在1000MPa以上的护环, 苏联采用电渣重熔钢。

6. 奥地利鲍勃公司 (Böhler) 的护环生产

护环材质该公司采用的是UM8钢, 其化学成分(%): C 0.45~0.5, Mn 17.0~19.0, Si 0.30~0.40, Cr 5.0~5.5, $P \leq 0.04$, $S \leq 0.03$ 。采用多级冲头扩张变形的强化方式, 每级冲头工作直径相差20~25mm。冷扩(或预热至50~60℃)8~12次。所生产护环, 其外径最大可达1500mm, $\sigma_{0.2}$ 为900MPa。

7. 美国的护环制造情况

美国的护环用钢主要有0.5C18Mn5Cr和0.7C9Mn6Ni4Cr冷变形强化钢。强化方式有: 538~704℃半热锻强化、球面模具冷扩孔和爆炸胀形强化等。其中采用爆炸强化护环尺寸可以达到: 外径1524mm, 内径1300mm, $\sigma_{0.2}$ 为1500MPa。但是由于护环制造技术难度大, 所以从七十年代开始, 美国的护环主要依靠进口。

三、国内护环生产情况

我国于1958年开始试制护环, 从1960年开始生产护环到现在, 200MW以下的护环已能稳定生产。所制造的300MW、600MW护环质量已达到或超过美国西屋公司标准。我国各重机厂护环生产情况见表5。目前, 我国已普遍采用液压胀形强化和楔块扩孔工艺, 这两种工艺已是目前成熟的生产技术。

我国高等院校和研究院所, 对于我国护环攻关的科研工作, 作出了卓有成效的贡

献。如: 上海材料研究所在高强度钢护环材料及检测技术方面; 上海交大在楔块扩孔技术的开发方面; 哈尔滨工业大学在奥氏体护环用钢的强化机理和锤上冷锻小型护环的研究以及断裂力学的分析方面; 北京钢铁学院在金相微观分析护环质量方面; 东北重机学院和太原重机学院从事的护环各种强化技术及各项关键技术的开发与研究等科研项目, 都为我国电站锻件国产化作出了重大的贡献。

四、护环的生产技术

1. 护环生产技术的關鍵

采用变形强化法生产护环的工艺流程如图4所示。

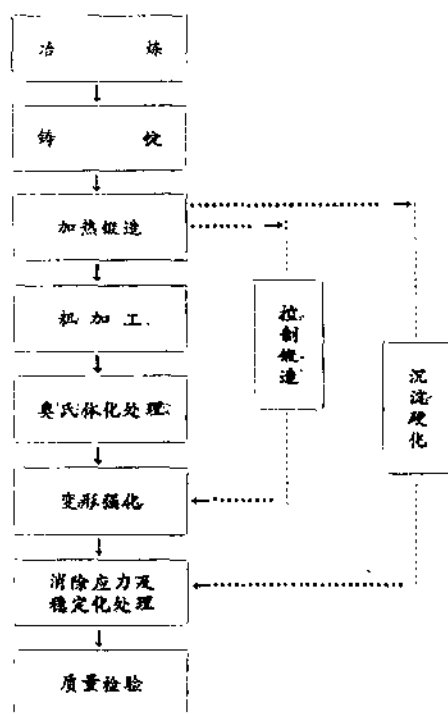


图4 护环生产工艺流程

护环生产的技术关键主要应控制好以下几个方面:

(1) 冶炼: 如果用普通电炉冶炼, 关键是提高钢水的纯洁度, 保证较高的脱碳速

度与严格的出钢温度。应严格化学成分, 控制杂质和微量元素以及氢气的含量。对于 $\sigma_{0.2} > 1000 \text{ MPa}$ 的护环, 日本室兰厂认为采用电渣重熔会大大提高护环钢的质量。电渣重熔钢除了具有纯净度好、结晶结构合理、晶粒较均匀等优点外, 其工艺塑性良好, 对冷变形强化有利。

(2) 浇注: 应使铸锭获得良好的结晶结构, 减少偏析和提高钢锭表面质量。为此可采用保护浇注和真空浇注等。日本室兰厂还应用旋转浇注的铸锭技术。现在正在研制电渣重熔铸造空心环坯加上扩挤变形制造供冷变形强化的环坯。

