

008 H  
— 11

# 大型铸锻件文集

## 第十一集

第一机械工业部技术情报所  
上海重型机械厂技术情报组 合編

1975.8 上 海

## 毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

西方资产阶级有的，东方无产阶级要有，西方资产阶级没有的，东方无产阶级也要有。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

熟悉敌我双方各方面的情况，找出其行动规律，并且应用这些规律于自己的行动。

一切国家的好经验我们都要学，不管是社会主义国家的，还是资本主义国家的，这一点是肯定的。

## 前 言

“知己知彼，百战不殆”。我们遵循伟大领袖毛主席的这一教导，本文集中集中收集了有关真空流铸大钢锭方面的文章，择要披露，以能通过共同分析，取其精华，去其糟粕，供实际工作参攷。

目前大钢锭生产中，看来夹杂物是一个较为突出的问题，本集中对此有所侧重。结合第7集中“锻造钢锭中夹杂物的来源”一文，可从中了解这一问题的趋向。

限于水平，恳请批评指正工作中的缺点和错误。

编者

一九七五年六月

## 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| ✓1、国外真空浇铸大钢锭中某些问题的处理 ..... | 1  |
| ✓2、大型锻造钢锭的真空浇注 .....       | 23 |
| ✓3、钢液流除气中的物理因素 .....       | 59 |
| 4、大型钢锭底部出现的异常组织 .....      | 72 |

# 国外真空浇铸大钢锭中某些问题的处理

(综述)

真空浇铸是在大钢锭、大锻件飞跃发展的基础上提出来的，50年代美国电站转子重大事故的研究分析，促进了这一工艺的广泛建立与迅速发展。从1959年起，几乎所有生产大锻件的国家，都用真空浇铸作为取得优质大钢锭的手段。真空浇铸在这一段较长时间的运用过程中，无论是设备、工艺、操作各方面都暴露了一些问题，通过实践也解决了一些问题。国外对这些问题的处理可供国内实际生产参考。

## 真 空 度

真空度是决定除氢率的最为重要的因素。但以什么样的真空度较为适至今仍众说纷纷，分歧至甚。

为取得最大的除氢率，钢渣内的残余氢应尽量压低。由于真空浇铸时钢渣粉碎为无数渣滴，反应表面积极大，接近于平衡状态，所以A. Tix相图上残余氢量很接近于A. Sivert氢在钢渣中溶解度的平衡曲线（图1）。曲线说明，真空度低于5 mm时，含氢量不大于2.5厘米<sup>3</sup>/100克，

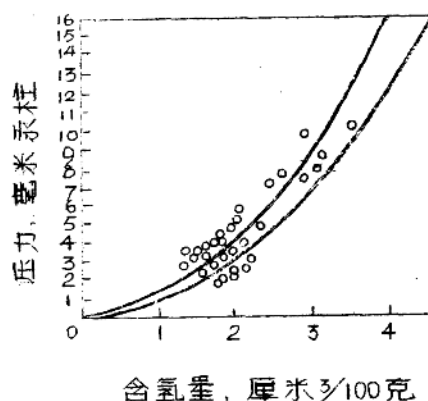


图1 真空室内含氢量的平衡曲线

而意大利的V. 斯盖来斯认为 2.5 厘米<sup>3</sup>/100克的含氢量对多数合金钢已足够安全。日本关东特钢厂朝熊利彦则放得宽些，认为要防止白点，含氢量必须降至 2.5 pp<sub>m</sub> (2.8 厘米<sup>3</sup>/100克) 以下，亦即真空度应低于 10 托。因此，根据 Siver 曲线分析，真空浇铸时真空度一般 1—10 托已经足够。实际上国外各厂所用的真空度，都倾向高于上述理论值。特别在真空浇铸初期，为追求达到平衡状态，最大限度地除氢，一般均选用较高的真空度 (表 1)。

