

冶金反应动力理论学术讨论会

论文集

(上)

1982年4月12~16日

四川·重庆

中国金属学会冶金物化学术委员会

重庆大学印刷

20.
-A
1

400
26-A
1

前 言

冶金反应动力学及第二届炼钢理论学术讨论会于一九八二年四月十二日至十六日在四川省重庆市重庆大学举行。

会议收到有关钢铁和有色金属冶金反应动力学等方面的论文40篇，分上下两集统一印刷，作为会议资料。

由于交稿期限延续较长，文集分批付印，故无法分类编排，以论文收到日期先后为序。

论文均以原稿为准，印刷校对难免有错误之处，尚祈见谅。

上 集 目 录

冶金过程浸入式气流与熔体间的动量传输现象.....	肖泽强 (1)
高炉碱金属循环和富集的动力学及数学模型.....	杨永宜等 (16)
三孔喷枪所产生的同源三股射流结构的理论分析.....	陈允恭等 (31)
水力模型试验中的流动显示方法.....	王尚槐等 (46)
铁矿石三界面并列反应模型的还原速度式.....	那树人 (60)
热风炉不稳定态传热的数学模型及其求解.....	张宗诚等 (69)
氧枪的湍射流特性.....	马恩祥等 (82)
喷射冶金基础理论的研究现状.....	梁宁元 (93)
连续铸锭板坯凝固传热数学模型.....	蔡开科等 (109)
水模拟法研究 RH、RH + IJ 中钢液流态.....	徐匡迪等 (122)
向铁水喷吹CaO系粉剂的脱硫动力学研究.....	徐匡迪等 (136)
单颗粒还原模型及其应用——气—固相还原反应动力学探讨.....	李福纲 (151)
冶金过程动力学在研究钢中气体与皮下气泡关系中的应用.....	关启德 (163)
氧气与液态铁锰合金反应动力学.....	高筱苏等 (185)
低碳区脱碳动力学模型的随机化.....	秦明达等 (199)
高炉可动炉芯气—液二相流的模拟研究.....	谢裕生 (206)
铁矿石球团气体还原的动力学研究.....	黄务淦 (220)
转炉炼钢脱磷工艺的反应工程学的探讨.....	张叔和 (237)
用 CO—CO ₂ 混合气体逐段还原赤铁矿球团矿的还原反应速度.....	李兰滨等 (249)
熔渣中铈扩散系数的测定.....	梁连科等 (262)

冶金过程浸入式气流与熔体 间的动量传输现象

东北工学院

肖泽强

一、引言

一百多年前,当贝塞麦等发展现代炼钢技术时,他们所利用的基本手段就是浸入式气流对冶金熔池的强烈搅拌作用以及在此条件下熔体内部足够快速的传质传热过程。因此,许多文献中将贝塞麦和托马斯炼钢法分类为气动炼钢法。后来,由于原料条件等因素的限制,依靠外来热源及熔池自身沸腾搅拌的平炉和电弧炉炼钢法取代了空气转炉占据过的主要炼钢法的地位。因此,上述浸入式气流搅动的气动炼钢过程的现象,未得深入研究。直到本世纪50年代开始,由于氧气顶吹转炉的发明和发展,冶金熔池在高速气流喷吹下的冶金现象,受到很大重视,许多研究成果促进了这一工艺发展成为世界主要炼钢工艺的过程。自七十年代初出现氧气底吹转炉炼钢技术以后,钢液的炉外精炼技术中也愈来愈多地应用浸入式惰性气体喷吹技术,其中用氩气载送粉料进行铁水和钢液处理的喷射冶金,发展更是迅速[1-4]。

针对上述冶金工艺技术的发展,国内外许多研究机构和冶金研究工作者,纷纷开展有关冶金熔体内气体喷吹时物料间的传质、传热和动量传输现象的研究工作,并发表了许多研究成果[5~8]。

利用气体喷吹进行冶金熔体精炼处理的长期生产应用结果表明,气流喷吹下或载粉喷吹下,熔池内反应速度大大增加,反应动力学甚至热力学条件显著改变。经过为时仅10分钟左右的钢包喷吹处理后,钢中硫可以降低一个数量级(这在常规的炉内精炼中是无法实现的),钢液洁净度大大提高,钢质量显著改善。可是,由于新工艺的发展时间不长,在高温熔体内进行动力学现象研究时测示技术上的一系列困难,使得迄今所作过的研究工作仍然不足以充分和确切地反映出实际状况。因此,对于气流喷吹下(特别是经由浸入式喷咀的喷吹)的熔池反应现象,仍有待深入研究。

本文的主要目的是研究惰性气体经由浸入式喷咀喷入熔池的行为,即气体由孔口的流出过程、气泡形成及其对液相介质的搅拌作用。在这方面,K. I. L. Guthrie、J. K. Brimacombe、T. A. Engh、J. Szekely、R. J. Fruehan、D. G. C. Robertson、Sano and Mori[9-15]等人进行了一系列的实验研究工作,发表了许多有意义的结果。但是,由于测示技术上的困难等各种原因,上述研究结果有的差别较大,有的数据仅仅依靠常温下物理模