(3) 热锻: 护环钢热锻的主要问题是开裂、可锻性不好、晶粒粗化和不均匀以及碳化物不能充分固溶等。按常规锻造工艺, 应在高温下冲孔以改善应力状态, 并快速均

匀扩孔。护环毛坯现在多要经过奥氏体化处理(控制锻造除外)。奥地利鲍勒公司认为, 850°C 不要保温, 并在粗加工前和后进行两次奥氏体化处理。以 $25 \sim 50^\circ\text{C/h}$ 升温至 1050°C 保温4h后水冷, 壁厚每增加15mm则保温时间增加1h, 以免在碳化物析出较快的温度($600 \sim 900^\circ\text{C}$)时, 碳化物在晶界聚集。采用控制锻造技术(控制热锻毛坯时的变形温度、变形速度、应力状态、变形分布以及冷却速度)这一护环热锻新工艺, 较之传统工艺的质量好, 且周期短。

护环制坯除用锻造方法外, 还可采用环轧、挤压及胎模锻方法。随着空心钢锭生产技术和电渣重熔钢质量的提高, 以及结晶器设计制造水平的提高与进步, 采用电渣重熔铸空心环坯, 再经均匀塑性变形制坯的方法也是可能的。

表6 无磁护环钢的化学成分(%)

钢 号	采 用 大致年份	护环制造方法	化 学 成 分							
			C	Si	Mn	Cr	Ni	V	N	Fe
8Mn8Ni4Cr	1920	半热锻或冷扩	0.5	0.4	7.5	4.0	8.5	—	—	其余
18Mn4Cr	1928	半热锻或冷扩	0.5	0.4	18.0	4.0	—	—	—	其余
18Mn5CrV	1954	冷 扩	0.5	0.8	18.0	5.0	—	0.1	—	其余
18Mn5CrVN	1967	冷 扩	0.65	0.75	19.0	6.2	1.5	0.1	0.14	其余
18Mn18Cr	1978	冷 扩	0.1	0.3	18.5	18.5	—	—	0.1	其余

表7 无磁高强合金材料*的化学成分(%)及特性

合金名称	Fe*	C	Mn	Si	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Ni	V	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
镍基合金	8.0 ~11.0	0.015 ~0.08	<0.4	<0.25	13.0 ~17.0	2.5 ~3.5	2.4 ~3.8	2.75 ~3.80	0.1~0.3	其余	(B) 0.003 ~0.01	1241
铁基合金	—	—	—	—	3.0	0.3	0.5	2.5	1.0	5.0	0.018	1379
硬化合金	—	0.55	18.8	—	8.2	3.03	—	—	—	—	0.95	—
硬化合金	—	—	—	—	5.0	1.0	(Ta) 3.0	3.0	—	34.5	—	—
EPRIT	34.5	—	—	—	3.0	0.3	(Ta) 0.5	3.0	1.0	5.0	0.01	—

* 硬化方式均为沉淀硬化

(4) 护环的材料, 强化工艺和探伤仍是国内外在护环生产中注意的中心课题。

2. 护环用钢及合金材料

制造汽轮发电机护环的材料, 目前主要是高强度无磁钢(见表6和表7), 包括应用范围最宽、应用历史最长的变形强化用钢和时效沉淀硬化钢等。沉淀硬化型合金材料, 具有强度高($\sigma_{0.2}$ 达1379MPa)、耐

应力腐蚀的优点, 但目前应用还不多。

德国克虏伯公司在1938年以前采用的是Mn8Ni8Cr4钢, 1954年后改用Mn18Cr5钢。五十年代, 日本室兰厂在护环事故中证明Mn8Ni8Cr4钢的抗应力腐蚀性能差, 而后采用Mn18Cr4钢。日本室兰厂的护环用钢见表8。几种国内、国外护环用钢见表9。

表8 日本室兰厂护环尺寸、用钢及性能

钢 号	护 环 制造方法	护 环 尺 寸 (mm)			$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_b (MPa)	δ (%)	ψ (%)
		外 径	内 径	高				
12Mn18CrN	冷 扩	1164	972	850	1320	1372	19.6	49.2
18Mn5CrMoV (Mo3.0%, V0.8%)	冷扩并 时效处理	1199	985	872	1368	1411	24.9	43.5
18Mn5Cr	冷 扩	1136	944	876	1238	1354	24.3	40.6

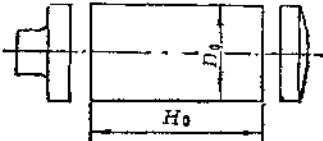
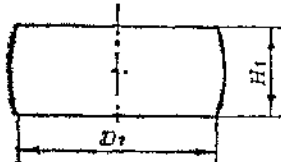
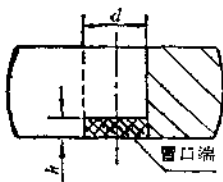
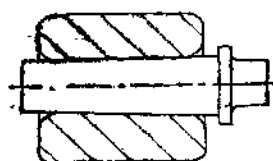
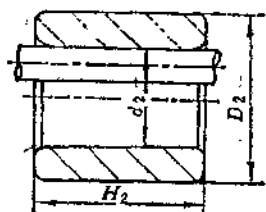
表9 几种国内外用钢的化学成分(%)