表 1

| 国别  | 厂名                     | 真空度, 托    |             | 除氢率<br>% | 锭重<br>吨 |
|-----|------------------------|-----------|-------------|----------|---------|
|     |                        | 原始        | 操作          |          |         |
| 西 德 | 鲍霍姆厂 (Bochumer Verein) | 0.1—1     | 1—10        | > 50     | 150     |
| 美 国 | 伯利恒厂 (Bethlehem)       | —         | 0.06—1      | 60—70    | 250     |
|     | 合金钢铁公司 Duquesne 厂      | 0.2       | 0.6—0.5     | —        | 240     |
| 日 本 | 关东特殊钢厂                 | 0.09—1    | 4—8         | 50—60    | 15—20   |
|     | 川崎制铁公司兵库工厂             | 0.03—0.05 | 2—3         | 65       | 50      |
|     | 神户钢铁公司                 | —         | 5—10        | 50       | 120     |
| 苏 联 | 乌拉尔重型机器厂               | —         | 5—10<br>3—8 | 40—50    | 32.5    |
|     | 列宁工厂                   | —         | 8—46        | 50—75    | 460 新   |
| 捷 克 | 斯可达厂                   | 0.03      | 6           | —        | 130     |
| 意大利 | 台尔尼厂                   | 0.03      | 1.5         | 40—75    | 170     |
| 比利时 | Cockeril — Ougrie 厂    | —         | 5           | 60—70    | 100     |

注：资料来源众多，数据难以统一完整，但均经核实无误。

各国真空度相差很大，除氢率却大致相同，究其根源，真空度分歧的原因在于：

- 1、耐火材料中的水份及其他气体使总排气量发生变化；
- 2、浇铸速度不同，致使单位时间内的排气量不同；
- 3、钢液的原始含氢量及所要求的最终含氢量不尽相同；
- 4、排气装置各异。

总之，由于处理的钢液量、除气程度、泵的类型及容量等实际条件的不同，各国所用的真空度自然也就不同。例如捷克斯柯达厂早期真空系统为两级转子油泵，并联后排气量为 $8000\text{米}^3/\text{时}$ ，设备能力所能维持的真空度仅 $6\text{托}$ ，客观条件局限于这一水平；意大利台尔尼厂控制原始氢量及降低浇铸速度来补偿排气泵能力之不足，仅能维持 $1.5\text{托}$ 的真空度；美国所用的蒸汽喷射泵即能保证操作压力在 $0.5-0.6\text{托}$ 。但共同的一点是：都采用设备所能达到的最高真空度。

采用最高真空度的目的是促使钢液在真空下激烈爆炸粉碎成细小的液滴，以有利于除气。但对控制液滴成流，控制钢锭表面质量带来矛盾。英国钢铁公司 J.C.C. Leach 更认为过份细小的液滴，也即较高的真空度，是钢锭底部形成大型夹杂物的原因之一——液滴在锭模壁上的激冷及其在下降途中的热辐射损失促使钢锭底部形成大型夹杂物。

Leach 等认为真空浇铸的真空度不宜过高，特别在浇至锭身以前，应为 $10\text{托}$ ，一待浇至锭身时立即升高到 $2-7\text{托}$ ，直至浇铸结束。意大利台尔尼厂于应用真空浇铸初期，浇铸 Senn 原子能电站 20 万千瓦发电机转子部件的 170 吨钢锭时，也采取过类似上述的措施。K. Ruttiger 总结此种调节真空度来控制钢锭底部夹杂及成型的方法为典型的真空浇铸过程（图 2 表 2），虽然西德专利评述此种调节真空度的方法来控制液流飞溅是不利于产品质量的。

