

高等学校教学用书

金属材料

冶炼工艺学

AODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

金属材料冶炼工艺学

北京科技大学 王 惠 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料冶炼工艺学 / 王惠主编. -北京: 冶金工业出版社, 1995

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1609-9

I. 金… II. 王… III. 金属材料-熔炼-工艺学-高等学校教材 IV. TF111

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第13219号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

有色曙光印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1995年5月第1版, 1995年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16, 11.5印张 272千字 178页, 1-1500册
7.00元

前 言

本书是根据金属材料及热处理、粉末冶金专业教学计划中“普通冶金”、“金属工艺学”等必修课教学大纲的要求编写的。原讲义在北京科技大学使用过多次，经调整、补充和修改编成此书。

冶炼工艺对金属材料质量具有极为重要的影响，本书着眼于培养学生提高分析和解决冶炼质量问题的能力，突出冶炼工艺与金属材料质量的关系。全书分为两篇共十三章。第一篇八章，内容为合金钢及合金冶炼的物理化学过程，这是控制产品冶炼质量（成分控制、纯洁度及铸态组织）的理论基础；第二篇五章，内容为炼钢方法，包括一次熔炼，炉外精炼，二次重熔及钢锭浇注，并论述冶炼工艺路线的选择原则和合金钢及合金冶炼的发展动向。由于现代科学技术对高质量金属材料的需求不断扩大，本书加强了特种冶炼的内容。

本书由北京科技大学胡尧和（三、九章）、王勇（四、八、十一章）、傅杰（绪论、六、七、十三章）、王惠（一、二、五、十、十二章）四同志合作编写。由王惠担任全书主编。

本书原稿曾经北京科技大学马廷温教授、东北大学芮树森教授审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，编者谨向这些同志表示衷心的感谢。

本书适用于高等院校冶金类和机械类的金属材料及热处理、粉末冶金等专业作为教材，并可供钢铁冶金、压力加工、机械制造和铸造专业的学生和有关科技人员参考。

限于编者水平，本书难免有不少缺点甚至错误之处，欢迎读者批评指正。

编者

一九九四年七月

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 合金钢及合金冶炼的物理化学过程

第一章 冶金熔体	7
第一节 熔铁	7
第二节 炼钢炉渣	9
第二章 元素的氧化与合金的脱氧	17
第一节 熔池传氧过程	17
第二节 合金元素的氧化度和氧化物的稳定性	13
第三节 脱氧原理和脱氧方法	21
第四节 炼钢的合金化过程	24
第三章 炼钢过程的脱碳反应	27
第一节 脱碳反应的作用	27
第二节 脱碳反应的热力学	28
第三节 脱碳反应的动力学	31
第四节 脱碳反应的控制	33
第四章 脱磷与脱硫	36
第一节 脱磷	36
第二节 脱硫	40
第五章 炼钢过程的去气	47
第一节 气体对钢及合金性能的影响	47
第二节 气体在钢及合金中的溶解与去除规律	48
第三节 去气措施	52
第六章 非金属夹杂物的控制	55
第一节 非金属夹杂物的分类	55
第二节 夹杂物对钢及合金性能的影响	58
第三节 非金属夹杂物的去除	56
第四节 熔炼过程中夹杂物的溶解及结晶过程中夹杂物的再生	60
第七章 元素的挥发	62
第一节 元素挥发的热力学	62
第二节 元素挥发的动力学	63
第三节 元素的实际挥发情况	65
第八章 钢和合金的结晶与凝固	68
第一节 金属结晶凝固的一般规律	68
第二节 钢和合金的铸锭组织	71