钢 号	国 别	强化类型	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	W	N	V	其他
50Mn18Cr4	中国	变形强化	0.4~ 0.6	17.0~ 19.0	0.3~ 0.8	3.0~ 5.0	—	≤0.05	≤0.08	—	—	—	—
50Mn18CrN	中国	变形强化	0.4~ 0.6	17.0~ 19.0	0.3~ 0.8	3.0~ 5.0	—	≤0.025	≤0.03	—	0.05~ 0.12	—	—
50Mn18Cr4WN	中国	变形强化	0.4~ 0.6	17.0~ 19.0	0.3~ 0.8	3.0~ 5.0	—	≤0.025	≤0.03	0.7~ 1.2	0.08~ 1.2	—	—
50Mn18Cr4V	中国	沉淀硬化	0.55	19.0~ 20.0	0.74	4.0~ 5.0	—	<0.01	<0.07	—	—	1.4~ 1.9	Re 0.1~0.2
Mn8-Ni8	美国	变形强化	0.4~ 0.75	6.0~ 10.0	0.2~ 0.65	3.5~ 6.0	6.0~ 10.0	≤0.045	≤0.05	—	—	—	—
Mn18-Cr5	美国	变形强化	0.4~ 0.6	16.0~ 20.0	0.2~ 0.65	4.0~ 6.0	≤2.0	≤0.025	≤0.08	≤0.50	—	—	Mo ≤0.50
Mn18-Cr18	日本	变形强化	≤0.10	18.0~ 20.0	≤0.8	17.5~ 19.5	—	≤0.015	≤0.05	—	0.4~ 0.6	—	Al ≤0.015
X40MnCr18	东德	变形强化	0.3~ 0.5	17.0~ 19.0	0.3~ 0.8	3.0~ 5.0	—	≤0.03	<0.06	—	0.08~ 0.12	—	—
UKR-N	西德	变形强化	0.50	19.0	0.60	4.50	≤1.0	—	—	—	0.30	0.10	—
ЭИ503	苏联	变形强化	0.58~ 0.71	7.9~ 9.5	<0.5	3.0~ 4.0	7.5~ 9.0	<0.03	<0.04	0.5~ 1.0	—	—	—
No7无磁钢	日本	变形强化	0.60~ 0.75	8.0~ 9.5	<0.7	3.5~ 5.0	8.0~ 9.0	<0.03	<0.06	—	—	—	—
NMF-3	法国	变形强化	0.4~ 0.6	17.0~ 20.0	0.7~ 1.0	3.0~ 5.0	—	<0.03	<0.05	<0.1	0.08~ 0.13	—	—

3. 护环制坯

护环坯的热锻工艺要点见表10。

表10 护环毛坯的热锻工艺要点

火次	温度(℃)	工 序	变 形 简 图	说 明
I	1200~850	(1) 压铅把 (2) 倒 棱 (3) 预提长 (4) 下 料		① 倒棱压下量30~50mm ② 预拔长锻比 ≥ 1.4 ③ $H_0/D_0 < 2.5$ ④ 切口整齐, 无毛刺
II	1200~850	(5) 锻粗至 H_1		锻粗比 $H_0/H_1 = 2 \sim 3.5$
III	1200~900	(6) 冲孔d		① $d < 450\text{mm}$ 实心双面冲孔 $d \geq 450\text{mm}$ 空心冲孔 ② $D_1/d = 2.3 \sim 2.5$ ③ 内孔不得有毛刺, 连皮 ④ 冲脱 $h = 50 \sim 100\text{mm}$
IV	1200~850	(7) 芯棒拔长		① 用上、下圆砧或上、下V型砧 ② 拔长比 $< 50\%$ ③ 防止热裂 ④ 转动均匀
V	1200~850	(8) 芯棒扩孔		① 壁厚均匀, 余量均匀 ② 防止热裂 ③ 锻后入水冷却