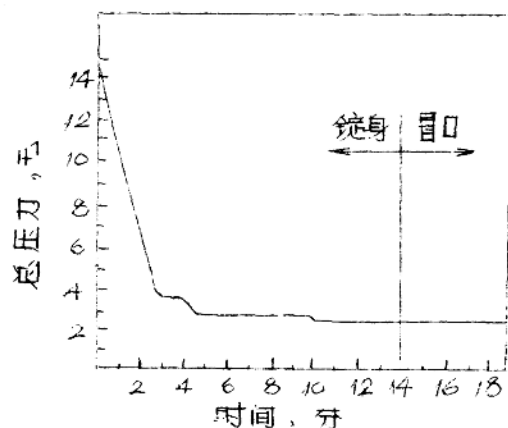


图2、真空浇铸100吨钢锭过程中的压力变化

表2

| 国 别 | 厂 名        | 真空度, 吨 |      | 注          |
|-----|------------|--------|------|------------|
|     |            | 浇铸前期   | 浇铸后期 |            |
| 英 国 | 英国钢铁公司     | 10     | 2-7  | 前后期以浇至浇身划分 |
| 意大利 | 台尔尼厂       | 6-8    | 1.5  | 前期压力为氮气压力  |
| 西 德 | Hoesch 冶金厂 | 14     | 3    | 前期指最初2分钟   |

真空度究竟宜高还是宜低，经多年实践使用，已可由逐渐深入至除氢机理的研究来判定这一问题。

日本钢铁厂室兰工厂曾用10支90吨重的钢锭棒来除氢的机理。试验的条件为：

|       |              |
|-------|--------------|
| 真空室压力 | 8—12 吨       |
| 浇铸温度  | 1580—1590 °C |
| 浇铸速度  | 6—7 吨/分      |
| 水口直径  | 50 毫米        |
| 下落距离  | 1.5—6.5 米    |

下落时间 0.4 秒

试验测定除氢过程分为 3 个阶段：

#### 1、形成气泡碎成渣滴

钢渣进入真空室时由于溶解于钢渣中的气体膨胀，立即形成气泡并爆炸成小渣滴从而释放出大量气体。气泡形成、生长的条件是：

$$P_s = (P_{H_2} + P_{N_2} + P_{CO}) > (P_t + P_f + \frac{2\sigma}{r})$$

式中： $P_s$ ——总平衡压力

$P_{H_2}$ 、 $P_{N_2}$ 、 $P_{CO}$ ——各平衡分压力

$P_t$ ——容器压力

$P_f$ ——钢渣压头压力

$\sigma$ ——钢渣表面张力

$r$ ——气泡半径

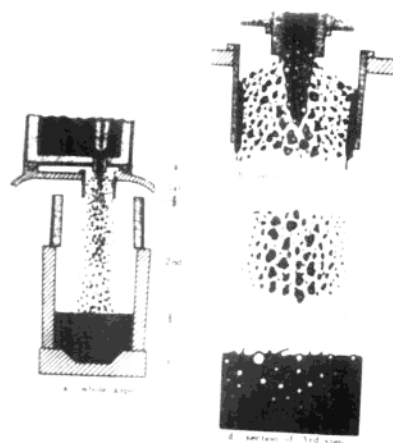


FIGURE 1 Schematic aspect of vacuum pouring.

图3、真空浇铸时除气的三个阶段

氢、氮的平衡压力，在一定的钢渣温度下可按其含量估算得出，但 $p_{CO}$ 则视钢渣中的自由氧、氧化夹杂物及水口耐火材料（如氧化物夹杂中含有 $SiO_2$ 时将影响 $p_{CO}$ 值）等因素而异。因此，气泡的形成取决于自由氧、氧化物夹杂和水口耐火材料。而气泡的成长则决定于氢、氮、氧原子由钢渣向气泡表面扩散的原子数，其中氢原子的扩散速度比氮、氧原子大两个数量级，所以除氢效果特别显著。如果气泡表面有氧化物夹杂，由于向钢渣内输送了氧，于是所形成的氧化铁也将相当可观。

因之，第1阶段内除氢率将取决于自由氧及 $SiO_2$ 等之氧化物。

## 2. 渣滴下落

渣滴在下落过程中还会形成气泡，因此在渣滴下落过程中仍在继续除气。

大部分渣滴的半径大于1厘米（8-12兆压力下），而且往往并未碎成小渣滴，虽然比在渣流中形成气泡较为困难，但由于大多数渣滴尺寸较大，表面张力造成的压力还是较小，因之仍有可能形成，但形成后并不常常破裂。