型提供或有的实验工作忽略了许多不应该忽略的因素。例如, J. Szekely 和 J. K. Brinacombe 发表的水平射流喷入液相后的穿透轨迹相差很大(见图1)。中西和 Szekely 发表的钢包吹氩搅拌的混合时间经验式, 也受到许多研究工作者的修正^[16]。

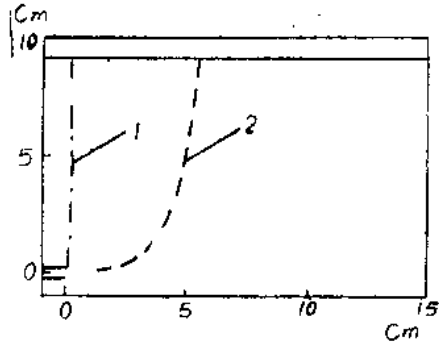


图1 关于水平射流穿透的不同研究结果
1—Brimacombe 数据
2—Szekely 数据

下文介绍的内容是水模型、火模型和实物内对气流经由浸入式喷咀流出行为的研究结果, 主要包括喷咀周围根部气泡的参数、初气泡行为分析及测定结果、气流——液相间动量传输过程以及气泡抽引液相形成循环搅拌的能力。

二、实验方法和设备

实验是在 500×500×1000 毫米、 $\phi 300 \times 600$ 毫米和 $\phi 1000 \times 1500$ 的水模型、30 公斤中频感应炉和 6'、60' 实际钢包内进行的。图2、图3、图4给出了上述三种实验条件的设备示意图。

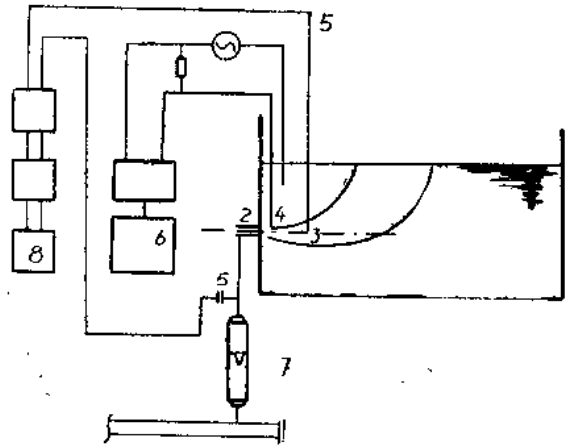


图2 研究水平气流穿透行为的水模型装置

- | | |
|---------|-----------|
| 1—水容器 | 2—喷咀 |
| 3—毕托管 | 4—探针 |
| 5—传感器 | 6—光电示波记录仪 |
| 7—转子流量计 | 8—电位差计 |

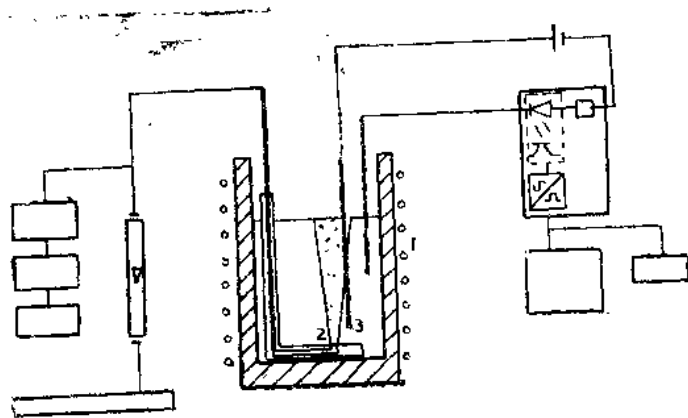


图3：测定金属熔体内气泡参数的火模型

1—炉体 2—喷嘴 3—探针

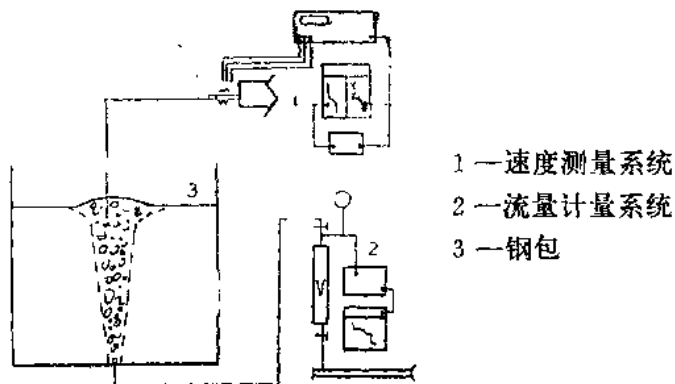


图4 60' 钢包内测量液流速度的实验装置

气体由喷嘴流出后，流股轴线速度的衰减过程系根据 $u \propto \sqrt{P}$ 的关系，利用毕托管测出的相对速度值 u/u_0 来表示的。考虑到水平射流轴线轨迹要转向的情况，曾在 $\phi 300 \times 600$ 园柱容器内补充测量了垂直向上流轴线速度的衰减过程。

