

浮选

下 卷

冶金工业出版社

浮 选

(纪念A.M.高登文集)

下 卷

〔美〕M.C.富尔斯特璠 编
胡力行 吕永信 谢怀祖等 译校

冶金工业出版社

译 选
下 卷

〔美〕M.C.富尔斯特璠 编
胡力行 吕永信 谢怀祖等 译校

★

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

★

850×1168 1/32 印张 20 7/8 字数 556 千字

1982年6月第一版 1982年6月第一次印刷

印数00,001~2,300册

统一书号: 15062·3815 定价2.55元

译 者 序

《浮选》一书是1976年由美国矿冶石油工程师学会为纪念美国高登教授(1900~1974)而出版的文集。

本书由美国M.C.富尔斯特瑙(M.C.Fuerstenau)教授编辑。全书分上、下两卷,共有论文48篇,除第一、二两篇记述高登教授的生平及其教学和科研活动外(这两篇译本未收入),余46篇均为科技论文。内容可分七个部分:上卷包括非金属矿浮选基础6篇、硫化矿浮选基础8篇及其他浮选基础6篇;下卷包括浮选动力学及浮选机设计7篇、浮选回路及操作自动控制5篇、选厂实践13篇(其中铜硫化矿选厂6篇,铜、钼、铅、锌硫化矿选厂4篇,煤、磷酸盐及氧化铁燧岩浮选各一篇),以及浮选厂尾矿污水药剂的环境问题1篇。46篇科技文献中,有美国25篇,加拿大6篇,澳大利亚和南非各4篇,英国2篇,罗马尼亚、芬兰、意大利、日本和巴布亚新几内亚各一篇。

本书较系统地总结了浮选领域近十五年来的重大成果,尤其着重论述了浮选理论、计算机自动控制、X射线分析及大型浮选机的发展,并介绍了各种类型矿物原料的浮选实例,是当前有关浮选的一本内容较广、材料较新、学术水平较高、有参考价值的书。本书可供有关院校选矿专业师生及研究生,以及从事选矿生产科研人员、技术工人学习和参考。

本书上卷已由冶金部矿冶研究总院胡力行及吕永信等同志译校,本社出版。下卷共包括26篇论文,第21、24~27及33~46篇由冶金部矿冶研究总院胡力行、陈祥勇、罗义昌及韩寿林等同志译校,吕永信同志审阅;第22、23及28~32篇由冶金部矿冶研究总院邱宇等及鞍山钢铁学院谢怀祖等同志译校。

在翻译过程中,我们对原书中凡能确定的一些技术、印刷错

误均做了订正，但由于我们的外语和技术水平有限，书中错误及不妥之处请批评指正。

1980年 8 月

目 录

译者序

第四部分 浮选动力学及浮选机设计

第二十一篇	单个气泡捕获单个矿粒的绝对比率.....	1
第二十二篇	数学模拟在预测浮选网络性能方面的应用及其局限性.....	11
第二十三篇	分批浮选和连续浮选的数学模型.....	40
第二十四篇	硫化矿工业浮选回路的模拟.....	82
第二十五篇	浮选机.....	105
第二十六篇	大型浮选槽的设计和发展.....	164
第二十七篇	奥托孔普浮选机.....	184

第五部分 浮选回路及操纵控制

第二十八篇	X射线在线分析.....	205
第二十九篇	浮选厂最优化.....	243
第三十篇	模拟在设计和改造浮选厂方面的应用.....	277
第三十一篇	浮选厂计算机控制.....	302
第三十二篇	芒特艾萨矿业有限公司黄铜矿浮选的计算机控制.....	330

第六部分 铜硫化矿选矿厂实践

第三十三篇	美国阿纳康达公司威德选矿厂.....	361
第三十四篇	费尔普斯·道奇公司蒂龙选矿厂.....	375
第三十五篇	肯奈科特铜公司博尼维尔选矿厂.....	386
第三十六篇	塞浦路斯·皮马选矿厂.....	407
第三十七篇	杜瓦尔·西雅里塔选矿厂.....	426
第三十八篇	布干维尔铜选矿厂.....	448

