

• 高等学校教学用书 •

炉 外 精 炼

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

769

1

冶金工业出版社

高等学校教学用书

炉外精炼

武汉钢铁学院 徐曾啟 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书

炉外精炼

武汉钢铁学院 徐曾啟 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街清华院北楼13号)

新华书店总店科技发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张11.75 字数 271 千字

1994年6月第一版 1994年6月第一次印刷

印数1~4100册

ISBN 7-5024-1395-2

TF·320 (课) 定价5.55元

前 言

本书系根据冶金、有色系统教材出版规划和钢铁冶金专业“炉外精炼”课程教学大纲编写的。

炉外精炼是近些年来迅速发展的各种炼钢精炼技术的总称。目前有关炉外精炼的介绍和论述很多，但是全面、系统地介绍炉外精炼的理论和实践的专门著作却很少，特别是教科书。

由各厂家开发并应用于生产的炉外精炼方法至今已超过四十种。由于各厂的精炼项目、设备条件、技术水平不尽相同，所开发的精炼方法，从设备到工艺，必然会有很大的差异。但是，各种方法都是要为完成某项精炼项目创造最佳的热力学和动力学条件，所以，尽管方法不同，所采用的精炼手段却基本相同。目前已应用的精炼手段，不外乎渣洗、真空、搅拌、加热、喷吹等五种。各种不同的炉外精炼方法，只不过是这五种精炼手段的不同组合。这样分析论述这五种手段的基本原理，必然适用于应用这些手段的炉外精炼方法，而不必一一论述每一种炉外精炼方法的工艺原理。

本书内容共分五章。第一章概论，介绍各种炉外精炼方法的提出、发展、分类、特点，以及采用的精炼手段和冶金功能，以期对炉外精炼技术作一概括的描述。第二章炉外精炼的理论基础，按五种精炼手段分别阐述其工作原理，确定工艺参数，作出对生产有指导意义的结论。第三章炉外精炼工艺，重点介绍国内外应用较为普遍的几种炉外精炼方法的特点、工艺、工艺参数和冶金效果。此外，还对其他二十余种炉外精炼方法作了简要的介绍。第四章炉外处理和精炼用耐火材料，介绍炉外精炼用耐火材料的工作条件和所用耐火材料的品种，以及国内外在该领域的发展概况。第五章炉外精炼方法的选择和发展趋势，从炉外精炼设备的类型和特点的分析出发，归纳出选择炉外精炼方法的若干原则，还对炉外精炼在现代炼钢车间中的地位、作用和工艺布置作了简要的论述。

参加本书编写工作的有武汉钢铁学院徐曾启、包头钢铁学院吴培良、华东冶金学院吴淇澳和鞍山钢铁学院谢玉琛。由徐曾启任主编。

1992年6月，在武汉钢铁学院召开了本书的审稿会。参加审稿的有北京科技大学马廷温、鞍山钢铁学院薛志明和唐山工程技术学院宋文林等同志。他们提出了许多宝贵意见。编者对参加讨论、审查的同志表示衷心的感谢。本书在编写过程中，作者参考了国内外公开出版的有关文献，以及有关院校的讲义，限于条件，不能将诸多文献一一列出，谨在此向诸位原作者致以深切的谢意。

本书作为钢铁冶金专业教材，还可供金属材料及热处理、压力加工、铸造等专业的本科生、研究生、教师，以及工厂的有关工程技术人员参考。

限于编者水平，书中缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

编者

1992年10月

目 录

1 概论	1
1.1 炉外精炼出现和发展的原因	1
1.2 炉外精炼方法的分类	3
1.2.1 渣洗	3
1.2.2 吹氩	5
1.2.3 真空脱气	6
1.2.4 大吨位钢液的真空脱气	6
1.2.5 带有加热装置的炉外精炼方法	6
1.2.6 低碳钢液的精炼方法	7
1.2.7 固体料的添加方法	7
1.3 炉外精炼技术的特点及所采用的精炼手段	8
1.3.1 炉外精炼技术的特点	8
1.3.2 炉外精炼技术所采用的精炼手段	9
2 炉外精炼的理论基础	13
2.1 渣洗	13
2.1.1 合成渣	13
2.1.2 渣洗的精炼作用	18
2.2 真空	26
2.2.1 钢液的真空脱气	26
2.2.2 钢液的真空脱氧	33
2.2.3 降低一氧化碳分压时的吹氧脱碳	41
2.2.4 真空泵抽气能力的选定	44
2.3 搅拌	46
2.3.1 搅拌方法	46
2.3.2 搅拌方法的比较	48
2.3.3 搅拌过程中的能量消耗	50
2.3.4 熔体的混匀时间与比搅拌功率的关系	53
2.3.5 气力提升泵的工作原理及在冶金熔体搅拌中的应用	56
2.3.6 气体搅拌钢包内钢液的运动	59
2.4 加热	63
2.4.1 燃烧燃料加热	63
2.4.2 电阻加热	64
2.4.3 电弧加热	64
2.4.4 化学热法	66
2.4.5 其他加热方法	67
2.4.6 钢包炉的能量平衡	68
2.5 喷吹	71