液体速度的测量方法是依据 $Re > 10^4$ 以后，形阻体在液流中的阻力系数基本保持常数的条件设计的。它的最大特点是可以测量水和钢水的流动速度，从而解决了液体金属中表面层液流流速的测定问题。形阻件及记录系统曾在标准水力学流槽内 ($1000 \times 2000 \times 24000$ 毫米) 用超声波测速仪进行了校正，灵敏度不亚于参比仪表[17]。

气泡的测量技术选用了电导探针法，其原理如图2、图3所示。气体喷入液相后，除在喷口处可能存在一段连续流股外，喷入的气体均将形成大小不一的气泡、气泡在上浮中还将发生分裂、合并等而改变体积和数量，因此可以将喷口处初期形成的原始气泡称为初气泡。根据气泡形成规律，本实验规定探针头置于喷孔前 $1 \sim 2d$ 距离处测出的气泡为初气泡。这种初气泡（或称一次气泡）可以在熔体内形成，也可以直接在喷嘴处形成。当它在喷嘴处形成时，其形状可能成为半球形或饼状，由于它出现于流股根部，也可称为根部气泡。这种复

盖于喷口周围的根部气泡，在其形成和脱离中，周期性地对喷口周围炉衬造成机械性冲刷。为测量这种气泡的特性，专门设计了一种多触点电导探头，安于侧壁上(图 5， $L_1 \sim L_6$)。在铝液中，用移动探针测量了根部气泡尺寸。

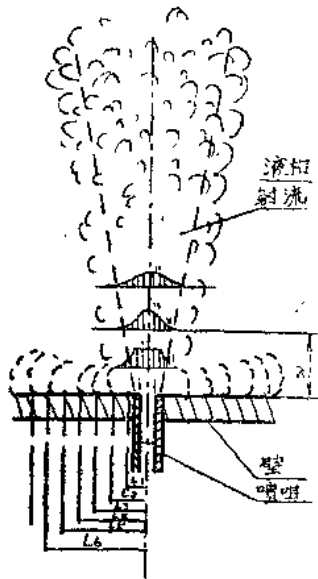
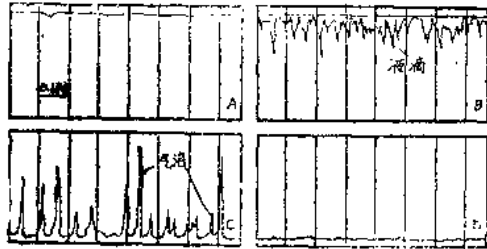


图 5 根部气泡测定的多触点电导探头



- A—连续气流
- B—液珠渗入气流
- C—气泡信号
- D—连续液相

图 6 水模型内气泡测定记录示例

(原稿缺)

图 7 铁液中气泡测定的纪录示例

60 吨钢包内的测定是在一台 VOD 设备上进行的。钢水由 60 吨电弧炉放出后，利用扒渣机将包内覆面渣全部或基本全部地扒掉。然后在真空处理前进行流速测定。测定时氩气流量波动在 $0.05 \sim 0.22$ 米³/分钟之间。搅拌气体由钢包底中央多孔塞砖鼓入包内。气体流量是利用转子流量计配以压力传感连续测定仪表由操作者随时观察并记录(吹 Ar 过程中流量计至喷嘴间的阻力损失因钢液温度、多孔塞砖表面状态而不断变化)。

三、结果和讨论

1. 浸入式气体射流的流出行为:

浸入式喷咀出口截面上气体流出行为, 对射流的穿透、熔钢的流动、喷口的侵蚀、粉粒的穿透及气—固—液间反应都有影响。石桥^[18]、森—美^[19]等人利用水模型和水银模型对上述现象做过研究。

喷口气体流出行为, 可以先从气—气或液—液两相内的流出来分析。图8给出了这种流股的结构模型。流体喷出后, 外介质逐渐卷入流股, 直至达到流股中心(图8中A、B交接点)。在A段内中心轴线速度保持不变, 为 u_0 。从A、B交接点开始, 中心轴线速度 u_m 将逐渐降低, 而流股的直径也不断扩大。显然, 当 u_m 减小到一定程度, 流股即将失去在介质中的穿透能力。流股流出喷口, 经A段进入B段的速度衰减情况及AB段转换部位, 可以通过动量守恒原理和实验获得。

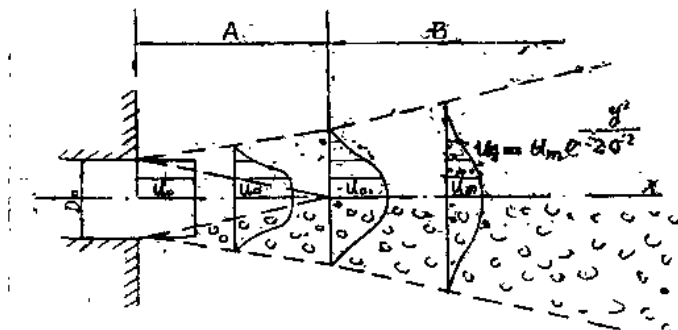


图8 喷口流出的流股结构模型

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^\infty (u_x)^2 dA}{(u_0)^2 A_0} = 1 \quad (1)$$