第三节	凝固过程中的偏析	75
第四节	凝固过程中的收缩	77

第二篇 炼钢方法

第九章	一次冶炼	79
第一节	氧气转炉炼钢	79
第二节	平炉炼钢	86
第三节	电弧炉炼钢	90
第四节	感应炉冶炼	101
第五节	真空感应炉冶炼	104
第六节	等离子电弧炉冶炼	113
第七节	有衬电渣炉冶炼	115
第十章	炉外精炼	118
第一节	炉外精炼的冶金特点	118
第二节	炉外精炼方法	119
第十一章	二次重熔	127
第一节	电渣重熔(ESR)	127
第二节	真空电弧重熔(VAR)	135
第三节	电子束重熔及等离子弧重熔	139
第四节	几种二次重熔方法的比较	141
第十二章	钢锭浇注	142
第一节	锭模铸钢	142
第二节	连续铸钢	152
第十三章	冶炼工艺路线的选择和合金钢及合金冶炼的发展动向	157
第一节	合金钢及合金冶炼工艺路线	157
第二节	不同冶炼工艺路线对合金钢及合金组织性能的影响	158
第三节	冶炼工艺路线选择原则	163
第四节	合金钢及合金冶炼发展动向	165
复习思考题		174
主要参考书目		178

绪 论

金属材料在现代工农业生产、交通运输、建筑工程、国防建设和科学技术中有着广泛的应用。钢在金属材料的用量中约占85%以上。钢可分为普通钢和特殊钢两大类，特殊钢包括优质合金钢和合金（合金可以不以铁为基）。钢之所以能够得到广泛的应用，主要是由于它具有良好的性能，例如，钢的强度高，塑性和韧性好，加工性能及焊接性能好。某些高级合金钢及合金还具有一系列的特殊性能，例如耐热性、抗腐蚀性、抗氧化性、耐磨性、电磁性能及其它力学、物理性能，等等。本教材涉及的金属材料为钢和合金。

为了使钢和合金具有所需要的性能，必须保证其具有一定的组织结构，而要获得所需要的组织结构，又必须保证其具有一定的化学成分和合理的冶炼（包括浇注）、压力加工、热处理、机加工及焊接工艺。金属材料冶炼工艺学的任务在于研究钢和合金冶炼工艺及其对产品质量的影响，改善钢和合金的性能。

实践证明，冶炼工艺对合金钢和合金质量具有极为重要的影响。对于从事金属材料研制的科技人员来说，掌握钢和合金冶炼方面的知识是很必要的。学习合金钢和合金冶炼工艺学，旨在懂得冶炼质量的评价指标；了解冶炼工艺对钢和合金组织性能的影响；掌握决定冶炼质量的冶金过程物理化学规律；熟悉不同冶炼方法的特点；知道如何选择冶炼工艺路线及冶炼工艺；具有一定的分析和解决冶炼质量问题的能力。

合金钢和合金冶炼质量评价指标

炼钢车间的主要产品是钢和合金的铸锭及连铸坯，有时也包括铸件，其冶炼质量可以用成分控制、纯洁度和铸态组织作为评价指标。一个好的冶金产品，成分应控制在最佳范围，纯洁度要高，铸态组织要好。

成分控制：每一种钢或合金均有一定的成分要求，这一要求在技术条件中有明确规定。成分达到技术条件规定时，一般均能满足技术条件对该钢种关于性能方面的要求。但是，实践表明，为了得到最佳的综合性能或经济效果，不同钢及合金尚有缩小规格要求，即要求将成分控制在技术条件允许的某一更窄小的范围内。这一控制规格便是所谓“企业内部标准”或“厂标”。衡量一炉钢炼得好不好，首先要看成分是否控制合适，能否控制在最佳范围内。

成分控制还意味着对于微量元素的控制。近年来，微量元素越来越广泛地被应用于合金钢和合金中。常用的微量元素添加剂有硼、铈、铟、铅、镁、钙、钡、钨、钼、钕、钆等。微量元素对于合金钢和合金性能具有重要影响，有的钢种已将微量元素含量列入技术条件。

微量元素一般均与氧、氮、硫等杂质元素具有高的亲合力，有的在真空熔炼过程中极易挥发。微量元素是否能达到最佳控制，取决于冶炼工艺。

纯洁度：合金钢和合金纯洁度的高低意味着含有害杂质的多少。杂质包括如下几类：

1. 非金属杂质

这类杂质包括硫和磷以及氯、溴、碘。不同钢种技术条件中均包括对硫、磷含量的成分要求。根据钢中硫、磷含量的高低，工业用钢被分为普通钢($S \leq 0.055\%$, $P \leq 0.045\%$)，

