

纯净钢及二次精炼

蒋国昌编著

上海科学技术出版社

- 纯净钢概述
- 二次精炼技术发展和运行参数
- 二次精炼过程的单元操作分析
- 几种纯净钢的二次精炼技术及其分析
- 二次精炼技术的整体优化和系统优化

纯净钢及二次精炼

蒋国昌编著

上海科学技术出版社

ISBN 7-5323-4132-1



9 787532 341320 >

ISBN 7-5323-4132-1/TF·3

定 价： 30.00 元



纯净钢及二次精炼

蒋国昌 编著

上海科学技术出版社

1995.4

责任编辑 任 侃

纯净铜及二次精炼

蒋国昌 编著

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所经销 常熟文化印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 20 字数 440,000

1996年10月第1版 1996年10月第1次印刷

印数 1—2,000

ISBN 7-5323-4132-1/TF·3

定价: 30.00 元

内 容 提 要

本书是一本综述纯净钢生产及二次精炼技术的专著。

全书分五章。第一章纯净钢概论；第二章二次精炼技术的发展和运行参数；第三章二次精炼过程的单元操作分析；第四章几种纯净钢的二次精炼技术及其分析；第五章二次精炼技术的整体优化和系统优化。资料详实，说理明晰；并配有 400 余幅插图，以辅助文字说明。

本书可供从事钢铁生产、研究的工程技术人员(包括企业家和工程师)阅读；亦可供大专院校有关专业师生采作教材或教学参考书。

序

—

我国钢产量 1993 年已逾 8800 万吨,跨进了世界钢铁大国的前列。这是多年来全国冶金工作者及生产者辛勤劳动的成果。但我国钢铁工业的总体水平和世界先进国家相比,还存在相当大的差距。钢材品种缺、质量差、成本高,而工艺流程老、冶炼轧制设备旧,正是我国大多数钢厂亟待解决的问题。今后主要是提高钢质量问题,以求得低能耗、高成材率及高质量、低成本及高劳动生产率而符合高标准要求的钢材。近二三十年来,国际钢铁界已成功地肯定两个行之有效的钢铁生产流程:即从矿石开始的高炉熔炼——铁水预处理——转炉吹炼——二次精炼——连铸——连轧长流程;和以废钢为原料的电炉熔炼——二次精炼——连铸——连轧短流程。长流程适用于大型钢厂;在生产高档次、高质量及高附加值如深冲钢板、涂层板、油井管等板管钢材方面占有优势。对废钢富有国家,短流程则适用于中小型钢厂,在生产长材(棒、型、线)及普通管板钢材方面则具有优越的竞争能力。但无论采用哪一种流程,其核心的关键性环节是近 20 年来蓬勃发展的二次精炼技术。没有二次精炼,则无法达到纯净钢的特殊要求。通过二次精炼,电炉及转炉均失去原有的炼钢功能。电炉操作只有熔化期,主要完成废钢熔化及钢水提温的功能。转炉则基本上完成铁水脱碳及钢水提温的作用。本世纪 50 年代钢材含硫、磷量一般各小于 0.05%,优质钢硫、磷量一般各自为 $\leq 0.02\%$,也即单零的标准。近 20 年来,随着宇航、航空、石油、汽车、国防及微电子工业的蓬勃发展,日益要求降低钢铁杂质的含量。由于冶炼新技术及多功能二次精炼技术的广泛被采用,到 80 年代末期,钢铁杂质含量已能做到:硫 $\leq 5 \times 10^{-6}$,磷 $\leq 30 \times 10^{-6}$,碳 $\leq 10 \times 10^{-6}$,氮 $\leq 15 \times 10^{-6}$,氧 $\leq 5 \times 10^{-6}$,氢 $\leq (1 \sim 2) \times 10^{-6}$;也即各杂质均降到双零或三零的标准。人们发现,钢的纯净度愈高,其性能愈好。例如,轴承钢当 $[\%O]$ 由 30×10^{-4} 降到 15×10^{-4} 时,其接触疲劳寿命提高 5 倍;降到 10×10^{-4} 时提高 15 倍;而降到 5×10^{-4} 时则可提高 30 倍。对热轧宽带 $[\%S]$ 由 0.02 降到 0.001,钢的横向冲击值提高 12~15 倍。硫在钢内一般以球形 MnS 存在,在轧制时延伸为长条体,造成钢材在纵、横、深三个方向有不同冲击值。此异向性加大深冲废品率。而且在 0°C 以下,冲击值大为下降,使钢材在低温环境下难以应用。对双零标准的含硫钢,当通过用 Ca、Mg、Zr 或稀土元素处理后,则硫化物在轧制后永保球形,使三个方向的冲击值几乎相等,形成所谓的均向钢,而且在 0°C 下的冲击值 and 高温时相比下降并不多,其值且高于单零标准普通含硫钢高温时的冲击值。变型处理用的喷粉或喂丝精炼设备,如瑞典的 SL 法,德国的 TN 法,日本的 KIP 法等等均系 70~80 年代开发成功的,都已在国际上广泛地被采用。

