

毛主席语录

社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思列宁主义的路线，不是回避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间的困难总是可以解决的。

任何新生事物的成长都是要经过艰难曲折的。在社会主义事业中，要想不经过艰难曲折，不付出极大努力，总是一帆风顺，容易得到成功，这种想法，只是幻想。

目 录

一、发展概况	1
二、工艺特征	11
三、试验研究	33
四、分析讨论	78

一、发展概况

(一) 实现连续炼钢的深远意义

毛主席教导我们：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。”钢铁工业的发展史也同样遵循着这一规律。

众所周知，转炉之后出现平炉，平炉之后出现电炉。开始用空气炼钢，后来用富氧炼钢，现代则多数用纯氧炼钢。其间，工艺、设备、品种等发生过多次重大的变革。至今，整个世界的潮流是采用纯氧顶吹转炉炼钢。举日本为例，1956年顶吹转炉尚属空白，但十五年后的今天，仅顶吹转炉钢一项，年产量就高达7088万吨，占总产量的80.0%^[1]。

然而，一百多年来，炼钢工艺尽管经历了一连串的更新，却还是没有摆脱一炉一炉间断冶炼的老传统。与其它先进工业部门相比，因设备笨重、生产率低、劳动条件差等缺点，钢铁工业迄今仍处于较落后的状态。因此，当前世界各国在讨论未来二十到三十年的冶金发展规划时，普遍提出了从矿石到成品钢材一条龙连续流水作业，实现钢铁生产全盘自动化的问题。实际上，这也是冶金工作者长期来梦寐以求的大课题。

从现代钢铁冶金联合企业的三个主要组成部分来看，高炉与轧钢原则上完全可以转入连续作业，唯有炼钢依然保持着间

断生产的特点。可见,炼钢过程的连续化就成了整个冶金企业连续生产的关键。要不要解决这个关键,能不能解决这个关键,国际上评论很多,绝大多数意见都是肯定的。

英国 M. J. Rhydderch^[2] 认为:“这项连续炼钢的成功,将使炼钢工作者过去的空想变为不消几年就可成为现实的工业规模的生产”。“钢与铁”杂志编辑部文章^[3]说,发展连续炼钢的重要意义已无需强调,它在钢铁界的巨大影响正如二十年前顶吹氧气转炉一样。……如果这项新工艺不久得以普遍采用,那末平炉和 LD 转炉就将变成过时的残余之物。法国 A. Berthet^[4] 讲:“连续炼钢给钢铁生产赋予了新的概念。高炉实际上可以连续出铁,若配以连续炼钢和连续铸锭,再与连续轧机相结合,这就构成了未来钢铁工业的灿烂前景”。澳大利亚对研究连续冶金一向富有兴趣。早在 1962 年 H. K. Worner^[5] 就有这样的看法:“在可预见的将来,高炉将继续成为主要的炼铁设备,但很难估计至 1975 年什么是炼钢的主要方法”。一年后,经试验得出了“用氧气精炼法连续生产各类碳钢在原则上完全可能”的结论^[6]。美国 E. M. Rudzik 等人^[7] 也证实了“用氧枪依次吹炼金属流股的连续炼钢工艺在技术上是不成问题的。”据 H. W. Meyer^[8] 分析:“由于技术的发展,已使钢铁公司在间断炼钢法上化费了大量的投资,在其回收之前,一般不会再作重大革新。但是,有了连续炼钢就必须摆脱这种情况,这项新工艺正在变得越来越富有生命力”。苏联 А. Ф. Мырцымов^[9] 在评论中写道:“可以毫不夸张地讲,现阶段正在研究和实现的连续炼钢是未来炼钢发展最重要和大有希望的方向”,并透露苏联已准备设计年产一千万吨钢的多段连续炼钢机组。日本中川龙一^[10] 的观点是:“连续炼钢对于大生产是一种合理的方法”,“目前高炉炼铁还将占主导地位……,今后必将从炼铁至轧钢采用连续化生产

方式”。木下亨^[11]设想一个全连续,全自动化的钢铁企业,可望在十五至二十年后实现”。而 M. W. Thring, M. A. Глчнков^[12]估计,至 1980 年连续炼钢产量将占世界钢产量的 10%。

