

国外真空自耗熔炼设备及生产情况

(内部资料)

上海市钢铁研究所

上海科学技术情报研究所

一九六五年六月

內 容 提 要

本文根据国外公开文献的报导,較詳細地敘述了真空自耗电弧熔炼方法的全貌。前几节主要介紹真空自耗电弧熔炼的特征和对鋼质量的影响,特別談到目前采用真空自耗电弧熔炼的鋼种以及世界各国已經建成的真空自耗电熔炼设备能力,后几节以較长的篇幅着重地敘述真空自耗电弧熔炼设备的类型,并根据工艺要求分析了各种类型设备的优缺点。

目 录

一、前言	(1)
二、真空自耗电弧炉的发展过程	(1)
三、真空自耗电弧炉的特点和用途以及生产的鋼种	(5)
四、真空自耗电弧炉所熔炼鋼的质量	(8)
五、真空自耗电弧炉的构造型式	(18)
六、真空系统	(22)
七、水冷结晶器的设计	(25)
八、真空自耗电弧炉采用的电源与电极升降自动调节系统	(28)
九、真空自耗电弧炉的遙控设备	(31)
十、真空自耗电弧炉的爆炸和安全问题的分析	(32)

国外真空自耗熔炼设备及生产情况

陈 通 蔣承蔭

(上海市鋼鐵研究所)

一、前 言

真空冶炼是改善钢质量的一种有效办法,虽然早在 1839 年就已知道利用真空冶炼可以改进钢的质量,但是因为真空冶炼设备在技术上没有彻底解决,一直没有能达到工业性生产规模。自第二次世界大战以来,因为航空工业的发展对耐热钢与精密合金提出了更高的要求,促使真空冶炼得到飞速的发展而达到工业性生产规模。目前在生产上应用的真空冶炼设备主要可分为两种类型:

- (1) 真空感应法冶炼; (2) 真空自耗电弧法冶炼。

真空感应法可以在 1×10^{-3} 毫米汞柱以下的真空度内进行冶炼与浇注,产品质量很高。目前世界上大型真空感应炉已能达到 30 吨容量^[1],但一般生产上应用的设备容量大多在 100~1000 公斤范围内。真空感应冶炼能够降低钢中气体含量与夹杂,钢锭成份可以由计算配料进行严格的控制,冶炼工艺过程接近一般冶炼工艺容易掌握;但是它所浇注的钢锭组织结构并没有得到改善,仍具有中心疏松、偏析、缩孔等缺陷,使大型钢锭的质量得不到保证。同时,由于炉衬材料的影响和炉衬的放气未能解决,在一定程度上影响钢的质量。

真空自耗电弧法是目前世界上迅速发展的一种新型炼钢方法,真空自耗电弧法不但可以有效地降低气体含量与夹杂,而且因为冶炼过程中不接触耐火材料,熔化温度高,凝固过程是在水冷结晶器内进行,因此组织紧密,可以避免大型钢锭的偏析,由于这一特点使这种方法目前在世界上用作生产高强度钢、滚珠钢、精密合金和耐热合金的主要冶炼设备。利用真空自耗电弧法冶炼以后的钢,不但在机械性能和电磁性能方面有很多提高,同时对耐热合金的高温性能(持久、蠕变)可以提高 100% 左右。但是真空自耗电弧熔炼需将原料预先铸成电极,增加了操作工序;铸锭的化学成份决定于原料电极的化学成份,难以临时调整,这些缺点一时尚难克服。

为了进一步提高金属的质量,已经发展了一种真空感应-真空自耗双联法,这种方法所制成的材料,性能比用一般冶炼方法所制电极再经过真空自耗的好得多。

另一方面,随着大容量大功率设备的发展,所需的大型真空钢锭也愈来愈多,小容量真空感应炉已不能适应这种要求,因此最近又发展一种真空精炼法^[1]。这种方法实质上是大型的真空感应炉,它采用电弧炉熔炼的钢液,按真空脱气处理注入放置在真空室内的大容量感应炉中,经过真空熔炼浇注成钢锭,这些钢锭可以直接使用,也可以在真空自耗电弧炉中进行再熔炼,这样熔炼时间和成本都可以大大地降低。

二、真空自耗电弧炉的发展过程^[2,3]

真空自耗电弧法冶炼最先应用在难熔金属的冶炼方面,但是由于在使用过程中发现它

操作简单,生产成本低,因此近七年在黑色冶金方面亦得到了飞速的发展。最早利用真空电弧冶炼金属是 Robert Hare,他在 1839 年就已进行真空电弧熔解白金的试验;随后 W. von Bolten 于 1903 年在西门子公司也进行了真空自耗电极熔炼钼的试验工作,这些试验都是在试验室内进行的;直到 1939 年由于钽的要求,对工业性生产的自耗电弧炉研究起了促进作用,W. J. Kroll 进行了自耗电弧法熔炼钽的实验;以后逐渐发展至 1949 年,具有现代型式的自耗炉开始应用;1953 年利用自耗炉熔炼钽等活性金属进入大规模生产;1957 年开始使用真空自耗电弧炉熔炼特殊钢,使得黑色冶金方面采用的真空自耗电弧炉迅速地发展。目前世界上容量在 0.5 吨以上的真空自耗电弧炉已有 200 台以上投入生产,其年产量正迅速地增长着。

真空自耗电弧炉在炉容量上也在急速地上升,目前美国最大炉容量为 200 吨,常用的炉容量约为 5~10 吨,正在研究建造的真空自耗电弧炉最大直径为 2.5 米^[4]。