2.5.1	气力输送中粉粒的行为	72
2.5.2	粉气流在管道输送中的流动特性	75
2.5.3	粉气流中固体粉粒的运动速度	77
2.5.4	粉气流的密度	78
2.5.5	粉气流进入熔池内的行为	79
2.5.6	非金属夹杂物的变性处理	87
2.5.7	喂线—合金芯线处理技术	90
3	炉外精炼工艺	94
3.1	RH法真空脱气	94
3.1.1	工艺过程	94
3.1.2	工艺参数	95
3.1.3	RH法的发展	98
3.1.4	RH法的效果	100
3.2	钢包喷粉	100
3.2.1	不同型式喷粉冶金设备的特点	101
3.2.2	喷粉工艺过程	103
3.2.3	工艺参数	104
3.2.4	冶金效果	106
3.3	钢包炉	107
3.3.1	钢包炉的特点及种类	107
3.3.2	工艺过程	109
3.3.3	工艺参数	113
3.3.4	钢包炉静态工艺模型的建立方法和工艺参数的优化	117
3.3.5	精炼效果	120
3.4	AOD	124
3.4.1	设备特点	125
3.4.2	工艺过程	125
3.4.3	工艺参数	127
3.4.4	AOD法精炼的效果	130
3.4.5	AOD与VOD的比较	133
3.5	其他精炼方法	134
3.5.1	渣洗	134
3.5.2	吹氩	134
3.5.3	真空脱气	135
3.5.4	具有调温功能的炉外精炼方法	137
3.5.5	低碳钢液的精炼方法	138
3.5.6	固体料的添加方法	138
4	炉外处理与精炼用耐火材料	140
4.1	铁水预处理装置用耐火材料	140
4.1.1	铁水预脱硫设备及工艺流程	140
4.1.2	铁水预处理罐罐衬耐火材料	142
4.1.3	喷枪	143

4.1.4	修补技术和修补料	143
4.2	炉外精炼用耐火材料发展概况	144
4.3	真空脱气装置 (RH、DH)用耐火材料	147
4.3.1	RH装置的内衬结构与砌筑	147
4.3.2	真空室耐火材料材质及性能	148
4.3.3	国外真空脱气装置 (RH) 采用的耐火材料	149
4.4	钢包炉精炼装置用耐火材料	151
4.4.1	LF精炼钢包	151
4.4.2	VAD精炼钢包	151
4.4.3	ASEA-SKF精炼钢包	152
4.4.4	VOD精炼钢包	152
4.4.5	喷射冶金用耐火材料	153
4.4.6	透气砖	153
4.4.7	连铸中间包	154
4.5	我国铁水预处理和炉外精炼用耐火材料发展概况	155
4.5.1	铁水预处理用耐火材料发展概况	155
4.5.2	炉外精炼用耐火材料发展概况	155
4.5.3	炉外精炼装置用耐火材料	155
5	炉外精炼方法的选择和发展趋势	158
5.1	炉外精炼设备的特点	158
5.1.1	设备的类型和特点	158
5.1.2	炉外精炼方法的选择	159
5.2	炉外精炼工艺的几种基本类型	160
5.2.1	真空脱气处理	161
5.2.2	真空循环脱气	162
5.2.3	真空吹氧脱碳	163
5.2.4	钢包炉	164
5.2.5	喷粉处理和喂线	165
5.3	现代炼钢车间的组成和工艺要求	166
5.3.1	新型氧气转炉车间	166
5.3.2	现代电弧炉炼钢车间	171
5.4	炉外精炼的问题和发展趋势	175
5.4.1	炉外精炼技术的发展趋势	175
5.4.2	炉外精炼技术发展中尚待进一步解决的问题	176
	主要参考文献	177

1. 概 论

长期以来,特殊钢大多是在电弧炉内熔化和精炼的。随着科学技术的发展,对炼钢的生产率、钢的成本、钢的纯洁度以及使用性能,都提出了愈来愈高的要求。传统的炼钢设备和炼钢工艺难以满足用户越来越高的要求。60年代,在世界范围内,传统的炼钢方法发生了根本性的变化,即由原来单一设备初炼及精炼的一步炼钢法,变成由传统炼钢设备初炼,然后在炉外精炼的二次炼钢法。出现了各种各样的炉外精炼法。

所谓炉外精炼,就是按传统工艺,将在常规炼钢炉中完成的精炼任务,如去除杂质(包括不需要的元素、气体和夹杂),成分和温度的调整和均匀化等任务,部分或全部地移到钢包或其他容器中进行。因此,炉外精炼也称为二次精炼或钢包冶金。

1.1 炉外精炼出现和发展的原因

炉外精炼是近年来发展起来的一项炼钢新技术。转炉、电炉和平炉都可以配合各种各样的炉外精炼方法。目前,经炉外精炼的普通钢已占其总产量的60%,特殊钢的炉外精炼比已高达85%。一种新技术的出现并得到迅速的发展,必然有其技术上和经济上的原因。炉外精炼法作为一项新技术也不例外。

从技术上看,对钢材质量日益苛刻的要求主要表现在纯洁度高,各向异性小,合金成分范围窄等方面。在第五届国际钢铁年会上,有人预测,到1995年,对钢纯洁度的要求将达到如下水平: $[C] < 6\text{ppm}$, $[S] < 5\text{ppm}$, $[P] < 14\text{ppm}$, $T[O] < 5\text{ppm}$, $[N] < 14\text{ppm}$, $[H] < 1\text{ppm}$ 。如此低的杂质含量,无论如何仔细地操作,传统炼钢方法产品的杂质含量仍将比上述水平高出几倍,甚至几十倍。由于传统炼钢方法合金的收得率波动很大,所以钢产品的成分范围较宽。同钢种的不同炉号性能差别较大,不利于钢材加工(轧制和机械加工)工艺的自动化,也不利于使钢材达到最佳性能的配合。杂质含量高,加之在钢中存在形式无法控制,必然导致钢材的机械性能在不同方向上存在较大的差异。