也有持相反的意见。由于目前 LD 转炉生产能力在 30~40 分钟内已达 200 吨的水平,故有人^[11]认为炼钢的连续化没有必要”。捷克 L. Jenicek^[8]提出:“如果在连续炼钢炉中还要强制金属成份均匀化,那末是否能真正认为这是连续炼钢?因此,快速地一炉一炉的间断生产方法,如氧气转炉,仍然是今后发展的方向”。E. F. Kurzinski^[13]说:“虽然连续炼钢工艺在技术上是可行的,但由于存在耐火材料损耗、终点成份控制以及接受包中金属和熔渣猛烈喷出等问题,怀疑连续炼钢法在当前能真正获得广泛应用”,并断言“任何一种连续炼钢法在可预见的未来都还代替不了碱性氧气转炉”。J. B. Austin^[14]强调:“连续炼钢的各种优越性可能会被过多的耐火材料消耗所抵消。……尽管对连续炼钢法在经济上的估算和推测是何等的美好,但在多数情况下是极不可靠的”等等。

可见,人们的认识尚不一致。这也并不奇怪,事物总是一分为二的。连续炼钢作为一种新生事物,至今仍处于试验研究阶段,还有大量问题需要解决。而氧气转炉也确实优点很多,如炉体结构比较简单;可冶炼全部平炉钢种并能重熔 30% 的废钢;250 吨氧气转炉年产钢可达 200 万吨;与平炉车间相比,基建投资也要低得多。但是,连续炼钢本身就是一种氧气炼钢,一般的讲,氧气转炉固有的特性和优点它都具备。何况,发展连续炼钢的意义远非如此。摆在我们面前的根本问题,是连续炼钢还是间断炼钢?是建连续氧气炉,还是建间断氧气炉?其着眼点不仅在于炼钢自身,它更涉及到整个冶金企业的全貌。冶金工作者记忆犹新的是,五十年代国际上曾有过“平炉还是氧气转炉?”

的大辩论,而如今面临的问题,关系更重大,意义更深远。

必须指出,尽管最近十年顶吹转炉获得了惊人发展,平炉因生产率已日趋淘汰,但在很多国家仍占相当比重,其中苏联80%、美国37%、西欧共同市场25%的钢还是靠平炉冶炼出来的。把原有的平炉改造为顶吹转炉,因厂房高度不够,旧有厂房不得不全部拆除,结果要增加大量的基建投资。若用连续炼钢炉代替平炉,则由于厂房、吊车及其它辅助设备能被重新利用,基建投资可望大大降低。这样,不仅在连续炼钢、间断出钢的现阶段可大幅度地提高车间生产能力,改善钢的质量,同时在将来当炼铁高炉、连续炼钢炉、连续铸钢装置、连续轧机全线连成一体后,还能把钢铁生产组成一个统一的、连续的、高度自动化的工艺过程。

在具体论述连续炼钢之前,不妨先追溯一下化工生产的发展情况。因为,冶金本属化工的一个分枝,后来才发展成为一门独立的技术。

化工早就采用了连续生产,并积累了丰富的经验。化工工艺按其进行的时间和空间特征,可分作间断生产和连续生产两大类。间断生产的特点是在某封闭系统中依次进行循环操作。过程的参数、温度、成份和被加工原料的性质随时间不断发生变化。过程结束,卸出成品,装入新料,加工过程开始重复进行。相反,连续生产不可能在封闭系统中进行,而必须具备一条流水工艺作业线。线上依次排列的各种生产设备又要全部开通。结果,随着原材料在工艺作业线上的不断流动,一步步地加工成产品。在这条作业线上的每个点都建有一定的反应参数,它们不随时间而变化,但不同的空间点。这些参数又各不相同^[15, 16]。任何一种工艺,都有它自己最合理的参数值。人们可以运用种种操作手段,调整流水线上某一点或某一区的传质和