除了美国以外,英国、西德、日本、瑞典都在迅速的发展。据报导,英国有五个以上的大型工厂在生产,目前已投产的最大真空自耗电弧炉是 Hadfields 公司 East Hecla 工厂的 10 吨炉^[5],该炉专门生产供轧制极薄钢带的轧辊用钢。西德有六个厂以上投入生产,最大的真空自耗电弧炉制造厂 Heraeus 至 1964 年已生产工业性设备 200 多台,是目前世界上最大的一个自耗炉制造厂。日本在 1958 年以后也迅速地发展真空自耗炉,并且与西德进行技术协作,目前在日本至少有十个钢厂已建有真空自耗炉,单神户制钢厂就有设备十余台,容量大多为 2 吨,日本已发表的最大设备为 12 吨炉。苏联资料发表正在应用的最大真空自耗电弧炉结晶器直径为 880 毫米,锭重 7.8 吨,设备电流强度为 28,000 安,正在设计的结晶器直径达 1270 毫米,电流强度达 45,000 安,锭重达 30 吨以上^[6]。

表 1 是到 1963 年为止已发表资料中世界上主要国家真空自耗电弧炉设备及生产情况的统计(其中还不包括 100 公斤以下的试验设备,但是由于资料有限,不可能非常完整)。

表 1 真空自耗电弧熔炼设备能力的统计(1963 年)

公 司 名 称	炉 数 (台)	年产量 (吨)	最大铸锭 直 径 (毫米)	最大铸锭 重 量 (公斤)	生 产 品 种	产 品 形 式
美 国						
Allegheny Ludlum Steel Corp.	2	410	400	1,000	铸	棒、丝、带、板、挤、管
	8	11,500	710	9,000	低合、电、工	棒、丝、带、板、挤、管
	1	—	1,250	27,000	特钢	棒、丝、带、板、挤、管
The Carborundum Metals Co.	2	550	440	1,100	铸	棒、丝、带、板、挤
Carpenter Steel Co.	2	2,800	508	2,500	低合、电、工	棒、丝、带
Climax Molybdenum Co.	2	340	330	700	钼	棒、板、挤
Columbium-National	1	—	—	230	铸	—
Crucible Steel Co. of America	3	5,800	814	10,000	低合、电、工	棒、丝、带、板
Du Pont de Nemours	—	—	305	700	特钢	—
Firth Sterling Co.	3 加电渣式	3,800	500	3,600	低合、电、工	棒、丝、卷

(续表)

公 司 名 称	炉 数 (台)	年产量 (吨)	最大錠直 径 (毫米)	最大錠重 (公斤)	生 产 品 种	产 品 形 式
Harvey Aluminium Co.	8 4	1,650	400 600	1,300 2,000	鈦 鋁	棒、板 棒、板
Kawecki Chemical	1		70~100	长400 毫米	鋁	—
Latrobe Steel Co.	1	2,715	508	4,000	低合、工、鋁、热	棒
Midvale Heppenstall Co.	2 1	5,500	550 1,016 1,250	4,200 25,000 40,000	低合、鋁、热 特鋼	棒、板
National Lead Co.	2	5	200	120 (凝壳式)	—	—
National Research Co.	1	—	70~100	—	鋁	—
Nuclear Metals Inc.	1	5	202	250	低合、工、电	挤
Oregon Metallurgical Corp.	4	1,100 1,300	500	1,800	鈦 鋁	
Reactive Metals Inc. (Mallory, Sharon)	9 3	5,500 1,150	760	4,500 6,800	鈦 鋁	棒、絲、带、板 棒、絲、带、板
Republic Steel Corp.	6 4	1,000 16,400	600 814	1,800 10,000	鈦 低合、热、鋁	棒、带 棒、带、板
Standard Steel Works div.	1	3,600	760	14,000	低合、工、鋁、热	錠坯、鍛件
Timken Roller Bearing Co.	1	2,460	610	5,000	低合、电、工、鋁、热	棒、絲、管
Titanium Metals Corp. of Ame- rica	18	10,000	700	4,500	鈦	棒、絲、带、板、挤
Union Carbide	1	—	140	长400 毫米	—	—
Universal Cyclops Steel Corp.	1	—	1,000	15,000	特鋼	棒、絲、带、板、挤
	2	5,500	635	6,000	低合、电、工	棒、絲、带、板、挤
	2	900	400	2,500	鋁、鎢、鋁、鋁	棒、絲、带、板、挤
U. S. Steel	1	—	810	20,000	特鋼	—
Vanadium Alloys Steel Co	1	3,640	610	4,100	低合、电、工、鋁、热	棒、絲、带、板
Wah Chang Corp.	2	950	400	1,600	活性金属与难熔 金属	棒、絲、带
	2		300	1,100		
	3		200	400		
Westinghouse Electric Corp.	2	450	400	1,400	电、热	棒、带、板
	2	250	400	900		

英 国

Austen Inc.	1	650	110	—		
I. C. I. (Imperial Chemical Indus- try) 卜内門	4	3,200	508 635	2,000 5,000	鈦 鈦	
Firth Brown	2	—	680	7,000	特鋼	
Hadfield Co. East Hecla Work	1		760	10,000	特鋼	
William Jessop & Sons	2	450	500 635	1,000 5,000	鈦 特鋼	

(续表)