式中,

$$\begin{aligned} M &= \int_0^\infty (u_x)^2 dA \\ &= \int_0^\infty u_m^2 e^{-\frac{y^2}{\sigma^2}} d\pi y^2 \\ &= \pi u_m^2 \sigma^2 \quad \left(\frac{\sigma}{x} = C \right) \end{aligned}$$

即

$$M = \pi u_m^2 C^2 x^2 = u_0^2 A = M_0 \quad (2)$$

故得:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1}{2C} \frac{D_0}{x} \quad (3)$$

理论推导指出, B 段流股轴线速度与原始速度之比只取决于孔径的倍尺, C 之值为流股的扩张速度, 可由实验得出。如果流出过程是在非均相体系(流出流体和介质的密度不同), 则式(3)将取:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1}{2C'} \frac{D_0}{x} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_x}} \quad (4)$$

由于液体金属中测量工作的困难, 实验是在空气—空气和空气—水、氦气—水和氦气—水的系统里进行的。选用氦气的理由是考虑气液密度比尽可能接近氦气—钢水系统(表1)。

试验介质密度比

表1

	钢水—氦气		模拟体系			
	20°C	1600°C	空气—空气	水—空气	水—氦气	水—氦气
液气密度比, ρ_l/ρ_g	3.9×10^3	2.5×10^4	1	7.7×10^2	5.6×10^2	5.6×10^3

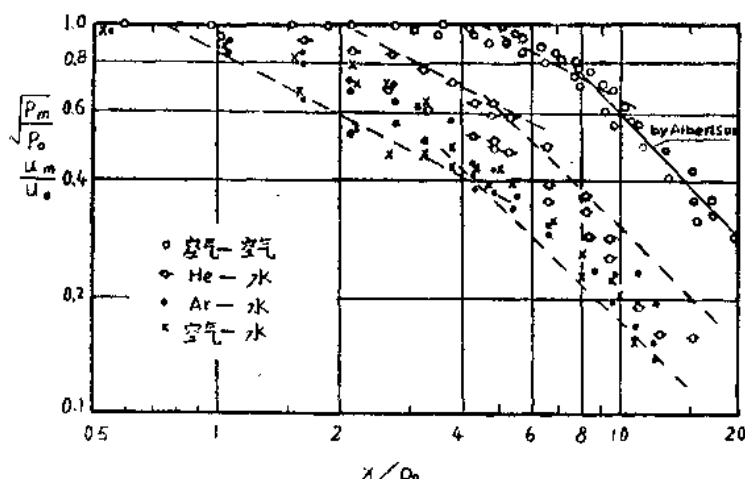


图9 流股轴线相对速度的衰减

本实验中空气—空气系统的实测结果, 与 M. L. Albertson 等人⁽²⁰⁾(图9中实线)获得的结果相符得甚好。本实验得出的 C 值为 0.082, 即 A 、 B 交接点在 $6.1D_0$ 处。但实验发现, A 、 B 交接点并不稳定, 流股 A 、 B 段之间存在一个过渡区, 对气—气体体系, 此区约占据 $(4 \sim 8)D_0$ 的区间。各种气体对水的喷吹, 其速度衰减的规律与气—气体体系相似, 但是(1): A 段显著缩短, (2)过渡区移动在 $(0.8 \sim 5.0)D_0$ 之间, (3)浮力对气流速度的变化产生影响。与气—气体体系相比较, 气—液体体系轴线速度在 $20D_0$ 处就衰退到原始速度的 $\frac{1}{10}$, $40D_0$ 处降到 $\frac{1}{20}$, 而前者降到 $\frac{1}{10}$ 和 $\frac{1}{20}$ 的距离分别为 $60D_0$ 和 $124D_0$ 。

可以推测, A 、 B 交接面的存在与气泡的形成有关, 因此图9所示气—液体体系过渡区 $(0.8 \sim 5.0)D_0$ 应是喷口前气泡形成的主要地区。

2. 喷口前气泡流和连续流的过渡:

石桥^[18]利用空气——水模型, 发现喷咀出口处的气流根部直径, 当喷咀气体出口压力增至 $2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$ 时, 反而变小。其机理是低气体压力下, 流出速度低, 气泡直接在喷咀上形成, 直径大于喷出口内径(D_0)。当气流速度增大, 气泡形成的部位移向液相, 在喷咀前方形成一段连续流股, 连续流股的直径比气泡流直径小。

本实验利用图 5 所示的实验设备, 测量了不同流量下, 喷咀两侧壁面上气泡频率的变化和分布。图 10B 所示为喷咀侧壁上距喷咀中心轴线 $2.2D_0$ 处气泡频率随气流出口速度的变化情况。实验结果非常清晰地表明, 喷咀处气体流出情况在不同流速下是有差异的。图 10B 所示气泡频率的转变出现在音速附近。在低于音速流出时, 直径达到和超过 $4.4D_0$ 的气泡是随供气量增加而增加的, 在接近音速时, 达到最大值。当流出速度超过音速后, 喷咀侧壁上测到的气泡频率迅速减小, 这说明部分或大部分气泡在喷咀前方形成, 减少了气流与侧壁接触的机会。因此, 可以将低于音速流出的状况称为气泡流区(气泡在喷咀上直接形成), 高于音速下的流出为射流区(喷咀出口处存在连续气流)。图 10A 示出沿侧壁不同距离的测点上气泡频率数, 由此也可以估算出气泡大小及尺寸的分布规律。