由于这阶段的过程较短，仅0.4秒，根据计算除氢率<15%，比第1阶段少。

## 3. 熔池表面除气

气泡先随渣滴进入熔池深处，由于锭模中静压头很低，有利于气泡形成与长大，因此易于成长上浮。此阶段中通过气泡上升，钢渣被剧烈搅动，气泡形成与长大积极活跃，而且又有足够的时间进行这一过程。

由此可见，三个阶段中以第1、3阶段除氢最多，要提高除氢率，显然，用较高的真空度是有利的。日本钢铁厂曾

用1-3毛的压力进一步试验，结果得出：

1、高真空度下，形成的气泡尺寸也较大，但最小半径与8-12毛时相同，这是由于气泡的表面张力减小，金属-气相接触面变大，促使易于形成气泡；

2、总平衡压低于0.01大气压时，气泡在1毛下较10毛下更易形成，也即高真空度下更易于除去氢气，所得残余含氢量显著降低（表3）。

表3

| 真 空 度, 毛 |      | 气 体 含 量, ppm   |                |                |
|----------|------|----------------|----------------|----------------|
|          |      | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> |
| 除 气 前    |      | 3.49           | 70.5           | 61.7           |
| 除气后      | 8-12 | 1.72           | 60.6           | 35.9           |
|          | 1-3  | 0.9-1.3        | —              | —              |

所以日本钢铁厂的结论是：要提高除氢率，宜采用较高的真空度。英国联合钢铁公司所属Peech & Tozer钢厂也曾通过大量炉次，试验分析气泡尺寸对除氢的作用，并研究影响气泡大小的因素及控制气泡大小的方法。该厂认为气泡尺寸决定着气泡粉碎后所形成渣滴的直径，也即气泡尺寸直接关系列残余含氢量，所得结果绘于图4。图中着重说明两点：

1、只要渣滴直径小于1毫米，即便在相当高的压力下，也比超低压（例如0.1毛）下及大颗粒渣滴的含氢量低；

2、如果渣滴尺寸小于0.5毫米，尽管操作压力范围较广（例如0.1-5毛），都可获得<1厘米<sup>3</sup>/100克的残余含氢量。

后者的说法也许就是前述分成一不同操作压力下，即不同真空度下，除氢率都很高的原因，在细化渣滴上，措施不同。

所以问题的关键似乎是如何取得细小的渣滴，也即如何控制气泡的尺寸。Peech & Tozer 钢厂认为除氢率是渣滴

半径的函数，要细化液滴可通过改进水口型式，减低真空室压力及降低钢的表面张力等来控制。因此从气泡除氢的角度看来，撇开水口型式及钢液温度这两项因素暂且不谈，归根到底还在于真空度。

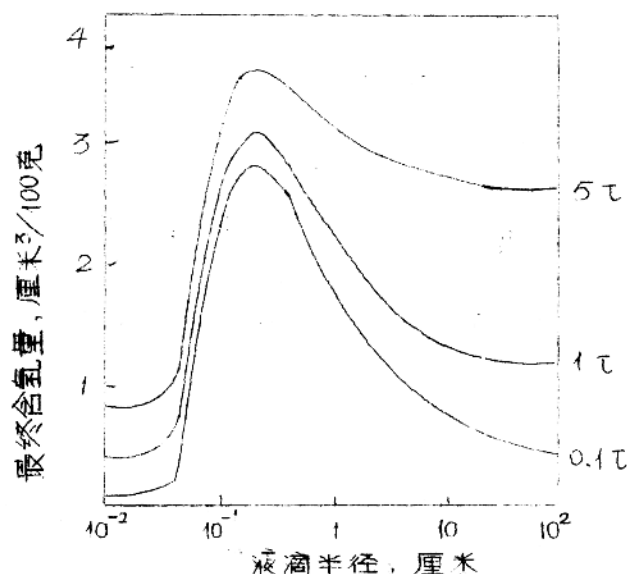


图4. 液流除气后的含氢量  
(原始含氢量为6厘米³/100克)