(2) 表面质量好。锭子及连铸坯表面质量不好会增加打磨量,对于真空电弧重熔及电子束重熔锭子会增加扒皮量,增加工序,降低金属收得率。

(3) 缩孔小,切头少。好的铸态组织应无残余缩孔及二次缩孔,自耗电极缩管要求浅,内部要干净。

(4) 锭子密实程度高。密实的锭子疏松、气泡等类型缺陷小,密度高。疏松包括一般疏松及中心疏松。气泡包括内部气泡及皮下气泡。

(5) 成分及组织均匀,偏析程度小。常见的偏析缺陷有方框形偏析、点状偏析、波纹状偏析、Laves偏析、碳化物液析等,它们对合金钢和合金性能有很大影响。此外,连铸坯中的大型夹杂物偏聚以及锭子中某些成分的显微偏析对材料性能亦有重要影响。

(6) 结晶组织好。良好的结晶组织包括轴向发展的柱状晶,小的二次枝晶间距,在特殊的熔炼条件下形成的等轴细晶、定向共晶、单晶等。好的结晶组织可以保证高的性能。

目前,为满足对金属材料性能越来越高的要求,一方面通过合金设计,研制新合金,通过改变合金成分使之具有一定的组织结构和性能;另一方面则是通过改进冶炼工艺,提高冶炼质量(实现成分最佳控制、提高纯洁度、改善铸态组织)以提高其性能。为此,了解不同钢和合金的冶炼方法以及冶炼工艺对钢和合金组织性能的影响是十分重要的。

当代炼钢方法

当代钢生产主要是高炉—转炉以及电炉等两个流程。

高炉—转炉流程,是传统的炼钢流程,这一流程的特点是焦炉炼焦、高炉炼铁、转炉炼钢。在世界上每年生产的七亿多吨钢中,约60~70%是用这一流程生产的。基于焦炉、高炉过程自身的一些缺点,欧洲、澳大利亚、日本和美国等极度重视熔融还原技术的开发,所谓熔融还原就是在铁浴系统中,通过煤、氧或空气与铁矿石作用,将铁还原出来。对于转炉炼钢,顶底复吹转炉显示出极大的优越性。目前,转炉钢生产的一个突出的特点是通过与炉外精炼配合,在保持转炉炼钢原有的高生产率优势的同时,改善产品质量,增加品种,现已可用转炉流程生产超纯钢。

在世界钢铁科技界极度重视熔融还原技术的同时,国际钢铁产业界都对电炉流程表现出越来越强烈的关注。尽管全球粗钢年总产量数年来一直徘徊在7.2~7.8亿吨之间,以废钢为主要原料的电炉钢产量所占的份额却在逐年上升,在全球粗钢产量由1970年的5.95亿t到1990年的7.7亿t的增长中,电炉钢占了75%的份额,而转炉钢仅占5%。从目前的发展趋势看,电炉钢除了将在传统的合金钢领域继续保持其相对优势外,还将在普通钢领域表现出强劲的竞争势态。电炉流程其所以能与转炉流程形成竞争格局,除有着深刻的资源、能源、环境和经济背景外,从技术角度看,主要是由干超高功率及氧燃助熔技术的发展,加上炉外精炼技术,使电炉成为一个熔化设备,大大提高了电炉的生产率,以致目前电炉出钢到出钢时间可达45min以下的水平。

综上所述,当代炼钢方法主要是转炉、电炉加炉外精炼,考虑到转炉、电炉的高生产率及综合经济效益,后步工序必须配以连铸和连轧。

此外,对于那些难熔金属(例如钨、钼、铌、钽)、活泼金属(例如钛及其合金)、小批量高级优质钢和合金(例如高温合金及精密合金)、对铸态组织有特殊要求或在铸态下使用的钢和合金(例如铸造高温合金)等,需要采用特殊的冶炼方法,这就是特种冶金