公 司 名 称	炉 数 (台)	年产量 (吨)	最大鑄錠 直 径 (毫米)	最大鑄錠 重 量 (公斤)	生 产 品 种	产 品 形 式
日 本						
日本スランレス	1	—	350	1,000	特钢	
日本冶金	1	—	400	3,000	特钢	
日本特殊鋼	—	—	350	1,000	特钢	
日立金属安来工場	1	—	350	1,000	特钢	
大同制鋼株式会社	—	—	280	400	特钢	
大阪特殊制鋼	1	—	350	1,200	特钢	
住友金属	1	—	305	1,000	特钢	
关东特殊制鋼	1	—	400	2,000	特钢	
	1	—	500	4,000	特钢	
关东制鋼	1	—	324	700	特钢	
特殊制鋼	1	—	640	6,800	特钢	
不二越鋼材	1	—	—	1,000	特钢	
神戸制鋼	很多	—	640	12,000	特钢	
	12	—	—	—	鉄	
住友輕金属	—	—	—	—	鉄	
古河电工	—	—	—	—	鉄	
其 他						
Degussa Metal Work (西德)	—	—	610	5,000	特钢	
Deutsche Edelstahl Work (西德)	—	—	250	500	特钢	
	1	—	660	6,000	特钢	
Friedrich Krupp (西德)	—	—	406	2,000	特钢	
Henningsdorf (西德)	—	—	305	700	特钢	
W. C. Heraeus (西德)	2	—	305	1,000	特钢	
Verrinichte Deutsche Metall Werke (西德)	—	—	406	1,000	特钢	
Centre d'Etude Nucleaire (法)	—	—	356	1,000	特钢	
Pechiney (法)	1	—	508	4,000	特钢	
Société Métallurgique d'Imphy (法)	1	—	508	3,000	特钢	
Ugine (法)	1	—	406	2,000	特钢	
Bofors A. B (瑞典)	—	3,200	660	6,000	特钢	
Sandvikans Janverks (瑞典)	—	—	305	700	特钢	
Gebr Böhler (奥)	—	—	305	700	特钢	
Montecatini (意)	—	—	305	700	特钢	

表注：低合——低合金鋼；电——电气及磁性材料；工——工具鋼；鑄——不鑄鋼；热——耐熱鋼；特钢——特殊鋼，包括上述各鋼种；棒——棒材；絲——絲材；帶——帶材；板——板材；挤——挤壓材；管——无縫管材；卷——成卷鋼帶。

三、真空自耗电弧炉的特点和用途以及生产的钢种

真空自耗电弧炉在短短的几年中能在产量上迅速的赶上真空感应炉是和它的许多特点分不开的,真空自耗电弧炉主要的特点有下列几项:

- (1) 采用电弧作为热源可以熔炼高温金属;
- (2) 在炉身中没有耐火材料,可以彻底免除耐火材料夹杂与沾污;
- (3) 在水冷铜结晶器中进行熔解,并且自下而上逐层凝固使组织得到根本改善,没有中心疏松的缺陷(图1);

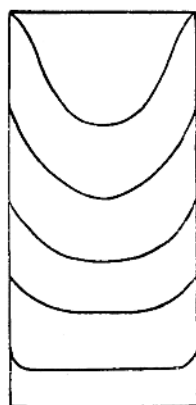
(4) 钢锭头部可以充分加热,完全避免缩空;

(5) 熔解和凝固可以在真空中进行,也可以在惰性气体中进行;

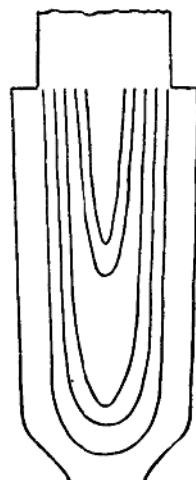
(6) 自耗电极在熔化过程中呈滴状熔化,由于电弧温度高达 5000°K ,并在真空中进行熔解,所以可以使部分非金属夹杂物分解挥发而减少。

由此提高了真空自耗电弧炉的产品质量,主要表现在下列几方面:

- (1) 纯度提高,减少非金属夹杂物;
- (2) 气体含量降低,特别是含氧量减少(见表2);



真空自耗



一般浇注

图1 真空自耗钢锭与一般浇注钢锭的凝固情况

- (3) 中心疏松气孔偏析减少;
- (4) 高温热加工性能显著改善,特别对含铝、钛高的钢更显著;
- (5) 提高磁性材料的电磁性能;
- (6) 改善机械性能以及不锈钢的耐腐蚀性;
- (7) 延长滚珠钢使用寿命及工具钢的切削能力。

表2 各种熔炼方法的低合金钢及不锈钢耐热合金气体含量的比较 (Evans)^[3]

熔 炼 方 法		低合金钢 (0.25% C 镇静钢)			不锈钢及耐热合金 (铁基、镍基、钴基)		
		H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)	H ₂ (ppm)	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)
空气中熔炼	酸性平炉	1~6	50~150	50~150			
	碱性平炉	2~10	75~250	40~125			
	碱性电炉	1~20	50~125	30~500	5~10	10~200	50~600
	高频感应炉				1~10	20~250	100~700
真空熔炼	真空脱氧法	1~4	10~100	25~100	<1~5	10~100	50~300
	真空感应炉	<1	5~15	5~50	<1~2	5~125	20~200
	真空自耗电弧炉	<1~2	5~25	10~100	<1~2	10~100	20~200

目前世界各国真空自耗电弧炉主要生产滚珠轴承钢、不锈钢、耐热钢、工具钢、极薄带钢的锭坯、精密合金等。表3是采用真空自耗电弧炉熔炼以及双联法(真空感应-真空自耗)生产的各种主要钢种。

