

# 顶吹气体射流冲击下熔池内 液体流场的研究

北京钢铁学院热工原理教研室 李有章  
鞍山钢铁公司热能所 李顶宜

## 摘 要

本文对顶吹气体射流冲击下熔池内的液体流场,将物理模型的试验测定,与数学模型方程的数值求解相配合进行了研究。用激光测速仪测定了模型熔池液流的速度分布。以湍流的运动学和动力学方程、Prandtl—Kolmogorov湍流单方程模型,以及物理模型试验测定提出的边界条件,构成了所研究问题的数学模型。应用Spalding等计算湍流回流的方法,对数学模型数值求解,得到了熔池内液流流函数、速度、涡量、湍动能,湍流旋涡粘性系数等的分布,计算结果与实验测定相当吻合,并可见本文的工作比之前人的有了进一步的改善。

## 一、所用符号说明

$A\mu, A_d$ 常系数	$\alpha$ 系数或可调常数
$C\mu, C_d, C_e$ 常系数	$\xi$ 涡量
$d$ 湍流特征线尺寸	$\xi_c$ 常涡量
$H$ 熔池液体深度	$h$ 凹陷深度
$N_{\Delta}$ 边界点与最邻近边界的网格点之间的垂直距离	$K$ 湍动能
$n$ 网格点的总数	$k$ 迭代次数
$R$ 熔池半径	$N$ 湍动能耗散率
$r$ 径向座标	$\lambda_d, \lambda_\mu$ 湍流旋涡粘性的长度因子
$r_c$ 凹陷半径	$\mu$ 常粘性系数
$R_{st}$ 湍动雷诺数	$\mu_e$ 有效粘性系数
$P_{rt}$ 湍动普兰特数	$\mu_t$ 湍流粘性系数
$V_r$ $r$ 向速度分量	$\rho$ 液体的密度
$V_z$ $Z$ 向速度分量	$\phi$ 变量、 $\xi/r$ , $\psi$ 、 $K$ 等
$Z$ 轴向座标	$\Phi$ 液体循环量
	$\psi$ 流函数

$n, p$  最邻近边界的网格点  
 $i$  网格点的序号数

$\Omega$  湍动能的产生速率  
下标:  $p$  边界上的点

## 二、前 言

采用顶吹气体射流冲击搅拌熔池内的液体,并根据冶金过程的需要,射流气体可为氧气或其他组分的气体,在氧气顶吹转炉炼钢,炉外精炼,有色冶金等生产过程中都有广泛应用。

对顶吹气体射流冲击下熔池内液体流场的研究,七十年代以前前人所做的大量工作,主要是进行水模型试验,研究了气体射流参数与熔池液面凹陷几何参数间的关系,观察了熔池内液体流场的现象,为分析有关冶金过程提供了一些有益资料,例如文献 [1] ~ [4] 等。六十年代中期 Wakelin [5] 用示踪粒子照相间接推算了一例水模型熔池流场的速度分布。1974年, Szekely 等发表了用 Spalding 等的方法、对照 Wakelin 的实验,数值计算顶吹气体射流冲击下熔池内液体速度场的结果 [6]。81年,本文作者之一,就这里所研究的问题提出了一个数学模型 [7]。

考虑到前面所述这些工作中存在的不足和问题,特别是鉴于发展喷吹冶金技术,及其有关冶金动力学和数学模型分析方法的需要,都有必要对这里所提出的问题作进一步的研究。为此,本文在研究工作中做了物理模型流场的显示实验,用激光测速仪测定了模型熔池内液流的速度分布。以有关问题湍流的流体动力学方程组、Prandtl-Kolmogorov 湍流单方程模型、以及对物理模型试验测定分析导出的边界条件,构成了所研究问题的数学模型,应用 Spalding 等 [8][9] 计算湍流回流的方法,用差分法对数学模型数值求解,得到了所研究问题流函数、速度、涡量、湍动能、湍流旋涡粘性系数等的分布。与 Szekely 等的工作 [6] 相比较,在本文工作中将凹陷面处理为二次抛物面,改进了对称轴线上的边界条件,特别是考虑了熔池自由面上实际存在的摩擦。通过比较,用本文方法计算的结果与实验测定的基本一致,并可见比前人的工作有了改善。