(主要包括真空熔炼和二次重熔)。

冶炼工艺对钢和合金性能的影响

不同冶炼方法或冶炼工艺对钢和合金具有不同的影响,这一影响是通过其对材料的冶炼质量的不同作用来实现的。

1. 通过成分控制影响钢和合金的性能

不同冶炼方法生产的产品具有不同的成分特征。平炉和转炉一般冶炼碳素钢和低合金钢,电冶炼具备生产高合金钢和合金的能力。

不同冶炼方法对成分控制的难易程度不同。真空电弧重熔对易氧化元素铝、钛控制较容易,电渣重熔则比较困难。电渣重熔时易挥发元素损失量小,真空电弧重熔则收得率低。

同一冶炼方法,工艺制度不同时,成分的控制也不同,例如,电渣重熔工艺不当时,高温合金电渣锭中铝、钛含量波动范围大。

不同的成分控制导致钢和合金的性能产生一定的差异。

2. 通过纯洁度影响钢和合金性能

不同冶炼方法生产的产品具有不同的纯洁度。真空冶炼的钢和合金与大气冶炼的材料相比较,有害金属杂质及氢含量低;炉外精炼可以降低钢中气体含量;电渣重熔具有高的去除氧化物夹杂和脱硫能力,等等。

同一冶炼方法,工艺制度不同时,产品的纯洁度不同,例如,同样用EAF+LF生产轴承钢时,钢中总氧含量可因采用不同吹氩制度和脱氧制度而有较大的差异。

不同的纯洁度当然会对钢和合金性能产生不同的影响。

3. 通过铸态组织影响钢和合金性能

不同冶炼方法生产的产品具有不同的铸态组织特征。二次重熔(真空电弧重熔、电渣重熔、电子束重熔)锭子柱状晶轴向发展,疏松、偏析程度小。用一次熔炼方法(平炉、转炉、电炉、感应炉、真空感应炉)生产的锭子柱状晶垂直于锭轴,疏松、偏析程度大。模铸锭与连铸坯铸态组织不同,VADER锭为等轴细晶锭。

同一冶炼方法,工艺制度不同时,产品的铸态组织也不同。

不同的铸态组织也会导致钢和合金性能的显著差异。

总之,分析钢和合金的某些冶炼质量问题(它们表现为产品的性能降低),应从成分控制、纯洁度及铸态组织三个方面去考虑。

教材内容安排及教学法

为了使学生懂得冶炼质量的评价指标,了解冶炼工艺对钢和合金性能的影响,熟悉不同冶炼方法的特点,知道如何选择冶炼工艺路线和冶炼工艺,具有一定的分析和解决冶炼质量问题的能力,本教材主要包括三部分内容:第一部分为钢及合金冶炼的物理化学过程,这是提高钢及合金冶炼质量的理论基础。结合产品的成分控制及纯洁度,讨论元素的氧化与钢液的脱氧、脱碳、脱硫、脱磷、去气以及夹杂物行为和元素的挥发;结合铸态组织,讨论钢和合金的结晶与凝固;考虑到决定钢和合金冶炼质量的诸反应过程大多在金属

液相、熔渣系统内进行,故对冶金熔体也进行了简要的介绍。第二部分为炼钢方法,其中包括一次熔炼、炉外精炼、二次重熔及钢的浇注。这一部分着重介绍不同冶炼方法的实质、设备简况、工艺操作过程、工艺参数的选定以及工艺参数对冶炼质量的影响。关于它们的冶金过程原理,集中在第一部分中进行讨论,在这一部分里只用其结论。由于冶炼方法形形色色,限于篇幅,这里不能够对各种冶炼方法均予以详细介绍,而是在一次熔炼、炉外精炼及二次重熔三章中先介绍其共性,然后选择某些重要的、广泛应用的冶炼方法作重点讲述,其中包括转炉、电炉及与其结合的主要炉外精炼方法(RH、LF、VOD、VAD等)和特种熔炼方法。有关特种熔炼方法写得较为详细,因为对于一个材料研制工作者说来,在高级优质钢和合金的生产中会经常遇到各种各样的冶金质量问题,为保证产品具有某些特殊性能,需要采用特种熔炼方法。此外,如前所述,有些钢和合金必须采用特种熔炼方法才能够进行生产。在钢的浇注方面,主要介绍模注和连铸。第三部分为冶炼工艺路线选择及钢和合金冶炼技术的发展动向。这一部分简要介绍可供选择的钢和合金冶炼工艺路线,不同冶炼工艺路线对钢和合金组织性能的影响及冶炼工艺路线选择的原则,分析钢及合金冶炼技术的发展动向,介绍一些在提高合金钢及合金成分均匀性和纯洁度、改善铸态组织,从而能使合金钢及合金具有高质量,与其它冶炼方法相比具有竞争能力的新的冶炼方法及工艺过程。