第七部分 铜、钼、铅、锌硫化矿选矿厂实践

第三十九篇	科罗拉多州克利马克斯辉钼矿浮选药剂的发展.....	467
第四十篇	钼有限公司魁斯塔分公司选矿厂生产实践评述.....	501
第四十一篇	恩达科矿选矿厂实践评述.....	516
第四十二篇	马格芒特选矿厂铅锌铜分离及当前的实践.....	529

第八部分 非金属矿选矿

第四十三篇	煤浮选.....	545
-------	----------	-----

第四十四篇 磷酸盐浮选566

第四十五篇 美国默萨比矿区氧化铁燧岩的阳离子浮选585

第九部分 环境问题

第四十六篇 选矿厂尾矿水中浮选药剂的环境问题603

参考文献.....632

第四部分 浮选动力学及浮选机设计

第二十一篇 单个气泡捕获单个矿粒 的绝对比率

J.P. 安弗朗斯 (Anfruns)

J.A. 基切勒 (Kitchener) ①

提 要

用直径0.5到1.1毫米的单个上升气泡，对表面经甲醇处理的强疏水性、直径12到40微米的单个石英矿粒的捕获比率做了测量。

其结果与理论计算的流体动力学碰撞率十分相符，表明在这一体系中，每一次碰撞都导致矿粒的捕获和固着。

前 言

浮选速度——特别是它与矿粒和气泡大小的关系——是一个复杂的问题，高登教授及其同事们对该问题提供了重要的论文^[1]。

由于上述研究，目前广泛地认为，对浮选机的实际工作还不能用非常基本的术语加以描述。影响泡沫中矿物回收率的因素很多，如矿泥的凝聚，可浮矿物粒级的相互干扰，不可浮矿物引起的干扰，气体的析出，紊流使聚集体碎解，气泡的饱和负载，以及脉石矿泥的夹带等等。因此，现代许多有关“浮选动力学”的

①伦敦皇家学院采矿和矿物工艺系。

分析，必然都是一般宏观动力学的半经验性数学模型。

然而，最近几年在气泡捕获矿粒的基本物理学方面有了一些进展。本文不能详细评述这些进展。但是，除高登的研究外，应提到萨瑟兰 (Sutherland)^[2]，布朗(Brown)^[3]和苏联的工作者，特别是博格丹诺夫及克拉辛等人所做的工作^[4]。稍后，有捷尔佳金等人的理论研究^[5]。该研究表明，扩散电泳的符号和大小可以影响非常微小矿粒（例如 <10 微米）的捕获比率。除捷尔佳金等人用携泡法所作的一项研究^[6]外，看来一直没有对这一因数的重要性或不重要性作过充分的试验。文献^[7]最近评述了大约1971年前关于捕获矿粒的物理学和表面化学方面的研究状况。其后，又发表了两篇涉及矿粒和气泡相互碰撞流体动力学的重要著作^{[8][9]}。

目前，普遍承认下述矿粒捕获的概念模型：

(a) 矿粒必须同气泡发生流体动力学的碰撞；

(b) 在短促的碰撞时间里（几毫秒），矿粒和气泡两者之间的液体薄膜自行破裂。它的不稳定性来源于捕收剂覆盖矿粒的疏水性表面，而完全没有所谓的“负分离压”定量理论的作用。

(c) 接触表面（弯月面）必须在矿粒上迅速扩大，并抗得住位移，否则，矿粒就易因碰撞而脱落。

(b) 和 (c) 两个条件不充分，只能导致浮选速度的降低。例如，已经知道，矿粒表面上的双电层能够产生一个使残余液膜变薄的能垒，甚至在疏水性矿粒表面上也是如此^[10]。文献^[11]中提出，当用盐水作为介质时，煤浮选速度的提高，是由于上述能垒的降低。捷尔佳金等人断定，动力学扩散电泳效应比静电双电层的作用范围还要宽些。这一可能性看来仍是一个悬而未决的问题。