我国二次精炼设备起步不晚,60 年代即自行设计制造 DH 真空处理设备。全国各厂先后安装各种二次精炼设备至少 100 台以上。但除极少数大厂在经常使用外,其余则停停开开,甚至长期废弃不用。其主要原因有三:(1) 二次精炼技术尚未引起国人的重视;(2) 高质量钢不高价。在一段时期由二次精炼付出的费用,得不到钢价的提高;(3) 销售市场钢材来源供不应求,人们满足于低质量的钢材。但一旦正式参加世界贸易组织之后,国内外市场

合流,面对国际市场严峻的竞争挑战,我国钢铁企业,如不加以全面结构优化及深化改革,大力开发二次精炼技术以提高质量,提高劳动生产率,则前途维艰,难以设想。

上海大学(原上海工业大学)蒋国昌教授等同志积累多年的教学科研经验和深入的工厂实践知识,写出《纯净钢及二次精炼》一书,实系我国钢铁界一件大喜事。全书贯彻理论联系实际的原则,不仅综合论述各种二次精炼技术及工艺过程,并从理论上阐明炼制纯净钢的原理,而且又根据钢种及各厂具体条件的不同提供选用适当的二次精炼设备的原则和方法。我国尚有不少钢种质量不过关,且更有若干品种不能自制。后者大多是属于高纯净度、准确而狭窄的化学成分范围、高表面质量及严格要求机械性能的钢种。读者可从本书获得二次精炼技术的全面知识,并可认清在提高钢质量、扩大钢品种方面二次精炼所起的关键性作用和应占有的地位。本书的出版发行,将对促进我国钢铁企业的结构优化及深化改革,使产品立足于市场竞争轨道上发展,起到积极的指导作用。

魏寿昆

1994年8月24日于北京科技大学

序 二

蒋国昌教授撰写的《纯净钢及二次精炼》一书即将问世,作为同事、校友,特别是在科研与教学上多年紧密合作的挚友,我怀着喜悦与兴奋的心情,向钢铁冶金领域的工程技术人员、研究工作者推荐此书。并借此机会,略抒读后的心得与感想。

