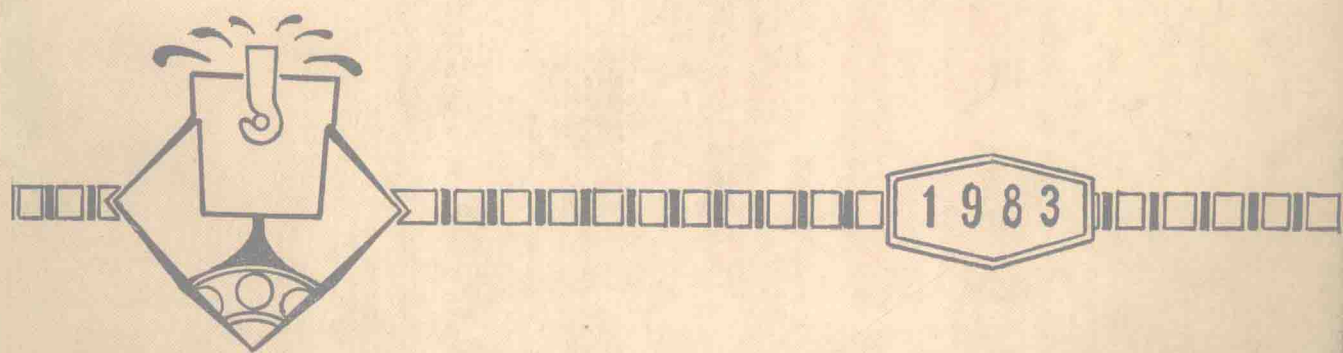


国外轴承钢工艺研究进展



中国金属学会特殊钢学术委员会
冶金工业部钢铁研究总院

一、冶炼工艺和钢中夹杂物

前 言

受中国金属学会特殊钢学术委员会的委托,钢铁研究总院组织有关人员,根据我国轴承钢生产和科研的实际问题和发展需要,从近十年来国外所有关于轴承钢的文献中选取并翻成本文集。内容分两部分:第一部分为冶炼工艺和钢中夹杂物,对用酸性渣处理钢水和夹杂物性质的控制作了较多的介绍;第二部分为控制轧制和快速退火工艺,介绍了各种类型的控制轧制和快速球化退火工艺及其作用和效果,特别对 650°C 温加工技术作了更详细的报导。文集对轴承钢以及轴承制造行业的生产、科研和教学人员都很有参考价值。

本文集由钢铁研究总院沈梨庭、刘德金、林慧国和赵量进行文献的查阅和选取,刘嘉禾、秦森作了审定;参加翻译的同志有一室和六室的魏果能、刘德金、吴曼先、郭莲莲、赵量、沈梨庭、皇甫庆茹、朱维翰、褚翰林、周来金、徐玉兰、宋贵红、赵淑萍、陈洪真、宣政、杜清敏;赵量作了总审校。

由于时间短促,编译者水平有限,在选题和翻译中难免有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

目 录

一、冶炼工艺和钢中夹杂物

生产高质量轴承钢的 SKF-MR 法	(1)
日本山阳和大同公司轴承钢连铸材生产现状	(6)
高碳高铬钢连铸时采用电磁搅拌的效果	(10)
钢中非金属夹杂的氧转移到精炼渣中的特点	(12)
发热造渣料在钢包中处理钢水	(16)
轴承钢的冶炼方法	(21)
碱性钢的生产方法	(23)
轴承钢的熔炼方法	(25)
轴承钢的熔炼方法	(26)
铬轴承钢生产方法	(27)
钢的冶炼方法	(31)
酸性渣中碱土金属氧化物和锰的分配	(33)
用稀土和碱土金属处理以强化LIX15钢中的硫化物夹杂	(38)
喷吹Al—Ba粉和Ca—Si粉对电炉钢中微量元素和夹杂物含量的影响	(40)
包内用碱土金属精炼电炉钢水	(45)
长寿命高碳铬轴承钢	(49)
加钙轴承钢	(53)
铝对轴承钢性能的影响	(58)
在高质量钢生产中应用高铁粗铝	(62)
熔炼轴承钢时终脱氧方法的改进	(63)
非金属夹杂对滚动轴承寿命的影响	(66)
外来氧化物相和硫含量对轴承钢夹杂物的影响	(73)

二、控制轧制和快速球化退火工艺

形变热处理对52100钢显微组织和力学性能的影响	(77)
--------------------------	--------

形变热处理和热处理对高碳轴承钢疲劳性能和断口金相特征的影响..... (93)

预温轧对热处理后52100钢断裂韧性的影响..... (111)

Y8和LLIX15钢奥氏体化后在临界温度上、下变形后的组织转变..... (123)

过共析钢的形变热处理..... (127)

热挤压对轴承钢奥氏体化时渗碳体溶解的影响..... (133)