传统的炼钢方法中,电炉炼钢法采用电弧作为热源,所以在温度、炉内气氛和炉渣性质的控制上,有相当大的灵活性。长时期以来,被公认为是具有较强精炼能力的一种炼钢方法。即使如此,这种方法的工艺本身就存在着矛盾和不合理,使由电弧作为热源的优越性不能充分发挥,或被难以避免的、不合理的工艺安排所抵销。例如,碱性电弧炉中所造的还原渣有着较强的脱硫能力,但是由于炉内渣钢接触界面太小,脱硫不能充分进行,即还原渣的脱硫能力不能被充分利用。又如,对于防止大断面合金结构钢和大锻件钢最敏感的缺陷——白点来说,要求把钢中的氢降低到 $2.5\sim 3\text{ppm}$ 以下。这在电弧炉冶炼的氧化期,如果经过激烈而均匀的碳氧化沸腾是完全可以达到的。但是,紧接着的还原期,却又使钢中的氢回升到 $5\sim 7\text{ppm}$,而出钢、浇注后则几乎回复到熔清时的水平。有试验认为,在电弧炉冶炼的氧化期,不论将钢中的氢降得多么低,扒除氧化渣后,随着以石灰为主的稀薄渣料的加入,钢中的氢就急剧升到与大气中水蒸气分压力($p_{\text{H}_2\text{O}}$)相平衡的数值,或者与炉气中 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 相平衡的数值。当渣料不干燥(特别是石灰)时,会使炉气中 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 达到较大的数值。在整个还原期,钢中的氢基本上保持不变,或略有缓慢增加。

的还原期，钢液内溶解的氧（以 $[O]$ 表示）不大于80ppm，插铝终脱氧后进一步降低到小于30ppm，而且钢中的氧化物夹杂也可以大部分上浮排除。如白渣保持15分钟后， $[O]$ 与总氧量（ $T[O]$ ）就趋一致。所以一般认为电炉还原期钢液的纯洁度很高。但在出钢过程中，由于钢液与大气接触， $[O]$ 急剧升高。如果钢液与大气接触达到平衡的话， $[O]$ 就会回复到脱氧前的水平（100~200ppm），给浇注带来恶劣的后果。为此，生产上采用两种办法解决此矛盾。一是钢渣混出，借还原渣保护钢液，减少钢液与大气的直接接触，并通过钢包内的渣钢混和，进一步发挥白渣的脱氧作用，同时把二次氧化的产物吸引到渣中。正因为如此，在通常情况下，炉内白渣中 $\Sigma(FeO)=0.3\sim 0.5\%$ ，而出钢后，包中渣的 $\Sigma(FeO)$ 上升到1%左右，甚至更高一些。另一种办法是增加钢中溶解的铝量（习惯上称为残铝量），用钢中的残铝对出钢引起的二次氧化的钢液脱氧。如出钢前残铝量为0.05~0.07%，出钢后则降到0.03%。这样可以稳定钢液含氧量和保护钢液中的其他合金元素（例如硅）。但是这两项措施只能解决钢厂的现场合格率问题，对于钢的内在质量未必有益，特别是提高残铝明显地恶化钢的纯洁度。对夹杂的研究已经表明，钢中氧化物夹杂主要来源于混渣、二次氧化和浇注系统耐火材料的侵入。而出钢和浇注时的二次氧化，则是成品材中脆性氧化铝系夹杂的主要成因。

为了解决工艺安排上的这种不合理性，在操作中规定了一些预防措施。例如，还原期加入料的严格烘烤，缩短还原期；包中加铝，延长镇静时间等。但是，这些措施并没有从根本上解决问题。只有将未脱氧的“粗钢液”从炉中倒出，在具有浇注功能的容器中（通常是钢包），有针对性地创造精炼条件，再将精炼的钢液直接浇注（最好在各种保护措施下），也就是尽量避免已精炼的钢液再与大气接触。这样，出现了钢的精炼从传统的炼钢炉内移到炉外，发展各种各样炉外精炼法的技术背景。

炉外精炼技术出现和迅速发展的技术原因，除传统的炼钢工艺无法满足用户对钢材质量日益严格的要求外，传统工艺还难以适应炼钢领域所出现的一系列新技术。例如，超高功率电弧炉技术的出现，显著地提高了废钢的熔化速率，从而提高了电炉的生产率。但是按照老的电炉炼钢工艺，在电炉内还要经过相当长时间的氧化和还原才能出钢。这样超高功率缩短熔化期的效果就被冲淡，并且还使大功率的变压器长时间地低负荷运行，降低了超高功率电炉的功率利用率，显然这是不合理的。为了充分发挥超高功率技术的优越性，只有改革电炉炼钢工艺，使大部分精炼任务不再在炉内完成，尽量提高熔化时间占整个冶炼时间的比例。又如连铸技术的出现，连铸机要求炼钢设备能定时、定量地提供一定温度的优质钢液。使用传统的炼钢工艺就较难满足这些要求，连铸技术的作用不能充分发挥，车间连铸比难以提高。若在炼钢设备与连铸机之间设置一种具备保持和调温的缓冲设备，则必然可显著地改善炼钢设备和连铸机的配合。至今相当数量的炉外精炼方法可以起到这种缓冲的作用。

炉外精炼这种新技术还必须具备充分的经济合理性。由于炉外精炼技术是数十种具体方法的统称，而各种具体方法的特点各不相同，所表现的经济效果的侧重面也不完全一样，所以该项技术的经济合理性也只能从几个大方面来讨论。

（1）提高初炼炉的生产率。与炉外精炼相配合的初炼炉可以是电弧炉、转炉或平炉。以电弧炉为初炼炉时，提高生产率的效果最显著，故以此为例。当电炉与某一种炉外精炼

装置相配合时，一部分精炼任务由电炉中移到炉外进行，必然可以缩短在电炉中的冶炼时间，从而提高电炉的生产率。一般可以提高电炉生产率25%左右。若与超高功率电炉相配合，则可提高超高功率电炉生产率50~100%（单渣法炼普钢时取上限）。就超高功率电炉本身而言，也只有与炉外精炼相配合，才能在生产特殊钢的同时，充分发挥电炉变压器的时间利用率和功率利用率。可以说这两项新技术是互相依存的。因此有人断言，电弧炉今后将作为一种高效率的废钢熔化器而存在，至于钢液精炼的任务则由炉外精炼来承担。