为了确定各种因素的数值，就必须测定浮选的绝对捕获比率。但是，这方面的资料似乎是一个空白。

试验体系的选择

大气泡摇摆和非直线地上升，它们的运动复杂。因此，注意力限于直径在1毫米左右的气泡，它们呈球体上升。

在用下面要介绍的借助旋塞产生上述气泡的干净玻璃装置中，对气泡的上升速度进行了一些测量，得到了与怀特公式^[12]相符合的结果。有关所研究的尺寸（0.4~1.2毫米）的上升气泡周围的速度场，还没有简单的理论公式。斯托克斯公式只适用于很低的雷诺数（ $Re \ll 1$ ），而牛顿公式对 $Re \sim 1000$ 是有效的。所研究的气泡的雷诺数范围为 $10 < Re < 100$ （对 $Re = 40$ 的流体，采用哈密莱克（Hamielec）等人^[13]的计算流函数）。

所研究的气泡具有同怀特公式相符的上升速度这一观察，揭示了这类气泡具有非环流表面（怀特公式是根据对固体球体测得的经验公式）。要得到更快上升的气泡，需特别谨慎。摇动用活性炭处理的蒸馏水，用细心清洗过的注射器产生气泡，可以得到与戈罗德茨卡雅（Gorodetskaya）^[14]与富尔斯特璠等人^[15]报导相符的上升速度。人所共知，表面活性物质的微量污染足以阻止非常微小的气泡表面的环流。尤其是上述作者已证明，起泡剂及其他表面活化剂在实际的浮选矿浆中确保小气泡形同结实的球体。同样，柯奇贝格（Kirchberg）等人^[16]发现，在存在起泡剂或捕收剂的情况下，直径为2.5毫米的气泡很快停止摆动，变为球形。很清楚，在实践中从来没有碰到过达到自由环流表面所要求的高度表面清洁度。这里介绍的试验结果，是在通常清洁的试验室条件下取得的，因此，并不是不合适的。

为了避免捕收剂作用，对表面硅醇基用甲醇处理而变得强疏水性（接触角近 90° ）的清洁石英颗粒进行了试验。在缺少可溶性表面活性剂的条件下，扩散电泳效应是不可能发生的，但用甲醇处理排除不了静电双电层^[17]。

设计的试验必须避免气泡重载，气泡间干扰，未附着矿粒跟在气泡后面的夹带，连生体或由（疏水性）石英凝聚而成的大聚

集体的捕收。最后使用的技术是基于气泡通过一个极稀矿浆柱上升。所安排的条件，使每个气泡仅可捕获几个矿粒，并且矿粒数可以容易地用显微镜确定。这个方法，是根据捷尔佳金等人^[6]的方法改革而成，但气泡是自由上升，而不是捕集的。

试 验

物料 将巴西水晶（纯净的石英）破碎、酸洗、干燥，并在一个玛瑙振动磨机中磨碎。这种石英产品在一个多段水析器中用流动自来水分级。用于试验的分级产品列于表1，其粒级分布用Zb型Coulter计数器确定。

表 1 试验用石英粒级明细表

粒 级	粒 级 范 围 (90%微米)	平 均 直 径 (微米)
A	33~46	40.5
B	26~38	31.4
C	20~31	24.6
D	14~23	18.0
E	8~18	12.0

每一粒级用氢氧化钠清洗后，再酸洗，而后洗涤和干燥。再按照拉斯柯甫斯基等人的方法^[17]，用三甲基氯硅烷使石英粉末表面甲基化。最终用纯苯清洗并干燥，产品就成为自由流动的疏水性粉末，贮存在干燥器中。

把称量过的部分疏水石英粉末撒在定量容积的二次蒸馏水中，制备成石英悬浮液。为使矿粒浸没，将容器抽真空并摇动。试验时，经搅拌的悬浮液，受一个浸没式超声波探头适度照射。矿浆的显微镜就地观察，肯定了这样的处理对消除聚集体是必要的，成功的（太强的照射会引起矿粒部分破碎）。