钢铁冶金是一门古老的学科,作为工艺技术已有几千年的历史,曾为人类物质文明进步作过巨大的贡献。但是,由于存在高温过程熔体内组元的结构不易确定,及反应瞬时状态测定的困难,长期以来,对钢铁冶金过程各种反应进行预测、计算乃至控制,都是采用经验数据、统计模型等办法,使这一学科始终被称为技艺,蒙上了神秘的面纱。这种情况,到本世纪 50 年代后期才取得突破性的进展。一方面是由于大型高炉、氧气转炉的出现,生产率大大提高,反应速度成倍增加,迫切需要过程自动控制,以便正确判断和及时反馈调节各种参数。另一方面则是对钢质量的要求越来越高,钢铁冶金工作者为提高钢纯净度而展开了大量基础研究。据统计从 60 年代到 70 年代,钢铁冶金学科方面的研究论文,比本世纪前半叶之总和还多一倍以上。其中特别是日本和德国的学者,起了某种中坚及先锋的作用。正因为此,他们几乎垄断了除 AOD 法以外的、所有钢铁冶金的新工艺新技术的开发。而这些工艺技术的诞生无不围绕着冶金物理化学在生产中的应用和钢中杂质元素最大限度地去除这两个主要命题展开的。大致上从 50 年代后期,到 70 年代初,是钢液真空处理与真空冶金研究的高峰期,DH、RH、VI、VAR 及 VOD 等先后商业化,成为生产低氢、氧钢的主要手段。70 年代到 80 年代中期,为了配合大型氧气转炉的少渣、无渣操作,提高转炉生产率,大力开展了铁水预处理的研究,并把其任务从铁水脱硫延伸到脱磷、脱硅。这一时期的研究,不仅揭示了许多冶金反应的新领域(如还原脱磷、卤族元素及碱土金属在铁液精炼中的应用),还使转炉成了高效的脱碳精炼反应器,提出了钢液精炼过程单元操作的新概念。70 年代中、后期至 80 年代,是钢液炉外精炼的孕育和大发展期,它的出现首先是因为石油化工工业的大发展,急需大批量的石油管线钢、油井管钢,以及反应塔用中厚板,一般电炉钢厂的产量、炉子吨位都满足不了其大数量少炉批的要求,因此,就要用氧气转炉钢厂的高生产率、大批量,加上炉外精炼来实现。与此同时,70 年代初运用于生产的 HP 和 UHP 电炉,也要求把精炼移到炉外,使之成为高效率熔化器,从而进一步提高高功率变压器的时间利用率。

回顾过去的 30 多年,可以说是钢铁冶金从工艺技术走向应用科学的转折期。计算机科学的发展及其在工业中的应用,为冶金熔体反应的热力学计算和速率现象研究提供了有力的工具。高温下熔体反应的 X-射线连续摄象装置、研究熔体结构的 Raman 谱仪等的出现,也为这种计算提供了直接、客观的证据。这些都使钢铁冶金新工艺、新技术的开发具有更加坚实的理论基础。这本书的出版,从纯净钢及二次精炼的角度,反映了钢铁冶金学科在理论上的成熟与进步。因此,本书对于初入这一领域的研究生及本、专科学生,或已有多年实践经验的工程技术人员,都将是十分有益的。

《纯净钢及二次精炼》一书的编写还是上海市高校重点学科——上海大学(原上海工业大学)钢铁冶金学科建设的一项内容。旨在总结该学科多年来在纯净钢及二次精炼方面的科研成果与研究论文,并广泛搜集国内、外在这一领域的最新进展。进而达到理论演绎与工艺优化相结合,以理论基础为重;本学科研究成果与国内、外进展俱呈,体现中国和上海的特色。值得指出的是,蒋国昌教授多年来致力于将冶金物化理论,应用于二次精炼、熔融还原等前沿课题,并已成功地在国内、外发表多篇高水平的学术论文,本书的出版又一次显示了他坚实而深厚的学科理论基础,也是他对本学科从工艺技术走向应用理论学科的一大贡献。

近代钢铁工业起源于欧洲,本世纪上半叶在北美及前苏联形成大规模、支柱型产业,六七十年代其技术发展在日本达到顶峰。但是,西方工业化国家已渡过其高速增长阶段,产业结构趋向高附加值、低能耗、低物耗的信息技术、生物技术和第三产业。在可以预计到的未来,发展中国家将转而成为世界钢铁生产的主要增长基地,其所占比重也会越来越大。作为人口众多的发展中大国的中国,已义不容辞地成为未来钢铁工业发展的中心,到本世纪末,我们不仅要在钢铁生产的规模上处于世界前列,还应担当起钢铁冶金学研究、发展的重任,这是中国冶金工作者的光荣;也将是中华民族在人类物质文明进步史上的又一重大贡献!让我们团结起来,努力承担起这一历史性的召唤吧!