4. 护环的强化技术

护环的强化方式很多,大致情况如图5。

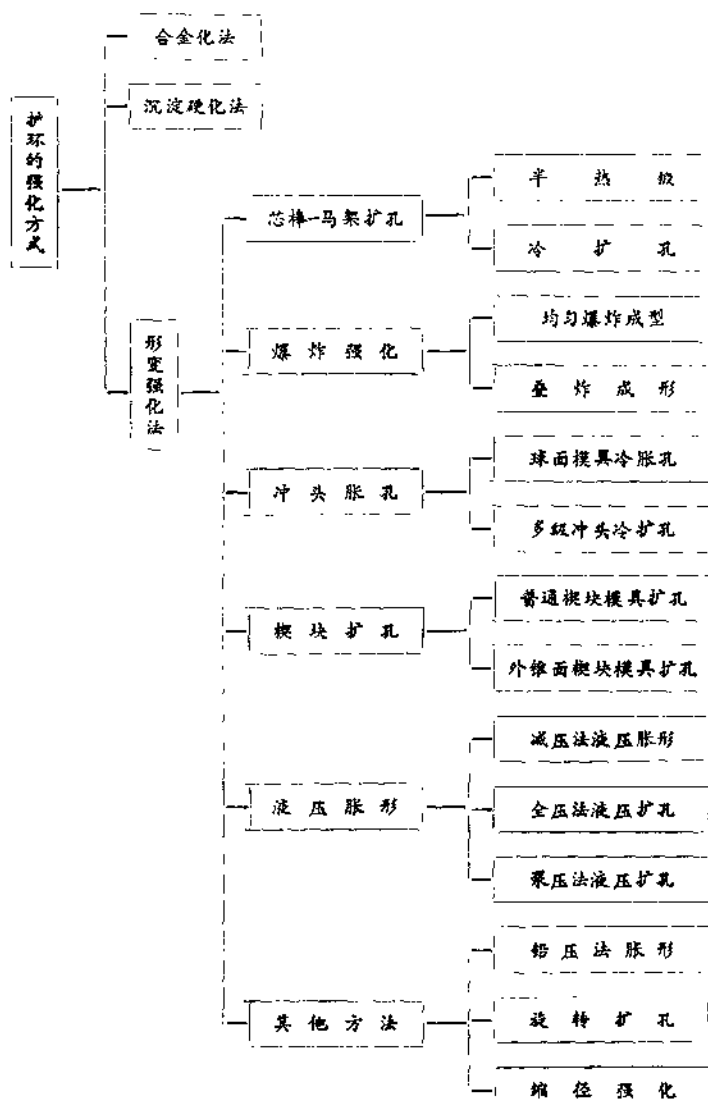


图5 护环的强化方式

目前应用最多的是液压胀形与楔块扩孔两种方法。

(1) 液压胀形强化

全液压胀形(不减压液压胀形法)的示意图如图6所示。减压法胀形如图7所示,减压法胀形是靠空心冲头增压使环坯胀形,并采用减力导柱,以减少水压机压力。七十

年代后期国外(如日本和苏联)研制了一种以高压泵为工作液压力源的泵压法扩张强化环坯的装置(见图8)。为了扩大上述装置的使用范围,又将导柱做成组合式,当用小吨位压力机扩张大直径护环时,则可更新较大直径的导柱,以减小密封压力机的压力。为了获得沿护环高度均匀扩孔成形,在护环

坯与冲头之间加放金属密封圈，外端头加放支承环，以起到阻力环的作用。1984年A.Г.Торакен发明了（专利SU1087229）在毛坯端部接一段阻力环带，其高度（ H ）相当于护环壁厚（ S ）的15~50%，且呈50~70°的内锥角（如图9所示），旨在使环坯沿高度均匀变形。

为使环坯的扩张更为精确，普洛捷恩科发明了在水压机上强化环坯的装置（见图10）。该装置也是将其放在水压机上压紧，再靠环形柱塞密封，而压力则由限位器调节，并由导管输入高压液进行环坯扩孔。

另外，还有采用高压泵打水使环坯在容器内缩径变形的环坯外压缩径装置（见图11）。用这种装置制造出的环坯应力状态和表面质量较好。图12为一液压复合成形工艺，在压机每次行程内，可以同时完成两个毛坯（一胀一缩）的变形工作，这些试验为护环环坯的变形开拓了新思路。