## 三、熔池内流场显示和速度分布测定

试验是在北京钢铁学院工业热工及热能工程系水力模型实验室的装置上进行的。图1示物理模型流场显示实验装置,有机玻璃圆筒6模拟熔池,其内半径  $R = 14.8\text{cm}$ ,高  $37\text{cm}$ ,内盛水。压缩空气1经喷枪2的喷嘴射流而出冲击搅拌熔池内的液体,实验用喷嘴出口直径  $D_0 = 0.625\text{cm}$ 。喷枪位于熔池对称轴线上,枪位可以调节。方形水箱4内盛水5,是为了减少模型内水对光的折射作用,方箱底边长  $34\text{cm}$ ,高  $37\text{cm}$ 。盖板3上有多个排气孔。

熔池液体流场用铝粉示踪显示,用片光源8照明,海鸥D135型相机曝光时间  $1/2$ 秒拍照,图2为流场流动显示照片。

在用激光测速仪测定模型熔池内液流速度时,则是将有机玻璃圆筒内盛一般的水,水中含有的微粒即可作为激光的散射粒子。所用激光测速仪为国产JDCH型后向及反射式后向激光多普勒干涉测速仪,功率  $15\text{mw}$ ,全量程  $2\text{mm/s} \sim 220\text{m/s}$ ,整机绝对误差为  $1\%$ 。

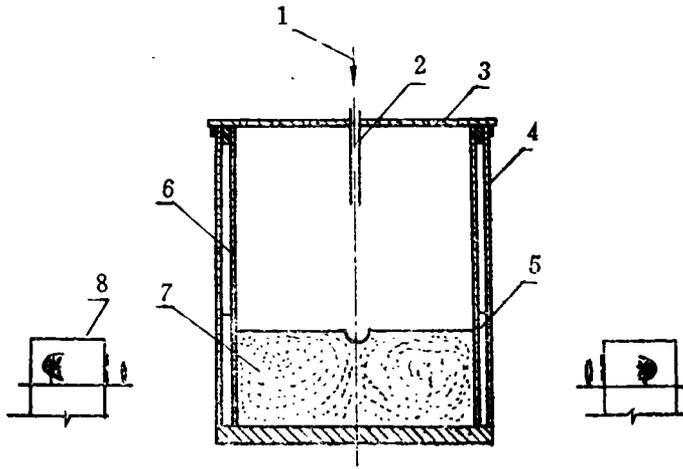


图 1 流场显示试验装置示意图

1—压缩空气；2—喷枪；3—盖板；4—外箱；5—水；6—有机玻璃圆筒；7—水及铝粉示踪；8—片光源。

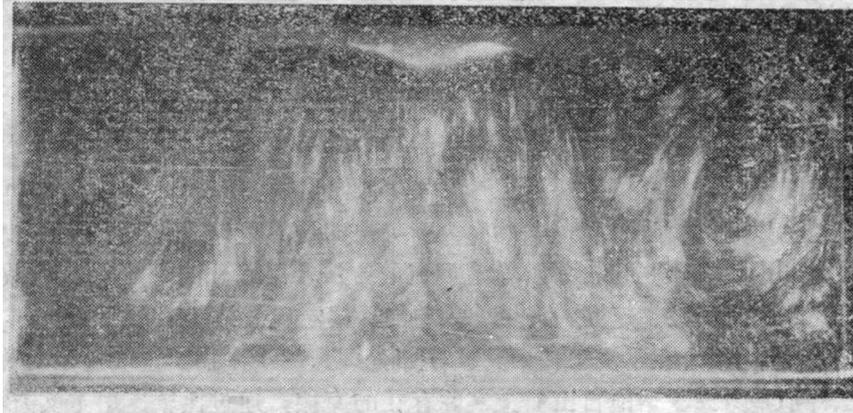


图 2 熔池流场流动显示照片

表 1 所列为本文中给出的计算依据的实验工况，测定结果见图 5。

表 1 一例实验工况的参数数值表

熔池半径 R cm	熔池深度 H cm	喷枪距液面高 H <sup>1</sup> cm	喷嘴前气体静压 mmWG	射流气体流量 Nm <sup>3</sup> /hr	射流出口速度 m/sec
14.8	11.6	15.4	140	4.55	41.2