轴承钢高温形变处理 (BTMO) 参数的最佳化..... (137)

塑性变形对珠光体钢相变组织的影响..... (140)

10、20和LLIX15钢在相变温度范围内的变形能力..... (144)

轴承钢的晶粒超细化和超塑性..... (146)

轴承钢和工具钢的软形变热处理..... (151)

轴承钢快速退火的可能性..... (154)

LLIX15和9XC钢奥氏体异常分解的动力学和机构..... (157)

轴承钢管的球化处理..... (161)

预淬火对碳化物球化的影响..... (163)

圆棒材冷却制度的研究和计算..... (166)

热处理对52100钢显微组织和力学性能的影响..... (169)

改善轴承钢接触疲劳寿命的热处理..... (178)

高碳钢主要是轴承钢的热处理方法..... (184)

高碳铬钼轴承钢的球化热处理方法..... (187)

LLIX15和XBΓ钢网状碳化物的形成..... (190)

生产高质量轴承钢的 SKF—MR法

影响疲劳寿命的因素

经受滚动接触疲劳的能力是滚珠和滚柱轴承钢主要的质量指标。疲劳强度必须高并且要求每炉钢的质量稳定以获得长而可靠的操作寿命。此外，从生产的经济性考虑要求钢具有良好和稳定的切削加工性、淬透性和均匀性。

上述材料重要性能的质量水平基本上取决于炼钢方法、浇注技术和使用的原材料。钢的切削加工性和均匀性也在很大程度上取决于塑性成形操作和热处理。而炼钢工艺对生产的经济性以及滚动轴承的质量具有异常的重要性。

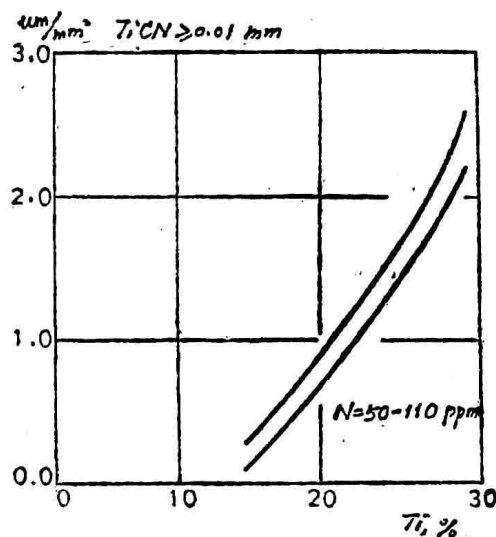
滚珠轴承钢的疲劳寿命受许多冶金因素的影响，如夹杂物含量、夹杂物的化学性质、均匀性等等。

低倍夹杂（按轧材中单个夹杂物的长度大于0.5毫米）的量对钢早期破坏的频率以致钢的可靠性有巨大影响。

高倍夹杂基本上可分成氧化物、硫化物和钛的氰化物。与低倍夹杂不同，它们在钢中的分布较均匀，一般说和钢中的氧、硫和钛含量相对应（图1）。

大量研究表明氧化物夹杂对轴承钢的寿命有明显的不良影响（图2）。疲劳强度不仅与高倍氧化物夹杂的总量有关，而且与它们的化学性质有关。点状氧化物即所谓含钙的D型夹杂对轴承钢特别有害。

当含硫量达大约0.04%时相应的硫化物夹杂量对轴承寿命没有什么坏的影响。图3清楚地表明了不同含硫量的SKF3（SAE52100）钢制成1309型自调滚珠轴承的寿命值。当氧化物夹杂高时，硫化物由于起到包覆作用甚至对轴承寿命会起到好的作用。硫化物还能改善钢



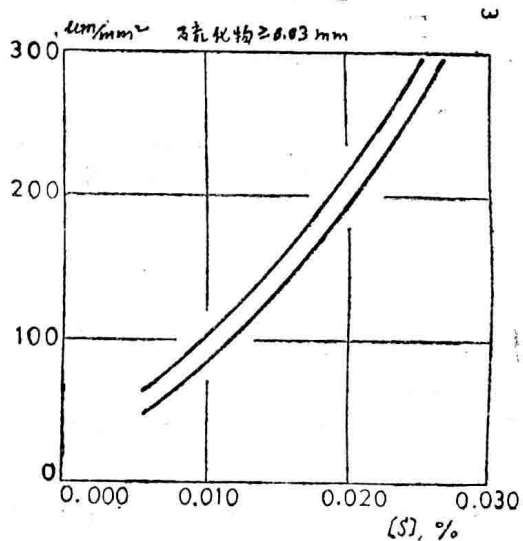
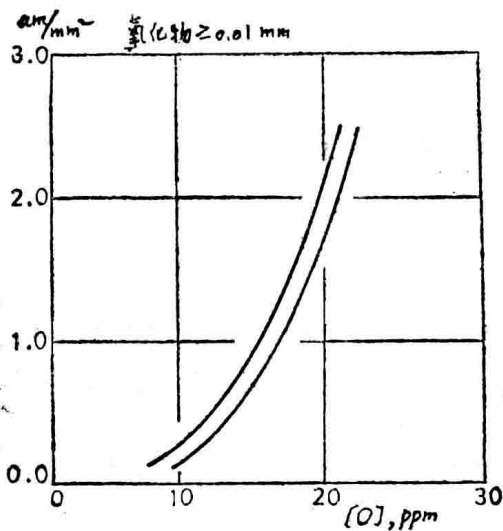


