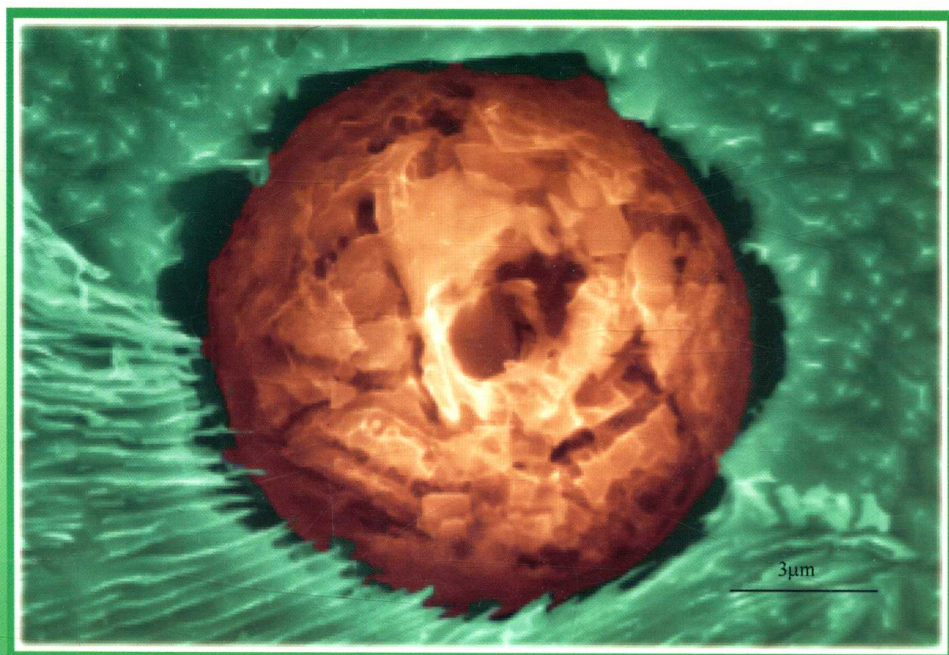


Non-Metallic Inclusions and
Element Segregation in Bearing Steels

轴承钢中非金属 夹杂物和元素偏析

■ 张立峰 王升干 段加恒 著



 冶金工业出版社
www.cn mip.com.cn

轴承钢中非金属夹杂物 和元素偏析

**Non-metallic Inclusions and Element
Segregation in Bearing Steels**

张立峰 王升千 段加恒 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2017

内 容 提 要

本书由三部分组成：第一部分简要介绍轴承钢的生产工艺路线，重点阐述 GCr15 轴承钢中非金属夹杂物的来源、形成与在各工序的去除手段，通过比对不同钢厂产品洁净度结果，对轴承钢中非金属夹杂物的控制进行了总结；第二部分针对轴承钢连铸坯液析碳化物行为进行实验研究，进而通过实验结果分析低倍检验孔洞的形成机理与控制方法；第三部分介绍电磁搅拌下的轴承钢连铸坯柱状晶偏转角的模拟仿真研究结果，得出对连铸坯凝固组织和元素偏析的影响因素，并在 GCr15 轴承钢上进行控制手段的工业验证。

本书专为高品质钢研发人员编写，可供钢铁冶金领域科研、生产、设计、管理、教学人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

轴承钢中非金属夹杂物和元素偏析 = Non-metallic Inclusions and Element Segregation in Bearing Steels/张立峰, 王升千, 段加恒著.
—北京: 冶金工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5024-7459-1

I. ①轴… II. ①张… ②王… ③段… III. ①轴承钢—
非金属夹杂(金属缺陷) IV. ①F762

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 014516 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7459-1

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京通州皇家印刷厂印刷

2017 年 1 月第 1 版, 2017 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 20. 5 印张; 4 彩页; 397 千字; 313 页

89. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

序

张立峰教授自 1998 年在北京科技大学获得博士学位以来，先后在日本东北大学、德国克劳斯塔尔理工大学、美国伊利诺大学、挪威科技大学、美国密苏里科技大学和北京科技大学从事洁净钢、非金属夹杂物和冶金过程数值模拟仿真研究等相关研究工作，取得了很多杰出的学术成果，是我国年轻一代冶金学者的代表人物之一。