## 四、数学模型

设熔池流场为稳定流，问题为轴对称，熔池内液体为常物性流体，凹陷以外液体的自由面是光滑的，凹陷表面为二次抛物面。图3示熔池与凹陷几何参数及所取柱坐标系。

### 1. 基本方程式

涡量方程（运动学方程）

$$\xi = \frac{\partial V_r}{\partial Z} - \frac{\partial V_z}{\partial r} \quad (1)$$

速度分量  $V_z$ 、 $V_r$  与流函数  $\psi$  间关系方程

$$V_z = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (2)$$

$$V_r = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (1) 中, 可得  
到流函数  $\psi$  与涡量  $\xi$  之间的关系式

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \xi = 0 \quad (4)$$

涡量传输方程 (动力学方程)

$$r^2 \left[ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{\xi}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\xi}{r} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ r^3 \frac{\partial}{\partial Z} \left( \mu_e \frac{\xi}{r} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_e \frac{\xi}{r} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

式中,  $\mu_e$ —有效粘性系数,  $\mu_e = \mu + \mu_t$ 。

湍流旋涡粘性系数  $\mu_t$  是湍流流动的一个性质, 随流场几何座标而变, 在流场固体壁及其邻域上为零。本文采用 Prandtl—Kolmogorov 模型以湍动能  $K$  表示  $\mu_t$  [8], 即

$$\mu_t = C' \mu \rho K^{1/2} \lambda \mu \quad (6)$$

在小雷诺数湍流的情况下, 根据 Wolfshtein [10] 的关系式

$$\lambda \mu = d [1 - \exp(-A \mu R_{et})] \quad (7)$$

在本文计算中取湍流特征尺寸  $d$  为径向网格距离的 1/5。湍动雷诺数  $R_{et}$  则由下式定义

$$R_{et} = d \rho K^{1/2} / \mu \quad (8)$$

湍动能输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial K}{\partial Z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial K}{\partial r} \right] - r (\Omega - N) = 0 \quad (9)$$

湍动能产生速率  $\Omega$  写为

$$\Omega = 2\mu_t \left[ \left( \frac{\partial V_z}{\partial Z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{V_r}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_r}{\partial Z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^2 \right] \quad (10)$$

湍动能的耗散速率  $N$  表为

$$N = C_d \rho K^3 / \lambda d \quad (11)$$

长度因子  $\lambda_d$  表为

$$\lambda_d = d [1 - \exp(-A_d R_{et})] \quad (12)$$

## 2. 边界条件

确定边界条件是流体动力学问题计算中的一个重要问题, 本文研究问题 (图3) 边界条件的数学表达式如下:

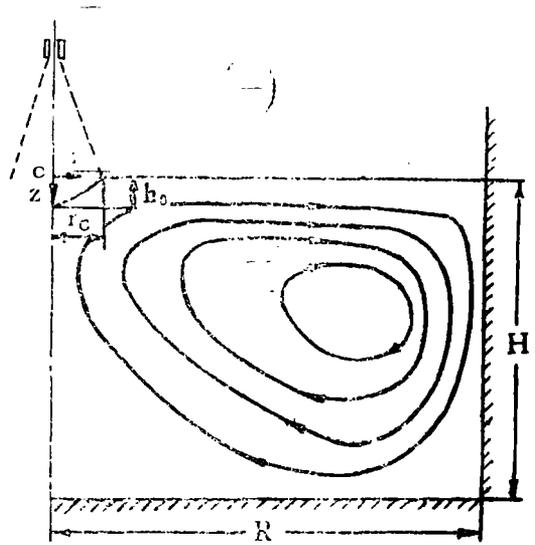


图3 熔池几何参数及座标

$$Z = 0, r_c < r < R, \psi = 0, \frac{\partial K}{\partial Z} = 0,$$

$$\left(\frac{\xi}{r}\right)_p = -2 (\psi_{zp} + \rho r V_{rp} N_{sp}) / \rho r^2 N_{sp}^2 \quad (13)$$