图1 高倍夹杂含量与氧、硫和钛含量的关系。SKF3钢，钢锭重3.4吨，坯料 $\Phi 100-300$ 毫米

的切削性。因此，轴承钢中较高的含硫量通常是有益的。

不同含量和化学成分的低倍和高倍夹杂对SKF3制成的6306型深槽滚珠轴承相对寿命 L_{10} 的影响示于图4。所用的钢材是现在或早期由不同冶金工艺炼制的。试验是在良好的实验室条件下进行的。

各种钢所以有不同的寿命，可以简单归结于清洁度、D型夹杂的含量以及夹杂物的分布情况（表1）。

非真空脱气双渣法生产的碱性电炉钢的质量表示60年代初期的水平。

60年代引入的真空脱气法从清洁度看，它使质量水平有很大提高。然而，“脱气钢”的质量由于各种精炼工艺冶金因素的差别表现出很大的分散性。各生产者采用不同的专门技术也使质量产生差别。

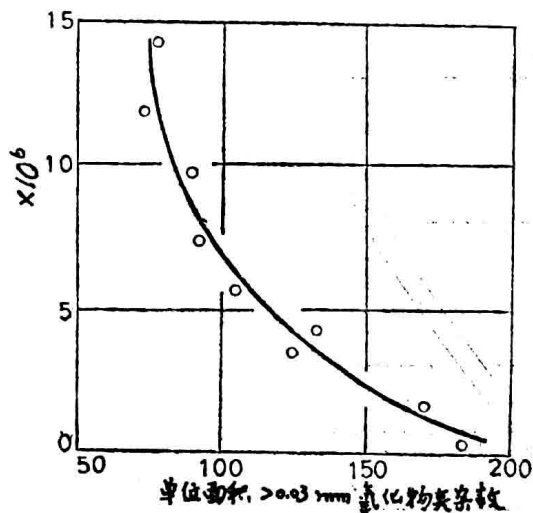


图2 氧化物夹杂的对1309轴承产生剥落的影响

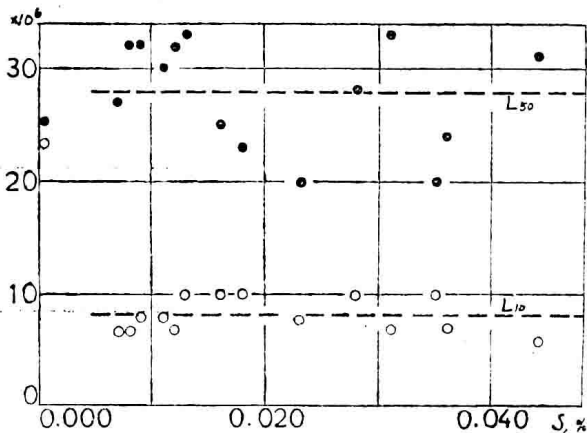


图3 不同硫含量对130个自调轴承寿命的影响

从60年代中期到70年代中期SKF公司是由电炉钢用DH法真空脱气处理来生产的（同时采用ASEA—SKF炉）。

图4所示DH脱气处理的钢的数据取自70年代初期的结果，仍代表现今“真空脱气钢”的平均质量水平。下文将给论证。

目前已停闭的酸性平炉法（AOH）炼制的钢的质量即为70年代后期酸性钢的典型水平。酸性平炉钢所以有好的寿命的一个原因是它完全没有D型氧化物夹杂。酸性平炉钢也具有稳定的清洁度。

以下叙述的ASEA—MR法生产的钢从清洁度观点，目前至少和电渣（ESR）或真空电弧重熔法生产的钢的质量相同。

由于冶金工艺的不断发展，在过去15年间已使早先电炉生产的全淬透轴承钢的滚动接触疲劳寿命提高10倍。酸性炉钢也不断得到改善，然而现在已被SKF—MR钢所超过。SKF3钢过去15年间清洁度的发展变化示于图5。