1994年9月18日

前 言

作为一个发展中的国家,我国的钢铁工业乃是国民经济的支柱之一。在相当长的一段时期内,我国还必须不断地发展和提高这个基础工业的水平,才能满足国家现代化建设的要求。而且,上海地区现在已成为我国最主要的钢铁生产基地之一,十分需要得到人才培养和新技术探索等方面的支持。为了适应这种形势,上海市教育委员会在我校设置了钢铁冶金重点学科,上海市科学技术委员会又决定进一步建设钢铁冶金新技术开发应用重点实验室。为提高教学质量,并为企业领导者及工程技术人员的继续教育作出一些贡献,要求我们编出几册专著。本书是其中之一。

本书是涉及纯净钢及二次精炼领域的一本专著。高度纯净的钢是发展各种先进技术(汽车、家电、油气采掘和化工、核反应堆等)所急需的材料。而二次精炼的重要性已日益为冶金界公认。这不仅是炼制高度纯净钢的经济手段,而且在钢铁大生产中它对流程的优化、运行的稳定、产量的提高、成本的降低和综合经济效益的增加都有不可取代的作用。

本书不打算从冶金学基础讲起,而是假设读者已经有了相应的初步知识,希望从本书得到更深的理解,更全面的掌握和新的启示。因此本书一方面重视技术实践规律的提炼,另一方面又特别着眼于引导读者应用基础理论知识去分析有关技术问题,掌握理论预测指导技术工作的方法。也就是说,作者试图在本书的编著中反映出我们这个研究集体的学术风格:工艺和理论的并重及互相渗透,并试图阐明怎样分析一项精炼技术。尽管作者能力有限,我们仍然执著地努力按此要求去写作。

本书的第一章是纯净钢的基本知识。写这一章是因为我们感到冶炼工作者往往不很清晰地了解为什么要不断减少钢中杂质,以及这些杂质究竟是什么;第二章主要是为工程师和企业家写的,作者期望这些技术性的(也包括一些经济性的)内容能对他们掌握操作、改进生产有所帮助;第三章是为研究人员(包括研究生)写的,涉及各种二次精炼技术的冶金学基础。如果说第二章的笔法是纵向的,第三章是横向的,第四章基本上是综合性地阐述若干最新的技术成就、特点及其理论依据。作者期望这一章能帮助人们在开创新技术时取得突破。第五章涉及的是设计和规划方面的“宏观”优化问题。

本书由蒋国昌执笔,和朱钰如教授合作编著了第一章,和周月明讲师合作编著了第二章,和壮云乾教授、陆利明讲师合作编著了第四章。徐匡迪、徐建伦、朱钰如三位教授对全书提出了宝贵意见,并和作者进行了极有意义的讨论。研究生李宏承担了部分初稿的计算机打印,作者对他们表示衷心的感谢。

本书总结了本学科的研究成果,更引用了大量文献资料,这些文献的原著者都为世界钢铁冶金技术和学术的进步作出了有意义的乃至重要的贡献,作者在这里向他们表示崇高的敬意和诚挚的谢意。

蒋国昌

1994年10月

目 录

第一章 纯净钢概论	1
§ 1-1 纯净钢的由来和发展	1
§ 1-2 滚珠轴承钢的纯净度要求	2
1-2-1 接触疲劳破坏的特征	2
1-2-2 非金属夹杂物对接触疲劳破坏的作用及理论解释	3
1-2-3 其他因素的影响	9
§ 1-3 结构钢的纯净度要求	10
1-3-1 热加工性	10
1-3-2 冷压加工性	11
1-3-3 可焊性	15
1-3-4 易切削性	18
1-3-5 承载能力对钢纯净度的要求	23
1-3-6 大锻件对纯净度的要求	32
1-3-7 薄板的可涂覆性能	32
§ 1-4 不锈钢、耐蚀钢和耐热钢的纯净度要求	32
1-4-1 耐蚀性	32
1-4-2 热强性	34
1-4-3 超纯铁素体不锈钢和高氮铁素体耐热钢	35
§ 1-5 电工用钢的纯净度要求	35
§ 1-6 纯净钢的标准	39
参考文献	41
第二章 二次精炼技术的发展和运行参数	43
§ 2-1 二次精炼技术的发展历程及在钢铁生产中的作用	43
§ 2-2 钢包冶金分类与发展	50
2-2-1 不含真空设施的简易型钢包精炼技术	50
2-2-2 真空脱气技术	59
2-2-3 钢包炉	68
2-2-4 VOD 和 AOD	88
2-2-5 钢包喷粉和喂丝	94
§ 2-3 中间包冶金学	103
2-3-1 物料在连续式反应器内宏观流动特征的描述	103
2-3-2 钢水稳定流动阶段的分析	106
2-3-3 大包更换期的分析	112
§ 2-4 铁水预处理 (战略问题和反应器问题)	117
参考文献	128