近年来，张立峰教授学习研究了国内外先进轴承钢生产企业的工艺与技术特点。本书作者在总结近 20 年来洁净钢研究成果的基础上，立足轴承钢生产企业现代工装和先进工艺的发展水平，借鉴业界关于轴承钢研究的丰硕成果，收集整理了国内外大量关于 GCr15 轴承钢的生产数据，以图文并茂的形式对 GCr15 轴承钢中的非金属夹杂物、GCr15 轴承钢中的碳化物、轴承钢连铸坯凝固组织和元素偏析做了全面系统的分析。全书内容丰富、体系合理，讲解深入浅出、通俗易懂，既具有严谨的科学性、系统性、知识性，又具有很高的学术价值和实用价值。

作为一种重要的冶金产品，轴承钢被广泛应用于机械制造、铁路运输、汽车制造、国防工业等领域。21 世纪初，我国轴承钢粗钢产量约为 92 万吨，2011 年达 378 万吨，2015 年轴承钢粗钢产量达 258 万吨。由于轴承承受强冲击和交变载荷的工作特点，对其化学成分的均匀性、非金属夹杂物的含量和分布、碳化物的分布等要求都十分严格。轴承钢种类繁多，基本上可分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、中碳轴承钢、不锈轴承钢、高温轴承钢及无磁轴承钢等系列钢种。含 1% C 和 1.5% Cr 的 GCr15 轴承钢是一种合金含量较少、应用最广泛的高碳铬轴承钢。本书以 GCr15 轴承钢为例，从轴承钢中夹杂物和元素偏析两个

方面进行分析,提出合理的控制措施来指导生产实践,为进一步提升我国轴承钢质量提供理论依据。

目前关于轴承钢寿命、钢中非金属夹杂物、碳化物、元素偏析等方面研究的书籍不少,但多数侧重某一方面内容,缺少一本对近十几年来轴承钢生产进行全面系统研究的书籍。张立峰教授的专著将以上几方面合理地统一起来,对轴承钢进行全面深入的介绍,通过对轴承钢非金属夹杂物的专题研究,提出了轴承钢连铸坯凝固组织和元素偏析控制的方法,丰富了钢的凝固理论,对高品质钢的生产与研发有促进作用。本书对轴承钢生产领域从事科研、教学和学习的科技工作者以及有关部门的管理人员具有很高的参考价值。

中国工程院院士
中国金属学会理事长



2016年12月21日

前 言

轴承钢被广泛应用于机械制造、铁路运输、汽车制造、国防工业等领域。21 世纪初,我国轴承钢粗钢产量约为 92 万吨,2011 年达 378 万吨,2015 年达 258 万吨。轴承钢种类繁多,基本上可分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、中碳轴承钢、不锈轴承钢、高温轴承钢及无磁轴承钢等系列钢种。含 1% C 和 1.5% Cr 的 GCr15 轴承钢是一种合金含量较少、应用最广泛的高碳铬轴承钢。由于轴承承受强冲击和交变载荷的工作特点,对其化学成分的均匀性、非金属夹杂物的含量和分布、碳化物的分布等要求都十分严格。

为进一步提升我国轴承钢质量,作者针对 GCr15 轴承钢进行了专题研究,揭示了轴承钢盘条在强酸环境下低倍组织检验孔洞的形成机理;通过数值模拟仿真研究,构建了铸坯柱状晶偏转角度与电磁力、流场的关系;通过增加二冷强度、降低过热度、控制拉速和选定合适的电磁搅拌参数等方法,解决轴承钢元素偏析问题,并改善凝固组织,得出了 GCr15 轴承钢的最优生产参数,并在国内某轴承钢生产厂家的工业生产过程中进行验证。

本书内容主要包括三方面:GCr15 轴承钢中的非金属夹杂物、GCr15 轴承钢中的碳化物以及轴承钢连铸坯凝固组织和元素偏析。

第一部分对 GCr15 轴承钢中的非金属夹杂物及其对疲劳寿命的影响进行分析。关于轴承钢中非金属夹杂物控制工艺,为了降低钢中总氧和控制钢中非金属夹杂物,在工艺和装备的设计、选择等方面务必坚持以下几点:轴承钢出钢避免脱氧剂和精炼渣一起加入,防止渣混合卷入钢液造成严重的渣钢反应;采用铝脱氧降低氧含量;采用高碱度精炼渣的强扩散脱氧技术;真空精炼由 VD 改为 RH,若使用 VD 真

空精炼,则需采用浅真空及扒渣技术,减小渣钢反应程度,这样可以降低夹杂物中的 CaO 含量,把夹杂物控制为以 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 或者 Al_2O_3 为主;全封闭中间包防止二次氧化;在使用浸入式水口的情况下,必须优化浸入式水口结构减少水口结瘤,防止水口结瘤物脱落造成轴承钢产品中的大型串状夹杂物缺陷;增加连铸机直立段长度,最好采用立式连铸机促进大尺寸夹杂物上浮,减少夹杂物被凝固坯壳捕捉等。坚持以上措施,轴承钢中的非金属夹杂物控制水平将得到大幅度提高。