当今轴承钢中氧化物夹杂含量的降低使得其他有害元素对疲劳寿命的影响相对显得明显了。例如在钢中能形成硬的不能变形的氮化钛的钛元素对52100钢的寿命有着坏的影响（图6）。

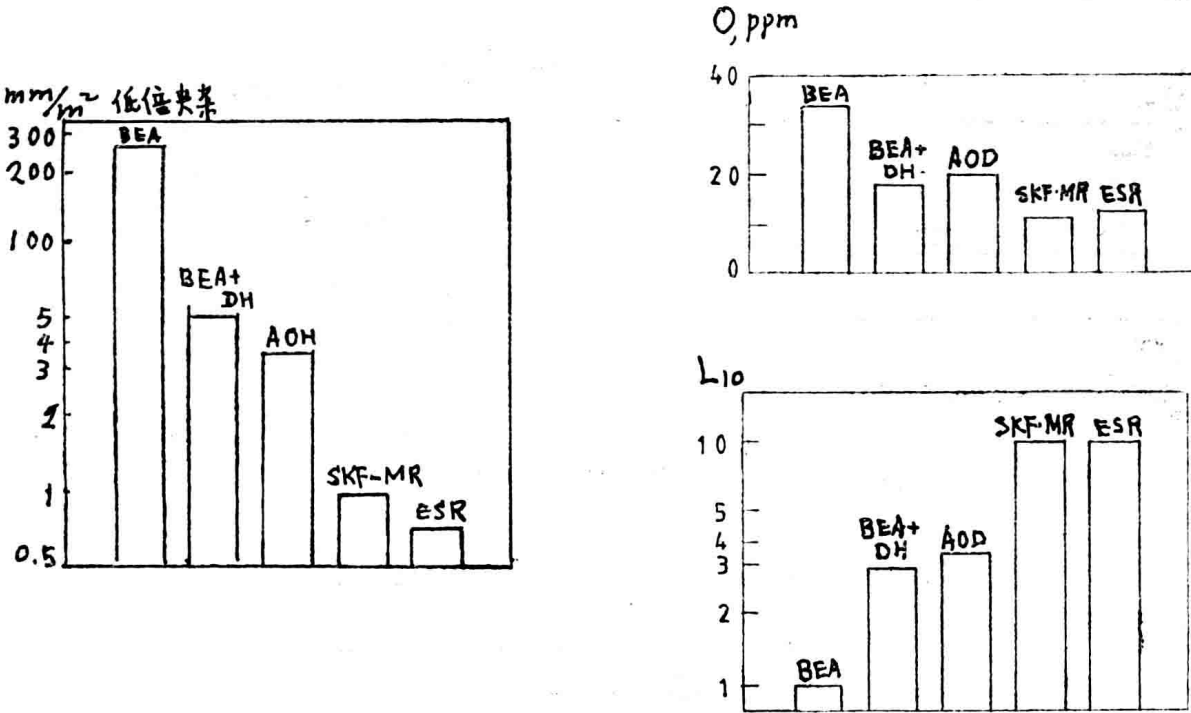


图4 不同方法生产的SKF3钢的相对L₁₀寿命和清洁度的关系，6309轴承寿命试验

SKF—MR法

生产高质量钢的SKF—MR法是SKF公司60年代和70年代初期研究成功的。目前该公司生产的钢全部由此法生产。它由一个在氧化条件下快速熔化用的SKF双壳炉和一个在还原条件下精炼用的ASEA—SKF钢包炉所组成（图7）。

表1 按JK图氧化物级别

冶 炼 方 法		氧 化 物 夹 杂					
		B		C		D	
		细	粗	细	粗	细	粗
BEA	平均	2.2	0.5	0.5	0.5	0.9	0.2
	最大	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0
BEA + DH	平均	1.5	0.2	0.2	0	0.5	0
	最大	2.0	0.5	0.5	0	1.0	0
AOH	平均	1.8	0.2	0 *	0	0	0
	最大	2.5	0.5	0.5	0	0	0
SKF-MR	平均	0.8	0 *	0	0	0 *	0
	最大	1.5	0.5	0	0	0.5	0
ESR	平均	0.7	0	0 *	0	0.1	0
	最大	1.5	0	0.5	0	0.3	0

