

现代电弧炉

炼钢用氧理论及技术

朱荣 著 ■



XIANDAI DIANHULU
LIANGANG YONGYANG
LILUN JI JISHU



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

现代电弧炉 炼钢用氧理论及技术

朱 荣 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2018

内 容 提 要

本书是作者及所在团队多年来在电弧炉炼钢用氧技术领域的研究成果,介绍了近年来国内外电弧炉用氧技术的发展、电弧炉炼钢氧气射流理论、电弧炉炼钢氧气喷枪设计、氧气射流冷态测试及数值模拟技术、电弧炉炼钢用氧装置、电弧炉炼钢供氧工艺及相关技术、电炉炼钢供氧与供电优化及智能控制,以及各种形式电弧炉供氧及典型厂家应用情况分析和电弧炉炼钢复合吹炼技术的应用。全书内容深入、系统,既有理论深度,又有技术支撑,具有较高的理论性和实用性。

本书可供从事电弧炉冶金生产、科研、管理方面的科技人员参考,也可作为普通高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电弧炉炼钢用氧理论及技术/朱荣著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 4
ISBN 978-7-5024-7745-5

I. ①现… II. ①朱… III. ①电弧炉—电炉炼钢—
吹氧(冶金炉) IV. ①TF741.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 051047 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 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7745-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京兰星球彩色印刷有限公司印刷
2018 年 4 月第 1 版, 2018 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17.75 印张; 346 千字; 273 页

69.00 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)

前 言

电弧炉炼钢是目前主要炼钢方法之一，具有流程短、节能环保等特点。随着废钢积蓄量及回收量的增加，电炉钢产量将不断增加。我国电弧炉炼钢是高品质特殊钢冶炼的主要工艺流程，为能源交通、机械制造、国防军工等领域关键装备及零部件生产提供所需的钢铁材料。

电弧炉炼钢的主要能量由电能及化学能组成，随着电弧炉炉料的多元化，化学能的利用显得越来越重要，氧气的使用量也在不断提高。但长期以来受电弧炉炉型结构等的影响及限制，电弧炉用氧效率、钢铁料消耗等技术经济指标与转炉炼钢相比，仍有一定差距。如何提高电弧炉用氧效率，减少钢液过氧化，充分发挥化学能的作用，实现电弧炉节电及提高能源利用率，一直是电弧炉炼钢的发展趋势和目标。

目前国内专门针对电弧炉炼钢用氧理论及实践的书籍很少，相关电弧炉炼钢工程技术及研究人员在工程实践中缺乏相关理论及工程应用实例借鉴，本书是目前国内第一部专门针对电弧炉炼钢用氧的专业书籍，希望本书的出版能为此提供一定的指导和帮助。书中内容是作者及其团队在参考分析国内外电弧炉炼钢用氧相关文献的基础上，对多年从事电弧炉炼钢研究成果的总结。全书从气体射流基础理论，氧枪结构、布置、设计及制造技术等方面进行了详细的阐述；同时结合供电及冶炼智能化进行了分析和讨论。

本书第1章为绪论部分，主要介绍了电弧炉炼钢相关技术；

第2章介绍了氧气射流理论基础；第3章系统介绍了电弧炉炼钢氧枪设计基础；第4章借助课题组的实验平台，介绍了电弧炉氧气射流的冷态测试及模拟方法，解决了氧枪设计参数的制定原则，并为氧枪制作及吹炼工艺的制定提供了帮助；第5章对电弧炉炼钢用氧装置及技术特点进行了详细的阐述，为电弧炉的氧枪选型、尺寸、水冷要求等提出了解决方案；第6章分析了电弧炉炼钢供氧工艺及对冶炼过程各项技术经济指标的影响；第7章介绍了电弧炉炼钢用氧的相关技术，分析了各单元技术如何配合发挥效能；第8章研究了电弧炉炼钢供氧与供电的关系及智能控制方法；第9章介绍了各种形式电弧炉供氧及典型厂家应用情况；第10章介绍了电弧炉炼钢复合吹炼技术的应用。