第二部分关于 GCr15 轴承钢中的碳化物方面,研究了轴承钢连铸坯凝固组织、铸坯中液析碳化物分布规律、轴承钢轧制全流程样品中 Cr 元素分布及热轧盘条中低倍检验孔洞的形成机理;进而研究铸坯及热轧盘条的加热工艺对轴承钢中合金元素分布及低倍检验孔洞的影响;最终提出控制低倍检验孔洞的工艺措施,从而提升 GCr15 轴承钢中 C 偏析水平。本部分定量化统计了轴承钢铸坯中液析碳化物的分布,从铸坯边部到中心,碳化物面积百分比、尺寸及数密度均逐渐增加。揭示了轴承钢盘条在强酸环境下低倍组织检验孔洞的形成机理:铸坯中残余的富 Cr 碳化物被轧制成链条状的带状碳化物结构, C 和 Cr 元素偏析到晶界上形成发达的二次网状富 Cr 碳化物,与之相邻的基体成为贫 Cr 区,导致该位置抗腐蚀能力下降而成为腐蚀初始位置,深度腐蚀后表现为轧材的低倍检验孔洞缺陷。为了减少碳化物的危害,对于铸坯中液析碳化物的控制措施主要是高温扩散工艺,扩散温度和扩散时间是影响轴承钢高温扩散效果的两个主要因素。

第三部分为轴承钢凝固组织和元素偏析研究,主要分析了电磁搅拌对宏观组织、枝晶臂间距、柱状晶偏转角等方面的影响。通过数值模拟仿真研究,构建了铸坯柱状晶偏转角度与电磁力、流场的关系。研究发现柱状晶偏转角与电磁力具有相反的变化趋势,其值随着电磁力的增加而减小;柱状晶偏转角与钢液流速具有相同的变化趋势,其值随着钢液流速的增加而增大。GCr15 轴承钢宏观偏析的控制方向与微观偏析的差别在于溶质元素在固相中的扩散速率非常小,连铸坯完全

凝固之后宏观偏析很难被消除。因此,针对微观偏析可以通过热处理手段减轻其对钢材的影响,而针对宏观偏析则需重点对连铸二冷强度、钢水过热度、拉速和电磁搅拌参数等因素进行控制。该部分还模拟研究了结晶器电磁搅拌电流、搅拌频率等因素对磁场强度、钢液流速、钢液冲击深度等效果的影响。通过分析钢液流动状态,得到合适的电磁搅拌电流、频率值,可减少凝固后的缩孔、疏松和中心偏析等缺陷的产生。

感谢中国工程院干勇院士在百忙中为本书作序,干院士肯定了本书的价值和作者所做的工作,并针对高品质轴承钢和其他特殊钢生产的关键工艺因素提出了具体的建议。

感谢相关单位为本书提供的科研成果和数据资料。感谢稀贵金属绿色回收与提取北京市重点实验室和国际合作基地(GREM)和北京科技大学高品质钢研究中心(HQSC)所提供的支持和北京科技大学绿色冶金与冶金过程模拟仿真实验室(GPM²)所有成员的努力。

由于作者学识和时间所限,书中不妥之处在所难免,诚恳希望读者提出宝贵意见。

张立峰

2016年12月26日

目 录

第一部分 GCr15 轴承钢中的非金属夹杂物

1 轴承钢生产概述	1
1.1 轴承钢种类及发展历史	1
1.2 轴承钢冶炼工艺与路线	7
1.3 轴承钢的性能及质量要求	10
2 轴承钢中的非金属夹杂物	14
2.1 非金属夹杂物分类	14
2.2 夹杂物对轴承钢质量的影响	16
2.2.1 夹杂物影响轴承钢质量的作用机理	18
2.2.2 夹杂物类型对轴承钢质量的影响	22
2.3 钢中杂质元素对轴承钢中夹杂物的影响	37
2.3.1 钢中氧含量对轴承钢中夹杂物的影响	37
2.3.2 钢中钙含量对轴承钢中夹杂物的影响	41
2.3.3 钢中钛、氮含量对轴承钢中夹杂物的影响	44
2.4 精炼渣操作对轴承钢中夹杂物的影响	49
2.4.1 精炼渣氧化性对夹杂物的影响（强扩散脱氧技术）	49
2.4.2 精炼渣碱度对夹杂物的影响（高碱度渣技术）	55
2.4.3 精炼渣成分控制对轴承钢中夹杂物的影响	59
2.5 碱土金属对轴承钢中夹杂物的影响	62
2.6 耐火材料对轴承钢中夹杂物的影响	63
2.7 炉外精炼过程对轴承钢中非金属夹杂物的影响	68
2.7.1 VD 吹氩的影响	70
2.7.2 VD 真空处理的影响	71
2.7.3 RH 精炼过程的影响	73
2.7.4 温度控制的影响	83
2.8 中间包冶金对轴承钢中夹杂物的影响	84