* 表示平均 <0.05

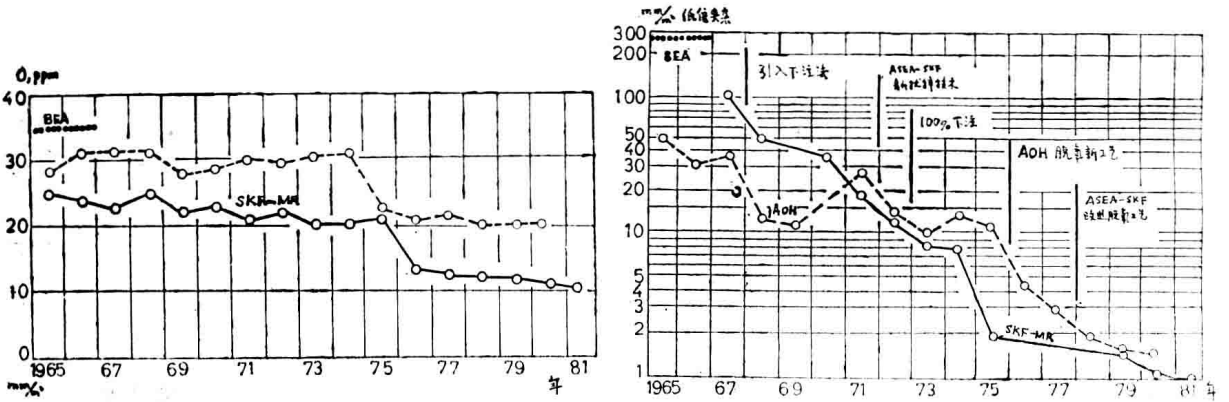


图5 SKF3钢中的氧含量和低倍夹杂，1965—1981

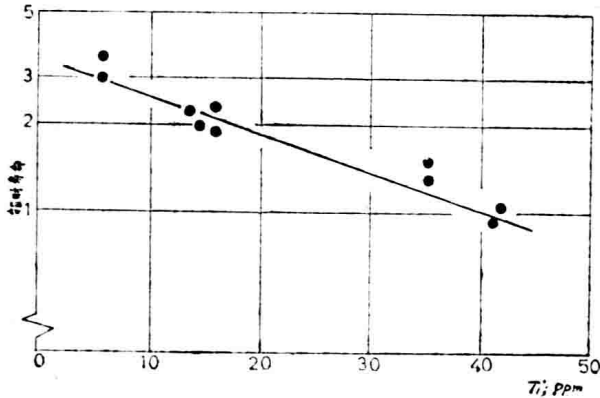


图6 不同含钛量SKF3钢转动梁试验结果

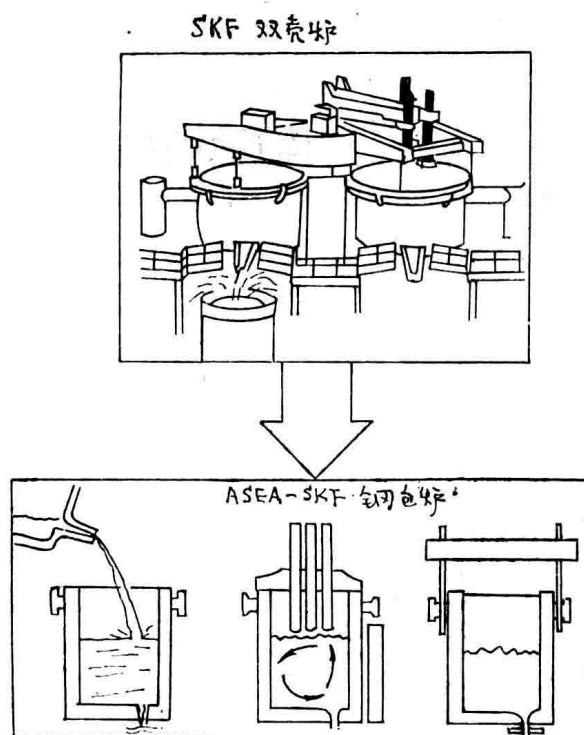


图7 SKF—MR法（一个SKF双壳炉和一个ASEA—SKF钢包炉）

双壳炉实际上是一个带两个炉壳的电炉。有两个旋转的炉盖，一个是带电极的普通电弧炉盖和一个不带电极的炉盖。两个炉壳都装有氧—油烧咀和冷却水套。

双壳炉的出发点是使电气设备尽可能长地在最大功率下的操作。在一个炉壳里熔化的同时，在另一个炉壳里可进行其他操作如出钢、清理、装料和废钢预热。

（赵量译自瑞典SKF公司1982年技术资料）

日本山阳和大同公司轴承钢连铸材生产现状

前言

山阳公司的以垂直型大截面钢坯连铸机为主体的第二炼钢厂，从1982年10月1日按计划开始了热运转，六个多月以来，设备运转正常，已浇铸了约1,000炉，在此期间，反复进行了大批量轴承钢、合金钢、铅易切削钢、不锈钢的试验。从今年2月份开始以4班3轮换制的方式投入了正式生产，同时，采用第一批试材掌握了质量数据，并将大批试材提供给了用户，得到了用户的认可。大同知多厂于1980年11月设置了大截面钢坯连铸机以生产结构钢、轴承钢为主，试制的轴承钢，正给轴承制造厂进行质量认可试验，其概要论述如下：