装置 装置原理示意于图1。

在A处纯水中产生的单个气泡，通过一定长度的矿浆柱(BC)上升，而后被捕集于D，在该处可从上面用显微镜观察它

们。计算出附着的矿粒数（通过气泡可看到矿粒）。夹带在气泡后面的任何矿粒，当气泡上升进入C上面的清水区时，被冲洗并沉下来。只计算那些因表面张力附着的矿粒。

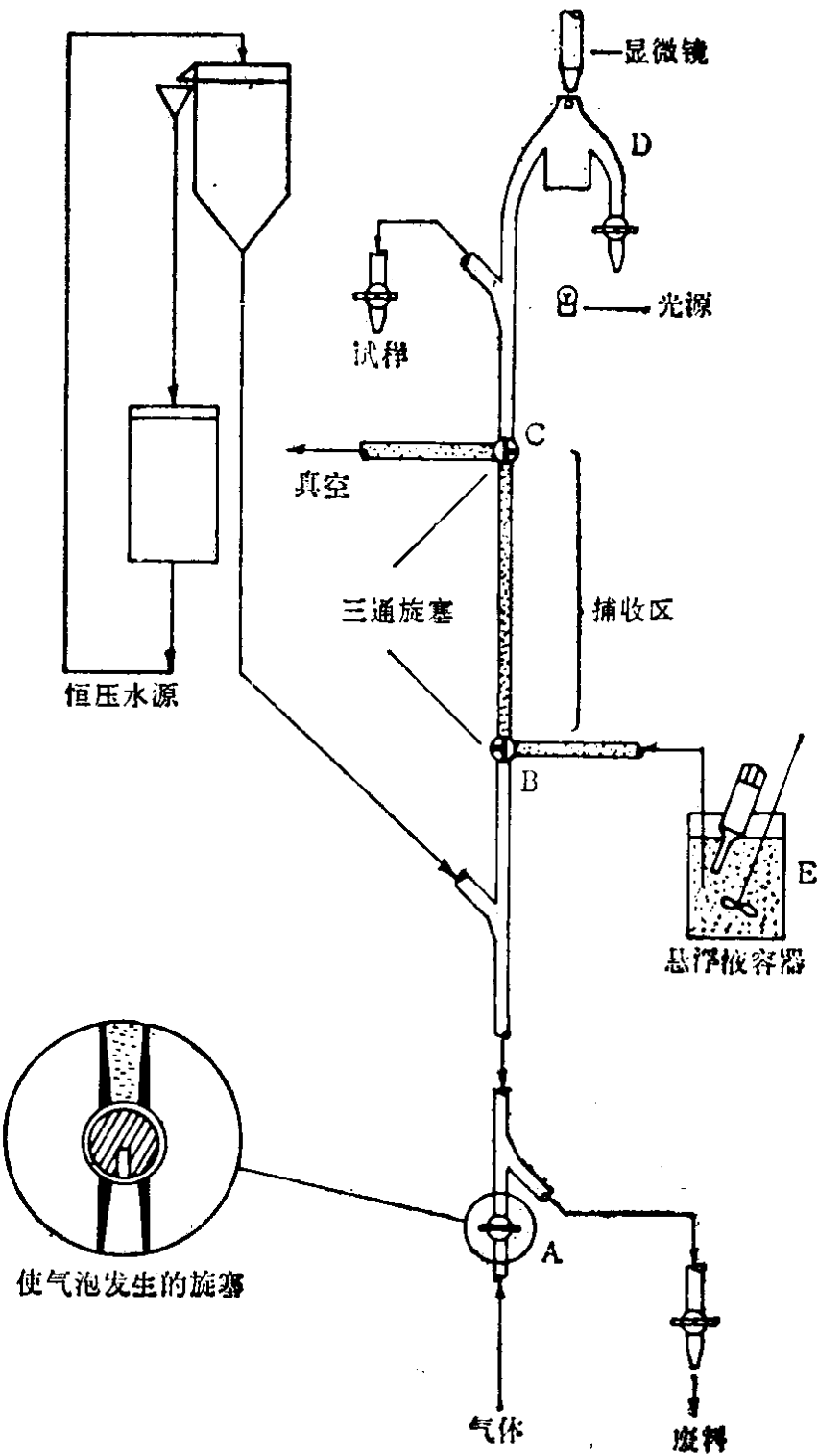


图 1 试验装置简图

产生单个气泡的装置A由留有一个起气体“贮存器”作用的空腔的旋塞组成，在旋塞中，管子被旋钮部分堵住。首先转动旋

钮，使空腔和处于可变压力（5~20厘米水柱）下的氮气源相通。然后，再转动旋钮，使压缩氮气膨胀并进入充满水的管子中，这样就放出尺寸前后一致的单泡。单泡由一股向下流动的清水暂时被阻而存在于AB区。