2.8.1	中间包全封闭技术	85
2.8.2	中间包加热技术	86
2.8.3	水口结瘤对夹杂物及轧材缺陷的影响	92
2.9	连铸机直立段长度对轴承钢夹杂物的影响	94
3	钢厂轴承钢洁净度调研结果分析	98
3.1	钢厂 A 轴承钢调研结果分析	98
3.1.1	钢厂 A 轴承钢研究意义及方法	98
3.1.2	钢厂 A 轴承钢研究初步结果	100
3.1.3	研究初步结论及建议	111
3.2	钢厂 B 轴承钢调研结果分析	114
3.2.1	钢厂 B 轴承钢研究结果	114
3.2.2	研究初步结论及建议	123
3.3	国内典型厂家轴承钢洁净度对比分析	123
3.3.1	轴承钢轧材样氧氮含量分析	123
3.3.2	轴承钢轧材样夹杂物分析	125
3.4	轴承钢中非金属夹杂物控制总结	130

第二部分 GCr15 轴承钢中的碳化物

4	轴承钢中的碳化物概述	131
4.1	碳化物缺陷的分类	131
4.2	碳化物分布对金属材料抗腐蚀性能的影响	131
4.3	碳化物缺陷的控制研究现状	133
4.4	轴承钢抗腐蚀能力的提升研究现状	135
5	轴承钢连铸坯中液析碳化物行为	136
5.1	实验方法	136
5.2	铸坯 A 中液析碳化物行为	137
5.3	铸坯 B 中液析碳化物行为	140
5.4	两铸坯中液析碳化物行为对比	144
5.5	两铸坯相同位置 Cr 元素分布	146
5.6	液析碳化物消除时间的计算	149
5.6.1	液析碳化物扩散溶解机制模拟计算方法	150
5.6.2	液析碳化物的扩散溶解及其影响因素	150

5.7 轴承钢连铸坯中液析碳化物行为小结	155
6 轴承钢轧制全流程 Cr 元素分布与低倍检验孔洞形成机理	156
6.1 实验方法	156
6.2 铸坯中 Cr 元素分布及腐蚀形貌	156
6.3 开坯小方坯中 Cr 元素分布及腐蚀形貌	158
6.4 轧制过程中 Cr 元素分布及检验孔洞形貌变化	159
6.5 热轧盘条中低倍检验孔洞的分布规律	162
6.5.1 热轧盘条中低倍检验孔洞的初始形成位置	162
6.5.2 热轧盘条中低倍检验孔洞的形态变化	163
6.6 轴承钢低倍检验孔洞形成机理	166
6.7 轴承钢轧制全流程 Cr 元素分布与低倍检验孔洞形成机理小结	173
7 轴承钢低倍检验孔洞控制	175
7.1 铸坯高温扩散对 Cr 元素分布的影响	175
7.2 盘条高温扩散对低倍检验孔洞的影响	177
7.3 正火球化退火对轴承钢低倍检验孔洞的影响	179
7.4 工业实验	183
7.5 轴承钢低倍检验孔洞控制总结	187

第三部分 轴承钢连铸坯凝固组织和元素偏析

8 连铸坯微观偏析与宏观偏析控制研究现状	189
8.1 连铸坯微观偏析控制研究现状	190
8.1.1 微观偏析的定义	190
8.1.2 微观偏析的影响因素	190
8.1.3 微观偏析的控制技术	191
8.2 连铸坯宏观偏析控制研究现状	192
8.2.1 中心偏析形成理论	192
8.2.2 中心偏析的评级方法	193
8.2.3 中心偏析的控制措施	196
8.2.4 控制中心偏析的数学模拟研究	207
9 连铸坯凝固组织研究	215
9.1 实验方法	215