设备概况

山阳公司原来的钢厂不仅添设了连铸机，而且力求提高高级特殊钢的质量，节省资源，节省人力，从根本上改善该公司的体系，在原来钢厂接邻的空闲地上又新设了如下各种设备，作为第二炼钢厂。

90吨电炉

↓ 变压器容量80,000KVA的UHP电炉。

炉外精炼LF炉

↓ 变压器容量13,000KVA。

RH脱气设备

↓ 容量140吨。

连铸设备

完全垂直型大截面钢坯连铸机。

↓ 断面 $370 \times 470\text{mm}$ 3流

加热炉、均热炉

↓ 步进式炉

初轧机

↓ 二辊可逆式，将铸坯轧成粗圆钢。

钢坯轧机 (PSW)

行星式斜辊轧机 (3辊行星式轧机)

↓ 轧制直径100~600mm圆钢坯。

探伤机

旋转型自动水浸超声波式

上述设备最大的特征就在于以质量要求严格的轴承钢为主，选择了在垂直型连铸机上连铸，并同大截面的低速浇铸相结合，促进非金属夹杂物的上浮防止偏析。当然，可利用LF炉和RH脱气设备的组合，进行钢水的净化和浇铸温度，化学成分的微调。此外，用PSW钢坯轧机，它的特点是有3个轧辊边自转边公转，在一个机座上产生高的压下量，这种轧机在日本是一种具有划时代的轧机。在保证质量方面，采用具有16个通道的水浸超声波仪，圆钢边回转并以斜角及垂直投入，这样就可保证测出钢坯表面的缺陷及发生在连铸材表面以下直到中心部的整个截面的缺陷。

操作概况

山阳公司去年10月设备运转以来，在四个月的(即去年10、11、12、和今年1月)试验期间依次进行了2,000吨、4,000吨、5,000吨、15,000吨的试轧，而后进入正式生产，2月为25,000吨,3月为30,000吨，4月为40,000吨，现在连铸比超过了50%。在此数量中,钢种比例是高碳铬轴承钢约占25%，中碳合金钢约占10%，低碳合金钢约占25%，铅易切削钢约占10%，不锈钢约占10%，碳素钢约占20%，大体上包罗了计划中大量生产的钢种。

连连铸已试验到9连连铸,目前也与批量有关，大体上是以4~7连连铸为标准进行操作。

质量概况

有关连铸材的质量特点是在各炉之间，一炉内或断面内化学成分的波动减少，使连铸材淬透性稳定，这些优点曾报导过，本文不详述了。下面主要叙述以轴承钢为主体，兼述其它钢种的几个特点。

1. 氧含量

氧含量是轴承钢的大敌，氧含量直接影响着非金属夹杂物，基体缺陷以至转动疲劳寿命。山阳公司以前就开发了特殊钢低氧的技术,以后为了使钢材进一步使氧降低到极低,又以增设了LF、RH精炼设备，以及采取钢包和中间包之间密封，改进中间包结构和保护气氛及能使大断面铸模内夹杂物上浮的各种设施，其结果示于表1。从中看出连铸材比模铸材的氧量约降低2.5PPm。因模铸材接触汤道耐火砖，气体难以排除，而连铸材没有这些问题故有利于得到极低氧钢。随着氧含量的降低，连铸材的缺陷，非金属夹杂物或磁粉探伤缺陷方面也都比模铸材减少，从而提高了高级特殊钢的可靠性。

表1 连铸材的氧含量

	T 部	M 部	B 部	平均
连 铸 材	7.2	6.6	7.4	9.1
模 铸 材	9.4	9.8	9.6	9.6

(轴承钢, n = 5, ppm)

2.转动疲劳寿命

随着氧含量的降低，预期会提高转动疲劳寿命，表2为山阳公司轴承钢转动疲劳寿命的一个例子，并记录了T断面和L断面上的数据。

表2

轴承钢的转动疲劳寿命

(L_{10} : 10%的累积破损概率
 P_{max} : 500公斤/毫米², 1800转/分)

	T 面	L 面
连 铸 材	$7.6-27 \times 10^6$	$33-41 \times 10^6$ 46%*
模 铸 材	$7-20 \times 10^6$	$4.2-24 \times 10^6$ 56%*