第三章 二次精炼过程的单元操作分析	135
§ 3-1 搅拌能	135
3-1-1 底吹气的搅拌能	135
3-1-2 顶吹气的搅拌能	137
3-1-3 行波电磁场的搅拌能	137
3-1-4 旋转磁场的搅拌能	139
3-1-5 钢水注流引起的搅拌能	140
§ 3-2 搅拌对流动和传质、传热的作用	140
3-2-1 搅拌能和熔池均匀化的关系	140
3-2-2 底吹气时钢包中钢水环流量	142
3-2-3 为什么要描述搅拌作用下流场的特点	144
3-2-4 搅拌作用下的流场的描述	146
§ 3-3 淹没吹 Ar 时气泡的行为及去[H]作用	151
3-3-1 Ar 气泡的去[H]动力学	151
3-3-2 DH-吹 Ar 过程中去[H]的综合速率方程	152
3-3-3 气泡流-射束两种机制的转换	152
§ 3-4 渣系选择	153
3-4-1 熔渣的键合结构	153
3-4-2 按“容量”选择渣系	154
3-4-3 利用光学碱度及熔渣模型对硫容量、磷容量的预测	163
§ 3-5 渣金反应的强化	169
3-5-1 搅动对渣金反应速率常数的影响	169
3-5-2 电化学的基本概念及公式	174
3-5-3 渣金反应动力学理论分析的一例	177
§ 3-6 喷渣粉	180
3-6-1 持久反应和瞬间反应的电化学模型	180
3-6-2 瞬间反应的影响因素	181
3-6-3 瞬间反应的效率和持久反应与瞬间反应的配合	184
3-6-4 喷粉过程中的吸氮	184
§ 3-7 沉淀脱氧及钢水中异相浮游物的行为	185
3-7-1 沉淀脱氧的原则	186
3-7-2 搅动促进钢水中异相浮游物向渣、衬的排除	186
3-7-3 搅动促进夹杂物聚合长大	188
3-7-4 界面张力作用的定量化	188
3-7-5 卷渣	189
§ 3-8 钙(镁)处理及非金属夹杂物的类型控制	189
3-8-1 钙(镁)处理的基本热力学资料	189
3-8-2 线材和带材钢中的夹杂物类型控制	190
3-8-3 镇静钢夹杂物变性处理的工艺依据	190
3-8-4 Gaye 模型在钙处理中的应用	192
3-8-5 用钙处理抑制 AlN 的生成	194
3-8-6 Ca 的有效利用率	194