9.2	铸坯宏观凝固组织测定	216
9.3	铸坯枝晶臂间距测定	217
9.4	铸坯柱状晶偏转角测定	221
10	电磁搅拌下轴承钢连铸坯柱状晶偏转角的模拟仿真研究	226
10.1	模型描述	226
10.1.1	电磁场计算模型	226
10.1.2	流场计算模拟	229
10.2	模型验证	233
10.3	电磁力场和流场	233
10.4	柱状晶长度的测定	237
10.5	结晶器电磁搅拌对连铸坯凝固组织的影响	238
10.6	不同搅拌参数下的电磁场模拟	241
10.7	电磁搅拌对宏观组织的影响	242
10.8	电磁搅拌对枝晶臂间距的影响	244
10.8.1	PDAS 测量结果	244
10.8.2	SDAS 测量结果	246
10.9	电磁搅拌对柱状晶偏转角的影响	249
10.10	电磁搅拌对柱状晶长度的影响	253
11	GCr15 轴承钢连铸坯宏观偏析控制	255
11.1	连铸坯化学成分	255
11.2	连铸坯低倍侵蚀实验	257
11.3	连铸坯宏观组织统计	259
11.4	连铸过程结晶器传热模型	263
11.5	连铸过程二冷传热模型	267
11.6	连铸坯宏观组织模拟研究	271
11.7	连铸坯宏观偏析模拟研究	274
11.7.1	宏观偏析模拟计算	274
11.7.2	二冷水分布优化方案	278
11.8	GCr15 轴承钢工业验证实验	282
12	轴承钢凝固组织和元素偏析控制总结	287
	参考文献	289

第一部分 GCr15 轴承钢中的 非金属夹杂物

1 轴承钢生产概述

1.1 轴承钢种类及发展历史

轴承钢是用来制造滚珠、滚柱和轴承套圈的钢。轴承一般由内套圈、外套圈、滚动体（滚珠、滚柱或滚针）和保持器四部分组成，除保持器外，其余都由轴承钢制成，如图 1-1 所示^[1]。当轴承运作时，轴承内外套圈与滚动体间将承受高频率变应力的作用，要求轴承钢有高而均匀的硬度和耐磨性，以及高的弹性极限。因此，对轴承钢的化学成分的均匀性、非金属夹杂物的含量和分布、碳化物的分布等要求都十分严格，是所有钢铁生产中要求最严格的钢种之一。

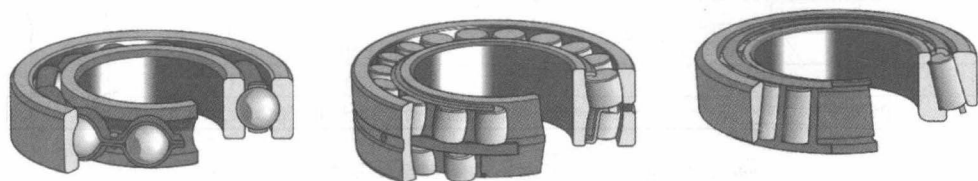


图 1-1 常用的滚动轴承（SKF）^[1]

轴承钢种类繁多，但基本上可分为高碳铬轴承钢、渗碳轴承钢、中碳轴承钢、不锈钢、高温轴承钢及无磁轴承钢等系列钢种。高碳铬轴承钢是轴承钢的代表钢种，包括 GCr15、GCr15SiMn、GCr4、GCr15SiMo、GCr18Mo 等。该类钢是轴承钢的主体，占到我国轴承钢总量的 90% 以上。我国高碳铬轴承钢的冶金水平、热处理水平及表面处理水平与国外相比尚有较大差距。GCr15 含 1% C 和 1.5% Cr，是一种合金含量较少，应用最广泛的高碳铬轴承钢，经过淬火加低温回火后具有较高的硬度、均匀的组织、良好的耐磨性、高的接触疲劳性能^[2]。渗

碳轴承钢是优质低碳或中碳合金钢，具有切削、冷加工性能良好、耐冲击、渗碳后耐磨、接触疲劳寿命高等优点。

滚动轴承是重要的机械基础件，在宇航、军工、机械制造、铁路运输以及汽车制造等行业中应用十分广泛。轴承使用的金属材料始于青铜、铸铁。轴承材料的发展经历了一个漫长的过程，其发展历程如表 1-1 所示^[3]。1905 年德国使用 SAE52100 高碳铬钢制造滚动轴承后，到 1920 年已经广泛用于滚动轴承制造，这是世界滚动轴承工业所用的第一代专用轴承钢；50 年代末，真空脱气钢问世，使轴承钢得到了迅猛的发展。