《金属材料冶炼工艺学》课程是在学生学完《物理化学》及《金属学》课程后进行教学的,因此,在第一部分里不再重复《物理化学》和《金属学》的基本内容,而是运用已有《物理化学》及《金属学》的知识,分析影响钢和合金冶炼质量的物理化学过程。同时,在这一部分里,通过对不同冶炼方法在成分控制、纯洁度及铸态组织三方面的特点介绍,可以加深对某些基本的物理化学规律的理解。考虑到在讲授本课程前学生已去冶金厂进行过认识实习,实习时,通过参观与现场教学,学生已对不同冶炼方法的设备及工艺过程有所了解,而且,在本教材课堂教学结束后,学生还要到特殊钢厂进行生产实习,还会进一步接触到炼钢实际,故第二部分在课堂教学时,主要要求学生了解不同冶炼方法的特点,工艺参数与冶炼质量的关系及工艺规程的制定原则,有关工艺过程等内容可以让学生自学。第三部分重点分析工艺路线选择的原则,介绍钢和合金冶炼技术的发展动向,重点分析有发展前景的冶炼方法在保证高冶炼质量方面的优越性。总之,本课程的教和学均要紧紧地围绕着冶炼质量这一核心,重点放在培养学生提高分析和解决钢和合金冶炼质量问题的能力上。

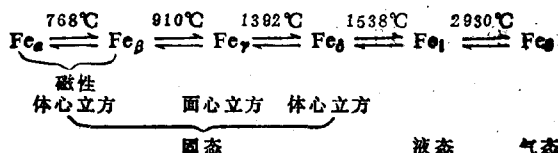
第一篇 合金钢及合金冶炼的物理化学过程

第一章 冶金熔体

第一节 熔铁

熔融纯铁（以下简称熔铁）和熔融铁合金的物理化学性质对于钢铁冶金过程是十分重要的。在冶炼和铸锭过程中，许多冶金反应都与熔铁及熔融铁合金的物理化学性质有密切的关系。本节只对熔铁和熔融铁合金的物理性质，各种元素在熔铁中的溶解度和相互作用问题做一般性的讨论。

众所周知，纯铁在固态时有三种同素异型的晶体结构，且在不同温度下发生固、液、气三态变化。即：



炼钢过程中的钢液是以铁为溶剂的金属溶液，溶有各种金属元素和非金属元素，因此钢液是一种熔融铁合金。当前的炼钢过程，要求铁必须呈液体状态，金属熔体的温度一般比其熔点高100~150℃，远低于沸点，在这种情况下液态铁（即熔铁）的结构和性质经研究确定与固态铁比较接近，而与气态铁有根本的不同。

一、熔铁和熔融铁合金的物理性质

（一）密度

某种物质单位体积的质量称为该物质的密度。熔铁和熔融铁合金的密度是研究其熔融状态结构和计算粘度及表面张力等所必须的物理量；同时，密度也是阐明钢液与熔渣、非金属夹杂物的分离与夹杂物上浮等有关各种现象的重要性质。

（二）粘度

粘度是液体或半流体流动难易的程度。熔铁和熔融铁合金的粘度对于冶炼和浇铸工艺以及钢质量都有很大的影响。例如，扩散过程、非金属夹杂物的排除、钢锭的结晶与偏析等都与钢液粘度有密切的关系，同时粘度也是阐明熔融铁合金结构的重要性质。

（三）熔点

晶体物质溶解时的温度称作熔点。各种金属熔点的高低在一定程度上反映了金属中基本质点之间作用力的大小，质点间作用力越大则其熔点就越高。因此，铁和合金的熔点是研究它们质点间作用力大小的重要性质，而且也是确定冶炼和浇铸温度的重要依据。