护环液压胀形变形强化时，护环的变形程度与屈服强度的关系如图13所示。

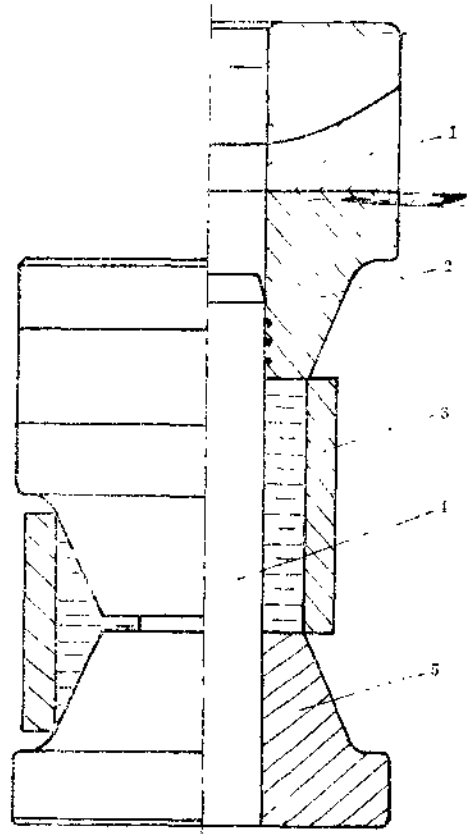


图7 减压法液压胀形示意图

1—防偏球面垫 2—上冲头 3—环坯
4—减力导柱 5—下冲头

（2）楔块扩孔强化

在日本、西德和我国的二重厂、广重厂已采用楔块扩孔强化方法生产护环。我国原采用工作锥角为8°、楔块数为12只的单冲头平底座普通楔扩模具（见图14）制造200MW汽轮发电机护环。二重厂引进日本室兰厂的楔扩模具（工作锥角为4°左右）及其技术后，已能成功地生产600MW汽轮发电机护环，护环质量达到了美国西屋标准。