$$r = 0, h_c < Z < H, \psi = 0, \frac{\partial K}{\partial r} = 0,$$

$$\left(\frac{\xi}{r}\right)_p = -8 (\psi_{zp} - 0.5\alpha\rho V_{zp} N_{sp}^2) / \alpha\rho N_{sp}^4 \quad (14)$$

$$r = R, 0 < Z < H, \psi = 0, K = 0,$$

$$\xi_p = (\psi_p - \psi_{sp}) / N_{sp}^2 / (\rho R / 3 + (5/24)N_{sp}) - (R + N_{sp})(R/6 + N_{sp}/8) / R / (R/3 + (5/24)N_{sp}) \xi_{sp} \quad (15)$$

$$Z = H, 0 < r < R, \psi = 0, \bar{K} = 0,$$

$$\xi_p = 3 (\psi_p - \psi_{sp}) / (r\rho N_{sp}^2) - 0.5\xi_p \quad (16)$$

$$Z = -h_c r^2 / r_c^2 + h_c, 0 < r < r_c, \psi = 0, \xi = \xi_c, K = \mu | \xi_c | / C_c^{1/2} \rho \quad (17)$$

边界方程式 (13) 考虑了熔池自由面上的摩擦, 在边界方程式 (13) 与 (14) 中, 引入了当地的速度  $V_{rp}$  与  $V_{zp}$ 。

### 3. 求解方法

对以上拟线性椭圆型偏微分方程及有关代数方程组, 采用 Spalding 等 [9] 计算湍流回流的方法, 用差分法数值求解, 有限差分公式采用  $16 \times 21$  的网格, 以逐次松弛法 (SOR 法) 迭代求解, 计算过程中, 按情况调整对某些变量的超、亚松弛因子, 保证解的收敛。以 FORTRAN IV 算法语言编制程序, 在北京钢铁学院计算中心 M150 计算机上进行计算, 源程序编译约需 22 秒, 一般工况计算时间约需 300 秒。计算收敛精确度标准定为

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\Phi_i^k - \Phi_i^{k-1}}{\Phi_i^k} \right| \leq 0.017 \quad (18)$$

## 五、计算结果与实验结果的比较和分析

表 2 中列有计算时所用参数与系数的数值, 几何参数  $R$ 、 $H$ 、 $r_c$ 、 $h_c$  根据我们的模型实验资料确定, 常系数  $A_d$ 、 $A_\mu$ 、 $C_d$ 、 $C_\mu$ 、 $Pr_t$  按 Wolfshtein 的实验资料 [10] 确定,  $C_c$  则按 Launder [8] 推荐的数值给定。常系数  $\xi_c$  与  $\alpha$  是在上机计算时, 参考我们在物理模型上测得的流场速度, 调试选定的。

表 2 计算所用参数及系数的数值

项目	R cm	H cm	rc cm	hc cm	$\xi_c$ 1/sec	$A_d$	$A_\mu$	$C_d$	$C_\mu$	$Pr_t$	$C_c$	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$\mu$ g/cms	$\alpha$
数值	14.8	11.6	1.55	1.04	-20	0.263	0.016	0.416	0.22	1.53	0.08	1	0.0133	100

图 4 示计算所得熔池流场流线谱及流函数值, 与图 2 该工况下流场显示试验照片比较, 可见两者图形基本是一致的, 流场回流涡核位置两者也较吻合。流场特点是表面层流线成水平, 流场主要为一顺时针向回转的大回流, 凹陷正下方底壁以上有一钝三角形流动停滞

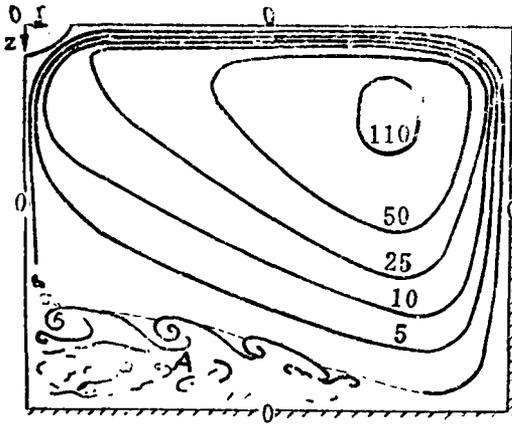


图 4 计算所得熔池流谱及流函数数值 (g/sec)