表3 各种利用真空自耗电弧法生产的钢种与化学成份

名 称	化 学 成 份 (%)				
	C	Cr	Mo	Ni	其 他
镍 基 超 合 金					
Udimet 500	0.10	19.0	4.00	余量	Ti3、Al3、Co19
M-252	0.15	19.0	9.75	余量	Co10.0、Al1.10、Ti2.50、Fe1.25、B0.06、Zr0.005
Waspaloy	0.08	19.5	4.30	余量	Co13.5、Al1.3、Ti3.1、Fe1.25
Inco 700	0.14	16.0	3.00	余量	Co30.0、Al3.1、Ti2.35、Fe1.5、B0.005、Zr0.05
Incoloy 901	0.04	13.0	6.00	42.0	Ti2.4、Fe 余量
GMR 235	0.15	16.0	5.30	余量	Al3.2、Ti2.2、Fe10.0、B0.075
GMR 235 D	0.15	15.5	5.25	余量	Al3.6、T.2.5、Fe4.25、B0.075
Hastelloy Alloy R-235	0.16	15.5	5.50	余量	Al2.0、Ti2.5、Fe10.0
Hastelloy Alloy X	0.15	22.0	9.00	45.0	W0.6、Fe 余量
D 979	0.07	14.3	3.80	45.0	W3.9、Al1.1、Ti3.9、B0.01、Fe 余量
René 41	0.09	19.0	9.75	52.5	Co11.0、Al1.65、Ti3.15、B0.005
Nimonic 80 A	0.04	20.5	—	余量	Al1.2、Ti2.4
Nimonic 90	0.08	19.0	—	余量	Co20.0、Al1.7、Ti2.7
Refractaloy 26	0.03	18.0	3.20	38.0	Al0.2、Ti2.6、Fe 余量
K-42-B	0.03	18.0	—	42.0	Co22.0、Al0.20、Ti2.1、Fe 余量
钴 基 超 合 金					
GE 1570	0.18	20.0	—	29.0	W7.3、Ti4.3、Fe1.4、Co37.5
X-40	—	23.0	—	10.0	W7.0、Co 余量
S-816	—	20.0	4.00	20.0	W12.0、Ta2.0、Ti3.8、B0.02、Co 余量
J-1650	0.20	19.0	—	27.0	W12.0、Ta2.0、Ti3.8、B0.02、Co 余量
铁 基 超 合 金					
A-286	0.06	14.8	1.30	25.5	V0.3、Ti2.0、B0.003、Fe 余量
Discaloy	0.06	13.5	3.00	26.0	Ti1.7、Fe 余量
W-545	0.05	13.5	1.50	26.0	Al0.20、Ti2.85、B0.08、Fe 余量
Unitemp 212	0.08	16.0	—	25.0	Nb0.50、Ti4.0、Al0.35、B0.07、Zr0.05、Fe 余量
M-308	0.08	14.0	4.00	33.0	Al0.25、Zr0.25、Ti2.0、W6.5、Fe 余量
合 金 工 具 钢					
AISI A-2	1.00	5.0	1.00	—	Fe 余量
AISI D-2	1.50	12.0	1.00	—	Fe 余量
AISI D-4	2.20	12.0	1.00	—	Fe 余量
AISI H-11	0.35	5.0	1.50	—	V0.40、Fe 余量
AISI H-13	0.35	5.0	8.00	—	V1.00、Fe 余量
AISI M-1	0.80	4.0	8.00	—	V1.0、W1.5、Fe 余量
AISI M-2	0.85	4.0	5.00	—	V2.0、W6.0、Fe 余量
AISI M-10	0.85	4.0	8.00	—	V2.0、Fe 余量
AISI M-50	0.80	4.0	4.25	—	V1.0、Fe 余量
AISI T-1	0.70	4.0	—	—	V1.0、W18.0、Fe 余量
AISI T-15	1.55	4.0	—	—	V5.0、W12.0、Co5.0、Fe 余量

(續表)

名 称	化 学 成 份 (%)				
	C	Cr	Mo	Ni	其 他
不 锈 鋼					
Greek Ascoloy	0.18	12.5	—	3.00	W2.75、Fe 余量
Turbine Alloy	0.20	13.0	1.00	0.75	V0.40、W1.00、Fe 余量
Armco 17-4 PH	0.07	16.5	—	4.00	Cu4.0、Nb0.35、Fe 余量
17-7 PH	0.07	17.0	—	7.00	Al1.2
15-7 Mo	0.07	15.0	2.50	7.00	Al1.2
AISI 304	≤0.08	19.0	—	10.00	Fe 余量
AISI 310	≤0.02	25.0	—	20.50	Fe 余量
AISI 316	—	17.0	2.50	12.00	
AISI 347	0.08	18.0	—	9.90	Mn1.9、Nb+Ta0.9、Fe 余量
AISI 403	≤0.15	12.5	—	—	Si≤0.50、Fe 余量

耐 热 鋼					
AISI 431	≤0.20	16.0	—	1.80	Fe 余量
AISI 440 C	1.05	17.0	0.50	—	Fe 余量
18-8 B	0.06	19.0	—	9.50	B2.15、Fe 余量
18-15 B	0.01	18.0	—	15.00	B0.80、Fe 余量

其 他					
AISI 4340	0.40	0.80	0.25	1.80	Fe 余量
AISI 6150	0.50	1.00	0.20	—	Fe 余量
AISI 9310	0.10	1.20	0.12	3.20	Fe 余量
AISI 9317	0.16	1.20	0.12	3.20	Fe 余量
AISI 51100	1.00	1.00	—	—	Fe 余量
AISI 52100	1.00	1.50	—	—	Fe 余量
Halmco	0.06	4.70	5.20	—	V0.5、Si1.1、Fe 余量
HTB-1	1.00	1.45	—	—	Al1.0、Fe 余量
TBS-600	1.00	1.40	0.30	—	Si1.0、Fe 余量
CBS-600	0.20	1.50	1.00	—	Si1.1、Fe 余量
HS-220	0.30	1.20	0.45	2.00	Si0.55、Fe 余量
HS-260	0.40	1.40	0.50	2.20	Si0.60、Fe 余量

(以上所有鋼种大部分为美国牌号)