本书的出版得到了北京科技大学冶金喷枪研究中心及北京荣诚科技有限公司同仁的鼎力帮助；得到了天津钢管股份有限公司、西宁特殊钢股份有限公司、新余钢铁有限责任公司、衡阳华菱钢管公司、莱钢钢铁股份有限公司等企业工程技术人员的大力支持；北京科技大学冶金与生态工程学院的董凯、杨凌志、刘润藻等老师，以及杨岩、魏光升、胡绍岩、李易霖、陈挺、马国宏、刘福海、王宏阳等学生收集整理资料并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心的感谢。

本书出版得到钢铁冶金新技术国家重点实验室的资助，在此也表示感谢！

由于作者水平所限，书中难免错误和不妥之处，敬请广大专家和读者批评、指正。

作 者

2018年2月

目 录

1 绪论	1
1.1 氧气喷吹技术	3
1.1.1 炉门供氧技术	3
1.1.2 炉壁供氧技术	5
1.1.3 EBT 供氧技术	5
1.2 氧燃烧嘴技术	6
1.3 泡沫渣技术	7
1.4 炉气二次燃烧技术	8
1.5 集束射流技术	10
参考文献	12
2 氧气射流理论基础	14
2.1 气体动力学基础	14
2.1.1 气体状态参量	14
2.1.2 气体实验定律	15
2.1.3 气体的过程变化	16
2.2 一维可压缩流动基本方程	16
2.2.1 连续性方程	16
2.2.2 动量方程	17
2.2.3 能量方程	18
2.3 亚声速气流与超声速气流流动	19
2.3.1 声速	19
2.3.2 马赫数、马赫角、马赫锥和马赫线	19
2.3.3 亚声速气流与超声速气流特性	21
2.4 激波	22
2.4.1 什么是激波	22
2.4.2 激波产生的条件	23
2.4.3 光学方法观察激波	24
参考文献	26

3 氧枪设计基础	27
3.1 超声速喷管设计	27
3.1.1 供氧量与理论设计氧压的确定	27
3.1.2 喉口大小确定	27
3.1.3 收缩角及收缩段长度	28
3.1.4 扩张角及扩张段长度	28
3.1.5 喷管工作特性	29
3.2 集束射流氧枪设计	30
3.2.1 国外集束射流氧枪的应用	32
3.2.2 国内集束射流氧枪的应用	32
3.2.3 集束射流氧枪射流特性	33
3.2.4 集束射流氧枪的参数设计	36
3.3 电弧炉氧枪设计实例	39
3.3.1 普通超声速氧枪设计计算	39
3.3.2 集束射流氧枪设计计算	40
3.3.3 常用电弧炉氧枪的设计参数	41
参考文献	41
4 氧气射流冷态测试及模拟技术	42
4.1 测试技术介绍	42
4.2 物理模拟	43
4.2.1 物理模拟简介	43
4.2.2 相似原理	44
4.2.3 物理模拟在炼钢中的应用	45
4.3 数值模拟	48
4.3.1 数值模拟原理	48
4.3.2 计算流体力学求解过程	50
4.3.3 数值模拟实例	52
4.4 喷头冷热态测试	56
4.4.1 超声速喷管出口马赫数的测定	57
4.4.2 射流温度的测定	59
4.4.3 射流压力的测定	62
4.4.4 射流流量的测定	64
4.4.5 光学观察法和流场的图形处理	66
4.4.6 冷热态测试实例	67

参考文献	69
5 电弧炉炼钢用氧装置	71
5.1 炉门氧枪	71
5.1.1 炉门供氧工艺	71
5.1.2 炉门氧枪装置	72
5.2 炉壁氧枪	80
5.2.1 炉壁供氧工艺	80
5.2.2 炉壁供氧设备	81
5.3 EBT 氧枪	83
5.3.1 EBT 吹氧工艺	83
5.3.2 EBT 氧枪设备	84
5.4 氧燃烧嘴	85
5.4.1 氧燃烧嘴助熔原理	85
5.4.2 影响烧嘴效率的因素	86
5.4.3 氧燃烧嘴设计	86
5.5 集束射流氧枪	89
5.5.1 集束射流氧枪的由来	89
5.5.2 集束射流的原理、特性	89
5.5.3 集束射流氧枪的基本结构	92
参考文献	97
6 电弧炉炼钢供氧工艺	99
6.1 物料平衡和热平衡	99
6.1.1 物料平衡计算	99
6.1.2 热平衡计算	109
6.1.3 典型炉料结构的物料平衡及热平衡	116
6.2 供氧工艺及匹配	131
6.2.1 电弧炉炼钢能量集成方法	131
6.2.2 电弧炉炼钢能量集成过程案例分析	132
7 电弧炉炼钢用氧相关技术	140
7.1 泡沫渣工艺	140
7.1.1 概述	140