分离旋涡区A，流场各处液体呈向凹陷涌流的主要趋势，这些都是冶金工作者熟知的现象。流函数数值表示液流的质量流量(g/sec)，因此两条流线A与B间的液流循环量 $\Phi$ 为

$$\Phi = 2\pi |\psi_A - \psi_B| \quad (19)$$

比较测得与计算所得熔池流场速度分布图5及6可见，两者数值与分布均相当一致。液流在凹陷边缘处速度为最大，此外，表面层、侧壁上半部附近及涡核周围速度值也较大，涡核中心、熔池底部、对称轴下部速度值则很小，表面层液流离开凹陷径向流动过程中流速逐步衰减。速度分布特点与图2及4流场流谱现象吻合。除表面层外，流场大部份区域速度值都较低，表明气体射流的能量用于推动液体运动的部份是不大的。

图7示计算所得熔池流场涡量分布，可见液体自由面涡量是自凹陷向四周扩散衰减，在涡核上方附近涡量有一较大变化，与流速分布的特点相对应，比文献[6]更好地反映了所研究问题的实际情况，在文献[6]中，认为自由面上涡量为零。

图8示计算所得熔池流场湍动能分布，可见除凹陷、表面层和对称轴中心附近外，其余区域湍动能值都较小，表明除凹陷、表面层、对称轴附近区域湍流混合起作用，其他区域可认为湍流混合没有实际意义，而可将之看为层流流场。由此可见，用顶吹气体射流软吹搅拌熔池的效果是较差的。但如果加大冲击射流的动量，则随凹陷及其上涡量值的加大，整个流场的湍动能都增大，湍流混合作用将加强与扩大，搅拌效果就将得到改善，详细情况见本文作者之一的论文[11]。