英国經常采用真空自耗熔炼的鋼种

En 31	滾 珠 軸 承 鋼				
En 40 C	0.34	3.2	0.90	0.60	V 0.24
S 82	高 級 渗 碳 結 构 鋼				
18-4-1	0.78	4.0	—	—	W18.0、V1.0
F.V. 535	0.10	10.5	0.70	0.25	Co6.0、V0.25、Mn0.8、Nb0.40、Si0.4

日本經常采用真空自耗熔炼的鋼种

SCNM 1	0.30	0.80	0.22	1.80	
SUJ 2	1.05	1.50	—	—	
SUS 21(即老規格 SUS 1)	<0.12	13.00	—	—	
SUS 22(即老規格 SUS 2)	0.15	13.00	—	—	
SUS 27(即老規格 SUS 7)	<0.08	19.00	—	9.50	

(续表)

名 称	化 学 成 份 (%)				
	C	Cr	Mo	Ni	其 他
苏联经常采用真空自耗熔炼的钢种					
ШХ 15	1.00	1.5	—	—	Ti=(C-0.02)×5 W9.5、V1.5
1X18H9T	≤0.12	18.0	9.50	—	
ЭИ 347	0.75	5.0			
ЭИ 906					
ЭИ 907					W9.0、V1.0
ЭИ 908					
ЭИ 944	0.75	5.0			

四、真空自耗电弧炉所熔炼钢的质量

1. 化学成分的变化与偏析

在真空自耗电弧再熔炼以后,除锰以外其他化学成分变化很少。表 4a 是真空自耗电弧再熔炼以后化学成分の数値,从表中可以看出锰减少约 5~30%,其他成分基本不变。锰的熔损随钢种、凝固条件、真空度而不同,因此电极成分在真空自耗电弧再熔炼以前必须先考虑到锰的熔损情况,加以补充。当采用合适的工艺制度时,真空自耗产品的偏析极少,不论在钢锭上部下部或者纵横向之间都没有偏析,特别是在中心部分也没有偏析。

2. 非金属夹杂物减少情况

在真空自耗电弧熔炼的过程中,因为没有采用耐火材料,所以可以完全避免增加硅酸盐夹杂与耐火材料夹杂。而且原有夹杂变得更细小呈均匀分布状。图 2 是美国 Crucible Co.

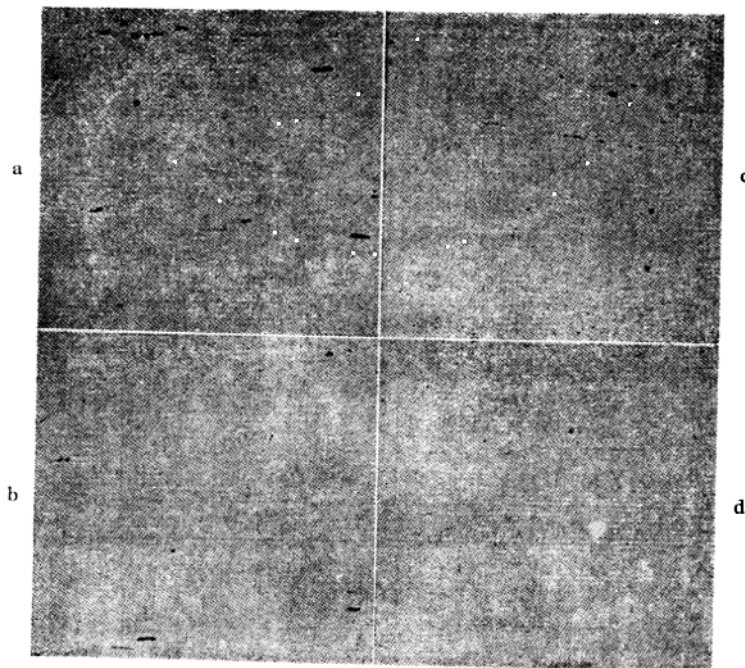


图 2 不同熔炼方法的 52100 钢的相对夹杂含量

a. 空气中熔炼 b. 空气中熔炼+真空自耗 c. 真空感应熔炼 d. 真空感应+真空自耗

表 4 a

編 号	类 别	鋼 号	相 同 成 份 的 其 他 牌 号	状 态	化 学 成 份										(%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
					C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Ti	V	Fe	Co	As	Sn																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	普 碳 鋼	SS-41 (H)	鋼 3	空气熔炼 真空自耗	0.16	0.54	0.23	0.015	0.040	0.26	0.009	<0.10	<0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 4a(续)