但是单是提高真空度，并不能进一步去除氢气。Peech & Tozer 钢厂经长期实践后指出，残余含氢量的降低，并不像 A. Sivert 定律那样简单，残余含氢量还与温度的4次方及真空中滞铸的时间有关：

$$H_2 = -K_1 - K_2 T + K_3 (p)^{\frac{1}{2}} + K_4 (A)^4$$

式中： $K_1, K_2, K_3, K_4$  均为常数

$T$  — 真空中滞铸的时间

$A$  — 绝对温度

可見除氫率还与流铸温度、流铸速度有关，这将于后文另行叙述。该厂认为 0.05 托真空度所得的含氢量与 0.5 托时的相同，均为  $0.8 \text{ 厘米}^3/100 \text{ 克}$ ，亦即越高真空下，仍然无济于残余含氢量的降低。並且认为要把含氢量减少到  $0.8 \text{ 厘米}^3/100 \text{ 克}$  以下是不可能的。而日本钢铁厂则抱有相反的观点，倾向于继续提高真空度。

综上所述，真空流铸中真空度的演变似乎经历了这样的过程。较高真空度（由于初期设备条件限制，该真空度相对讲还是低的），调节压低真空度以减缓钢锭底部的激冷，提高真空度以适应细化液滴的需要，但一般最高高至 0.5 托为止。从 73 年出国考察所得资料（表 4）来分析并与表 1、2 的数据作比较，再以近期报导神户钢厂真空度提高到 0.5 托及日本钢厂报导的操作真空度达 0.07—0.20 托相核实似乎是符合这一过程的。

表 4

| 国 别  | 厂 名         | 真空度<br>托      | 最大钢锭<br>吨 | 注   |
|------|-------------|---------------|-----------|-----|
| 意大利  | 台尔尼厂        | 0.5—0.6       | 220       |     |
| 奥地利  | 鲍勒钢铁公司      | 2—3<br>0.6—10 | 50        |     |
| 捷 克  | 斯可达厂        | < 1           | 130       |     |
| 罗马尼亚 | 布加勒斯特重机厂    | 0.5—1         | 134       |     |
| 西 德  | 梯森公司莱司霍尔茨钢厂 | 1—2           | 120       |     |
|      | 莱茵公司亨利希钢厂   | 0.5           | 300       | 热处理 |
| 日 本  | 日本钢铁厂室兰工厂   | 1—0.5         | 500       |     |
|      | 日立制作所胜田工厂   | 0.5           | 150       |     |

## 限 流 器

钢渣一进入真空室，就立即飞散成无数微细渣滴，以一定的扩展角度下落。渣滴的尺寸，以中心处的较大，直径为10毫米左右，周缘处的呈屑粒状，仅有数微米。表5列举其尺寸大致范围。扩散角的大小与钢渣内的气体量，水口形状，真空度和钢渣流动性有关。一般在10<sup>-3</sup>真空度下绝大部分以60-70°的顶角下落，但整个角度约有90°，某些厂家还大到130°。有人认为扩散角与真空度及除氢率之间有如图5的关系。细小的渣滴从一定角度向下散开后，飞溅的金属会落到锭模外面，或者堵塞冒口，造成外来夹杂；即或进入锭模内也可能因渣滴热容量小，会迅速凝固成壳，影响钢锭表面质量。解决飞溅利于除气与集中利于成形之间矛盾的最好办

表5

| 渣滴尺寸, 筛目 | 16 | 20  | 30   | 40   | 80   | 100 | 120-220 |
|----------|----|-----|------|------|------|-----|---------|
| 重量百分比    | 47 | 2.5 | 11.3 | 17.4 | 17.0 | 2.0 | 2.8     |