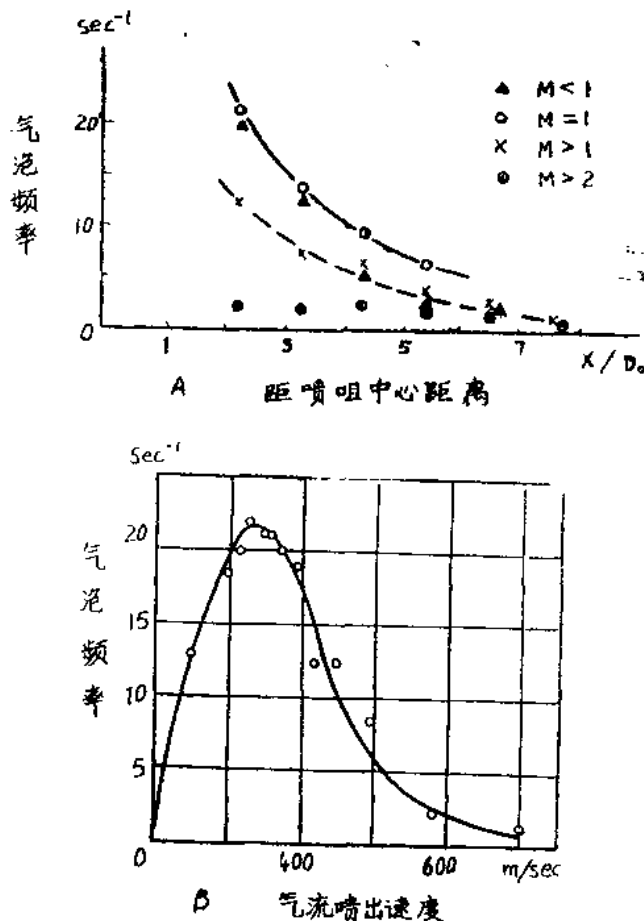


图10 喷咀侧气泡频率随距离和气流速度的变化情况

在出口速度小于音速时($M < 1$), 喷咀侧壁上气泡直径(长轴)分布为:

$>7.5D_0$	2 秒^{-1}	10%
$>6.5D_0$	3 秒^{-1}	15%
$>5.5D_0$	4 秒^{-1}	20%
$>4.3D_0$	6 秒^{-1}	30%
$>3.2D_0$	13 秒^{-1}	65%
$>2.2D_0$	20 秒^{-1}	100%

由图 10A 还可发现, 所有各测点上气泡频率在 $M > 1$ 以后都减少了。在 $M > 2$ 的高速流出下, 所有各测点的气泡频率只有 2 秒^{-1} 。

如果考虑气泡周期在喷咀侧壁上的出现, 会引起气、液流对衬材的冲刷, 则维持高速流出是有利于保护喷咀、延长耐材寿命的。曾经在另外一次实验中, 利用硼酸压制成型的喷咀研究了喷出速度对喷咀侧壁的侵蚀过程, 也发现高于音速的喷吹, 有利于减缓喷咀周围衬材的磨损速度。

3. 根部气泡的行为:

所谓根气泡, 即直接在喷咀上形成, 并沿喷咀侧壁铺散开的原始气泡。如前所述, 根部气泡对喷咀侧壁衬材的工作条件很有影响。

在气体流量较小时(即处于气泡流区)根部气泡即原始生成的气泡, 其最大尺寸随供气量的增加而增大。但有一个极限, 达到这一极限尺寸后, 根部气泡在喷咀侧壁上铺散开的面积不再增加。

曾经在空气——水和 Ar ——铝液中进行过测定。空气——水的测定结果可由图 10A 看出。 Ar ——铝液的试验是在感应炉内进行的, 喷孔尺寸为 5.5 mm 。供气量由 50 毫升/秒变化到 1000 毫升/秒, 喷咀流出气流的 Re 变化在 $750 \sim 15000$ 之间。利用可移式探头, 测出根部气泡最大直径示于图 11。由图可见, 最大根部气泡的长轴直径(图 5 虚线所示气泡)随供气量的增加而增大。当 $Re > 10^4$ 后, 达到极限值。本试验条件的最大极限值为 $71 \sim 75 \text{ mm}$, 相当于 $13 \sim 14D_0$, 这与空气——水体系内观测的结果相近。