7.1.2 泡沫渣形成机理及作用	140
7.1.3 泡沫渣工艺操作	144
7.2 供电技术	145
7.2.1 电弧炉电气运行技术	146
7.2.2 电弧炉供电曲线	151
7.2.3 电极控制技术	153
7.3 底吹工艺及技术	157
7.3.1 底吹机理及效果	157
7.3.2 底吹工艺设备	159
7.4 炉气二次燃烧与余热利用技术	165
7.4.1 炉气二次燃烧技术	165
7.4.2 余热回收利用技术	167
参考文献	175
8 电弧炉炼钢供氧与供电优化及智能控制	177
8.1 电弧炉炼钢过程的热化学计量模型	177
8.1.1 建模依据与系统分析	177
8.1.2 热化学计量模型	180
8.2 电弧炉供氧及控制	198
8.2.1 电弧炉供氧模块化控制技术	198
8.2.2 电弧炉能量输入分段控制技术	205
8.3 电弧炉冶炼终点控制	209
8.3.1 电弧炉炼钢终点静态模型控制	209
8.3.2 电弧炉炼钢终点动态模型控制	211
8.4 电弧炉冶炼成本模型	216
8.4.1 电弧炉静态成本模型	216
8.4.2 电弧炉在线成本控制模型	216
9 各种形式电弧炉供氧及典型厂家应用情况分析	223
9.1 宝钢电弧炉供氧	224
9.1.1 电弧炉简介	224
9.1.2 多功能氧枪的主要结构	224
9.1.3 多功能氧枪现场使用情况	226
9.1.4 氧枪现存问题	228
9.2 天津钢管公司电弧炉供氧	229

9.2.1 电弧炉简介	230
9.2.2 泡沫渣工艺的完善和炉门机械氧枪的创新	230
9.2.3 炉壁喷枪及二次燃烧系统和炉顶喷吹系统	231
9.2.4 效果分析	231
9.3 莱钢电弧炉供氧	232
9.3.1 电弧炉简介	232
9.3.2 电弧炉用氧状况	233
9.3.3 应用效果	236
9.4 国外供氧技术分析	237
9.4.1 国外电弧炉用氧	237
9.4.2 二次燃烧技术	238
9.4.3 德国电弧炉供氧	238
参考文献	243
10 电弧炉炼钢复合吹炼技术的应用	245
10.1 技术简介	245
10.2 技术方案	246
10.2.1 电弧炉炼钢熔池搅拌强度	247
10.2.2 集束射流技术的拓展应用	255
10.2.3 电弧炉炼钢安全长寿底吹技术的开发	259
10.2.4 电弧炉炼钢复合吹炼技术集成	263
10.3 实施效果	272

1 绪 论

电弧炉炼钢至今已有百余年历史，近 40 年来发展尤为迅速。纵观其技术发展史，缩短冶炼周期、提高钢液洁净度、降低生产成本一直是电弧炉炼钢技术进步的主旋律。而炼钢喷吹氧气的提出及其在电弧炉炼钢领域的应用，对电弧炉炼钢具有革命性的影响^[1]。

氧气用于电弧炉炼钢始于第一次世界大战期间，有人提出在炼钢电弧炉中应用氧气的创意。1940 年，Cheline 提出在电弧炉中利用“喷氧枪”喷吹氧气冶炼不锈钢，该方法由于能够有效利用大量廉价的不锈钢废料（废料利用可占炉料总重的 70%~100%）而颇受欢迎。然而，由于当时制氧成本高、氧气供应短缺等原因，电弧炉冶炼使用氧气量较少。