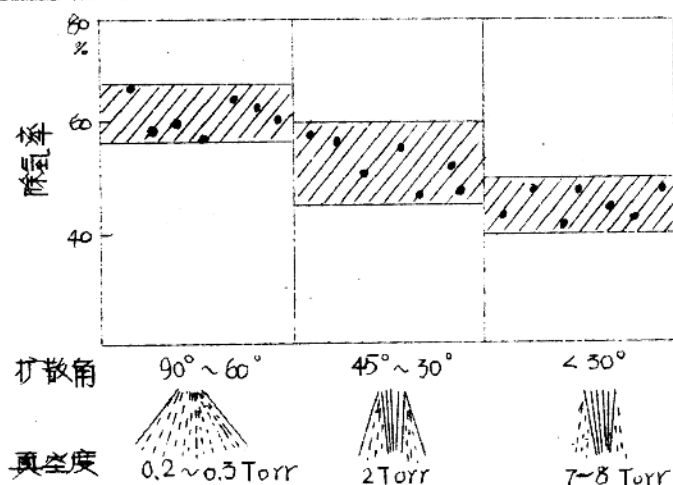


图5. 扩散角与真空度及除氢率之间的关系

法就是采用限流器，即抑制渣滴的飞散，然后予以收集、引导至锭模内。采用限流器后，金属渣流的扩散角得到了控制。据美国伯利恒厂及日本八幡钢铁厂报导，真空度为0.5-12毫米时，大致在 $90^\circ$ 左右，关东特钢厂在真空度2-5毫米下，总角度为 $90^\circ$ 。

限流器的结构形式很多，日、美、西德等国都曾以各种类型的限流器取得专利。各国所用的限流器及其改进提高过程大致如下。

限流器的基本形式为直筒形环圈结构，材质为石墨或耐火材料，尺寸由锭子大小、钢种及温度等决定。例如苏联某厂仅在真空室顶盖孔下挂一管子，直径280-300毫米，长300毫米。但据称浇铸小钢锭时仍不能完全避免飞溅至锭外。日本住友金属工业公司1971年的新案也使用直筒形环圈。

美国合众钢铁公司Duquesne钢厂的限流器呈截头圆锥形，上口8吋（200毫米），下口4吋（100毫米），材质为耐火材料，控制后渣流直径约为9吋（225毫米）左右，较为集中。

如图6所示的另一种截头圆锥式限流器係美国伯利恒厂的专利，耐熔环圈18直接安装在陶瓷水口及铝板7下，通过法兰20及21将18固定于真空室顶盖4及圆盘22上。这种连接方法可迅速地更换环圈18。环圈18的长度，孔口直径以及与冒口的距离，按钢锭大小及浇铸速度而变化。例如冒口为54吋（1350毫米）时，环圈长20吋（508毫米），下口直径11吋（280毫米）。浇铸过程中在环圈18孔口24的周围会逐渐形成凝固的锥形体，体积渐大，至垂垂。在浇铸过程中或浇铸结束后移动真空室顶盖时往往会下落至锭模内。图棒23即用来将此圆锥形堆积物拉住。根据经验，4支直径

4吋(101.6毫米)、长3吋(76.2毫米)的圆棒可以吊住直径21吋(530毫米)、重150磅(68公斤)的堆积物。当然,多增加些圆棒或改用金属细网眼及薄板结构等也未尝不可。

美国合众钢铁公司新泽西钢厂的限流器最初于1958.12.31取得美国专利,并先后于1960.4.18及1963.8.7于日本获得专利的内容看来,此种限流器经过改进,由一次除气改进为两次除气,据称可得表面成形美丽,含氢量在1.0 ppm 以下的钢锭。