(2) 缩短生产周期。一些大断面的重型锻件，常常因白点而报废。据研究，当钢中的氢低于2.5~3ppm时，可以避免白点的形成。单靠电炉冶炼要达到这样低的含氢量是极其困难的。在过去只能采用钢锭缓冷和高温扩散退火的办法以防止白点的生成。这样除了必须增添设备和增加操作费用外，还成倍地延长产品的生产周期。当采用钢流真空处理后，可在数分钟之内将钢中含氢量降到3ppm以下。若采用真空浇注，其脱气的优越性就更为明显，一切生产过程都和常规方法一样，只是浇注时钢流通过真空而进入钢锭模。这样就不用担心真空脱气时钢液的降温问题、脱气后在大气中浇注时的二次氧化和再次吸气的问题，以及钢液被浇注系统耐火材料玷污的问题等。生产实践证明，采用真空浇注后，大型锻件用钢不再出现因气体而导致的废品。

(3) 降低产品成本。提高生产率、改善产品的内在质量、缩短生产周期都可以使产品成本降低。此外，由于选用了某种炉外精炼方法，允许在初炼炉中使用一些质量较差，或价格便宜的原材料。这样，在降低产品成本方面的意义就更为显著。这种情况的典型例子是选用VOD或AOD生产超低碳不锈钢。因为它允许初炼炉的炉料中配用高比例的同类钢种的返回钢或碳素铬铁，从而显著地降低原材料的费用。据我国几个厂的经验，当炉外精炼18-8型不锈钢时，成本可比电炉返回吹氧法降低约190元/t，对于精炼超低碳不锈钢则可降低成本500~1000元/t。

(4) 产品质量的提高。每一种炉外精炼方法都可以在某一方面或某些方面提高产品的质量，从而使产品更为纯洁、性能更好和更加稳定。

1.2 炉外精炼方法的分类

各种炉外精炼方法都是在原有的设备和老的工艺不再能满足用户所提出的要求时出现的。所以现有的炉外精炼方法无论在设备结构、工艺安排和完成的精炼任务等方面都与发明厂的具体条件密切相关。因而，即使为了完成同一项精炼任务，也会出现从设备结构到精炼工艺都不尽相同的精炼方法。为了便于认识至今已出现的四十余种炉外精炼方法，可大致分类如下。

1.2.1 渣洗

最早出现的炉外精炼方法要算用合成渣来处理钢液，即所谓渣洗。作为提高转炉、平炉和电炉钢纯洁度的措施，早在1933年法国人就提出了派林(Perrin)法。之后被其他一些国家采用并得到一定的发展。渣洗除了可以快速脱硫以外，还能有效地脱氧和去除夹杂，从而减轻出钢过程中二次氧化的有害作用。仍在应用的渣洗工艺主要有1) 异炉渣洗；2) 同炉渣洗；3) 混合炼钢。