国外著名轴承制造商有瑞典 SKF 公司、日本 NSK 轴承公司、NTN 轴承公司、德国 FAG 轴承公司、美国 TIMKEN 轴承公司等，这些轴承行业大型企业，除了采用本国和本企业集团生产的轴承钢棒线材作为生产轴承基材外，也外购其他国家和其他钢厂生产的轴承钢材，如国内江阴兴澄特钢等企业生产的轴承钢即向 SKF、NSK 等轴承制造企业供货。国外高水平生产轴承钢的钢厂有瑞典 SKF 公司下属 Ovako 钢厂、日本山阳特殊钢、大同特殊钢、爱知制钢、住友金属公司小仓钢厂、JFE 公司仓敷钢厂、神户制钢公司神户钢厂与加古川钢厂、德国 ThyssenKrupp 钢铁公司、Saarstahl 钢厂等。高碳铬轴承钢是轴承钢的典型代表钢种，主要指成分为 1% C - 1.5% Cr 的钢种，该钢种在不同的国家牌号有所不同，如表 1-2 所示。

表 1-1 轴承材料的发展历程^[3]

年 代	轴承制作材料
公元前	木材或石材
40 年	青铜或铁
1520 年	铸造钢球
1879 年	淬火钢材
1865 年	铬钢
1901 年	1% 碳素钢
1905 年	高碳铬轴承钢（1% C-1.5% Cr）

表 1-2 世界各国高碳铬轴承钢牌号及成分（%）

型 号	C	Cr	Si	Mn	P	Mo	Ni	S
AISI 52100 (美国、韩国)	0.95 ~ 1.10	1.30 ~ 1.60	0.15 ~ 0.35	≤0.50	≤0.012	≤0.08	≤0.25	≤0.025
100Cr6 (德国)	0.95 ~ 1.10	1.35 ~ 1.65	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	≤0.030	≤0.10	—	≤0.020
SUJ2 (日本)	0.95 ~ 1.10	1.30 ~ 1.60	0.15 ~ 0.35	≤0.50	≤0.025	≤0.08	≤0.25	≤0.025
GCr15 (中国)	0.95 ~ 1.05	1.40 ~ 1.65	0.15 ~ 0.35	0.25 ~ 0.45	≤0.027	≤0.10	≤0.23	≤0.020

瑞典是世界轴承“王国”，历史悠久，产品质量居世界之冠。SKF 公司是世界著名跨国集团公司，经营项目很多，其中 SKF 轴承公司是世界上最大的轴承公司。SKF 公司开发了 SKF + MR 工艺，采用这种工艺，其轴承钢质量保持国际先进水平。这种工艺分两个阶段：首先在 SKF 双壳炉中氧化条件下将钢快速熔化；

然后在 ASEA-SKF 炉中在还原的条件下进行精炼，精炼工艺为：首先用 Fe-Si 进行预脱氧，然后扒渣，再加铝进一步脱氧，然后是脱硫和真空脱气，整个过程伴随感应搅拌。钢包可以加热，用铝沉淀脱氧，配以强烈的电磁搅拌，使脱氧产物充分分离，把轴承钢氧含量和夹杂物控制到了极低的程度。MR 代表两个工艺操作，氧化性气氛下熔化和还原性气氛下精炼，具体工艺过程可进行合金化、脱硫、脱氧等多种操作，具体如图 1-2 所示^[4]。近几十年来轴承钢洁净度的提高使得疲劳寿命得到很大提升，图 1-3 为瑞典 20 世纪 60 年代以前利用双渣法生产的“bad”电弧炉钢与瑞典 SKF + MR 操作生产的“modern”轴承钢疲劳寿命对比图，图中可以看出 SKF + MR 法大大提升了轴承钢的疲劳寿命，使瑞典轴承钢生产水平达到一个新高度。瑞典 Ovako 是通过模铸冶炼轴承钢，其普通级（B 级）轴承钢氧的质量分数控制在 $4 \sim 6\text{ppm}$ ($1\text{ppm} = 10^{-6}$)，Ovako 超高纯净轴承钢是各等向性轴承钢，极限疲劳强度和韧性在轧向和径向等各个方向基本相同，故而称为各向同性轴承钢。