20 世纪 50 年代，大型空气分离制氧装置的研发应用大大降低了工业用氧的生产成本，氧气开始用于电弧炉冶炼。1948 年，美国 11 个工厂 41 座电弧炉（9~95t）采用氧气进行冶炼，1951 年扩展至 220 座电弧炉，氧气广泛用于沸腾钢、半镇静钢和各级别碳素钢的生产；1953~1956 年，苏联电弧炉冶炼用氧技术迅速发展，到 1957 年已广泛用于苏联电炉钢厂绝大部分钢号（包括军工钢）的生产。20 世纪 60 年代初，供氧冶炼技术在电弧炉炼钢领域得到了广泛推广。

20 世纪 70 年代，为应对第一次能源危机，日本在电弧炉方面开展了一系列提高生产率、节省能源的技术开发工作，其中之一是富氧操作，即在全熔化期向废钢中喷吹氧气，使一部分铁氧化作为热源促进熔化。但由于此方法铁氧化严重，又开发了在废钢熔化完成后立即向钢液吹碳粉的方法即喷碳粉法，以提高钢液收得率。近 30 年，随着许多新技术、新工艺的采用，世界电弧炉炼钢迅速发展，其技术经济指标得到了根本性改善。

提高吨钢用氧量、增加化学能输入是强化电弧炉冶炼、提高生产节奏的最有效手段之一^[2]。在熔池碳源充分时，每喷吹 1m^3 氧气相当于向炉内供应 $3\sim 4\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电。特别是部分电弧炉采用生铁及热装铁水后，化学能的比例大大提高，输入氧气已成为现代电弧炉炼钢工艺的一个重要特点。因此，电弧炉炼钢高效供氧对加快冶炼节奏、大幅度降低生产成本非常重要^[3]。目前电弧炉供氧有多种形式，包括炉门供氧、炉壁供氧、熔池埋入式供氧及炉顶供氧等，同一电弧炉上可以同时使用多种供氧装置。

近年,我国电弧炉炼钢用氧技术的开发也取得了显著进步,相关技术及装备已达国际先进水平^[4]。截止到2015年,我国电弧炉出钢量在100t以上的有30座以上,已投产和正在建设的50t以上的超高功率电弧炉100余座。表1-1列出了我国典型60t以上的电弧炉主要技术指标^[5,6]。

随着容量大型化和金属原料多技术的发展,电弧炉炼钢冶炼周期缩短,生产更为高效。冶炼过程配加铁水使得电弧炉冶炼所需的氧气量大幅度提高,见表1-2。

表 1-1 我国典型 60t 以上的电弧炉主要技术指标

企业名称	公称容量×座数	变压器功率 /MV·A	耗氧量(标态) /m ³ ·t ⁻¹	电耗 /kW·h·t ⁻¹	冶炼时间 /min
天津钢管	150t×1	90	44	332	54
宝钢公司	150t×1(DC)	99	47	366.9	56.7
宝钢浦钢	100t×2(DC)	73	27.27	518	92
宝钢五钢	100t×1(DC)	76	45.42	524	78
南钢公司	100t×1	60	38	310	45
苏州钢厂	100t×1(DC)	100	15.6	456	75
安钢	100t×1	72	40.8	164.9	42.9
沙钢永新	70t×1	54	42.7	420	75
沙钢润忠	90t×1	65	35.02	330	53
江阴兴澄	100t×1(DC)	100	50	160	65
淮钢	70t×1	60	36.2	341	57
杭钢	80t×1	80	28.29	453	64
舞阳	90t×1	60	35.14	428	78
涟源	60t×1	50	76.07	484	173
广钢	60t×1	52	35.73	488	73
成都无缝	90t×1	65	39.79	547	71
西宁	60t×1	36	37	325	59
新疆八一	70t×1	60	39	339	60

表 1-2 不同炉容量和原料条件下的氧气需求量

炉容量 /t	原料	配碳量 /%	用氧时间 /min	脱碳速度 /% · min ⁻¹	所需总氧量 /m ³ · h ⁻¹	所需供氧 强度 /m ³ · (min · t) ⁻¹
30	废钢 85%、 生铁 15%	0.8	40	0.018	462	0.26
60	废钢 70%、 铁水 30%	1.5	30	0.047	2410	0.67
150	废钢 70%、 铁水 30%	1.5	25	0.056	7180	0.80