一些主要方法的示意情况见图1-1。各种方法所具备的精炼手段和主要冶金功能列于表1-1。其他诸如工艺过程、工艺参数、冶金效果等内容详见本书第三章。

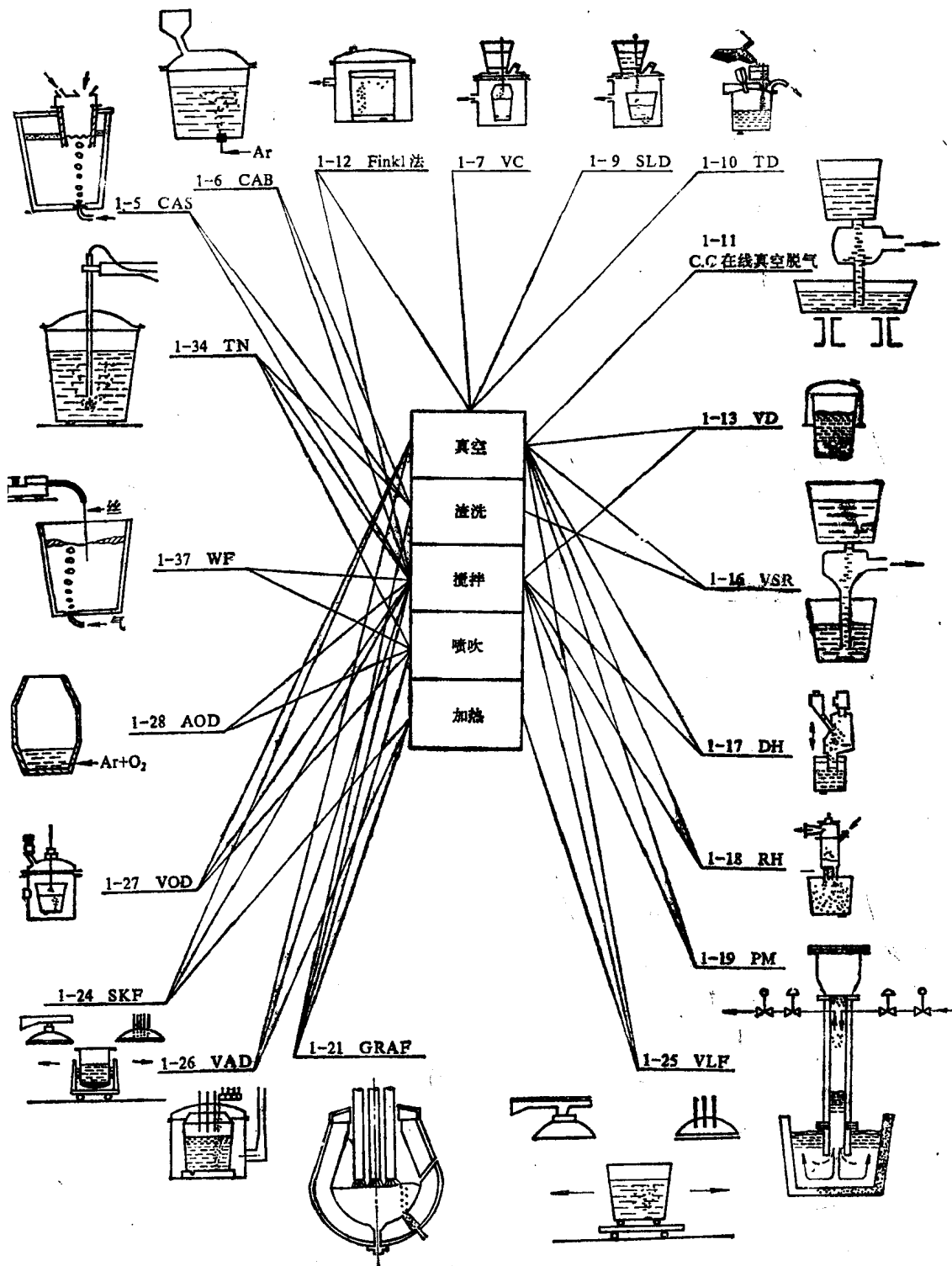


图 1-1 各种炉外精炼方法示意及所采用的精炼手段

表 1-1 各种炉外精炼方法的精炼手段和主要冶金功能

序号	名称	精炼手段					主要冶金功能							
		渣洗	真空	搅拌	喷吹	加热	脱气	脱氧	去除夹杂	控制夹杂物形态	脱硫	合金化	调温	脱碳
1	异炉渣洗	✓						✓	✓		✓			
2	同炉渣洗	✓						✓	✓		✓			
3	混合炼钢	✓						✓	✓		✓			
4	钢包吹氩			✓				✓	✓			✓		
5	SAB	+		✓				✓	✓		+	✓		
6	CAB	+		✓				✓	✓		+	✓		
7	VC		✓				✓							
8	真空室钢包脱气		✓				✓							
9	SLD		✓				✓							
10	TD		✓				✓							
11	连铸在线真空脱气		✓				✓							
12	Finkl法		✓	✓			✓		✓					
13	ISLD		✓	✓			✓		✓					
14	VSR	✓	✓				✓	✓			✓			
15	DH		✓				✓							
16	RH		✓				✓							
17	PM		✓	✓			✓		✓					
18	LF	+	*	✓		✓	*	✓	✓		+	✓	✓	
19	GRAF	+		✓	✓	✓	✓	✓	✓		+	✓	✓	
20	ASEA—SKF	+	✓	✓	+	✓	✓	✓	✓		+	✓	✓	+
21	VAD	+	✓	✓	+	✓	✓	✓	✓		+	✓	✓	+
22	CAS—OB			✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	
23	铝氧加热法				✓	✓							✓	
24	VOD		✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓
25	SS—VOD		✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓
26	RH—OB		✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓
27	AOD				✓	✓	✓							✓
28	DLU				✓	✓								✓
29	IRSID法				✓	✓			✓	✓				✓
30	TN法				✓	✓		✓		✓				✓
31	SL法				✓	✓		✓		✓	✓			✓
32	ABS				✓	✓		✓						✓
33	WF				✓	✓		✓		✓				✓

注：符号+表示可以添加的手段及能取得的冶金功能。

* LF增设真空手段后被称为LFV，它具备与SKF相同的精炼手段和冶金功能。

1.2.2 吹氩

渣洗过程中，熔渣被钢流冲击而乳化。为了提高渣洗的效果，希望乳化渣滴的半径尽可能小，以提高渣钢接触界面面积。但是完成了渣洗的精炼任务之后，又希望乳化的渣滴能尽快地全部从钢液中上浮排出。然而渣滴在钢液中的上浮速度是与渣滴半径的平方成正比的。在这种矛盾下，现场常采用延长镇静时间来解决。要延长镇静时间可提高出钢温度，这从钢质量、能源的利用、炉体寿命等方面来考虑，都是不可取的。为此，有些厂提出通过钢包底部专门安装的透气砖吹入氩气，依靠在钢液中上浮的氩气泡粘附乳化的渣滴，以

及上浮气泡所引起的钢液的搅动，促进渣滴的碰撞合并而加速上浮。这样就出现了一些吹氩搅拌的精炼方法。对于采用固体合成渣的一些方法，底吹氩搅拌而造成的钢包内钢液的运动，也将显著地加速渣钢间的传质过程。属于这类的精炼方法有：

(1) 钢包吹氩。

(2) SAB法 (Scald Argon Bubbling)，又称CAS法 (Composition Adjustment-by Scalded Argon Bubbling)。

(3) CAB法 (Capped Argon Bubbling)。

钢包吹氩时若吹氩量不大时，钢液的脱气效果不会明显。上述三种方法，氩用量都较小。例如CAB法的吹氩强度仅为 $0.5\sim 2l/\text{min}\cdot t$ 。据资料介绍，要取得较好的脱气效果，吹氩强度应不小于 $109\sim 218l/\text{min}\cdot t$ 。按现代的技术水平，最有效的钢液脱气工艺是真空脱气。