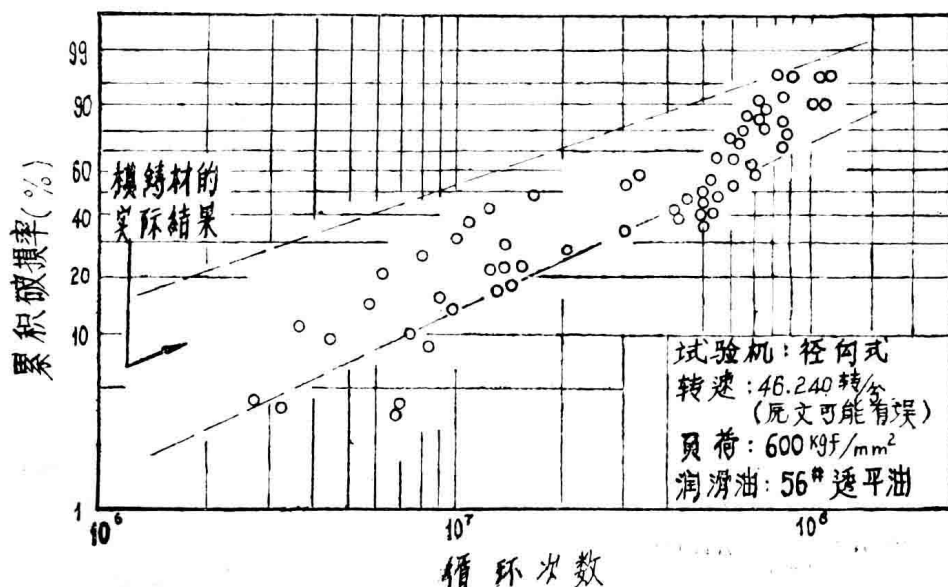
* 钢材中心部30%面积以内疲劳剥落的概率。

由表可看出连铸材T断面的转动疲劳寿命很好, 这种结果是同氧含量的减少成正比, 与以前我们所获得的氧含量同寿命的关系是一致的。也就是说同凝固方法无关, 而易使氧含量减少的连铸材, 对转动疲劳寿命是有利的。这些情况虽未在表1中表示出来, 但垂直型连铸的时候, 由于最终凝固部分的宏观组织和非金属夹杂物集中于钢材T断面的中心部分, 所以认为对止推型转动疲劳是有利的。

L断面的转动疲劳和T断面的转动疲劳一样, 也是连铸材的好。连铸材氧含量减少的原因同T断面的情况是一样的, 本文中L断面试验的目的不是比较连铸材和模铸材的疲劳寿命, 而是在于确认滚动体轨道面必然穿过钢材中心的偏析部位, 往往观察到早期疲劳剥离发生在偏析部位的几率高, 为什么这样作呢? 是因为轴承钢等高碳钢的连铸材, 中心部宏观的偏析外表上总比模铸材明显。但结果如表2, 模铸材和连铸材之间没有很大的差别, 可明确中心部位的宏观偏析实际应用上是无害的。

大同制钢公司技术开发的重点也是轴承钢的连铸。应用ELVAC工艺(即电炉—钢包精炼—真空脱气的复合精炼工艺), 使钢清洁化, 并采用钢液温度调整, 防止大气污染, 钢液面控制, 电磁搅拌等措施。

其连铸材和模铸材(SUJ2)的转动疲劳寿命比较的结果示于图1, 由图可以看出, 不管以前的模铸材疲劳寿命如何好, 连铸材也不差于它, 并确立了连铸轴承钢批量生产的技术。

图1 模铸材与连铸材(SUJ₂) 转动疲劳寿命的对比

3. 其它特性

为了减少篇幅，具体数据就不谈了。在进行连铸材的定性试验中，铅易切钢的铅粒由于急速凝固，均一细小地分布，所以就更能提高铅易切钢的切削性和机械性能的稳定性。另外，渗碳钢的热处理变形，随着炉批内化学成分和淬透性波动的减少而降低等，也看出了连铸材的优点。

结束语

以上叙述了以轴承钢为主的连铸材质量特性优越的几个例子，当然，连铸操作的稳定化是很难的，管理上一出错，就有可能发生连铸特有的缺陷，随着操作规范的不完善，可望会比原来的模铸材的质量有更进一步提高。

(周来金、宣 政编译自《特殊钢》1984、No1、28—30，

1983、No5、17—19和29—31)

高碳高铬钢连铸时采用电磁搅拌的效果

大西稔泰等

一、绪言

为了改善连铸钢坯的内部质量，试图在连铸机上应用电磁搅拌技术，本报告报导了关于在3号钢坯连铸机上应用电磁搅拌生产高碳高铬钢的试验结果。

二、实验结果

中央研究所根据高碳高铬钢的模拟试验结果，制定了结晶器内电磁搅拌（M）和凝固末期电磁搅拌（F）的工艺，在该所3号钢坯连铸机上进行试验。其生产条件见表1，化学成分列于表2。

三、检验结果

1. 照片①表示M + F搅拌后的钢坯纵剖面的低倍组织。通过M搅拌使微细等轴晶增加，而F搅拌则使偏析分散，M + F搅拌产生两者相辅相成的效果，使中心组织获得显著的改善。