传热过程,将产品的最终参数保持在某一预先给定的数值上,从而获得预期的效果。

以上概念完全适用于炼钢生产。不过,从这一概念出发,双联炼钢、三联炼钢或几只炉子交叉装料、交叉出钢,就都不能算作连续炼钢。

十九世纪中叶西欧的产业革命导致生产规模的飞跃发展,许多化工部门先后从间断生产转入了连续生产。一百多年来,成批的玻璃源源不断地从 1600°C 高温下连续熔炼出来,一部分人造蓝宝石从 2080°C 的更高温度下连续制作出来,几乎全部大规模生产的化工产品,例如炼油、化肥、酸碱等都已采用了连续作业。本世纪初,水泥工业开始用旋转炉投入连续生产,耐火材料和陶瓷工业也越来越多地用隧道炉和环形炉实行流水作业。机械制造、汽车工业等亦均不例外。可见,连续化业已成为工业发展的必然趋势。连续化生产有助于减少损耗,改善产品质量,提高设备效率,强化生产过程,实现机械化、自动化、从而促使劳动生产率大幅度地上升。

根据各工业部门连续生产的实践经验,采用连续作业时应当充分注意到以下几种因素:

1) 任何连续生产过程均由一系列操作工序所组成,而每一工序又都占有独立的专用设备。工序越多,相应的设备也越多,整个机组就更复杂。从这点出发,如果生产规模过小,经济上就不合算。因此,在选择工艺流程时应尽可能地简化工序,节约投资,以利生产。

2) 当加工处理对象和反应产物为液相和气相时,连续生产的组织最简单,最有效。因液体和气体都能沿工艺线自行流动。

3) 现代化大生产,如汽车制造的特点是设备专门化、产品

单一化。这样可以获得最佳经济指标。不过,这种方法对许多工业部门并不适用。如冶金工业,其产品规格众多,并且还在与日俱增。

4) 当代工业发展的标志是高速度的技术革新,包括生产方法和产品品种的不断更新。因此,连续生产设备应具有适应这种革新的可能性,以便迅速更换某些过时的构件和部件。

5) 采用连续作业系高水平生产的体现,对设备的可靠性,原材料和辅助材料质量的均匀性提出了更严格的要求。流水线上前一道工序出来的半成品必须严格满足后一道工序的技术条件。

6) 连续生产改变了整个设备的工作条件。如果说在间断生产中因高温和温度变化等因素对设备寿命带来不利影响,那末过渡到连续生产后,相应区域的高温影响虽然继续存在,但避免了温度的周期性变化。因此,在很多情况下,恒定的作业制度成了提高设备寿命的有利因素。

基于以上认识,联系炼钢过程实际情况,不难看出,实现炼钢过程的连续化完全是必要的。首先,炼钢工业本身就是一种大规模生产。英国人 M. W. Thring 在展望未来炼钢发展远景时认为,对今后卅年黑色冶金发展的预计必须建立在人类的实际需用量上。该用量他估计为每人每年 0.25~0.5 吨钢或相当于钢材的其它材料^[17]。其次,炼钢过程工序并不繁多,铁水、钢水都能沿工艺线自行流动。在冶炼一般碳钢、低合金钢和优质结构钢时,其操作工艺亦大同小异,故连续炼钢机组也不致比转炉或平炉更复杂。

当代科学技术的发展,冶金、热工、机械、仪表、电子等工业部门大量成就的取得,诸如气-粉混合料传送系统及其喷嘴的研

制成功，快速连续检测液态金属流量、成份、温度仪表和电子计算机的应用，新型优质耐火材料的制备，都为炼钢的连续化创造了极为有利的条件。

实现连续炼钢不仅非常必要，并且完全可能。

（二）发展简史及现状

连续炼钢工艺远在上一世纪就有人想到。1898年出现了第一个关于连续炼钢的专利^[18]。即直接在高炉或化铁炉之后处理和精炼生铁的方法。其特点是高炉或化铁炉经过处理室连续放出除去渣子的生铁，在处理室内铁水在流动过程受到烧嘴的火焰氧化作用，之后流入贮铁炉，在贮铁炉中或在与它分开的炉子中再炼成铸造用熟铁或钢，或者立即当作成品加以应用。