1.2.3 真空脱气

为了减少钢中的有害气体，特别是氢气，早在1860年英国的贝塞麦就提出过真空处理钢液的设想。之后还有人陆续提出各种钢液真空脱气的方案。但是由于当时机械工业和真空技术的发展水平，钢液的真空脱气还不可能应用于生产。直到第二次世界大战后，真空技术的发展和大型真空泵的研制成功，才为钢液真空处理的工业应用创造了条件。属于真空脱气的方法有：

(1) 真空浇注，又称VC法 (Vacuum Casting)。

(2) 真空室钢包脱气法。

(3) 倒包法，又称SLD法 (Shift Ladle Degassing)。

(4) 出钢过程中的真空脱气，简称TD法 (Tap Degassing)。

(5) 连铸在线真空脱气法。

(6) 芬克尔 (Finkl) 法，在我国通常称为VD法 (Vacuum Degassing)。

(7) ISLD法 (Induction Stirring Ladle Degassing)。

(8) VSR法 (Vacuum Slag Refining)。

1.2.4 大吨位钢液的真空脱气

只要求脱气处理的钢种多半在转炉或平炉中冶炼。这类炼钢炉通常吨位较大。若对于大量钢液仍采用上述的真空脱气方法，除必须成比例地增大抽气系统的抽气能力之外，还可能会在钢液的搅拌、脱气效率、设备基建投资、运行费用等方面出现困难。特别是在当时(五十年代)要制造抽气能力很大的真空泵也是相当困难的。为此出现了分批处理的设想，以及相应的真空脱气方法。属于这类的有：

(1) DH法。由原西德的多特蒙特 (Dortmund) 和豪特尔 (Hörder) 两公司联合研制，故有此名。在我国又称提升脱气法或虹吸法。

(2) RH法。由原西德鲁尔钢铁公司 (Ruhrstahl) 和海拉斯公司 (Heraeus) 联合研制。我国又称真空循环脱气法。

(3) PM法 (Pulsating Mixing Process)。

1.2.5 带有加热装置的炉外精炼方法

已讨论过的各种精炼方法，除DH和RH可安装附加热源之外，其他方法都不附设热源。精炼过程中钢液降温的问题，一般采用钢包预热、减少出钢过程的降温和提高出钢

温度等办法来解决。但是提高出钢温度必将增加初炼炉的负担和增加耐火材料的消耗。同时,在精炼时间、精炼项目、以及精炼效果方面,仍将受到限制。为此出现了一批带加热装置的炉外精炼方法。当前应用比较普遍的是三相交流电弧加热,下面第1至第4种方法就是采用电弧加热。近年来化学热法也得到较快的发展。属于这类带有加热装置的炉外精炼方法有:

- (1) LF(Ladel Furnace),如带有真空手段则称为 LFV。
- (2) GRAF(Gas Refining Arc Furnace)。
- (3) ASEA-SKF。瑞典两家研制公司名的缩写。
- (4) VAD(Vacuum Arc Degassing)。
- (5) CAS-OB(Composition Adjustment by Scalded Argon Bubbling-Oxygen Blowing)。

(6) 铝氧加热法。

1.2.6 低碳钢液的精炼方法

具备搅拌、真空、加热三种精炼手段的各种炉外精炼装置,精炼功能就比较齐全,它可以完成除熔化废钢以外的绝大部分精炼任务。但是还有一类低碳钢种,特别是低碳的高铬钢或铬镍钢,以上所列的各种精炼方法都不太适用。

低碳高铬钢液的精炼,主要矛盾是降碳保铬。在常规电弧炉中冶炼这类钢时,常采用返回吹氧法,以提高冶炼温度从而保证碳优先于铬氧化。过高的冶炼温度使炉衬的工作条件急剧恶化,为限制过高的冶炼温度,只有降低炉料中的配铬量,即增大脱碳后微碳铬铁或金属铬的用量,这样就提高了成品钢的成本。同时铬的总回收率也无法提高。为了更经济合理地解决降碳保铬问题,只有采用降低一氧化碳分压力的办法。在此认识的基础上,出现了一些不锈钢的专用炉外精炼方法。这些方法发展很快,不到十年就基本上取代了质低价高的电弧炉吹氧冶炼不锈钢的方法。例如,1976年日本的不锈钢将近有四分之三是由炉外精炼方法生产的。1977年美国的所有不锈钢都有炉外精炼法生产。有资料介绍单用AOD法生产的不锈钢就占资本主义国家不锈钢总产量的75%。属于这一类的方法有:

- (1) VOD(Vacuum Oxygen Decarburization)。
- (2) SS-VOD(Strong Stirring Vacuum Oxygen Decarburization)。
- (3) RH-OB(RH-Oxygen Blowing)。
- (4) AOD(Argon Oxygen Decarburization)。
- (5) CLU法国的克勒索-卢瓦尔(Creusot-Loire)公司与瑞典的乌德霍尔姆(Uddeholms)公司联合研制。

1.2.7 固体料的添加方法

为了完成某种冶金任务,往往需要加入一些固态反应剂。要求所加入的反应剂的利用率尽可能高。因而在反应剂加入时,总是设法使反应剂直接加入反应区,并与反应物有尽可能大的接触界面,同时尽量减少反应剂在参与反应前的损失。为达上述要求,在生产条件下对反应剂的加入方法作了一系列的改进,提出了一些行之有效的措施。这些措施基本上可分为二种类型。一种是将块状的反应剂变成粉剂,用气体载流喷入液态熔池中;另一种是将具有较大反应界面的反应剂用机械的方法,使其迅速地穿过渣层而进入液态熔池中。固体料的这些加入方法,单独地或与其他精炼手段组合成一系列新的炉外精炼方法。属于