注：1. 按钢液终点碳含量 0.1%，有 30% 的碳元素氧化生产了 CO₂，氧气利用率按 85% 计；

2. 未计入脱硅、脱锰等元素的耗氧量。

合理的电弧炉用氧制度对电弧炉炼钢经济指标的改善起到了重要的作用。由于受电弧炉炉型的限制，其炉体及熔池高度相对较浅，限制了电弧炉供氧强度的提高。因此，研究者开发了多种电弧炉炼钢高效用氧技术，主要的用氧方式包括多种形式供氧、氧燃烧嘴、二次燃烧，将它们有效结合可改善熔池的搅拌效果、促进冶金反应、降低电耗以及提高生产率^[7,8]。

近年来，电弧炉冶炼过程用氧技术日趋成熟和高效化，电弧炉炼钢强化及优化用氧主要体现在以下几方面：加速熔池冶金反应进程的高效氧气喷吹技术、以节电助熔为目的的氧燃烧嘴技术、可充分利用炉内烟气化学潜能的二次燃烧技术、强化电弧热效率和炉体寿命的泡沫渣技术等相关技术。下面对其逐一介绍。

1.1 氧气喷吹技术

电弧炉炼钢氧气喷吹技术是强化电弧炉冶炼的重要手段，主要具有以下功能：（1）氧气射流穿入熔池搅动钢液；（2）切割废钢，提高废钢熔化速度，使熔池温度均匀；（3）改善渣-钢动力学条件，快速脱磷；（4）改善泡沫渣操作，屏蔽弧光对炉衬的辐射，有利于提高电热效率和升温速度，缩短冶炼时间。

如何根据生产工艺向电弧炉内高效喷吹氧气直接影响到钢的质量、能耗和生产作业率，是电弧炉炼钢的关键。由此，多种形式及功能的电弧炉供氧喷吹技术得以开发。

1.1.1 炉门供氧技术

为加速炉内废钢熔化，传统电弧炉操作是采用炉门人工吹氧的方法，即操作工人手持吹氧管从炉门切割废钢，或将吹氧管插入熔池加速废钢熔化和熔池脱碳。随着用氧量逐渐增加，人工吹氧的方法已不能满足生产的需要；同时，考虑

到人工吹氧劳动条件差、不安全、效率不稳定等因素，现代电弧炉炼钢开发出电弧炉炉门氧枪机械装置，可在主控室内遥控喷吹氧气。由于造泡沫渣的需要，在向炉内吹氧的同时，须向炉内喷入碳粉，炉门碳氧枪随之得到开发。

电弧炉炉门吹氧设备按水冷方式分为两大类：一类是水冷式炉门碳氧枪，一类是消耗式炉门碳氧枪，如图 1-1 和图 1-2 所示。水冷式炉门碳氧枪在炉内工作时，水平角度与竖直角度均可调整，以便灵活地实现助熔废钢与造泡沫渣的功能。但由于喷枪采用套管水冷方式，水冷式炉门碳氧枪伸入炉内时不可插入熔池，以免发生爆炸，也不能与炉内废钢接触，否则会影响喷枪的寿命。消耗式炉门碳氧枪是用机械手驱动的三根外层涂料的钢管直接插入熔池，也可用于切割废钢助熔，喷枪一边工作一边消耗，其在炉内的活动范围较水冷式炉门碳氧枪大。