编 号	类 别	钢 号	相 同 成 份 的 其 他 牌 号	状 态	化 学 成 份 (%)																
					C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Ti	V	Fe	Co	As
11	工 具 钢	X30WCrV5.3 (德)	3W4Cr2V	电炉熔炼	0.800	0.41	0.43	0.033	0.004	—	—	—	—	2.48	0.29	4.24	—	—	0.58	—	—
				真空熔炼	0.320	0.32	0.44	0.030	0.005	—	—	—	—	—	—	2.38	0.30	4.22	—	—	0.58
12	滚 珠	SUJ2 (H)	GCr15 HIX15	空气熔炼	1.020	0.24	0.48	0.014	0.009	0.11	0.025	0.05	1.48	—	—	—	—	—	—	0.024*	0.016
				真空自耗	1.020	0.25	0.31	0.012	0.008	0.10	0.024	0.05	1.46	—	—	—	—	—	—	—	0.018
13	钢	100Cr6 (德)	52100	电炉熔炼	1.020	0.33	0.25	0.012	0.004	—	0.055	—	1.39	—	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.980	0.25	0.25	0.012	0.004	—	0.055	—	1.36	—	—	—	—	—	—	—	—
14		AISI 304 (美)	OCr18Ni9	空气熔炼	0.060	1.23	0.34	0.025	0.009	—	0.010	8.63	17.85	0.10	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.040	1.09	0.35	0.025	0.009	—	0.010	8.62	17.79	0.11	—	—	—	—	—	—	—
15	不	X10CrNiTi18.9 (德)	1Cr18Ni9Ti	电炉熔炼	0.047	1.26	0.40	0.016	0.007	—	0.005	10.80	18.00	—	—	—	0.25	—	—	—	—
				真空自耗	0.046	1.06	0.40	0.016	0.007	—	0.005	10.60	17.80	—	—	—	0.25	—	—	—	—
16		AISI 316L (美)	17-12MoL SUS33	空气熔炼	0.030	0.76	1.84	0.011	0.013	0.05	—	11.10	18.29	2.76	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.029	0.75	1.42	0.011	0.013	0.05	—	11.19	18.46	2.75	—	—	—	—	—	—	—
17	丝	AISI 347 (美)	Cr18Ni11Nb SUS43	空气熔炼	0.022	0.11	1.66	0.011	0.010	0.12	—	10.61	19.39	—	—	0.90	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.027	0.11	1.13	0.011	0.009	0.12	—	10.48	19.71	—	—	0.89	—	—	—	—	—
18		X15CrNiSi24.19	Cr23Ni18 26-20, AISI 310	电炉熔炼	0.160	1.49	2.30	0.018	0.004	—	0.110	20.50	24.90	—	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.160	1.36	2.27	0.018	0.004	—	0.110	20.40	24.80	—	—	—	—	—	—	—	—
19	钢	SUS 1 (H)	1Cr13	空气熔炼	0.120	0.61	0.22	0.014	0.015	—	—	—	12.72	—	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.119	0.38	0.22	0.014	0.015	—	—	—	12.77	—	—	—	—	—	—	—	—
20		SUS 21 (H)	1Cr13 即老规 格 SUS 1	空气熔炼	0.080	0.87	0.39	0.032	0.013	0.17	—	0.26	12.64	—	—	—	—	—	0.031	0.027	0.028
				真空自耗	0.090	0.63	0.40	0.029	0.008	0.14	—	0.26	12.55	—	—	—	—	—	—	0.028	0.028

表 4 a (续)

编 号	类 别	钢 号	相 同 成 份 的 其 他 牌 号	状 态	化 学 成 份 (%)																	
					C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Mo	W	Nb	Ti	V	Fe	Co	As	Sn
21	不	SUS 22 (H)	2Cr13 即老规格 SUS 2	空气熔炼 真空自耗	0.150 0.150	0.78 0.63	0.33 0.32	0.029 0.031	0.008 0.007	0.18 0.15	—	—	0.22 0.23	12.79 12.72	—	—	—	—	—	—	0.038 0.027	0.035 0.031
22	锈	SUS 27 (H)	18-8 即老规格 SUS 7	空气熔炼 真空自耗	0.070 0.060	1.72 1.49	0.51 0.50	0.031 0.032	0.010 0.010	0.08 0.08	—	—	9.45 9.70	18.80 18.95	—	—	—	—	—	—	—	—
23	钢	17-7PH (美)		空气熔炼 真空自耗 重复自耗	0.061 0.062 0.061	1.27 0.85 0.84	0.48 0.48 0.47	0.013 0.014 0.015	0.016 0.014 0.016	— — —	1.200 1.200 1.170	7.08 7.12 7.02	16.70 16.60 16.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	耐	E-312 (H)		空气熔炼 真空自耗	0.110 0.110	1.72 1.48	0.29 0.28	0.016 0.016	0.020 0.019	0.06 0.07	—	—	9.65 9.73	30.33 30.78	0.04 0.03	—	—	—	—	—	—	—
25	热	A-286 (美)		空气熔炼 真空自耗	0.074 0.075	2.68 2.51	1.08 1.02	0.018 0.017	0.006 0.006	—	0.150 0.160	27.45 27.60	15.53 15.72	1.48 1.44	—	—	1.52 1.57	0.27 0.26	—	—	—	—
26	合	Hastelloy W (美)		空气熔炼 真空自耗	0.016 0.017	0.68 0.62	0.67 0.61	0.009 0.012	0.001 0.001	—	—	余量 余量	4.92 5.04	23.82 23.64	—	—	—	0.21 0.24	6.25 6.97	2.42 2.47	—	—
27	金	X8NiCrAlTi 75 20	ЭИ 437 Nimonic 80	感应炉熔炼 真空熔炼	0.040 0.030	0.12 0.13	0.24 0.23	0.007 0.006	0.006 0.006	—	1.500 1.520	74.60 74.60	19.50 19.80	—	—	—	2.39 2.26	—	—	—	—	—
28	金	X8NiCrCoTi 55 20 20	Nimonic 90	感应炉熔炼 真空熔炼	0.030 0.040	0.07 0.07	0.10 0.10	0.007 0.006	0.006 0.006	—	1.550 1.550	58.30 58.20	19.70 19.80	—	—	—	2.38 2.31	—	—	17.2 17.0	—	—
29	磁 性 材	50Fe-50Ni (H)		空气熔炼 真空自耗	0.130 0.130	0.21 0.13	0.03 0.01	0.006 0.003	0.010 0.010	—	0.003 0.003	余量 余量	—	—	—	—	—	—	50.10 49.40	—	—	—
30	材 料	50Fe-50Ni (H)		空气熔炼 真空自耗	0.130 0.130	0.13 0.13	0.01 0.01	0.003 0.003	0.010 0.010	—	0.003 0.002	余量 余量	—	—	—	—	—	—	49.80 49.80	—	—	—