这类的有：

- (1) IRSID法国钢铁研究院研制的一种喷粉方法。
- (2) TN法。德国 Thyssen-Niederrhein 公司研制。
- (3) SL 法 (Scandinavian Lancers)。
- (4) ABS法 (Aluminum Ball Shoot)。
- (5) WF法 (Wire Feeding)。
- (6) 柱塞式料斗罩。

1.3 炉外精炼技术的特点及所采用的精炼手段

1.3.1 炉外精炼技术的特点

由以上讨论可见，炉外精炼技术是四十余种精炼技术的统称。随着科学技术的发展，还会出现一些新的精炼技术。这些已有的或即将出现的精炼技术，在冶金功能、设备结构、操作方法等方面都各不相同。这是因为发明这些技术的厂家都是根据自身的必要性和可能性而提出这些技术的。尽管如此，统称为炉外精炼技术的这一大批技术，都是各个发明厂家为了解决钢产品的质量、生产率、成本而提出的，是为了解决常规炼钢设备的某些不足和缺陷而提出的。这样，这些精炼技术必然具有某些共性，即具有相同的特点。炉外精炼技术至少具有以下三个特点。

(1) 二次精炼。整个炼钢过程，除将原材料熔化成液态外，要求在不同程度上完成脱碳、脱磷、脱氧、脱硫、去除气体、去除夹杂、调整温度和调整成分等冶金任务。而每一项冶金任务的顺利完成，都要求具备相应的条件。不同的冶金任务所要求的最佳条件不完全相同，有时甚至是互相矛盾的。对于某一种特定的冶金设备不可能创造出完成各项冶金任务所要求的最佳条件。许多冶金工作者在实践中发现，要求单一的冶金设备完成多项冶金任务是不合理的，也是不经济的。所以就出现了一种新的趋势，即把各项冶金任务分散到一些专门的精炼设备中去完成。也就是将整个炼钢过程分步进行。保留常规炼钢设备的某些优势，如超高功率电弧炉熔化废钢的优势，氧气转炉脱碳的优势，平炉、电弧炉、氧气转炉脱磷的优势等。这样，在这些炼钢炉中进行初炼，然后出钢，在炉外完成其他冶炼任务，称为二次精炼。这样分步进行，会创造最佳冶金条件，提高效率。

(2) 创造较好的冶金反应的动力学条件。炼钢过程中的各种冶金反应，多数是在高温下进行的多相反应。通常化学反应本身进行得较快，而向反应区传递物质（反应物的进入，反应产物的离开）的速率往往是缓慢的。因此，在多数情况下，冶金反应速率受物质的传递速率所限制，往往由传质环节的速率就可确定冶金反应的速率。根据菲克定律，物质的传递速率与传质系数、传递物质的浓度梯度、扩散流的截面积成正比。对于在相界面进行的多相反应，扩散流的截面积可认为等于相界面的大小。对于常规的炼钢炉，在氧化性条件下进行脱碳时，由于一氧化碳排出而引起的熔池搅动，可使反应物和反应产物有较大的传递速率。但是，多数的炼钢反应要求在低氧势的条件下进行。最典型的例子是电弧炉冶炼的还原期。由于电弧炉的供热的特点，在传统的电弧炉冶炼工艺中，可以安排有专门的还原期，为某些炼钢反应创造较为良好的热力学条件。但是由于熔池平静、反应界面积极小，使一些冶金反应的速率相当缓慢，电弧炉冶炼还原期的优越性，不能充分发挥。为解决这个问题，新创造的各种炉外精炼技术，从各个不同的方面来改善冶金反应的动力

学条件。例如，应用真空或吹氩以提高气体在气相与钢液之间的浓度梯度；应用喷粉以增加反应界面；应用各种方式的搅拌以增大传质系数和扩大反应界面。由于各种炉外精炼技术都是从不同的角度，以不同的方式，创造尽可能好的动力学条件，从而解决了传统炼钢设备优越性不能充分发挥的问题。

(3) 二次精炼的容器具有浇注的功能。钢液在出钢过程中，由于高温钢液与空气接触的表面积急剧增大，使钢液遭受大气的污染。吸气、二次氧化以及钢中易氧化元素（例如硅和铝）的二次脱氧，均使钢的纯洁度下降。并且，这种被污染的趋势和程度却与钢液被精炼的程度有关，脱氧愈完全、气体含量愈低的钢，二次氧化和吸气就愈严重。为了解决这个问题，绝大多数用于二次精炼的容器，除可以盛放和传送钢液外，还具有浇注的功能。滑动水口的成功使用，在技术上解决了精炼时间与塞棒寿命的矛盾，使精炼容器具备浇注功能而不再存在结构上和工艺上的困难。由于经二次精炼后的钢液，可以不经出钢直接送浇注工段浇注，从而避免了已精炼好的钢液在出钢过程中的再污染，从而解决了传统的电弧炉炼钢工艺在安排上的不合理和矛盾的问题。

1.3.2 炉外精炼技术所采用的精炼手段

各种炉外精炼技术的出现都是为了解决发明厂家所要求解决的具体问题，同时又密切结合着该厂的厂房、设备、工艺等具体条件。所以现有的四十余种炉外精炼方法各不相同。但是不论哪个厂家，发明哪一种炉外精炼方法，都力争创造完成某种精炼任务的最好热力学和动力学条件，使得现有的各种各样炉外精炼方法，在采用的精炼手段方面，有它们的共同之处。为了创造最佳的冶金反应条件，到目前为止，所采用的基本手段不外乎渣洗、真空、搅拌、加热、喷吹等五种。当前名目繁多的炉外精炼方法也都是上述五种基本手段的不同组合。

(1) 对精炼手段的要求。作为一种精炼方法的精炼手段，必须具备一些条件，只有基本满足这些条件后，才能被认为是一种手段，在不同的精炼方法中被引用。这些条件至少应包含以下诸点：