1939年Н. Н. Доброхотов^[19]发表了关于连续炼钢的第一篇著作，并设计了一个车间平面布置。氧化炉精炼，脱氧炉脱氧，两者之间用流槽连通。铁水自高炉车间用125吨带盖铁水缶车运至炼钢车间操作平台，经流槽连续兑入氧化炉。精炼过程连续加入预热至1200℃的石灰、石灰石和铝矾土。氧化炉熔池镜面宽5米、长16~32米，昼夜生产能力1440~2880吨或1~2吨/分，用炉顶冷焦炉煤气烧嘴加热。

1940年德国H. Rochling和O. Johanssen^[20]申请了一个旋转炉连续炼钢专利，空气自设于熔池液面下的风眼鼓入。同年还出现过用一个用一组相互穿通的炉子连续吹炼铁水的专利方案，在每一只炉子中单独造渣，以创造去除杂质的最有利条件。

此后，1948年苏联Г. П. Иванцов, С. И. Собкин^[21]设计了一种由七只侧吹转炉串成一体的连续炼钢机组，用以处理富磷、富硫、富铬以及含镍、铬的特殊生铁。

所有上述方案在整整半个世纪中仅仅停留于书面设想，并没有引起当时人们的特别注意。因此，只不过成了冶金发展史上一种有趣的记载罢了。

五十年代起，由于冶金科学技术的飞速发展，特别是大型制氧机的出现以及伴随而来的氧气炼钢、真空处理和连续铸锭等钢铁工业三大技术革命的开展，连续炼钢才逐步受到了重视，进行了一些小型的试验研究。但当时的世界潮流主要是纯氧顶吹转炉炼钢，各国都在竞相争用，至于连续炼钢，除继续充实了一些专利和设想方案外，实际工作依然做得很少。从文献报导中只见到英国的旋转坩埚炉和废钢熔化炉两种小型连续试验。

至六十年代，纯氧顶吹转炉日趋成熟、完善和定型。冶金界在规划并探索未来钢铁工业发展远景时，才真正把连续炼钢的研究摆到议事日程上来。1961年后，澳大利亚、英国、法国相继在小型研究基础上转入了半工业性和工业性试验阶段。其中英国喷雾炼钢首次试验成功的消息引起全球震动，1966~1968年间在世界主要冶金期刊上广为宣传。六十年代后期，有关槽型连续炼钢试验的报道逐渐增多，其中澳大利亚和法国均取得了较好的成果。

至今，国际上已有15个工业发达或比较发达的国家（英国、法国、美国、日本、澳大利亚、西德、苏联、瑞典、奥地利、捷克、波兰、东德、卢森堡、加拿大、比利时）正在积极从事连续炼钢的试验研究。其中不少国家已搞十年左右，发表的文献和专利上百篇，设想和试验方案数十种。值得注意的是，工业最发达的美国搞得较慢较少，而二等工业国家英国、法国、澳大利亚等搞得较快较多。首先发展氧气顶吹转炉这个炼钢新技术的奥地利也正在积极从事连续炼钢的试验。由于连续炼钢意义重大，技术要求较高，还出现了国际间联合试验的趋势，如澳大利亚和瑞典等。

可以相信，世界上第一座连续炼钢车间的出现将为期不远了。

总览近十年连续炼钢发展动向，可概括成下列几点：

(1) 两种类型：即平炉型连续炼钢法和纯氧转炉型连续炼钢法两种类型。那一种方法好，尚难一概定论，因为除型式和性能外，还牵涉到生铁、废钢和燃料等一系列问题。各国当前着重研究的多数属于后者。这对于废钢和燃料少的国家尤为适宜。

(2) 两大流派：以英国为代表的侧重研究喷雾连续炼钢，其中英国系立式喷雾，奥地利系卧式喷雾。以苏联、澳大利亚为代表的侧重研究槽型连续炼钢。而法国的泡沫法，就渣、金反应特征而论，则介乎上述两者之间。