（四）扩散系数

扩散系数的物理意义是扩散物质在单位浓度梯度单位截面积时的扩散速度。熔融铁合金中各种元素的扩散系数是与反应速度限制环节有关的重要物理性质，而且也是阐明熔融

铁合金结构的重要性质。

(五) 表面张力

液体表面相邻两部分间单位长度内的相互牵引力称作表面张力，它是分子力的一种表现。熔融铁合金的表面张力是研究钢铁冶炼过程中各种表面现象的所不可缺少的重要性质，例如钢液内CO气泡的生成和长大，脱氧产物的生成、集聚和排除，金属与熔渣的分离和钢液的凝固等，都与钢液的表面张力有密切的关系。

(六) 蒸气压

蒸气压是当挥发与凝聚相变过程达到平衡时物质的蒸气压力，称为饱和蒸气压，简称蒸气压。蒸气压是确定熔融铁合金中各组元活度的重要性质，了解各种物质的蒸气压的大小及其随温度变化的规律，可以根据需要在冶炼过程中对防止组元挥发或促进组元挥发进行有效的控制。

(七) 导热率和电阻率

导热率是物质导热的能力，电阻率则是表示物质抵抗电流通过特性的一个因数。熔融铁合金的冷却凝固过程与其导热性能有着直接的关系，而熔铁和熔融铁合金的电阻率是金属熔体进行感应加热和电磁搅拌等电磁输送的重要物理性质。

二、各种元素在熔铁中的溶解度和相互作用

前已述及，钢液是以铁为溶剂的金属溶液。在碳素钢液中常见的溶质元素有：碳、硅、锰、硫、磷、氧、氢和氮等。为了改善钢的机械性能和使钢具有各种特殊性能，通常还要向钢中加入各种合金元素，如硅、锰、铝、铬、镍、钴、铜、钨、钼、钒、钛、铌、锆、镁、硼和稀土元素等。因此，必须了解各种元素在熔铁和熔融铁合金中的溶解度以及各种元素在熔融铁合金中的相互作用，这对于充分利用各种有益元素和最大限度地去除各种有害元素和非金属夹杂物是十分重要的。

(一) 各种元素在熔铁中的溶解度

各种元素在熔铁中溶解度的大小与原子半径大小、晶格类型以及与铁原子的相互作用力有关。元素的原子半径与铁原子半径($1.22 \times 10^{-8} \text{cm}$)越相近，晶格类型与铁相同，其性质与铁原子越相似，则它们与铁原子之间的相互作用力与铁原子本身间的相互作用力就越相近，也就越容易溶解。

根据在1600℃时熔铁中元素溶解的数量可将元素分为四类：

- (1) 完全溶解的元素：硅、锰、铝、镍、钴、铜、硼、硫、铈等；
- (2) 部分溶解的元素：铬58%、钨33%、钼34%、钒65%、钛97%、铌32.8%、锆33%、碳5.41%、磷1.7%等；
- (3) 溶解很少的元素：氢、氮、氧、铅、银等；
- (4) 成气态的金属元素：镁、钙等。

可以根据元素溶解数量的多少和倾向，认识冶炼和凝固过程中元素含量变化的原因，从而合理地控制冶炼工艺条件，达到控制钢和合金的化学成分和提高钢质量的目的。

(二) 熔铁中各种元素的相互作用和相互作用系数

钢液不是理想溶液。熔铁中各种元素不仅与铁发生作用，而且各溶质元素之间也发生相互作用。这是因为不同元素的原子结构各不相同，因而它们之间（包括同类原子及异类原子）的相互作用力不同，有的互相排斥，有的互相吸引（有的甚至生成牢固的化合物），

而排斥或吸引的程度又随不同原子的性质、数量以及外界环境等因素而异。造成的结果是，能参加化学反应的元素浓度，不是其实际浓度，而是它的有效浓度即活度。实际浓度必须用一个校正系数即“活度系数”来修正，活度系数反映着有效浓度和实际浓度差异的程度。

计算溶铁内元素的活度系数 f_i ，必须知道元素的活度相互作用系数。

设有元素2、3、4……等溶解于铁液内(Fe为元素1)，元素2的活度系数 f_2 可用下式求出：

$$\lg f_2 = e_2^2 \cdot [\%2] + e_2^3 \cdot [\%3] + e_2^4 \cdot [\%4] + \dots \quad (1-1)$$