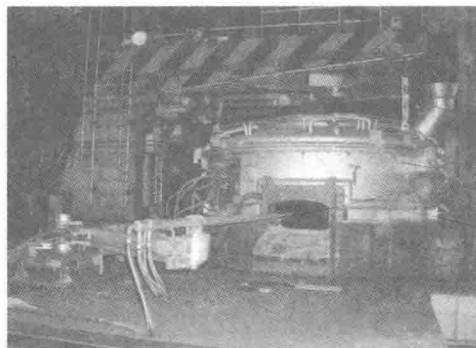


图 1-1 水冷式炉门碳氧枪



图 1-2 消耗式炉门碳氧枪

水冷式炉门碳氧枪具有氧气利用率高；泡沫渣效果好；脱碳、脱磷效果稳定以及自动化程度高等优点。如新余 50t 电弧炉使用这种氧枪后，吨钢可节约氧气 5m^3 ，电耗降低 $31\text{kW} \cdot \text{h}^{[9]}$ 。但它主要在钢铁料温度低时需要与氧燃烧嘴配合使用，不能连续吹氧以及吹氧深度不易控制，操作中不能与钢液接触，有一定的局

限性。消耗式炉门碳氧枪在炉内可更早地开始切割废钢，在炉内活动空间大，且不用担心水冷式炉门碳氧枪会发生的漏水事故，但操作过程中隔一段时间需要接吹氧管，增加一些麻烦。

1.1.2 炉壁供氧技术

电弧炉炉壁供氧是为了消除炉内冷区，保证炉料均衡熔化，利用炉壁模块化控制喷射纯氧以提高电弧炉的比功率输入，提高生产效率。图 1-3 所示为电弧炉炉壁供氧模块。

炉壁氧枪主要有脱碳、助熔、二次燃烧及造泡沫渣等功能^[10]。炉壁氧枪的安装方式与传统的安装方式相比较，安装位置更接近熔池，射流到熔池的距离与传统的安装方式相比缩短了 40%~50%，可大大提高熔池脱碳速度和氧气利用效率；可将熔池内的燃烧与熔池上方的燃烧有机结合起来，提高了冶炼过程热效率；可在炉内实现多点喷射，精确控制吹氧量和碳粉喷吹量，泡沫渣效果好。

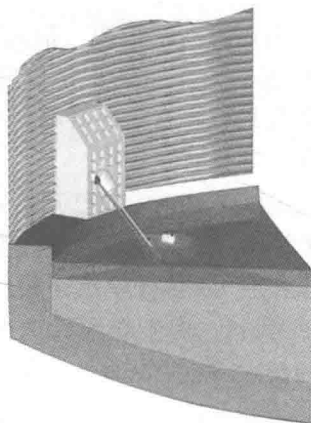


图 1-3 电弧炉炉壁供氧模块

1.1.3 EBT 供氧技术

为实现无渣出钢，现代电弧炉均采用偏心炉底出钢技术（EBT），不仅减少了出钢过程的下渣量，而且缩短了冶炼周期、减小了出钢温降。但同时也使得 EBT 区成为电弧炉内冷区之一，造成该区的废钢熔化速度较慢、熔池成分与中心区域成分差别较大等问题。

在偏心炉侧上方安装 EBT 氧枪进行吹氧助熔，可解决 EBT 冷区问题，如图 1-4 所示。EBT 氧枪能促进 EBT 区域的废钢熔化，完全解决了 EBT 区域的废钢在出钢时还未熔化而造成的出钢口打不开等问题，并在出现熔池后，提高 EBT 区的熔池温度，均匀熔池成分。出钢时，EBT 区域的温度及成分与炉门口区域温度及成分仅相差 0.5%~1.0%。



图 1-4 电弧炉 EBT 氧枪安装

1.2 氧燃烧嘴技术

电弧炉冶炼电耗的高低、冶炼时间的长短，很大程度上取决于熔化期时间，即取决于废钢熔化的快慢。电弧炉炼钢过程中，炉料由电弧区逐渐向外依次熔化。对于三相交流电弧炉，尤其是超高功率电弧炉，在电极之间对应炉壁处形成的 3 个冷区使废钢熔化不均匀，熔化时间较长。

国外于 20 世纪 50 年代在电弧炉炼钢中就已开始采用氧燃烧嘴技术。发展到 80 年代，日本已有 80% 的电弧炉、欧洲有 30%~40% 的电弧炉采用氧燃烧嘴技术。国内氧燃烧嘴技术的开发早在 60 年代就已开始。由于受到油、气资源的限制，工业推广没有铺开。80 年代初，由于煤炭资源丰富、价格较低，煤氧烧嘴技术得到了大力开发。北京科技大学成功研发了煤氧烧嘴技术，在国内多家电弧炉企业推广使用，取得了平均冶炼电耗降低 60~100kW·h/t、冶炼时间缩短 15~30min 的良好效果^[11]。