(3) 两种倾向：一种倾向是搞单段机组，即冶炼过程杂质(C、Si、Mn、P、S)的去除全部集中在一个反应器内进行。另一种倾向是搞多段机组，即根据冶金反应特点，将诸杂质元素分别在不同反应器中加以去除。前者以英国、澳大利亚为代表，后者以苏联、日本为代表。

(4) 一项新技术——逆流渣操作工艺的应用：连续流渣操作最早在卢森堡作过试验^[22]。由于LD-AC转炉在冶炼高磷生铁时需经常倒炉出渣并造新渣，致使与低磷单渣操作的LD转炉相比，失去了经济上的优越性。因此，将一座容量为2~3吨的经典LD-AC顶吹试验转炉改造成既能连续吹炼又能连续出渣。不久，澳大利亚、西德等国发展了这一经验，在槽型连续炼钢炉中采用逆流连续出渣的新工艺，取得了优异成绩。逆流渣操作已成了当前连续炼钢试验中一项较为流行的新工艺、新技术。

(5) 现有水平：见表1。

表 1 国外连续炼钢的试验水平

项 目	最 大 机 组		实 际 生 产 能 力		连续时间	最高脱 P 率
	吨/时		吨/昼夜	吨/周	小 时	%
指 标	50~80	20~30	500	3000	50	98
国 别	英	法	法	英	法	澳

项 目	最高脱 S 率	氧 利 用 率	废钢加入量	金属收得率		耐 火 材 料 消 耗
	%	%	%	%		公斤/吨钢
指 标	88	107.6~127.5	34~44	97	98~99	<1.5
国 别	澳	澳	法	法	澳	法*

* 炉龄可达一个星期

(6) 改进措施:

1) 充分保证铁水供应, 扩大试验规模, 延长连续作业时间;
 2) 改造炉型结构, 研制新型优质耐火材料, 不断提高炉衬寿命, 尤其是一些关键部位, 如炉顶、渣线、挡渣墙等。并采用预制件进行快速更换。

3) 严格控制铁水、钢水的流量、成份、温度, 恒定工艺操作制度。为此, 必须解决一系列的连续检测和调节技术, 并逐步转入用电子计算机对整个冶炼过程实行自动控制。在终点钢水流量、成份和温度尚控制不准的情况下采用调整炉等过渡设施, 以便模铸成锭或连铸成坯。

4) 提高炉内 CO 燃烧程度, 喷入补充燃料, 进一步改善炉子热工条件, 扩大废钢加入量。与此同时, 应研究解决大块废钢的加入方法问题。

5) 在开展半工业性、工业性试验的同时, 重视基础理论和模型研究, 充分掌握工艺的内在规律, 以加速连续炼钢的发展进程。

二、工 艺 特 征

与一般炼钢方法相比,连续炼钢的特点是:从铁水、废钢到钢水,不是一炉一炉相对孤立地冶炼,而是连续不断地在流动中冶炼。即铁水不断地加进去,钢水连续地流出来。整个冶炼过程的各个阶段或环节可以充分地沿长度或高度方向展开。目前国外各种槽型连续炼钢炉正是建立在将冶炼过程沿长度方向展开的基础上的,而英国喷雾炼钢装置则属向高度方向展开的一种典型。

(一) 槽型连续炼钢

1. 设计思想

一般炼钢法都是间断操作的。炼钢过程的各种物理化学反应全部集中在一个容器中进行,其中不少反应彼此矛盾,相互干扰,使整个冶炼过程难以有效地进行。譬如,脱硫反应要求还原性气氛,脱磷反应却要求氧化性气氛;温度对硫的平衡分配影响不大,而脱磷反应的热力学条件则希望降低温度。同样,硫、磷两个元素和硅又有矛盾:金属中含硅本有利于硫的去除,但由于硅在冶炼过程氧化得最早、最快,形成酸性渣,又妨碍了硫向炉渣的转移;冶炼初期的温度条件对脱磷较有利,但也因硅的大量氧化抵消了这一有利因素。尽管通过多次造渣可以在炼钢过程将硫、磷去除到很低水平,但却付出了很高的渣料和热量代价。因此,从冶金过程物理化学的基本规律出发,较理想的是对各种