式中 e_2^2 、 e_2^3 、 e_2^4 ……都叫做元素2的“活度相互作用系数”。 e_2^2 表示铁液中元素2自身的活度相互作用系数； e_2^3 表示加入元素3后对元素2的活度系数引起的影响； e_2^4 表示加入元素4后对元素2的活度系数引起的影响，等等。

可将上式写成以下通式：

$$\lg f_i = e_i^i [\%i] + \sum e_i^j [\%j] \quad (1-2)$$

式中 i ——为熔铁中第二元素；

j ——为 i 以外的第三元素或其它元素。

若第三元素与第二元素相同， e_i^j 就变成 e_i^i ，也就是元素 i 本身的活度相互作用系数。

表1-1列出了1600℃时熔铁中某些元素的活度相互作用系数 e_i^j 值。由于活度相互作用系数 e_i^j 表示元素 j 对元素 i 的活度系数的影响，所以可以根据表1-1的数据计算熔铁内元素 i 的活度系数 f_i 值，进而计算出熔铁内元素 i 的活度 a_i 值，显然，这对控制炼钢过程是十分重要的。

【例题】 生铁液含C 4.0%，Si 0.5%，Mn 0.6%，S 0.05%，P 0.2%。求1600℃时该生铁液中C的活度是多少？

解：从表1-1中查出 e_C^j ，则有：

$$\begin{aligned} \lg f_C &= e_C^C [\%C] + e_C^{Si} [\%Si] + e_C^{Mn} [\%Mn] + e_C^S [\%S] + e_C^P [\%P] \\ &= 0.14 \times 4 + 0.08 \times 0.5 + (-0.012) \times 0.6 + 0.046 \times 0.05 + 0.051 \times 0.2 \\ &= 0.6053 \end{aligned}$$

$$\therefore f_C = 4.03$$

$$a_C = f_C \cdot [\%C] = 4.03 \times 4\% = 16.12\%$$

上述生铁中C参加反应时，它的有效浓度即活度为16.12%。

第二节 炼钢炉渣

“要炼好钢必须先炼好渣”。造渣是炼钢工艺过程的重要组成部分。在非真空冶炼中，炉渣是炼钢过程的必然产物，也是炼钢过程中不可缺少的媒介物，如果没有炉渣，必要的炼钢物理化学反应难以完成，而合格的钢液就难以保证。

一、炉渣的来源与作用

(一) 炉渣的主要来源

炼钢炉渣的主要来源：炼钢过程中各种元素被氧化而形成的氧化物；各种造渣材料(石

* 习惯上，用方括号代表钢液中组元，用圆括号代表熔渣中组元，用大括号代表气体中组元。

表1-1 1600℃时熔

第二 元素 i	第 三									
	Al	B	C	Ca	Co	Cr	Cu	H	Mn	Mo
Al	0.045		0.091	-0.047				0.24		
B		0.038	0.22					0.49		
C	0.043	0.24	0.14	-0.097	0.0076	-0.024	0.016	0.67	-0.012	-0.0083
Ca	-0.072		-0.34	(-0.002)						
Co			0.021		0.0022	-0.022		-0.14		
Cr			-0.12		-0.019	-0.0003	0.016	-0.33		0.0018
Cu			0.066			0.018	-0.023	-0.24		
H	0.013	0.05	0.06		0.0018	-0.0022	0.0005	0	-0.0014	0.0022
Mn			-0.07					-0.31		0
Mo			-0.097			-0.0003		-0.20		
N	-0.028	0.084	0.13		0.011	-0.047	0.009		-0.02	-0.011
Nb			-0.49					-0.61		
Ni			0.042	-0.067		-0.0003		-0.25		
O	-3.9	-2.6	-0.45		0.008	-0.04	-0.013	-3.1	-0.021	0.0035
P			0.13			-0.03	0.024	0.21	0	
Pb	0.021		0.066		0	0.02	-0.028		-0.023	0
S	0.035	0.13	0.11		0.0026	-0.011	-0.0084	0.12	-0.026	0.0027
Si	0.058	0.20	0.18	-0.067		-0.0003	0.014	0.64	0.002	
Ti						0.055		-1.1		
V			-0.34					-0.59		
W			-0.15					0.088		
Zr										