1) 独立性：精炼手段必须是一种独立的手段，它不能依附于其他冶金过程，而成为伴随其他冶金过程而出现的一种现象。例如，出钢过程中，由于钢流的冲击，会导致钢包内钢液的搅拌。但是不能认为出钢是一种搅拌手段，因为这种搅拌是伴随出钢而出现的，一旦出钢过程完成，这种搅拌很快就停止。不可能按照搅拌的要求来改变出钢过程，所以出钢时造成的搅拌是从属的、非独立的。又如VOD、AOD在精炼低碳钢种时，钢中碳的氧化放热可使钢液温度升高，但是这种加热是伴随脱碳过程而出现的，它从属于吹氧氧化这个冶金过程。同样也不能根据钢液升温的要求来规定脱碳过程。所以化学热法虽是加热手段中的一种方法，但是在VOD、AOD精炼低碳钢的过程中，这种化学热的释放，不能认为是一种加热的手段。只有为了加热钢液的目的，有意识的添加一些易氧化的元素，然后吹氧氧化，这才是独立的加热手段，如VOD、AOD在精炼非低碳钢种时所采用的化学热法，再如AOH法和CAS-OB法。

2) 作用时间可以控制：作为一种手段其作用时间必须可以根据该手段的目的而控制。例如在许多精炼方法中都应用了真空手段，运用真空主要是为了脱气、脱氧或吹氧脱碳。则作为手段就应该能满足根据脱气等精炼过程所要求的真空的建立和真空维持的时间。又如搅拌，如要求整个精炼过程中自始至终地一直搅拌钢液，则作为搅拌手段就应该

保证满足这点。电磁搅拌和吹氩搅拌所以被认为是搅拌手段的原因之一，就是它们的作用时间可以人为地控制。

3) 作用能力可以控制。精炼手段的能力或强度，如真空的真空度，搅拌的搅拌强度，加热的升温速率等，必须是按照精炼的要求进行控制和调节的。例如，真空吹氧脱碳时，为了防止钢中其它元素的氧化和碳氧反应过分剧烈而引起的喷溅，要求在吹氧过程中随着碳含量的降低，逐渐提高真空度。在VOD精炼中，就可以逐级启动蒸汽喷射泵，以控制和调节真空度在冶炼要求的范围内。

4) 精炼手段的作用能力再现性要强，也就是影响精炼手段的能力的因素不宜太多，这样才能保证能力的再现性。例如出钢过程所造成的搅拌，影响其搅拌强度的因素较复杂，且不能有效地控制，所以再现性较差。而吹氩搅拌或电磁搅拌的搅拌强度影响因素就比较单一，分别控制吹氩量或工作电流，就能对应地调节搅拌强度，且有较强的再现性。

5) 便于与其他精炼手段组合，一种精炼手段的装备和工艺过程，应该尽可能地不阻碍其他精炼手段的功能的发挥，这样才能为几种手段组合使用创造条件。例如，燃料燃烧可以加热钢液，但是一般不用它作为加热手段，特别是同时应用真空手段时，因为燃烧产生的大量烟气，将会妨碍真空的冶金功能的发挥。

6) 操作方便、设备简单、基建投资和运行费用低。

(2) 精炼手段的种类。

1) 渣洗：渣洗是获得洁净钢并能适当进行脱硫和脱氧的最简便的精炼手段。早在本世纪的三十年代，就有人提出用熔渣来精炼金属，并且付诸实践，取得一定的效果。四十年代在某些国家得到广泛应用的混合炼钢，也包含了用熔渣精炼钢液。六十年代使用的轴承钢的氧化性渣洗工艺，一些合金结构钢和不锈钢的异炉渣洗工艺，都是利用合成渣（在专门的炼渣炉中熔炼），借出钢时钢流的冲击作用，使钢液与合成渣充分混合，从而完成脱硫、脱氧、去除夹杂等精炼任务。在电弧炉冶炼中，还有在出钢前控制调整还原渣的成分、流动性和温度，出钢时钢渣混出，借此使钢液与还原渣充分混合，以进一步利用还原渣的精炼作用（称同炉渣洗）。这种工艺也是利用了渣洗原理。近年来发展起来的炉外精炼方法中，仍有选用渣洗的。例如LF法，在钢包中加入固体的合成渣料，并用电弧加热，吹氩搅拌以促进合成渣对钢液的精炼。又如VSR法，钢流经真空脱气后，再通过一液态的合成渣渣层，以完成合成渣对钢液的精炼。

渣洗工艺有一定的脱硫和脱氧的效果，但是不能去除钢液中的气体，而且当造渣材料不干燥的情况下，还有可能使钢液增氢。另外，为了提高精炼效果，应尽可能地扩大渣钢接触界面，也就是尽可能提高合成渣乳化的程度。但是精炼反应完成后，又要求乳化了合成渣渣滴尽可能充分地排出。根据斯托克斯上浮公式，颗粒愈小在平静的液体中上浮速度也就愈小。这样要使极细的渣滴上浮，需要足够长的镇静时间，然而随着镇静时间的延长，钢液温度下降，粘度增加，更不利于渣滴的上浮，所以往往有极细的渣粒残存于钢中，成为大颗粒非金属夹杂。为使镇静时间延长，但又未采用加热手段，只有提高出钢温度，特别是应用固体合成渣时，较高的出钢温度就显得更为重要。如前所述，过高的出钢温度，对钢质量、原材料消耗、能源的利用都是不利的。初炼炉的炉渣，特别是氧化性的初炼炉炉渣，对合成渣的精炼作用是极其有害的。所以在渣洗前，将钢液与初炼炉渣分离，就成为决定渣洗效果的重要工序。各种各样的挡渣出钢技术和钢包炉中除渣的方