同时，在容器E中制备好已知浓度的矿浆，并用抽真空法使它通过BC区。然后，快速转动旋塞B和C，关闭通过AB的水流，使气泡上升通过矿浆并进入捕集槽（D）内。为了检查矿浆浓度，清洗出柱内全部矿浆，配成一定的体积，用Coulter计数器计算试样。管子BC的内部尺寸是已知的。在内径5毫米的细管内与在一个非常粗的管子中测量相比，前者对气泡上升速度稍有影响，约降低速度10%（为了做流体动力学计算，采用细管数值）。

用每种尺寸的若干气泡，和用不同尺寸的气泡（通过A下面氮气的不同压力得到）反复试验。而后试验装置清洗干净，用另一些粒级的石英再进行一系列试验。所有的测定是在室温约摄氏

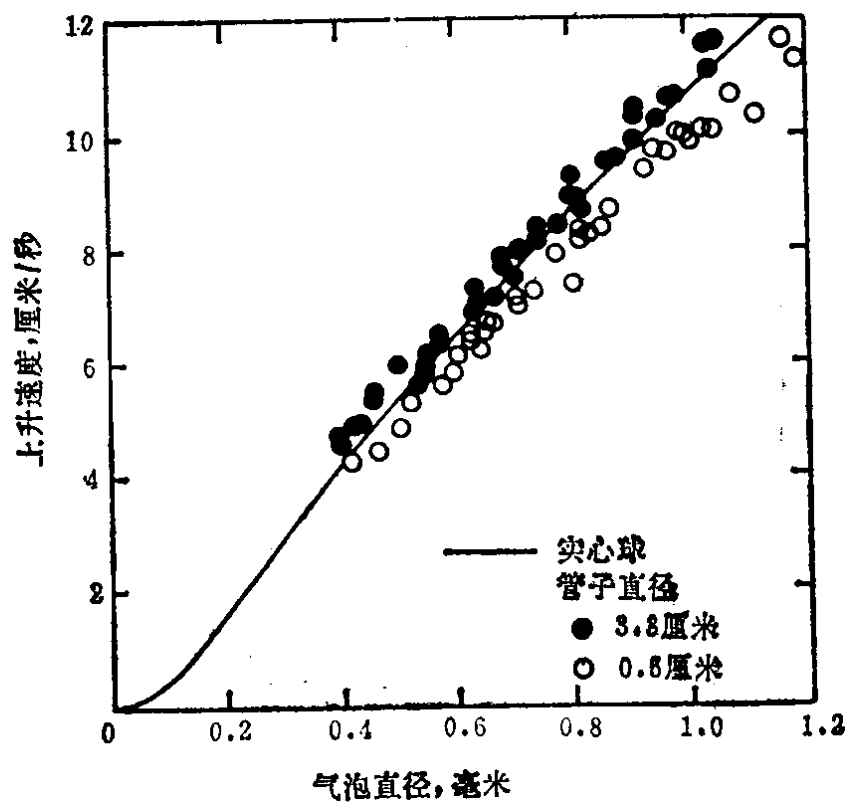


图 2 粗管和细管中的气泡上升速度

20°C下完成的。

结果: 图2示出气泡上升速度 (U_b) 与其直径的函数关系。
图中实线是用怀特的实心球公式^[12]计算得到的。

被给定尺寸 (直径 D_b) 的气泡捕获的给定粒 径 (d_p) 的矿粒的平均数, 可假设与BC柱中的矿浆浓度和BC的长度成正比。因此, 用比率常数表示被捕收矿粒的平均数是可能的。然而, 在这方面常见的是用无量纲的捕获“效率” E_c 来反映结果。 E_c 为:

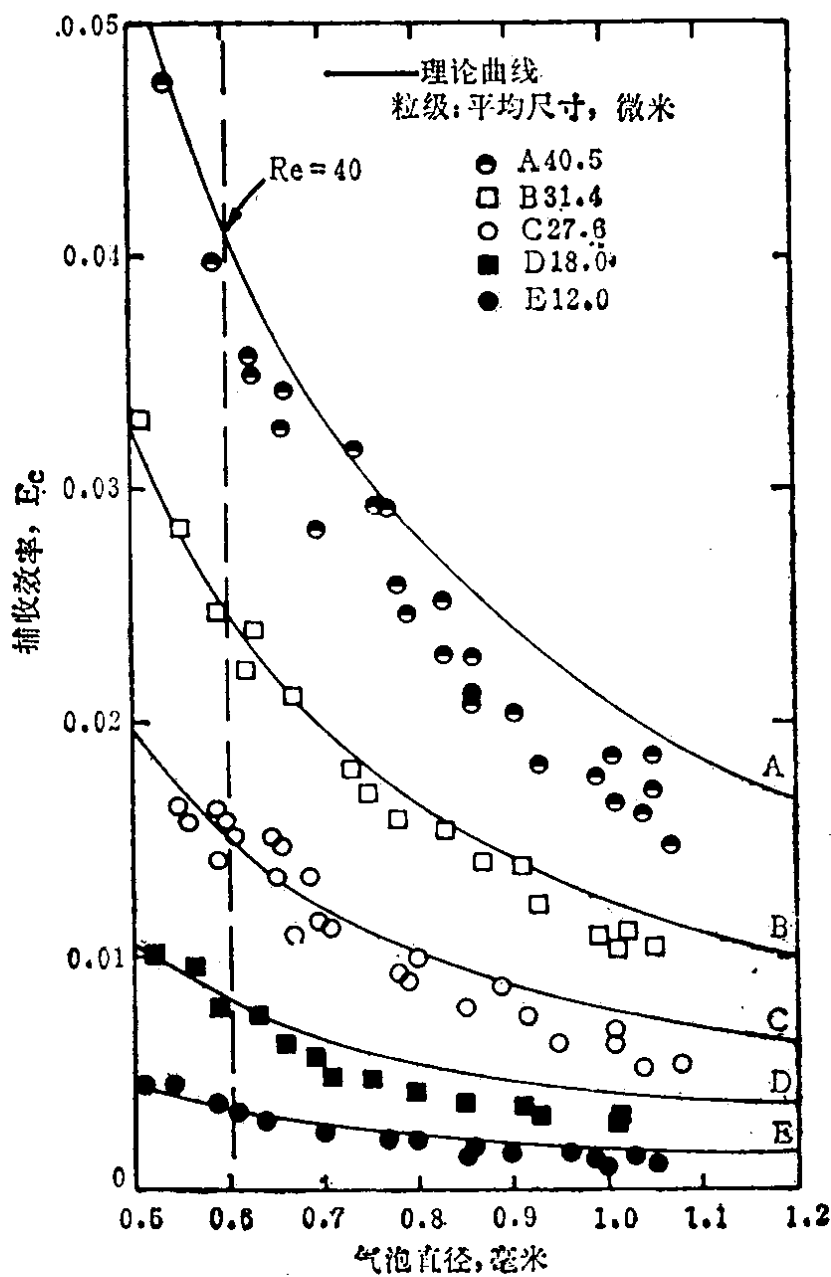


图 3 A—E粒级的捕收效率

$$E_c = \frac{\text{被气泡捕收的矿粒数}}{\text{处于气泡路途中的矿粒数}}$$

然后，可将 E_c 的试验值与理论计算值相比。应该指出， E_c 的定义只是建立在一个完全任意的参考标准之上。 E_c 不是一个对于理想浮选可达到1的数值，因为一个气泡不能完全“捕尽”处在它前面的所有矿粒。

图 3 表示所研究的五个疏水性石英粒级（表1）的捕获效率（ E_c ）与气泡尺寸的函数关系。其再现性大约是 $\pm 5\%$ 。理论曲线的计算方法在后面讨论。

在图4中，用无量纲形式表示数据，纵坐标是 $\log E_c$ ，横坐标是矿粒尺寸和气泡尺寸之比（ d_p/D_b ）。上面的虚线表示在假设势流下计算的碰撞效率，而下面的虚线则表示缓流下的碰撞效率（斯托克斯）。