§ 3-9 二次精炼中的热损分析和加热问题	197
3-9-1 出钢过程中钢水温降的分析	197
3-9-2 钢包包衬中温度曲线的分析	198
3-9-3 三相电弧加热的热效率分析	200
3-9-4 电弧加热功率的确定及耐材损耗指数	202
3-9-5 化学加热时 Al 和 O_2 的有效升温能力	203
3-9-6 渣粉及喂入线的加热	204
§ 3-10 RH 过程的理论模拟	207
3-10-1 环流量(环流速率)的理论模型	207
3-10-2 钢水在 RH 真空室内的滞留时间和去气速率	212
3-10-3 吹 Ar 口结构参数的优化	213
3-10-4 RH 处理时大包内的流场和浓度场	215
3-10-5 RH-IJ 的特点	217
参考文献	219
第四章 几种纯净钢的二次精炼技术及其分析	223
§ 4-1 微细夹杂物的利用或排除	223
4-1-1 结构钢中的晶内铁素体片技术	223
4-1-2 铸坯冷凝过程中 MnS 析出的理论模型	233
4-1-3 排除微细夹杂物的新技术及其分析	241
§ 4-2 高合金钢脱磷	244
4-2-1 氧化脱磷	245
4-2-2 还原脱磷	252
4-2-3 氧化脱磷和还原脱磷的比较	255
§ 4-3 超低硫钢	258
4-3-1 程序喷粉技术	258
4-3-2 低压喷粉	262
4-3-3 RH-IJ, RH-PB, RH-PTB, VOD-PB, LF-PTB	264
4-3-4 顶喷时粉料群体侵入深度的计算	266
§ 4-4 超低氮钢和高氮钢	267
4-4-1 铁水吸氮过程动力学	268
4-4-2 铁水脱氮过程动力学	269
4-4-3 吹 Ar 脱氮过程动力学	270
4-4-4 低氮钢和超低氮钢冶炼技术	273
4-4-5 高氮钢冶炼技术	274
§ 4-5 超低碳钢	275
4-5-1 用 RH 深脱碳的基本规律和技术措施	275
4-5-2 用 RH-OB、RH-KTB(PTB)等深脱碳的优点	282
4-5-3 超低碳范蒂里脱碳反应的综合速率方程	285
4-5-4 超低碳范蒂里脱碳过程数模和终点预报模型	288
4-5-5 超低碳高合金钢的脱碳和脱氮(VOD-PB 的应用)	290
参考文献	290
第五章 二次精炼技术的整体优化和系统优化	295

§ 5-1 系统优化	295
5-1-1 立足于产品选用二次精炼主体装备的原则	295
5-1-2 方案的变更——有制约的优化原则	298
5-1-3 前后工序匹配和整体效应	300
§ 5-2 整体优化	301
参考文献	301
附录	302
一、本书符号表	302
二、工艺技术的代号	303

第一章 纯净钢概论

§ 1-1 纯净钢的由来和发展

1962 年秋,英国钢铁协会首先以纯净钢为主题举行了学术会议。自此之后,纯净钢的理论、检验方法和生产技术一直是钢铁冶金界的重要课题,由一系列国际学术会议的召开^[1~10],可以集中地看到纯净钢这一领域里逐年的历程、业绩和新的趋势。

在钢铁工业的发展中,人们始终没有放弃过提高钢质量的奋斗,因为只有不断更新钢的质量才能适应其它科技和工业部门发展之需。同时这也是市场竞争的结果,尤其是发展中国家钢产量大幅度增长,促使发达国家不得不靠提高质量去保持市场。纯净钢概念的提出是一个新的里程碑,反映了对钢质量更苛刻的要求。

什么是纯净钢?顾名思义,纯净钢应该是所含杂质很少的钢。从历史上看,在钢铁冶金形成产业之后,人们首先注意到的杂质有:氧、硫、磷和氢^[11]。氢的问题(例如它引起的宏观缺陷“白点”)虽然也曾使人们困惑了一个时期,但自真空冶金技术开发之后已迎刃而解。磷,除了使用高磷原料或要求超低磷纯度的情况之外,没有给炼钢工作者带来严重的困难,因为多数钢种只要求 $[\%P] \leq 0.035$ 。但,氧和硫则不同。在钢液中,氧部分以溶解态存在,部分以某种悬浮的氧化物夹杂形式存在。钢凝固过程必然又有二次脱氧反应。另外,绝大部分硫也在此时析出而成为硫化物夹杂。Kiessling (对纯净钢的发展有重大贡献的学者之一)曾作过如表 1-1 所示的计算^[11]。他假设钢仅含 1×10^{-6} 的氧与 1×10^{-6} 的硫,并全转变成直径 $1\mu\text{m}$ 的球状 Al_2O_3 和 MnS ,每吨钢将含 10^{12} 量级的夹杂物。可见,不管人们怎样改进精炼技术,所得的钢仍然只是由合金基体与非金属夹杂物构成的复合材料。即,理论上不可能产生出不含非金属夹杂物的钢。而非金属夹杂物对钢性能的影响十分复杂。不仅其数量,其组成、粒度、形状、硬度乃至在显微镜下的分布特征都是必须考察的因素。因此,常用非金属夹杂物沾污度的概念来作为综合的指标。然而,怎样准确地评定非金属夹杂沾污度却又是一个难题。如果取样测钢的总氧量,测定结果的准确度可以说主要取决于定氧仪的系统误差,因为氧在钢液中是均布的。但钢坯中非金属夹杂物的分布很不均匀。这就是说,评定非金属夹杂物沾污度时首先要考虑的是所取试样有没有代表性。一句话,炼钢工作者不得不运用统计学的方法来研究非金属夹杂物问题。正是由于如此的复杂,氧、硫及非金属夹杂物的研究始终是纯净钢这一领域里的核心课题。尽管,标志其早期的历史性进展的论著,在本世纪 30 年代初就已问世^[11]。