采用全废钢冶炼的电弧炉炼钢工艺已普遍采用氧燃烧嘴技术，保证了炉料的同步熔化。同时，氧燃烧嘴还可以提高炉内 CO 的二次燃烧率，有效地缩短冶炼时间，提高电弧炉的生产效率。目前，根据使用燃料的不同，氧燃烧嘴主要有油氧烧嘴、煤氧烧嘴、燃气烧嘴等几种形式，所用燃料有柴油、重油、煤粉和天然气等物质。各种类型烧嘴的特点和氧燃理想配比见表 1-3^[11]。

表 1-3 各种类型烧嘴的特点和氧燃理想配比

烧嘴类型	特 点	氧燃理想配比
油氧烧嘴	需配置油处理及汽化装置，氧、油量通过节流阀调节，自动控制水平较高。从设备投资、使用和维护方面比较，轻柴油优势明显	一般氧油比为 2:1，为使烧嘴达到最佳供热量，根据投入电量来改变均匀熔化时所需的最佳烧嘴油量

续表 1-3

烧嘴类型	特 点	氧燃理想配比
煤氧烧嘴	需配置煤粉制备设备, 虽然煤资源丰富、价格低, 但是装备复杂、投资大, 容易产生污染, 目前已不再使用。	氧煤比控制在 1.5 : 1 左右时, 吨钢电耗最低
燃气烧嘴	天然气发热值高、易控制, 是良好的气体燃料。设备投资少, 操作控制简单, 安全性最好	理想配比为 2 : 1 时, 火焰温度及操作效率最高; 理想配比小于 2 : 1 时, 火焰温度降低, 废气温度提高; 理想配比大于 2 : 1 时, 碳及合金氧化显著, 消耗量增加

氧燃烧嘴主要用于熔化期, 因为其产生的热量主要通过辐射和强制对流传递给废钢, 这两种传热方式都主要依赖于废钢和火焰的温度差以及废钢的表面积。因此, 烧嘴的效率在废钢熔化开始阶段是最高的, 此时火焰被相对较冷的废钢包围着。随着废钢温度的升高和废钢表面的缩减, 烧嘴的效率不断降低。图 1-5 显示了烧嘴效率与熔化时间的关系^[12]。从图中可以看到, 为了达到合理的效率, 烧嘴应该在熔化期完成大约 50% 后就停止使用, 此后由于效率较低, 即使继续使用氧燃烧嘴也无法达到助熔节电的效果, 反而只会增加氧气和燃料的消耗。

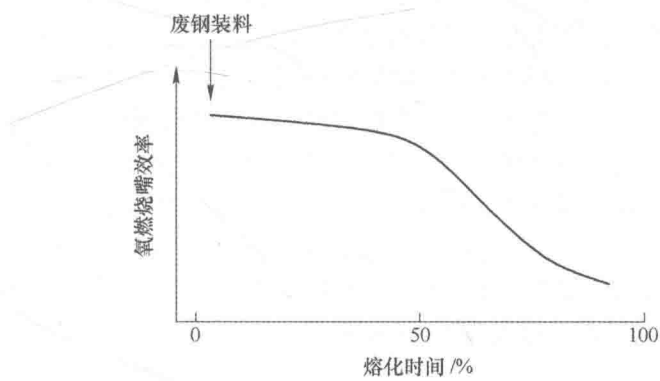


图 1-5 氧燃烧嘴效率与熔化时间的关系

1.3 泡沫渣技术

泡沫渣技术是在 20 世纪 70 年代末提出的。所谓泡沫渣是指在不增大渣量的前提下使炉渣呈很厚的泡沫状, 即熔渣中形成大量的微小气泡, 且气泡的总体积大于液渣的体积, 液渣成为渣中微小气泡的薄膜而将各个气泡隔开, 气泡自由移动困难而滞留在熔渣中, 这种渣气系统称为泡沫渣。电弧炉泡沫渣技术是在冶炼