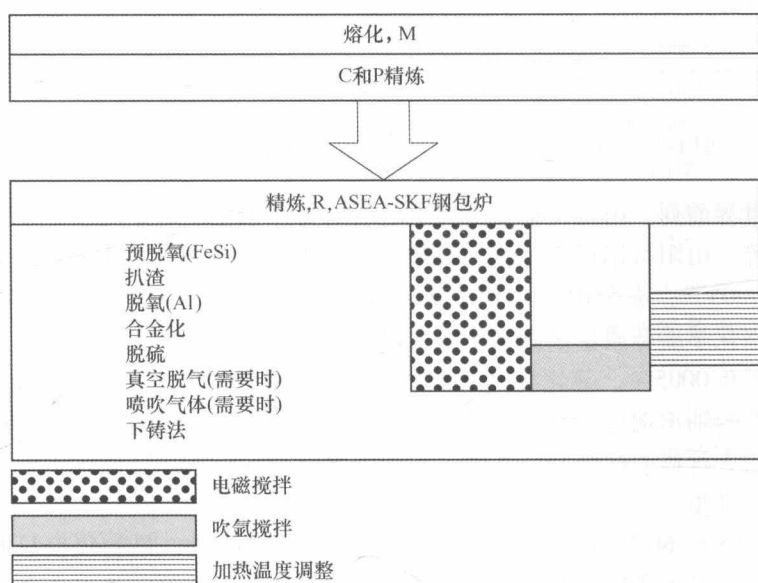


图 1-2 MR 操作过程^[4]

德国蒂森集团是欧洲最主要的轴承生产厂家之一，年产轴承约 16 万吨，可以将氧质量分数稳定控制在 6ppm 以下。

日本在 20 世纪 70 年代为了降低炼钢成本，提高钢的洁净度和质量，率先将炉外精炼技术应用于轴承钢生产中，随后西欧的钢铁企业也加入到推广和使用这项技术的行列中。日本轴承钢虽然起步相对较晚，但大有后来居上之势，经过近 40 多年的努力，通过加强科研，引进先进技术、装备，优化工艺，使轴承钢的

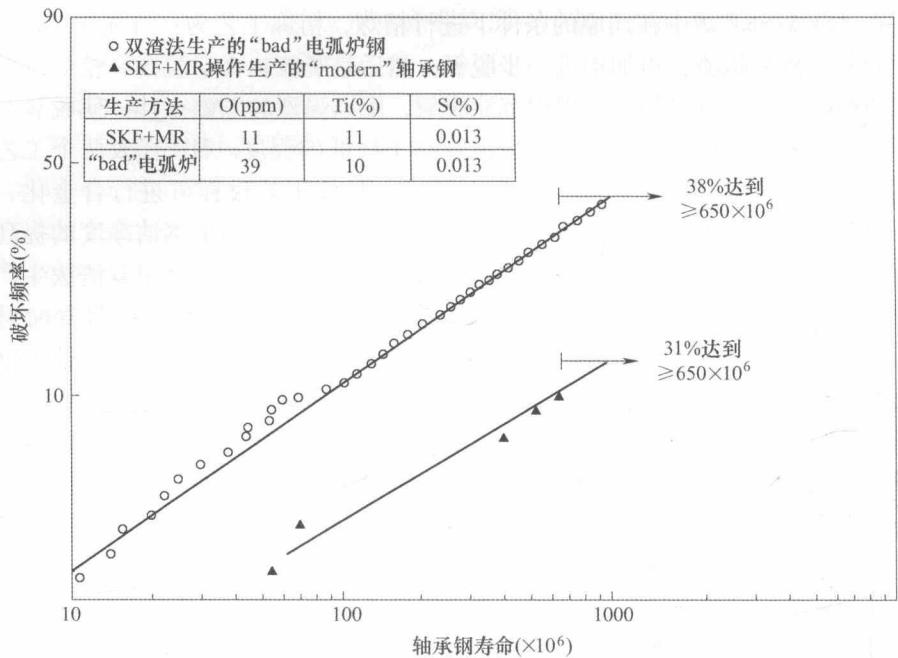
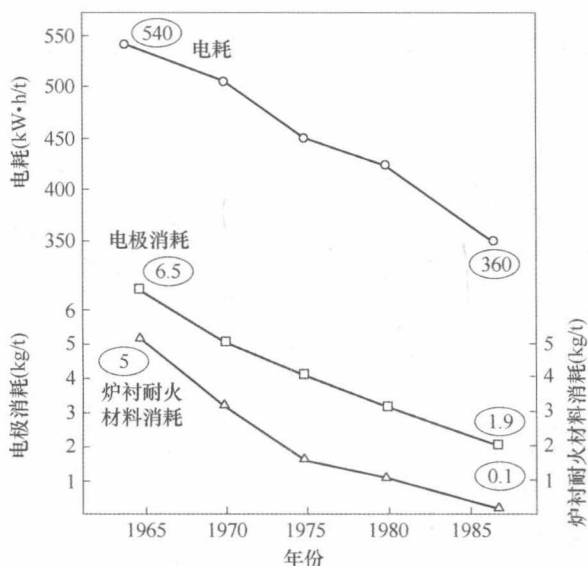