灰、萤石、白云石，耐火砖块等），氧化剂或冷却剂（矿石、石灰石等）所带入的脉石，金属原材料带入的泥砂和铁锈；被侵蚀的炉衬耐火材料；铁合金的脱氧产物、脱硫产物等。可见，炉渣来源于金属原材料、辅助材料和炉衬三个方面，在炼钢过程中成为高温熔体。

（二）炉渣在炼钢过程中的作用

一般说来，炼钢过程中熔渣和钢液直接接触，参与其间的物理化学反应和传质传热过程，通过对炉渣成分及其性能、数量的调整，可以控制金属熔池中各元素的氧化和还原过程。其作用可以大致归纳为：

- （1）熔渣直接参与脱硫、脱磷等钢液与熔渣界面间的反应。
- （2）熔渣是氧的传递媒介，控制金属熔池中各元素的氧化还原过程。
- （3）熔渣是钢液中各种元素氧化产物的汇集体。熔渣密度要比钢液密度小得多，这样，钢渣自然分开，而元素氧化产物的密度也远低于钢液的密度，可以上浮到钢液表面，

铁中某些元素的 e_i 值元 素 i

N	Nb	Ni	O	P	Pb	S	Si	Ti	V	W	Zr
-0.058			-6.6		0.0065	0.03	0.0056				
0.074			-1.8			0.048	0.078				
0.11	-0.06	0.012	-0.34	0.051	0.0079	0.046	0.08		-0.077	-0.0056	
		-0.044					-0.097				
0.032			0.018		0.003	0.0011					
-0.19		0.0002	-0.14	-0.053	0.0083	-0.02	-0.0043	0.059			
0.026			-0.065	0.044	-0.0056	-0.021	0.027				
	-0.0023	0	-0.19	0.011		0.008	0.027	-0.019	-0.0074	0.0048	
-0.091			-0.083	-0.0035	-0.0028	-0.048	0				
-0.10			-0.0007		0.0023	-0.0005					
0	-0.06	0.01	0.05	0.045		0.007	0.047	-0.53	-0.093	-0.0015	-0.63
-0.42	(0)		-0.83			-0.047					
0.028		0.0009	0.01	-0.0035		-0.0037	0.0057				
0.057	-0.14	0.006	-0.20	0.07		-0.133	-0.131	-0.6	-0.3	-0.0085	-0.44
0.094		0.0002	0.13	0.002	0.011	0.028	0.12				
		-0.019		0.048		-0.32	0.048			0	
0.01	-0.013	0	-0.27	0.029	-0.046	-0.028	0.063	-0.072	-0.016	0.0097	-0.052
0.09		0.005	-0.23	0.11	0.01	0.056	0.11		0.025		
-1.8			-1.8			-0.11		0.013			
-0.35			-0.97			-0.028	0.042		0.015		
-0.072			-0.052		0.0005	0.035					
-4.1			-2.53			-0.16					0.022

进入熔渣。

(4) 熔渣对钢液有保护作用。熔渣可以减缓合金元素在氧化气氛中的氧化烧损，可以减缓钢液吸收气体和减少钢液的热损失。

(5) 炉渣的其它作用：电渣炉熔渣做为电阻发热体，可以起到重熔和精炼金属的作用；平炉熔渣是传热介质，通过它把热量传给金属熔池；电弧炉熔渣可起稳定电弧的作用，对稳定工艺操作过程十分有利，……。

当然，炼钢过程中炉渣也有不利的作用，这主要是：

(1) 炼钢过程中高温熔渣对耐火材料炉衬有浸蚀作用，降低炉衬寿命。

(2) 出钢时，铁和一些有益合金元素可能会混在熔渣里，造成一部分金属损失。

造渣是炼钢工艺过程的一个重要方面，必须给予充分的重视，应选择合适的炉渣组成，控制适当的熔炼温度和渣量，使炉渣在冶炼过程中发挥其有利的作用而尽量抑制其不利的作用。