表 4 b

編號	類別	鋼 号	相同成份的其他牌号	状 态	气 体 含 量			夹 杂 物 含 量 (%)					
					N(%)	O(%)	H	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	总 量
1	普 碳 鋼	SS-41 (H)	鋼 3	空气熔炼	0.0055	0.0070	—	0.0060	0.0004	0.0005	无	无	—
				真空自耗	0.0046	0.0034	—	0.0005	0.0004	0.0005	无	无	—
2		SS-41 (H)	鋼 3	空气熔炼	0.0033	0.0051	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0030	0.0010	—	—	—	—	—	—	—
				重复自耗	0.0017	0.0005	—	—	—	—	—	—	—
3	結	16MnCr5 (德)	16CrMn	平炉熔炼	0.0100	0.0030	2.5 ^{CC} 100g	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0100	0.0015	1.8 ”	—	—	—	—	—	—
4		34Cr4 (德)	40Cr	电炉熔炼	0.0140	0.0050	2.1 ”	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0110	0.0015	1.4 ”	—	—	—	—	—	—
5	构	SNCM 1 (H)	AISI 4800 系	空气熔炼	0.0110	0.0032	—	0.0045	0.0010	0.0001	痕迹	痕迹	0.0056
				真空自耗	0.0100	0.0010	—	0.0024	0.0020	0.0003	痕迹	痕迹	0.0047
6		AISI 4340 (美)		空气熔炼	0.0097	0.0043	—	0.0072	0.0002	0.0006	痕迹	无	—
				真空自耗	0.0085	0.0016	—	0.0021	痕迹	0.0005	痕迹	无	—
7	鋼	35NiCrMo14 (德)		电炉熔炼	0.0150	0.0050	8.1 ^{CC} 100g	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0080	0.0020	1.8 ”	—	—	—	—	—	—
8	工	85Cr7 (德)	9Cr2 (冷軋鋼)	电炉熔炼	0.0140	0.0040	4.0 ”	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0120	0.0020	1.9 ”	—	—	—	—	—	—
9	具	X210CrW12 (德)	Cr12W (冷冲鋼)	电炉熔炼	0.0220	0.0050	1.2 ”	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0230	0.0020	1.4 ”	—	—	—	—	—	—
10	鋼	DMo5 (德)	AISI M-2, SKH9 (H)	电炉熔炼	0.0260	0.0050	4.0 ”	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0230	0.0020	1.3 ”	—	—	—	—	—	—

表 4 c(续)

表 4 b(续)

表 5 D (续)														
编号	类别	钢 号	相同成份的其他牌号	状 态	气 体 含 量			夹 杂 物 含 量 (%)						
					N(%)	O(%)	H	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	总量	
11	工 具 钢	X30WCrV5 3 (德)	3W4Cr2V	电炉熔炼	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
				真空熔炼	0.0140	0.0010	—	—	—	—	—	—	—	
12		SUJ2 (H)		GCr15 HIX15 52100	空气熔炼	0.0089	0.0042	—	0.0075	0.0002	0.0004	无	无	—
	珠 钢			真空自耗	0.0080	0.0016	—	0.0012	0.0001	0.0003	无	无	—	
13		100Cr6 (德)		电炉熔炼	0.0150	0.0040	—	—	—	—	—	—	—	
				真空自耗	0.0080	0.0010	—	—	—	—	—	—	—	
14	不	AISI 304 (美)	OCr18Ni9	空气熔炼	0.0290	0.0107	—	0.0118	0.0021	0.0006	0.0037	0.0081	—	
				真空自耗	0.0290	0.0044	—	0.0060	0.0006	0.0005	0.0002	痕迹	—	
15		X10CrNiTi18 9 (德)		1Cr18Ni9Ti	电炉熔炼	0.0210	0.0030	—	—	—	—	—	—	—
	锈			真空自耗	0.0170	0.0010	—	—	—	—	—	—	—	
16		AISI 316 L (美)	17-12MoL SUS 33	空气熔炼	0.0170	0.0084	—	—	—	—	—	—	—	
				真空自耗	0.0170	0.0033	—	—	—	—	—	—	—	
17	钢	AISI 347 (美)	Cr18Ni11Nb SUS 43	空气熔炼	0.0140	0.0430	痕迹	—	—	—	—	—	—	
				真空自耗	0.0140	0.0170	痕迹	—	—	—	—	—	—	
18		X15CrNiSi 24 19		X23H18 26-20, AISI 310	电炉熔炼	0.0450	0.0030	—	—	—	—	—	—	—
	钢			真空自耗	0.0400	0.0015	—	—	—	—	—	—	—	
19		SUS 1 (H)	1Cr13	空气熔炼	0.0140	0.0360	痕迹	—	—	—	—	—	—	
				真空自耗	0.0140	0.0022	痕迹	—	—	—	—	—	—	
20		SUS 21 (H)	1Cr13 即老规格 SUS 1	空气熔炼	0.0090	0.0092	—	—	—	—	—	—	—	
				真空自耗	0.0070	0.0016	—	—	—	—	—	—	—	

表 4 b(続)

表 4 c(続)