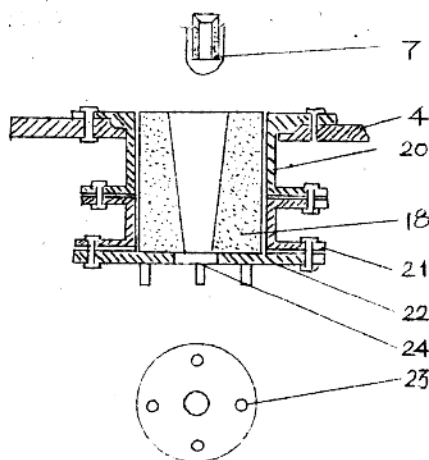


图6.美国伯利恒厂专利的限流器

原先专利单独使用图7a的限流器,结构上环

圈52用法兰50支持在真空室顶盖上,52的开口小于法兰的孔口。钢渣经环圈52抑制后再通过D58进行除气,因其与锭模很为靠近,已可完全防止飞溅。

改进后钢渣经前室(见图7,b)及后室分两阶段处理。所谓前室係指中间包与真空室顶之间的空间。这一空间在中间包安装就绪后,藉包底的凸缘与真空室顶上的法兰结构相密封,並以单独的真空泵17排气。如与真空室同用一套真空泵时则应使用适当的联接装置。前室的压力 $< 2.5$ 托。所谓后室,即为真空室,压力 $< 1.0$ 托。

处理过程如下。钢渣首先进入前室。爆炸飞溅后含氢量由9 ppm 降至2.5 ppm 左右,然后由限流器收集进入后室。渣流在后室内不再爆破,含氢量进一步降至1.5 ppm 以下,

然后注入锭模。处理时，孔口 58 为限制渣流不能太大，但这又限制了气体由此向下排除。因此就要求通过辅助泵 17 从附加装置处外排。这时可在真空室顶盖上增开附加孔口，且必须具备一定的截面。例如，浇铸速度为 8 吨/分，钢渣含氢量为 9 ppm 时，孔口截面积  $A \approx 516 \sim 645 \text{ 厘米}^2$ 。

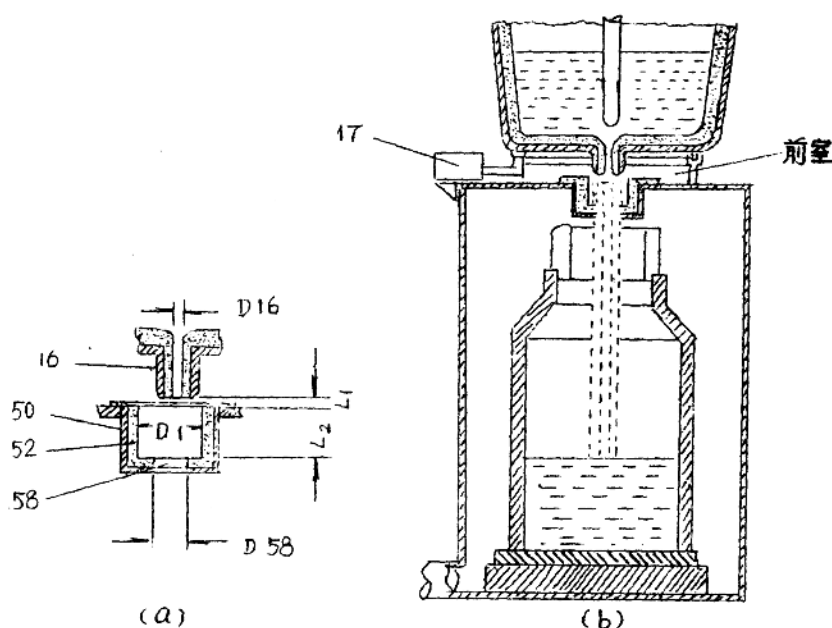


图7、美国新泽西钢厂的限流器

中间包水口及锭模顶部相对于限流器的位置非常重要，必须位于吸入全部渣流的位置。水口底面与限流器环圈端面的距离  $L_1$ ，为防止渣流爆炸后释放出来的气体泄漏， $L_1$  须小至 1 吋 (25.4 毫米)。但在两次除气时此  $L_1$  有时可适当增大，环圈内径  $D_1$  与  $L_1$  之比，不小于 4.7:1。

环圈装置的孔口  $D_{58}$  尺寸必须适当，应在下列范围之内：