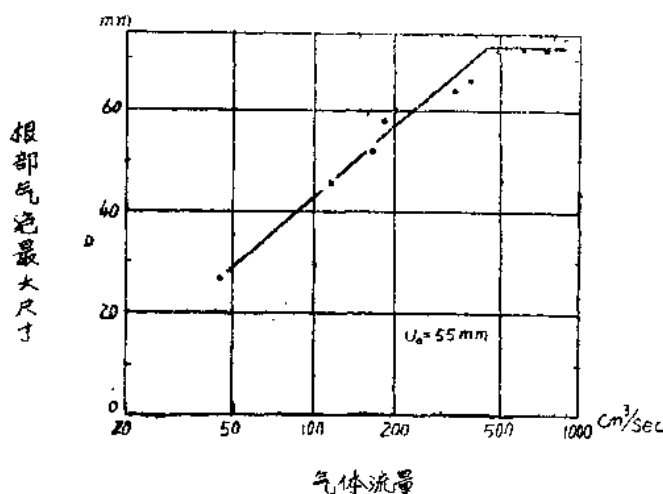


图11 Ar —— Al 体系内根部气泡的最大直径

铝液中吸 Ar 时孔口根部气泡的最大尺寸

表 2

气体流量 cm^3/sec	流出速度 m/sec	R_e	F_r'	根部气泡最大尺寸 mm
45.9	1.93	751	0.033	27.5
115.4	4.86	1890	0.208	46.0
162.9	6.86	2667	0.515	52.0
185.0	7.79	3029	0.535	58.0
208.8	8.79	3418	0.681	60.0
340.0	14.31	5567	1.807	64.0
389.0	16.38	6370	2.366	66.0
488.7	20.57	8000	3.733	72.0
608.9	25.68	9970	5.796	72.0
744.9	31.75	12200	8.674	72.0
893.6	37.61	14630	12.482	75.0

应该指出的是, 当气体流出处于射流区时, 尽管气泡不直接在喷咀上形成, 但实验测得, 仍有频率为 2 秒^{-1} 的气泡周期地在喷咀侧壁上铺散开来, 并伴随有突发性膨胀和声响。图 10 $AM > 2$ 时的流出中, 仍记录有 $2 \sim 3$ 个/秒的根部气泡, 石桥等人也报导了这种气泡的存在, 并指出它具有反坐力。本试验测定了空气—水系统内, 浸入式喷管周围气体流出和气泡爆发的反坐力。(计算)流出速度 430 米/秒和 625 米/秒时的反坐压力分别为 217.3 和 225.3 mmH_2O 。

4. 初气泡的频率和体积:

在气泡流区域内, 气泡直接在喷孔上形成, 故根部气泡即初气泡, 在射流区域内, 初气泡在离开喷孔一定距离处形成。本节讨论气泡在喷咀上或喷咀前沿附近形成的规律。利用动量转换原理对喷咀气泡形成后的平均体积进行分析, 并通过试验进行检验。

由图 12 所示, 气泡在孔口形成时, 将受到促使气泡脱离喷口的向上力(浮力 F_B 、余压力 F_P 和出口动量通量 F_K)的作用, 同时也将受到阻止气泡长大和脱离喷咀的向下力(惯性力 F_I 、粘性形阻力 F_D 和表面张力 F_S)的作用。

当气体流量足够小时, 气泡的形成主要取决于浮力和表面张力, 这种情况不在本文讨论之内。当气体流量增加到惯性力的作用超过表面张力时, 气泡的形成进入动力学区, 气泡在喷口形成时主要受浮力和惯性力的作用。若此处不考虑残余压力等的作用, 气泡形成时, 其所受的向上力为浮力:

$$F_b = V(\rho_l - \rho_g)g \quad (5)$$

在此条件下, 气泡前缘长大所受阻为惯性力 F_I , 其数值等于气泡和跟随气泡运动的液膜

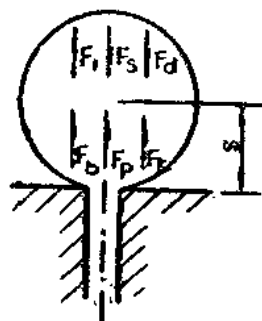


图12 气泡形成模型

的动量通量:

$$F_I = \frac{d}{dt} \left\{ [V\rho_a + \alpha V\rho_l] \frac{ds}{dt} \right\} \quad (6)$$

若气体为稳定态流出, 则任意时刻的气泡体积应为:

$$V = Qt \quad (7)$$

令(5)=(6), 按 $t = 0$ 时, $ds/dt = 0$, $s = 0$ 的条件并考虑 $\rho_v \ll \rho_l$, 积分之, 得:

$$V\rho_l g = \frac{d}{dt} \left[(\alpha V\rho_l) \frac{ds}{dt} \right]$$

$$s = \frac{1}{4\alpha} g t^2 \quad (8)$$

在气泡形成完毕并脱离喷口那一瞬间, 其体积为:

$$V = Qt_c = \frac{4}{3}\pi r_c^3$$

即此刻气泡的半径为:

$$r_c = \left(\frac{3Qt_c}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

令 $s = r_c$, 则可求出气泡平均体积:

$$s = r_c$$

$$\frac{1}{4\alpha} g t_c^2 = \left(\frac{3Qt_c}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$t_c = \left(\frac{4\alpha}{g} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{3Q}{4\pi} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (10)$$