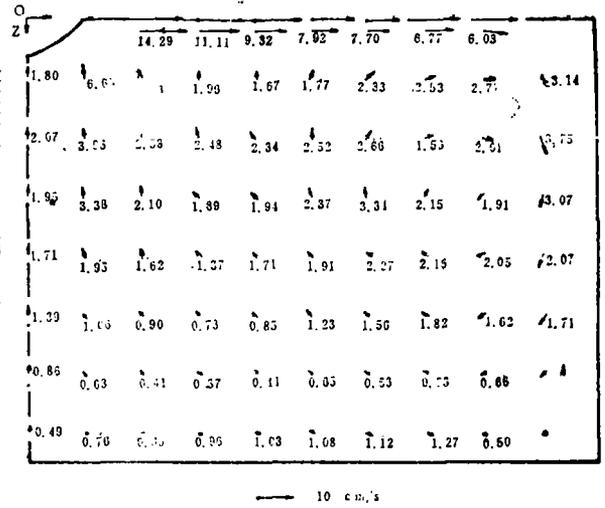


图 5 激光测速仪测得的熔池流场速度分布

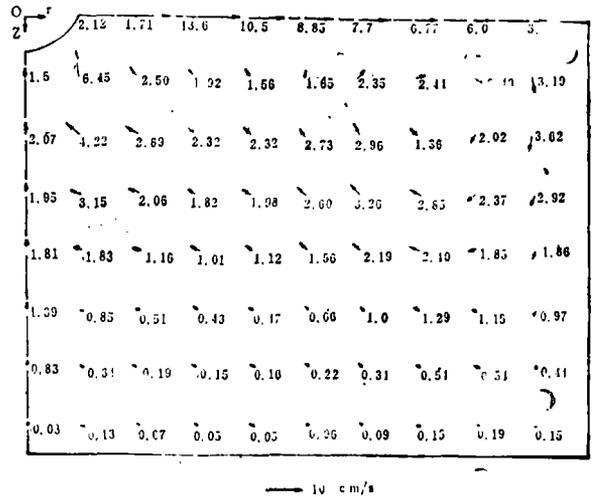


图 6 计算所得熔池流场速度分布

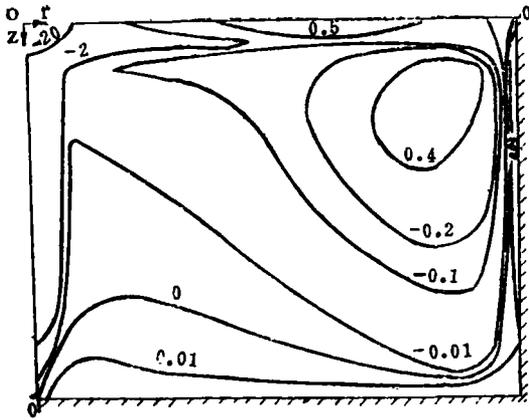


图 7 计算所得熔池流场涡量分布 (1/S)

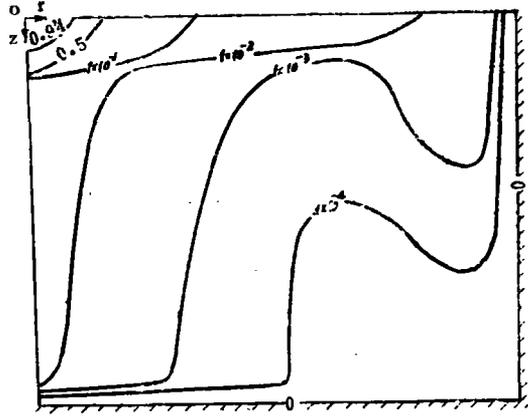


图 8 计算所得熔池流场湍动能分布 (cm²/s²)

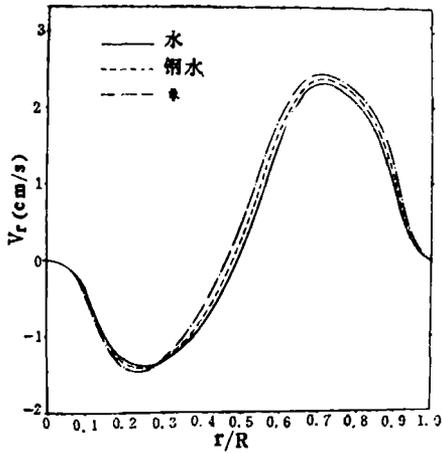


图 9 计算所得水、钢水和汞在液面下深1.56cm处径向速度的分布

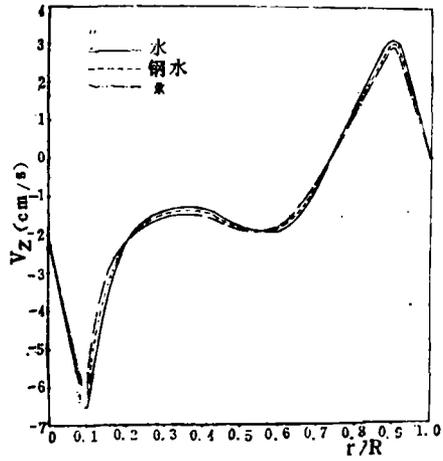


图 10 计算所得水、钢水和汞在液面下深1.56cm处轴向速度的分布

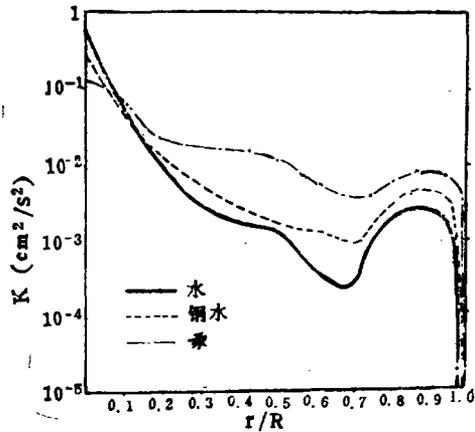


图 11 计算所得水、钢水和汞在液面下深1.56cm处的湍动能分布 (cm²/sec²)