外锥面楔块扩孔模具（见图15），具有大幅度省力的优点，但环坯逐环变形不很均匀。

护环楔块扩孔强化时，护环的变形程度与屈服强度的关系如图16所示。

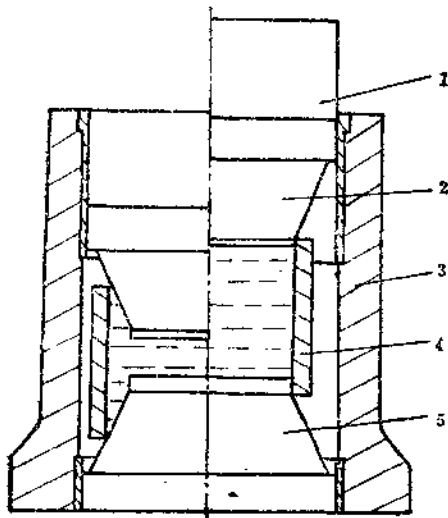


图6 全液压胀形示意图

1—上垫 2—上冲头 3—外导套
4—护环坯 5—下冲头

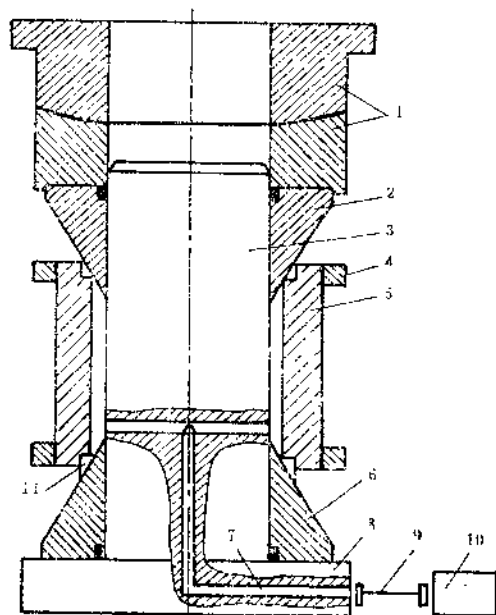


图8 泵压法扩胀环坯装置

- 1—球面垫 2—上密封锥体 3—导柱
4—支承环 5—环坯 6—下密封锥体
7、9—导管 8—底座 10—高压泵
11—金属密封圈

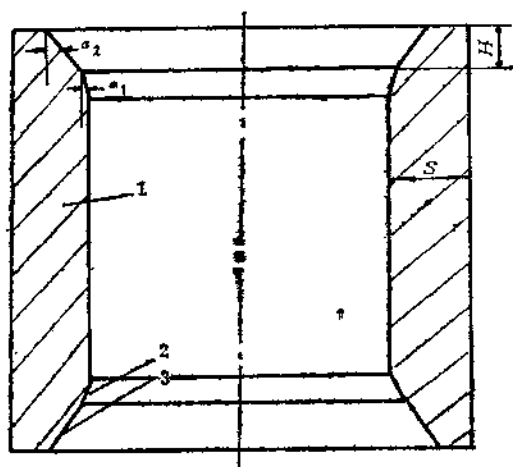


图9 加厚阻力环及环坯示意图

- 1—环坯 2—加厚阻力环 3—锥形带

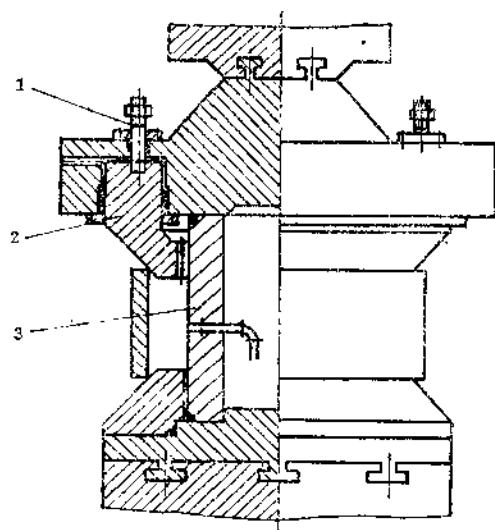


图10 在压力机上强化环坯装置

- 1—限位器 2—密封柱塞 3—导柱

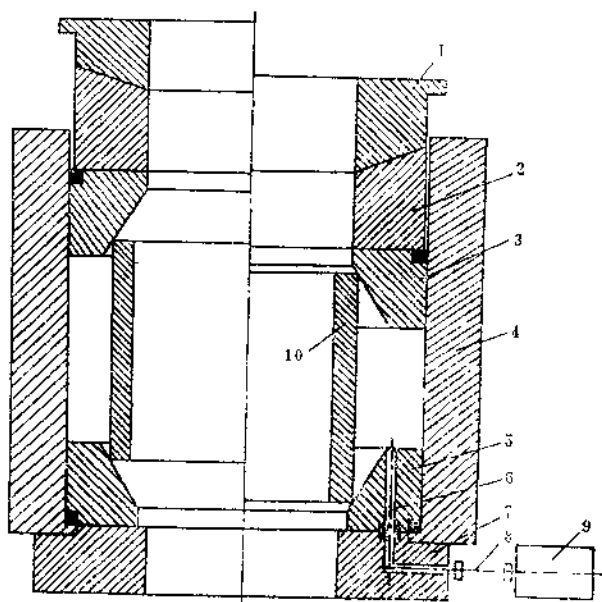


图11 环坯液压缩径装置

- 1—凸球面垫 2—凹球面垫 3—上冲头
4—容器 5—下冲头 6、8—导管
7—底座 9—高压泵 10—环坯

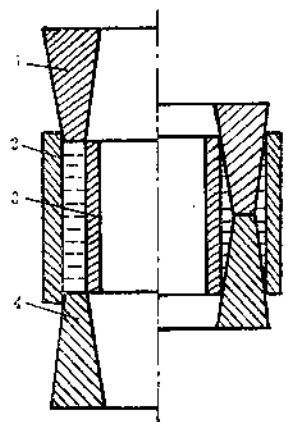


图12 液压复合成形装置

1—上冲头 2—膨胀外环
3—缩径内环 4—下冲头

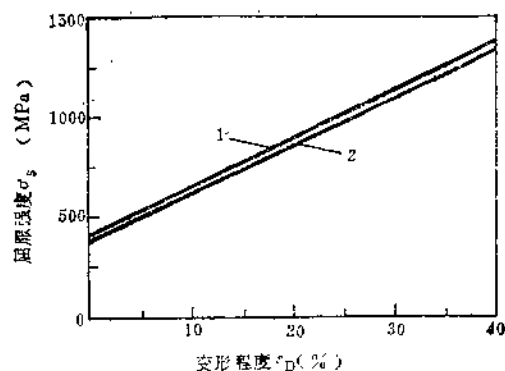


图13 护环液压胀形变形程度与护环屈服强度的关系

1—50Mn18Cr4WN钢 2—50Mn18Cr4钢

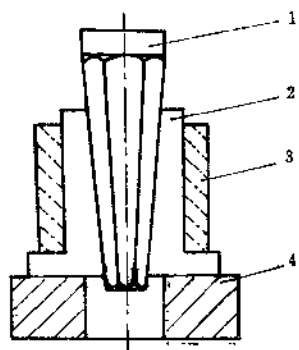


图14 普通楔扩模具

1—冲头 2—楔块 3—环坯 4—底座

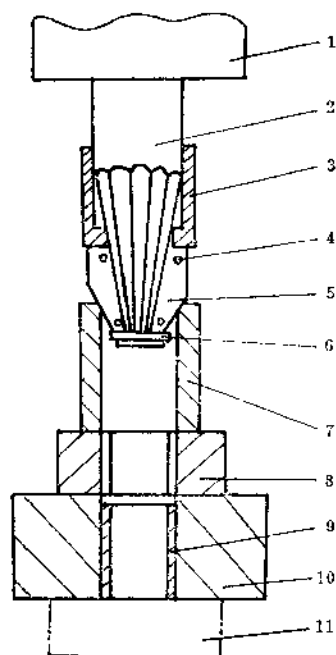


图15 外锥面楔扩模具

1、11—上、下工作台 2—冲头 3—限位环
4—弹性件 5—外锥面楔块 6—挡板
7—环坯 8—底座 9—顶环 10—底座