杂质元素采取“分而治之”的办法，即在冶炼过程的不同阶段、不同区域为某一种或两种杂质元素的反应创造最有利的条件，先后加以去除。当然，这就要求拉长工艺流水线，而连续性生产正好为此开辟了广阔的前景。问题是这条流水线究竟要拉成多长，能拉成多长。

若举一座年产 48 万吨钢的炼钢车间，用一台槽型连续炼钢机组进行生产为例，则这台机组的生产能力应该是 48 万吨/年。取年作业时间 333 天，即相当于 $60 \text{ 吨/时} = 16.7 \text{ 公斤/秒}$ 或 2.4 升/秒 。

当金属在槽内的流速为 10 厘米/秒时（从防止回流和轴向搅拌出发），槽的断面仅为 240 平方厘米（ 12×20 厘米）。将冶炼时间定作 10 分钟，槽子长度就得 60 米。冶炼时间增加一倍，槽子长度便拉长成 120 米。在这么长的槽子里，因流股的轴向搅拌不明显，原则上可以把它分隔成若干独立操作区域，保证冶金反应各个阶段能在相应区域单独进行。但是，用这么长的槽子炼钢显然是不切实际的。不仅场地、设备有困难，温度损失和耐火材料消耗更成问题。扩大断面可以缩短长度，但有一定限度。过分扩大断面，势必导致金属流速的急剧下降。在冶炼强度不变条件下，此时要求向单位金属液面输入更多的氧量，同时也相应地增加了自单位金属液面逸出的气量，从而造成了流股轴向的剧烈搅拌，严重地破坏了分段独立操作的工艺组织，最终失去了连续炼钢沿长度方向展开的一系列优点。

不仅如此，在极端情况下，轻易地用一只类似 LD 转炉的球形反应器进行连续炼钢（采用特殊操作技术的泡沫法例外），还将出现其它新的问题。为了阐明这一点，有必要作一些理论上的探讨。

任何一种间断炼钢操作，除氧流直接作用下的反应区外，金

属熔池的成分和温度基本上都是均匀的。据此,炼钢工可以用一勺钢水来判断整炉的成份和温度。造成金属成份和温度均匀化的条件是熔池的强烈沸腾与搅拌。沸腾与搅拌的强度则取决于供氧制度和气体从熔池中逸出的平均速度 W_{co} 。一般来讲, W_{co} 就标志着熔池的搅拌强度和上涨程度。平炉和转炉的操作实践表明, W_{co} 又取决于脱碳速度 W_c 。 W_{co} 和 W_c 的关系是:

$$\begin{aligned} W_{co\text{平炉}} &= \frac{W_c^{\text{平}}}{100} \cdot h \cdot 7000 \cdot \frac{1.897}{3600} \cdot \frac{T}{273} \\ &= 0.133 W_c^{\text{平}} \cdot h \cdot \frac{T}{1000} \end{aligned} \quad (1)$$

$$W_{co\text{转炉}} = 8.0 W_c^{\text{转}} \cdot h \cdot \frac{T}{1000} \quad (2)$$

其中: h ——熔池深度, 米;

T ——熔池温度, $^{\circ}\text{K}$ 。

平炉强化冶炼时, 脱碳速度为 $0.6 \sim 0.8\% \text{C/时}$, 熔池中气体的逸出速度, 因熔池深度不同而波动于 $0.1 \sim 0.2$ 米/秒范围。转炉炼钢速度快得多, 其相应的气体逸出速度也要大得多, 顶吹转炉为 $3.0 \sim 4.8$ 米/秒, 底吹转炉约为 12 米/秒左右。

为了计算连续炼钢过程 CO 气泡的逸出速度, 上述两式中的 W_c 应用 $\frac{\Delta C}{\tau} = \frac{C_1 - C_2}{\tau}$ 来代替。 C_1, C_2 为熔池进出口金属中的含碳量; τ 为金属在炉内的停留时间(它相当于间断炼钢的冶炼时间。在炉型设计中已知 τ 和金属在炉内流速就可决定熔池的总长, 已知 τ 和铁水流量就可决定反应器的炉容量)。于是(1)、(2)两式在连续炼钢条件下就变成:

$$W_{co} = 0.133 \frac{\Delta C}{\tau_{\text{时}}} \cdot h \cdot \frac{T}{1000}; \quad (3)$$

$$W_{co} = 8.0 \frac{\Delta C}{\tau_{\text{分}}} \cdot h \cdot \frac{T}{1000} \quad (4)$$