在本文工作中, 还就熔池内液体分别为钢水与汞做了计算, 取它们的密度与常粘性系数分别为 $\rho_{Fe} = 7.0\text{g/cm}^3$ ,  $\mu_{Fe} = 0.05\text{g/cm}\cdot\text{sec}$ ;  $\rho_{Hg} = 13.6\text{g/cm}^3$ ,  $\mu_{Hg} = 0.015\text{g/cm}\cdot\text{sec}$ 。图9与10示计算所得距自由面1.56cm处, 水、钢水和汞速度分布的比较, 可见它们间很相似, 计算结果较文献[6]的图7和8有改善。图11示计算所得水、钢水和汞在液面下深1.56cm处的湍动能分布, 表明密度越大的液体对应处湍动能值越大, 亦即在维持同样凹陷形状、深度及其表面涡量值的情况下, 要求冲击射流气体的动量要随液体密度的加大而加强。

## 六、结 语

本文对顶吹气体射流冲击下熔池内的液体流场, 将物理模型的实验与测定, 与数学模型方程的数值求解相配合进行了研究, 采用这种研究方法的结果, 使研究工作的阶段结果, 比前人的工作结果有了进一步改善, 为今后的有关工作打下了一定的基础, 本文研究工作的详细情况可见论文[11]。

参加本文实验工作的有: 北京钢铁学院王尚槐、覃竟南、黄志伟、冯诚芝同志、中国科学院热物理所韩克礼、刘玉民、张钟梅和乐凤荣同志, 本文作者对以上同志及北京钢铁学院计算中心同志的帮助, 以及对协助本文工作的其他同志, 表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] R.B.Banks and D.V.Chandrasekhara: Experimental Investigation of the Penetration of a high Velocity Gas Jet through a Liquid Surface. J.Fluid Mech.Vol.15,Pt.1,Jan, 1963,pp13.
- [2] R.S.Rosler and G.H.Stewart: Impingment of Gas Jets on Liquid Surface.J.Fluid Mech.Vol.31, Pt.1,Jan.1968,PP.163
- [3] 中国科学院化工冶金研究所,首钢实验厂:首钢实验厂5吨转炉拉瓦尔喷头射流特性及其熔池作用的模拟研究。
- [4] B.H.巴普基兹曼斯基著,曹兆明译:氧气转炉炼钢过程理论。上海科技出版社,1979.9
- [5] D.H.Wakelin: Ph.D.Thesis, Uuiv.of London Euglaud.1966。(原文未见)
- [6] J.Szekely and S.Asai: Turbulent Fluid Flow Phenomena in Metals Processing Operations: Mathematical Description of the Fluid Flow Field in a Bath Caused by Imping Gas Jet.Met.Trans Vol.5,Feb.1974,pp493.
- [7] 李有章: 顶吹气体射流冲击下熔池内液体运动的数学模型,北京钢铁学院,1981.6.
- [8] B.E.Launder and D.B.Spalding: Lectures in Mathematical Models of Turbulence,Academic Press, 1972.
- [9] A.D.Gosman, W.M.Pun, A.R.Runchal, D.B.Spalding and A.M.Wolfshtein, Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows, Academic Press. 1969.
- [10] A.M.Wolfshtein: The Velocity and Temperature Distribution in One-Dimensional Flow With Turbulence Augementation and Pressure Gradient Int.J.Heat and Mass Transfer, 1969,Vol.12,pp 301.
- [11] 李顶宜: 顶吹气体射流冲击下熔池内液体流场的研究,北京钢铁学院热能工程系硕士研究 学 文,1982.3.

# The Modeling of Fluid Flow Fields In A Bath Caused By Imping Gas Jet

Li Ding-Yi Li You-Zhang

## Abstract

In this work, the fluid flow field in a bath caused by imping gas jet are studied by means of experiment with a physical model together with numerical solution of the mathematic model. Velocity distribution of the fluid flow in the bath is measured by laser Doppler anemometer. The mathematic model consists of the kinematic and dynamic equations of turbulent flow, one equation model of turbulence and newly defined boundary equations. The mathematic model is numerically solved implicitly using method solving recirculating flow problems developed by Prof. Spalding, so that, the flow pattern, the distribution of velocity, vorticity, turbulent kinetic energy, and turbulent viscosity are obtained. The results computed agree well with those measured in experiments.