編号	類別	鋼 号	相同成份的其他牌号	状 态	气 体 含 量			夹 染 物 含 量 (%)					
					N(%)	O(%)	H	Al ₂ O ₃	SiO ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	总 量
21	不 锈	SUS 22 (H)	2Cr13 即老規格 SUS 2	空气熔炼	0.0196	0.0079	—	—	—	—	—	—	—
				真空自耗	0.0164	0.0017	—	—	—	—	—	—	—
22	铸	SUS 27 (H)	18-8 即老規格 SUS 7	空气熔炼		0.0091	—	0.0042	0.0565	0.0045	0.0002	痕迹	0.0654
				真空自耗		0.0020	—	0.0032	0.0142	0.0076	0.0017	痕迹	0.0267
23	鋼	17-7PH (美)		空气熔炼	0.0200	0.0055	—	0.0127	0.0010	0.0008	0.0008	无	—
				真空自耗	0.0170	0.0018	—	0.0036	0.0011	0.0008	0.0005	无	—
24	耐 热	E-312 (H)		重复自耗	0.0140	0.0009	—	0.0026	0.0011	0.0006	0.0002	无	—
				空气熔炼	0.0440	0.0243	—	—	—	—	—	—	—
25		A-286 (美)		真空自耗	0.0440	0.0128	—	—	—	—	—	—	—
				空气熔炼	0.0086	0.0430	—	—	—	—	—	—	—
26	合	HastelloyW (美)		真空自耗	0.0065	0.0090	—	—	—	—	—	—	—
				空气熔炼	0.0058	0.0113	0.0006 %	—	—	—	—	—	—
27	金	X8NiCrAlTi 75 20	ЭИ437 Nimonic 80	真空自耗	0.0044	0.0060	0.0001 %	—	—	—	—	—	—
				感应炉熔炼	0.0210	0.0020	13.0-100g/cc	—	—	—	—	—	—
28		X8NiCrCoTi 55 23 20	Nimonic 90	真空熔炼	0.0160	0.0020	2.7 "	—	—	—	—	—	—
				感应炉熔炼	0.0170	0.0020	10.0 "	—	—	—	—	—	—
29	磁 性 材 料	50Fe-50Ni (H)		真空熔炼	0.0120	0.0020	3.0 "	—	—	—	—	—	—
				空气熔炼	0.0028	0.0190	—	0.0009	0.0174	0.0016	痕迹	0.0122	—
30		50Fe-50Ni (H)		真空自耗	0.0028	0.0080	—	0.0005	0.0004	0.0011	痕迹	0.0012	—
				空气熔炼	0.0018	0.0180	—	0.0010	0.0197	0.0021	痕迹	0.0019	—
				真空自耗	0.0017	0.0088	—	0.0003	0.0005	0.0007	痕迹	痕迹	—

(坩埚钢公司)用不同熔炼方法熔炼滚珠钢,进行金相夹杂物评级检查比较,经过统计后证明真空自耗电弧再熔炼的滚珠钢的夹杂减少1~2级而保持在1~1.5级之间^[7](按 A. S. T. M. B 类方法)。

虽然关于夹杂的评级,可以因为视场不同而有所区别,但是利用真空自耗电弧再熔炼的滚珠钢在100倍的放大率下,在大多数的视场内均没有夹杂可见。因为非金属夹杂物的减少而分布得更均匀,使由真空自耗滚珠钢制成的滚珠轴承寿命提高一倍以上。图3、4是真空自耗滚珠钢与空气熔炼的滚珠钢制成的轴承在寿命试验机上进行寿命试验的结果^[8]。

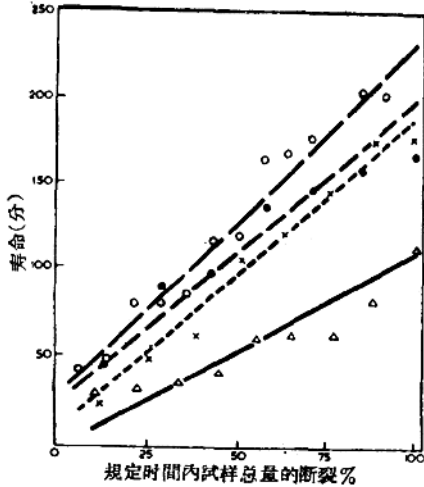


图3 En 31 钢轴承材料在模拟轴承试验中的断裂 (Scott: Wear 5(1962)P.70)

- △ 具有标准疲劳性能的不纯碱性电炉钢
- × 碱性电炉滚珠轴承钢
- 酸性平炉钢
- 真空自耗再熔炼钢

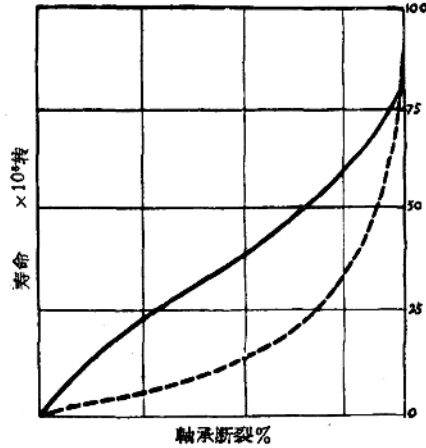


图4 碱性电炉空气中熔炼材料(虚线)与真空自耗电炉再熔炼材料(实线)轴承寿命的比较。
En31 钢, 被试验的轴承约30只 (Skefko 公司所做的结果)

非金属夹杂物的电解分析,证明在真空自耗电弧熔炼以后夹杂物含量有显著的减少,减少数量如表4c所示。

3. 降低气体含量的效果

真空自耗电弧熔炼使氧、氮、氢等气体含量降低,特别是对氧的降低更显著;利用真空自耗电弧法熔炼的产品含氧量,一般较真空感应法更低,气体含量降低数量如表4b所示。

4. 机械性能方面

真空自耗熔炼以后,由于气体含量的降低以及结晶状态改善,因此机械性能也有改善,特别是横向延伸率、冲击、蠕变、疲劳、热加工性能的提高更为显著,以下是各种机械性能的改善情况:

(1) 室温抗张 真空自耗熔炼对室温抗张性能的改善主要表现在横向性能的改善。图5表示空气中熔炼与真空自耗电弧熔炼的A-286 钢材纵横韧性的比较;而图6表示35NiCr Mo 14 钢纵横向机械性能和熔炼方法及变形程度的关系。这些资料都充分说明经过真空自耗电弧熔炼以后,塑性有很好的改善,特别是横向性能有大大地改善,冲击值也有提高。