图 1-3 瑞典 MR 及 “bad” 电弧炉生产轴承钢疲劳寿命对比^[4]

质量跃居世界前列。山阳特钢是世界上著名的特殊钢生产厂家之一，以生产轴承钢管著称。山阳特钢近年开发的 SNRP 超纯净轴承钢生产工艺，生产出了氧含量小于 0.0005%，夹杂物尺寸不大于 11 μm 的轴承钢。山阳超高纯轴承钢（EP）代表轴承钢化学冶金质量最高水平。大同特钢开发出了 MRAC-SSS，可以生产出氧含量小于 0.0005%，氧化物夹杂极细小的轴承钢。神户、和歌山、爱知和新日铁钢厂生产的轴承钢 also 具有很高的水平。图 1-4 为日本生产轴承钢电耗、电极消耗和炉衬耐火材料消耗情况变化图，由图中可以看到日本在降低炼钢成本方面取得了很大的进步。

20 世纪 50 ~ 60 年代，是中国轴承钢生产的起步阶段，最初仅仅只能生产高碳铬轴承钢，对于高质量要求的轴承钢，均需要从苏联进口。经过几十年投入和发展，目前绝大多数钢厂都可以大规模生产轴承钢，成为名副其实的轴承钢生产大国。由于高档次轴承钢的标准高且使用量少，一般钢企在提高产品档次方面关注较少。这方面的不足逐渐引起注意后，面对激烈的国际竞争，我国轴承钢不能仅仅在产量上领先，质量和钢种开发上也必须有所突破，以增强我国冶金和轴承产业的国际竞争力。1967 年我国引进 RH 装置对 100t 碱性平炉钢液进行脱气处理，氧质量分数降到 20ppm 左右；20 世纪 70 年代以来，随着经济发展和工业技术进步，轴承的应用范围扩大；而国际贸易的发展，又推动了轴承钢标准国际化和新技术、新工艺及新装备的开发和应用，效率高、质量高、成本低的配套技术

图 1-4 日本轴承钢生产原材料消耗变化图^[5]

和工艺装备应运而生；80年代初开始大力推进炉外精炼技术，相继建立了 EAF + LFV、EAF + VAD、EAF + 吹氩或喂线等；1985 年又投产两座 50t 高功率电弧炉和一台 60tVAD 钢包精炼炉，标志着我国轴承钢生产进入炉外精炼时代；1985 年以来是对标国际先进水平阶段。钢厂炉外精炼技术趋于成熟，电炉容量趋于大型化，广泛应用连铸，已实现连铸坯热送，钢材洁净度显著提高^[6,7]。2000 年后国内特殊钢厂普遍采用了铝脱氧、高碱度精炼渣等超低氧特殊钢生产工艺技术，随着装备水平提高，更多地采用 RH 精炼和大方坯连铸等，轴承钢总氧含量和夹杂物控制水平显著提高。

我国近 20 年来轴承钢粗钢产量如图 1-5 所示。21 世纪初，我国轴承钢粗钢产量约为 92 万吨，2011 年达 378 万吨，2015 年达 258 万吨。产量提高的同时材质水平也取得了显著的进步，如兴澄特钢、宝钢特钢、北满特钢等都先后通过 SKF、FAG、NSK 和 Timken 等国际著名轴承公司的认证，已经成为其材料供应商。我国轴承行业发展至今，已具备相当的生产规模和较高的技术、质量水平，但是国产轴承钢与瑞典 SKF、日本山阳等先进厂家相比还存在一定差距，国外发达国家，比如瑞典、日本、德国、美国等国的轴承钢产量和质量都处于领先地位，其共同特点是设备先进、工艺技术成熟、质量稳定。我国轴承钢与国外的差距主要表现在以下三个方面：一是钢中微量杂质元素含量偏高；二是表面质量差（包括尺寸精度、表面裂纹和脱碳等）；三是内部质量不稳定，波动范围大。

国内以兴澄特钢、宝钢特材、东北特钢和江苏苏钢、南京钢厂等为代表的先进轴承钢生产企业，具有品质高和产量大等特点，代表了中国轴承钢冶金质量的最高水平。虽然国内轴承钢厂的冶金设备、工艺和生产流程与国外先进的轴承钢