氮,人们也早就发现它的有害作用。不过大体上在 50 年代中才开始有重要的研究工作^[12]。到今天,则出现了尖锐的对立。一方面,国际上已召开了两届讨论高氮钢的学术会议。除众所周知的奥氏体不锈钢之外,在低合金高强度钢和铁素体合金钢两大类中主张以氮代碳;另一方面,对其它的钢种又提出了超低氮的纯度要求。

纯净钢的一个重要进展是 Kiessling 提出把痕量残余元素 (Pb, As, Sb, Bi, Cu, Sn) 归

表 1-1 以球状 Al_2O_3 和 MnS 形态存在的 O 和 S 均为 1×10^{-6} 时, 钢中夹杂物的粒度和数量^[11]

夹杂直径(μm)	每吨钢中夹杂的颗数	夹杂物之间的距离
1000	2.3×10^3	3.8cm
100	2.3×10^6	3.8mm
10	2.3×10^9	380 μm
1	2.3×10^{12}	38 μm
10^{-1}	2.3×10^{15}	3.8 μm
10^{-2}	2.3×10^{18}	0.38 μm
10^{-3}	2.3×10^{21}	0.038 μm

入钢中杂质之列^[1]。人们开始注意这些元素相当晚, 约是 70 年代中的事。原因在于: 它们一般不是作为合金元素使用的, 而是作为各种原材料(合金剂、废钢等)的伴随物被无意中带入钢液。通常它们的含量又少, 约在 0.01% 以下。所以长期以来它们不是炼钢生产中常规检验的对象。此外, 促使人们注意这些元素的另一个因素是它们并非一般的氧化或还原操作所能有效排除的。这样, 随着废钢一次又一次地返回利用, 它们在其中也就越来越多。

最后, 还必须提到碳。钢是铁-碳合金, 但不锈钢中碳为有害元素, 这也是人们熟知的。最近的发展是响应汽车制造业对薄板的需求而推出的 IF (无间隙相元素钢) 等新钢种。碳在这些钢中又变成了最主要的杂质! 事实上, 并非仅仅是碳, 其它一些常用的合金元素在某些情况下也起有害作用^[13]。

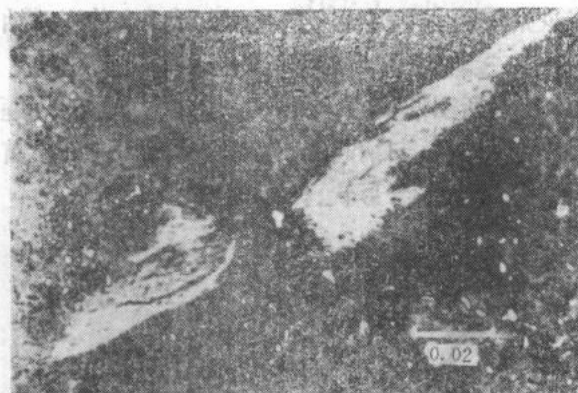
以上的论述给了读者什么印象呢? 最深的印象可说是杂质的队伍不断扩大。另一方面, 某个元素(如已提及的氮和碳)却又并不总在杂质的队伍内。对不同的钢种, 杂质的概念有所不同, 甚至截然相反。这是接着必须深入分析的问题。