2. 图1表示钢坯中心偏析的检验结果，加M + F搅拌的材料与没有加搅拌的材料相比较，减轻了中心偏析。

但是，采用M + F搅拌对于本钢种来说，存在一个合宜的工艺条件，特别是F搅拌，如果工艺选择不当几乎会完全失去搅拌作用。

3. 通过炉外精炼及在连铸过程中，采用无氧化浇注工艺等减少夹杂物的措施，再用M搅拌可使凝固界面上的夹杂物净化，所以具有良好的清洁度水平。

4. 开坯后钢坯表面质量检查及超声波探伤检验结果表明，质量完全没有问题。

四、结语

根据高碳高铬钢连铸的试验结果认为，采用适应本钢种的最佳M + F搅拌工艺，该钢种在连铸机上生产是可能的。

表1 生产条件

项 目			设 备 及 参 数
溶 炼 炉			公称80吨转炉
炉 外 精 炼			ASEA—SKF
连 铸	铸坯断面尺寸		300×400毫米
	铸造速度		0.9米/分
	ΔT		40°C
	电 磁	M	低频旋转磁场
	搅 拌	F	
耗水量			0.26升/公斤钢

表2 化学成分 (单位: 重量%)

C	Si	Mn	Cr	P	S	Ti
1.00	0.26	0.42	1.37	0.010	0.004	0.001

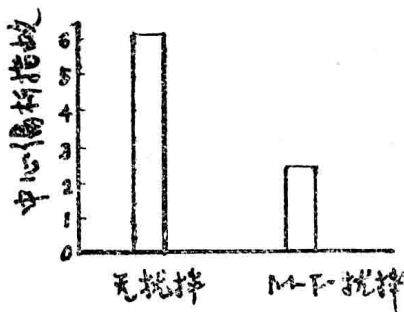
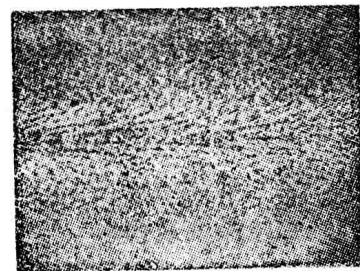


图1 中心偏析水平



照片1
连铸坯纵断面低倍组织

(宋贵红译自《铁と钢》，1982，68，4，9259

刘德金校)

钢中非金属夹杂的氧转移到精炼渣中的特点

Л.И.Крупман等

目前常用的包内新渣精炼钢工艺可以使硫化物沾污程度减少2—4倍；但氧化物含量的减少并不明显^[1,2]。

其实，对许多钢件来说，其所需性能主要不是决定于塑性硫化物相，而是氧和氧化物夹杂的含量^[3]。

为此，开展钢包内用新渣精炼钢水去除氧和氧化物夹杂的研究是很必要的。

众所周知，采用酸性渣比用碱性渣精炼可以获得更低的氧和夹杂含量^[4,5]。

钢材最终氧含量用真空熔融法测定，它包括氧化物夹杂中的氧和溶解氧两部分^[6]。在相同浇注条件下钢锭中溶解氧的含量应当与炉外精炼渣的氧化位有关，而非金属夹杂物的含量则取决于炉内和包内渣对脱氧产物的同化作用。

因此，人们对精炼渣成份对其氧化位和吸收夹杂物能力的影响进行了研究。文献^[7,8]的作者用电动势法测定了碱性CaO—Al₂O₃渣系和酸性渣系（石英，长石硝石加碳酸钠组成——译者注）中氧的活度。文献^[9]作者用熔融氧化镁作固体电解质，双铂—氧电极的电化学电池测定了自熔精炼渣中氧的活度。并以80%SiO₂和20%Na₂O渣为标准渣。

表1所列研究渣系的样品是用化学纯氧化物和工业纯可燃物配制而成。

电极反应机理可表示如下，（阴极反应→，阳极反应←）：



第一个过程是氧的吸附，它取决于气相中氧的分压和温度；第二过程取决于电极特性，而第三过程则与熔体中氧离子的活度有关。

表1.研究渣系的成份%*

渣号	渣 成 份 %						K
	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	SiO ₂	CaO	MnO	CaF ₂	Na ₂ O	
1	23,0	5	53,0	0	11,0	8,0	0,44
2	49,0	38,0	33,0	5,3	2,4	10,3	1,0
3	60,7	50,0	26,0	4,3	2,0	8,0	1,63
4	76,0	50,5	15,9	0,1	2,0	6,1	3,45

* CaF₂含量是根据F含量的换算；K—渣子的酸度指标。

当Pt—O电极过程被确定为O₂ + 4e $\rightleftharpoons$ 2O²⁻时，电池电动势可写成下面形式：

$$E = \frac{RT}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{O^{2-}}^N}{a_{O^{2-}}^C}$$

式中：a_{O²⁻}^N——被测渣中氧离子活度；