由

$$V = Qt_c$$

$$= \left(\frac{4\alpha}{g} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{\frac{1}{5}} Q^{3/5}$$

故理论推得气泡体积与流量的关系式为:

$$V = \alpha' Q^{3/5} g^{-3/5} \quad (11)$$

在 A_1 ——铁水和 A_1 —— Al 液内, 实验测得的结果表示为(图13):

A_1 —— F_0 系统:

$$V = 2.86 Q^{3/5} g^{-3/5} \quad (12)$$

A_1 —— Al 系统:

$$V = 2.75 Q^{3/5} g^{-3/5} \quad (13)$$

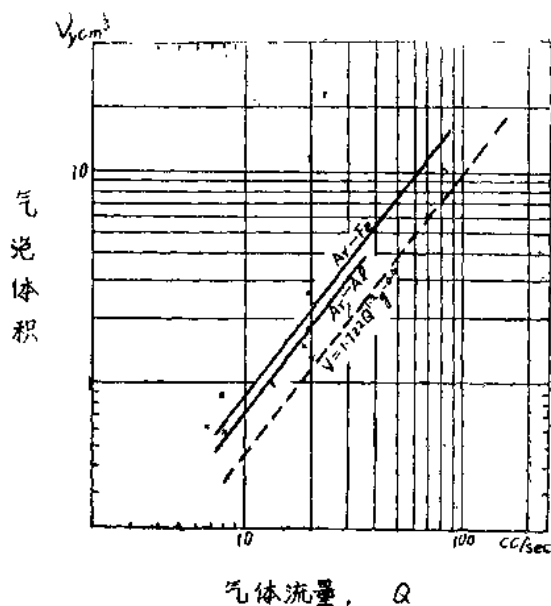


图13 气泡体积与气体流量的关系

实验发现，浸入式喷咀处气泡的形成频率在不同液体中互不相同，本实验测得空气——水、 A_r —— Al 、 A_r —— Fe 系统的气泡频率与其他研究工作者的比较列于表3〔22、23〕

各种气液系统内气泡频率的实验数据比较

表3

	本实验	Brimacombe〔22〕	Guthrie〔23〕
A_r —熔铝	12~16		
A_r —铁水	8~12		~10
空气—水	20~23	19—21	
A_r —水银		10—14	
氮—水银		10	
氮—水		17~19	
A_r — $ZnCl_2$		27~21	

5. 气泡搅拌能力

液态金属利用气体喷吹进行精炼的主要机能之一是搅拌。惰性气体喷吹金属液的搅拌是通过气泡向熔池内传递的。近年来，发表了许多有关气体搅拌下熔体混合速度的文章〔24~28〕。除森一美等近期发表文章从钢液循环运动速度来估价混合时间外，多数文章只是依靠统计数字整理的经验公式，未阐明气泡搅拌促进混合的对流循环机理。

为了推导气泡抽引液体金属，形成循环流动而实现混合的数学模型，本实验根据动量传

输的全浮力模型，定量分析了钢包吹氩时的气泡搅拌能力 详细的实验研究方法及结果，可参考文献[17、29]。

理论推导的基本依据是：在图14所示的钢包喷吹时液流运动模型内，上升气液流的任一截面上的动量通量来自气泡所受的浮力，即：

$$M_z = B_z \quad (14)$$

通过 60 吨钢包内实测液流速度和气液流张角，得出钢包喷吹氩气时，由钢包下部被气泡驱动而上升至顶面而进入循环的钢液量计算式为：

$$V_L = 1.9(z + 0.8) \left[\ln \left(1 + \frac{z}{1.48} \right) \right]^{0.6} Q^{0.381} \quad (15)$$

若定义被抽引钢液量 V_L 与供气量之比为抽引比 m ，则

$$m = \frac{V_L}{Q} = 1.9(z + 0.8) \left[\ln \left(1 + \frac{z}{1.48} \right) \right]^{0.6} Q^{-0.619} \quad (16)$$