§ 1-2 滚珠轴承钢的纯净度要求

1-2-1 接触疲劳破坏的特征

滚珠轴承在其运行一段时间后, 通常都因接触疲劳破坏而报废。此时, 在其工作滚道上会出现一些表层剥落所致的凹坑, 俗称“麻点”。这种破坏和滚珠轴承工作时的承载特点密切相关。滚珠轴承运行时, 其滚道处于承载-卸载的循环中。载荷使接触点附近三向受压。与此相应, 在接触点的皮下 0.10~0.50 mm 处, 切应力呈最大值。另外, 由于必然存在的摩擦作用或形状尺寸因素的作用, 更使此切应力增大。这就是引起“麻点”的外因。整个滚道上各处的皮下切应力大体上可以说是一致的, 而“麻点”仅出现于某些局部, 可见“麻点”的形成还有它的内因。

材料的疲劳破坏有很多不同的形式。它们的共同特点是整个破坏过程可分为裂纹的萌发和扩展两个阶段。滚珠轴承的接触疲劳破坏也不例外。Tricot 指出^[14]: 处于萌芽状态的裂纹常呈特征性的蝶形, 如图 1-1。蝶的两翼常和滚道成 45° 角, 而此两翼之间则常是一个非金属夹杂。若此滚珠轴承可沿双向滚动, 就能够在其中观察到如图 1-2 所示的“双蝶现象”。当这种“蝶”长大到某一尺度后, 沿着其一翼就会出现逐渐向滚道表面扩展的显微裂纹, 如图 1-3 所示。可见, 滚珠轴承上出现“麻点”的内因就是滚道的皮下存在着非金属夹杂物。



× 500

图 1-1 滚珠轴承接触疲劳开裂萌发时的蝶形

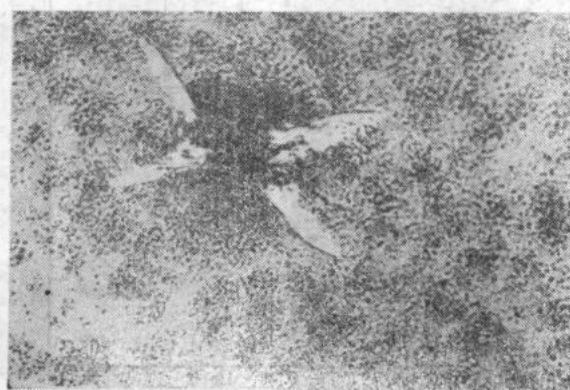
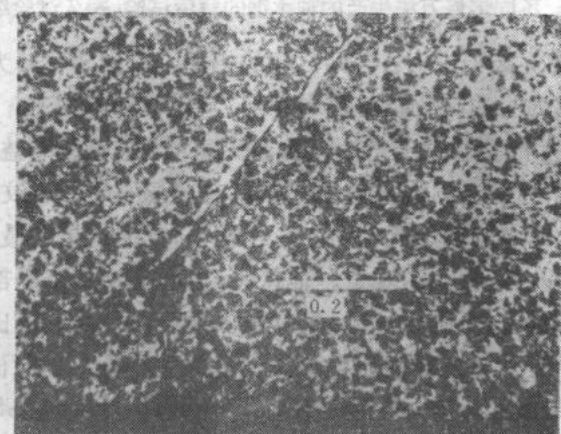


图 1-2 双蝶形的裂纹



× 200

图 1-3 蝶形裂纹扩展到试样表面的一例

1-2-2 非金属夹杂物对接触疲劳破坏的作用及理论解释

非金属夹杂物的作用在于破坏了钢基体组织的连续性和均匀性，从而在该处引发应力集中。它叠加于外应力之上，使钢最终疲劳开裂。若无此应力集中，那么滚珠轴承就将有很高的接触疲劳寿命。图 1-4 将几种熔炼方法生产的滚珠轴承作了比较。众所周知，真空电