如果将连续条件下金属在炉内的停留时间设计成与间断炼钢的冶炼时间相近,则在同样炉型条件下,由于单位表面气体的大量逸出,造成整个熔池的剧烈沸腾和搅拌,导致金属成分和温度的均匀化。这样就出现了一种新的情况,即当采用一只球形反应器进行连续炼钢时,杂质的去除始终是在接近出钢条件下进行的。而在间断炼钢过程则不同,上述情况只出现在冶炼的终点。

我们知道化学反应的速度与反应物质的浓度密切相关。当其它条件不变时,浓度的降低在多数情况下将引起反应速度的减慢。举脱碳反应为例,当金属中含碳量大于0.3~0.4%时,属零级反应,即反应速度与含碳量无关。但低碳区的脱碳反应和喷石灰粉的脱硫反应都接近于一级反应,此时,反应速度与杂质浓度成正比:

$$\frac{dc}{d\tau} = -KC_0. \quad (5)$$

对于间断炼钢过程,杂质浓度从 C_1 降至 C_2 所需时间是:

$$\tau = \frac{1}{K} \ln \frac{C_1}{C_2}. \quad (6)$$

在该时间内,若反应剂(渣料或氧气)的供给速度为 g ,则其总耗量为:

$$G = g\tau = \frac{g}{K} \ln \frac{C_1}{C_2}. \quad (7)$$

因此,脱除每一单位量的杂质,需消耗反应剂(渣料或氧气):

$$\frac{G}{C_1 - C_2} = \frac{g}{K(C_1 - C_2)} \ln \frac{C_1}{C_2} = \frac{g}{KC_2} \cdot \frac{\ln \frac{C_1}{C_2}}{\frac{C_1}{C_2} - 1}. \quad (8)$$

前已指出,从间断操作过渡到连续操作,意味着杂质原始

浓度从 C_1 降至 C_2 。这样，因式(8)中的 $\ln \frac{C_1}{C_2} = \frac{C_1 - C_2}{A \cdot \tau \cdot C_1} = 1$ 等于 1，得：

$$\frac{G}{C_1 - C_2} = \frac{g}{K C_2} \quad (9)$$

式(9)就表示在熔池被充分搅拌条件下，连续操作过程反应剂的消耗量。再将(9)，(8)两式相除，即可得出两种操作过程反应剂消耗的比例：

$$\frac{G_{\text{连续}}}{G_{\text{间断}}} = \frac{\frac{C_1}{C_2} - 1}{\ln \frac{C_1}{C_2}} \quad (10)$$

从式(10)可以具体算出 $\frac{C_1}{C_2}$ 与 $\frac{G_{\text{连续}}}{G_{\text{间断}}}$ 的相互关系：

$$\frac{C_1}{C_2} = 1.0 \quad 1.5 \quad 2.0 \quad 3.0 \quad 5.0 \quad 7.5 \quad 10$$

$$\frac{G_{\text{连续}}}{G_{\text{间断}}} = 1.0 \quad 1.23 \quad 1.44 \quad 1.82 \quad 2.49 \quad 3.22 \quad 3.91$$

对于两级反应，则反应速度与浓度的平方成正比：

$$\frac{dc}{d\tau} = -K C^2 \quad (11)$$

根据上述同样的运算方法，可以获得：

$$\frac{G_{\text{连续}}}{G_{\text{间断}}} = \frac{C_1}{C_2} \quad (12)$$

比较式(10)和式(12)可以看出，当 $\frac{C_1}{C_2} = 5$ 时，对于一级反应，在连续条件下反应剂的消耗要多 2.49 倍，而对于两级反应，则要多 5 倍。可见反应级数越高，采用连续生产过程就越不合理。

也可用图解法确定连续过程反应剂的消耗量(图 1)。先根