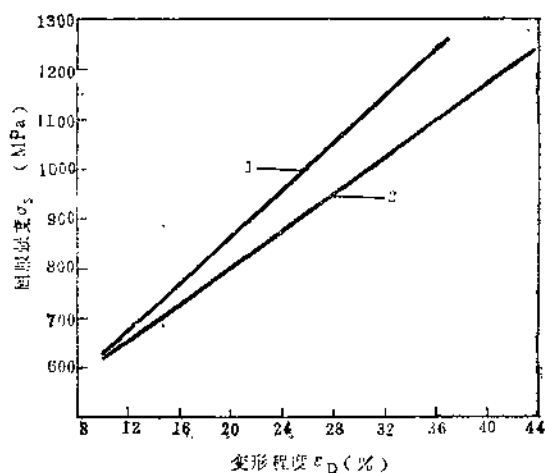


图16 护环楔扩时变形程度与护环屈服强度的关系

1—室温下扩孔 2—预热100~200℃扩孔

(3) 其他变形强化工艺研究

美国曾应用过爆炸变形强化工艺。我国的上重、太重、北重、二重以及洛矿等一些工厂在六十至七十年代也曾使用爆炸变形强化工艺制造了一批小型护环，并装机运行。其中较佳工艺方案有均匀爆炸胀形工艺，其装置如图17所示。由于采用特殊形线的药包，抵消了弱界面的能量损失，所以能使环坯沿高度均匀胀形。从太重厂的生产实践证明，护环的残余应力较小。

北重厂采用的叠爆装置（见图18），用三炮就能胀成四只护环坯，而且护环的残余应力较小。

美国应用过球面模具冷胀孔的方法，但我国在应用过程中发现，胀形时有设备振动大、残余应力大等问题。奥地利曾用不同直径的冲子的多级扩孔方法。苏联中央机器制

造科研所试验过铅压成形方法。我国太原重机学院研究了改进型铅内压成形技术、在离心力场内变形技术、外锥面楔扩技术以及校形技术等。

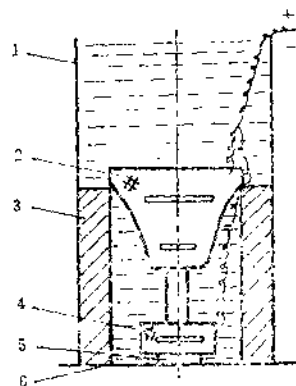


图17 均匀胀形爆炸装置示意图
1—水套 2—特殊形线炸药包 3—环坯
4—下药包 5—下垫 6—底板

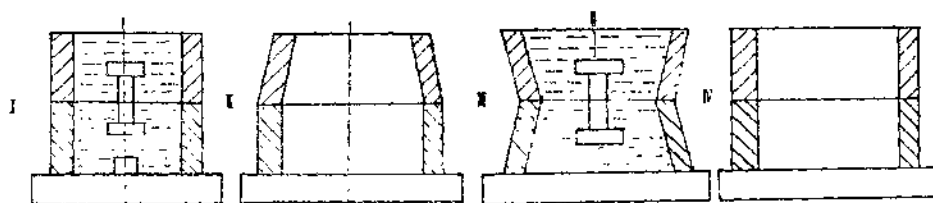


图18 叠爆装置示意图

I—初始位置 II—下环均匀成形，上环喇叭变形 III—两只喇叭形上环叠放 IV—两只上环均匀成形終了

五、讨论

护环的晶粒度不均匀是目前护环锻件的重要质量问题之一，也是国产护环与进口护环的差距之一。由于护环用Mn-Cr系和Mn-Cr-Ni系奥氏体钢都是本质粗粒钢，美国ASTM标准规定为1~3级，西屋公司希望优于3级。日本制钢所将晶粒度作为质量控制的手段。热锻是影响奥氏体护环钢晶粒度的关键工序，而变形温度、变形程度的分布和应力状态又是该工序中的关键影响因素。

在一般的护环热锻工序中，最后一火芯棒扩孔的锻造比及锻造温度很重要。表11为北京重机厂热锻护环坯料最后一火的锻造比。按照规定，只要最小锻比大于1.5，即可加热至1200℃。