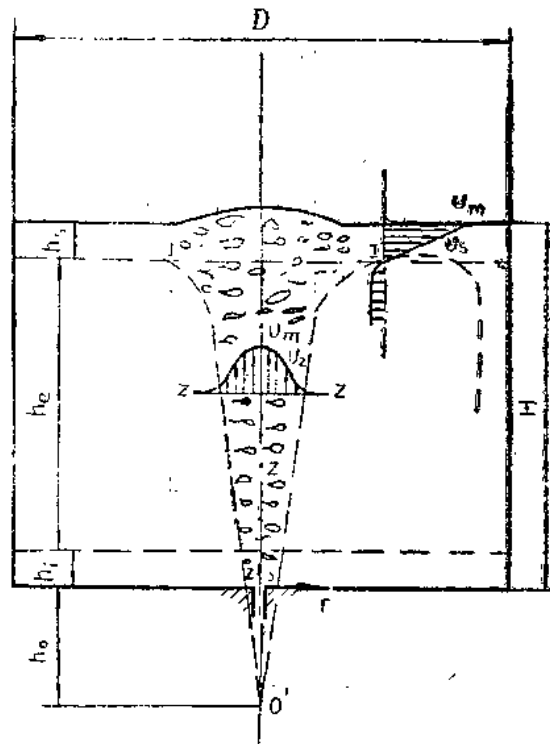


图14 气体搅动钢水的循环流动模型

在正常工艺下， m 值约为 50~200，钢液在此条件下的循环周期约为 5~40 秒，物料足够均匀的混合时间为 20~120 秒(图15、16)。

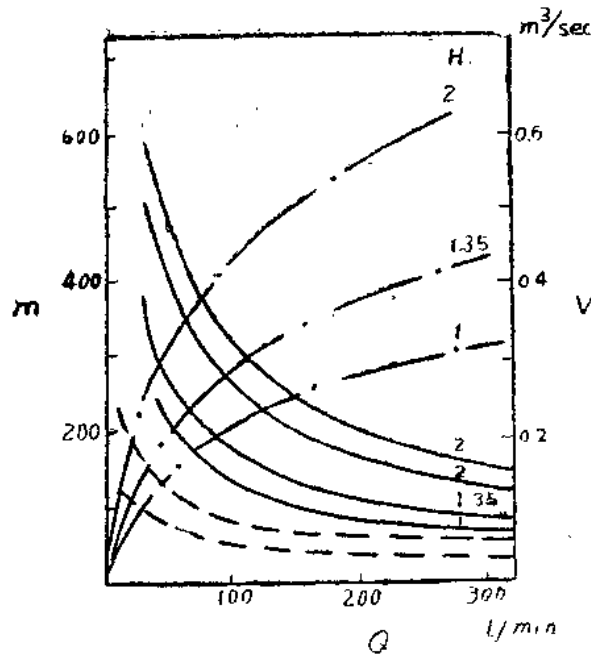


图15 不同钢液深度下, V_i 和 m 随供气量的变化
(—•— V_i , — m , Kobus 空气—水系统)

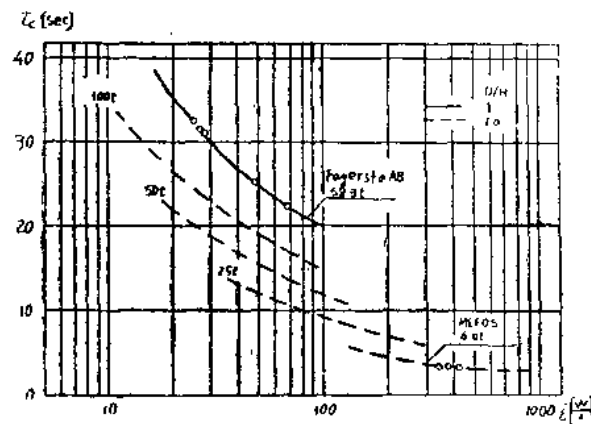


图16 气体搅动钢包内钢液流动的循环周期(t_c)

四、结 论

1. 气体吹入液相, 其轴线相对速度迅速衰减, 其衰减速度与倍尺和密度比有关。
2. 由浸入式喷咀流出的气体, 低于音速时属气泡流出区, 高于音速流出为射流流出区。
3. 气泡流出区和射流流出区内, 喷咀侧壁上都会有根部气泡作用。射流区内的根部气

泡的最大直径约为 $13 \sim 14 D_0$ ，形成时有较大的反坐力，每秒出现 2 次左右。

4. 喷咀附近初气泡（一次气泡）体积，在动力学区内，符合 $V \propto Q^{0.6} g^{-0.4}$ 关系。在金属铁液中气泡频率为 $8 \sim 12 \text{ 秒}^{-1}$ ，只有水中气泡频率的 $1/2$ 左右。

5. 气泡对液相具有巨大的搅拌能力，其体积抽引比为 $50 \sim 200$ ，从而可以保证钢包吹氩能在 2 分钟内实现均匀混合。

浸入式喷咀喷吹气体的机理、气泡形成及其冶金行为，还有待深入研究。

符 号 说 明

u —速度
 P —压力
 M —动量动量
 ρ —密度
 D_0 —喷孔直径
 Q —气体流量
 r —半径
 α —气泡上液膜量系数
 g —重力加速度
 B —浮力
 τ_c —循环周期
 V —气泡体积
 t —时间

参 考 文 献

1. SCANINJECT I, №1 International Conference of Injection metallurgy, Lulea°, June 8-9, 1977, Sweden
2. SCANINJECT II №2 International Conference of Injection metallurgy, Lulea°, June, 13-14 1980, Sweden
3. 《取钢精炼技术与钢材特性》，第54、55回西山纪念技术讲座，1978年，9，10月
4. 《Oxygen Converter metallurgy》，KTH, April, 23, 1980, Sweden
5. Meeting on Gas Injection into Liquid Metals, univ. of Newcastle upon Tyne, England, April, 1979
6. 《Heat and Mass transfer in metallurgical systems》，proceedings of the International centre for Heat and Mass. Transfer, 1980
7. 全国冶金过程反应动力学会议，1982年5月重庆
8. J. Szekely, 《Rate phenomena in process metallurg》，Wiley-Interscience, 1970