晶粒度对最后冷变形强化效果有明显的影晌。同样交货尺寸的护环坯，晶粒越粗则要求有较大的变形量才能达到所要求的性能。同时，细晶粒较粗晶粒具有更好的冷变形能力，具体参数如图19所示。

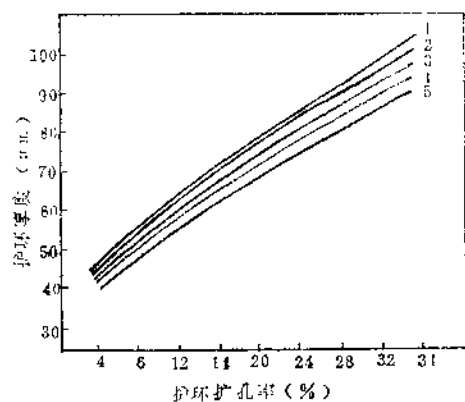


图19 晶粒大小对冷变形扩孔率的影响

晶粒度级别 (ASTM):

1—4级 2—3级 3—2级 4—1级

5—大于1级

另外, 晶粒度不均匀 (尤其是区域性不均匀), 冷变形强化时往往会引起不均匀变

表11 北京重机厂热锻护环坯料
最后一火的锻造比

护环容量 (MW)	拔长锻造比	扩孔锻造比	总锻造比
6	2.2	1.22	2.6
12	1.6	—	1.6
25	1.85	—	1.85
50	1.75	1.26	2.2
100	1.42	1.36	1.93

形, 从而导致内部残余应力影响产品质量。

护环强化后的稳定化处理是很必要的, 对此, 国外有关标准中有明确的规定。

责任编辑 赵晓东

电渣重熔的大型化发展

——近十年世界大型电渣重熔概况

上海重型机器厂 向大林 叶允尚

【提要】 本文从历史沿革和技术优势出发,介绍了电渣重熔法炼钢的大型化发展,特别是最近十多年世界大型电渣重熔的概况,并对160t电渣炉和200t级电渣炉作了重要介绍,从技术和经济上分析了电渣钢大锻件的特点。指出,电渣重熔是生产优质大锻件有竞争力的先进技术,应该加深认识,引起重视。

一、历史沿革

电渣重熔是50年代末、60年代初才发展起来的一种新型炼钢法。1892年,俄国工程师和发明家 Н. Г. Славянов 在他的著作中最早记述了电渣过程的原理。1935年,美国人 R. K. Hopkins 首次进行了开拓性的工作,他以空心管作自耗电极,管中填以粒状合金,在铜制水冷模内的直流电渣(但美国人误认为是电弧)下熔炼和凝固,炼出合金钢,并于1939年以霍普斯金法(Hopkins Process)命名获得美国专利。后来还出现了采用实心自耗电极并具有一些其它特点的专利。50年代,苏联巴顿电焊研究所由电渣焊焊缝金属质量优于母材得到启示,把电渣焊的相似过程移植到冶金领域,1958年5月,在德聂伯特殊钢厂建立了第一台工业电渣炉(P909型),生产直径500mm,重500kg的电渣锭。60年代中叶,很多国家包括一些工业发达国家才刚刚开始起步研究电渣重熔技术,世界电渣炉的容量还仅仅在几吨范围,1965年,我国上海重机厂就已建成了一座100t电渣炉,开启了电渣重熔大型化的先河。这座当时世界上最大的电渣炉,其结晶器直径为1500和2100mm两种,由3节迭合而成固定式长结晶器。自耗电极由原有1t小电弧炉

生产。3根自耗电极同时重熔,由1台3相变压器向3根电极供电。电极采用螺纹连接,边连接边送进,接电极时无需停电,熔炼过程照常进行,可生产50~100t的大型电渣锭。

100t电渣炉把当时世界上的电渣锭重量提高了两个数量级,解决了上海重机厂当时生产大锻件缺乏大钢锭的困难,为制造我国当时最大的轧机——2300mm冷轧板机和 $\phi 1600$ mm支承辊等做出了积极贡献。

二、电渣重熔的大型化发展趋势

1. 概况

能源工程、石油化工等行业都需优质大锻件。特别是近30年以来,电力消耗急剧增长,汽轮发电机组单机容量迅速扩大,使得用以生产大锻件的钢锭重量不断增加,锻件质量要求也愈来愈严格。目前,汽轮发电机组的单机容量已增加到1300MW,而1300MW机组的低压转子通常需用重达600t的巨型钢锭来制造。自重很大的转子在高温、高压和高速运转条件下承受着复杂的应力,要求在任何断面都应具有高度的化学和物理的均匀性,优良的抗断裂性能,以致超声波检验的起始灵敏度现在已提高到 $\phi 1.5$ mm当量。