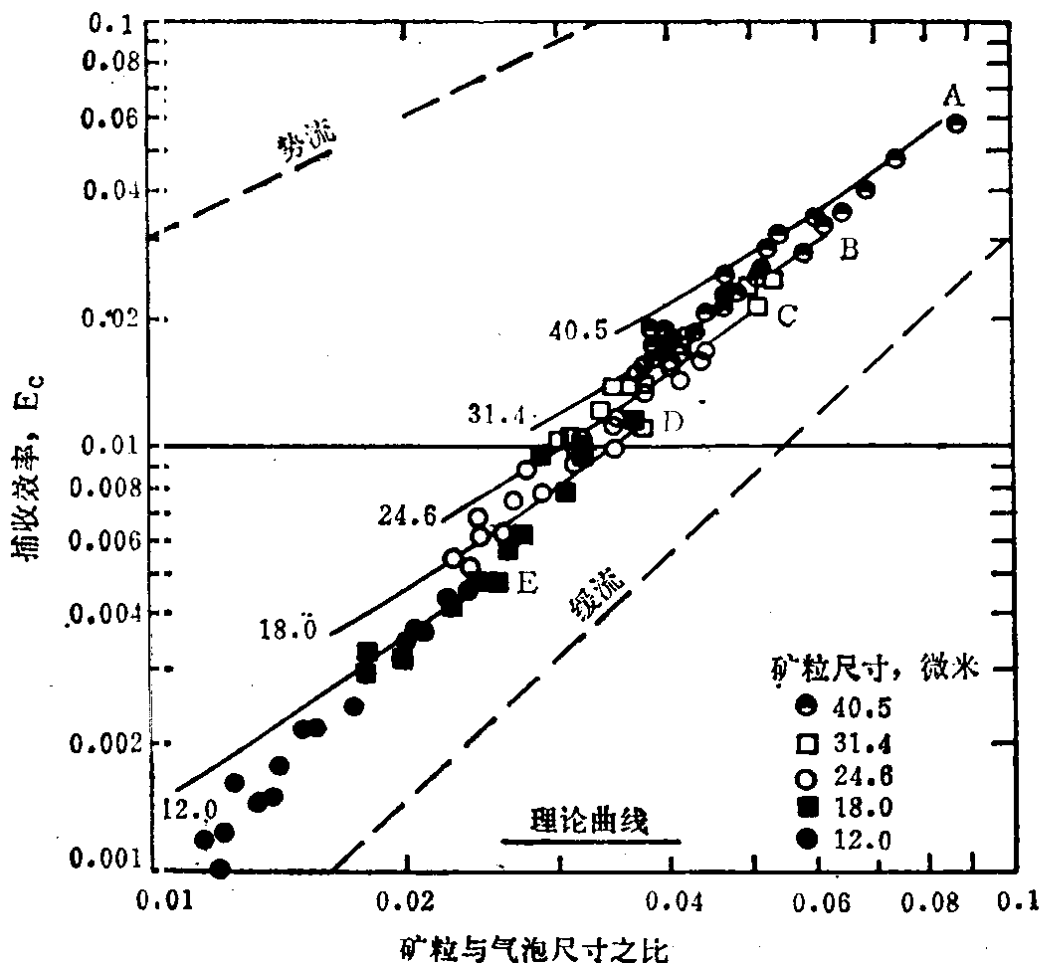


图 4 用无量纲形式表示的试验结果和理论曲线

讨 论

在由流体动力学碰撞率推导理论值的过程中,作了如下假设:

- (a) 矿粒和气泡两者都是球形的;
- (b) 只考虑重力和粘滞阻力;
- (c) 矿粒很小,不致影响气泡的运动;
- (d) 斯托克斯定律能适用于这类矿粒;
- (e) 可忽略不稳定状态的阻力项;

(f) 计算作用于矿粒上的阻力所采用的流体速度,是假想矿粒不存在时,在矿粒中心处的流体速度。

对于本文所研究的矿粒和气泡而言,这些假设是有根据的。

用无量纲变数表示的矿粒运动方程式可以写成

$$\text{Stk}(dv_p^*/dt^*) = v_{s,p}^* - (v_p^* - v_f^*) \quad (1)$$

其中 $v_p^* = v_p/U_b$; $v_f^* = v_f/U_b$; $t^* = U_b t/R_b$

$$v_{s,p}^* = \frac{2g(\rho_p - \rho_f)r_p^2}{9\eta U_b} \quad (\text{矿粒无量纲沉降速度})$$

$$\text{Stk} = \frac{\text{Re} \cdot a^2}{9} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right) \quad (\text{斯托克斯数})$$

$$\text{Re} = 2\rho_f R_b U_b / \eta \quad (\text{气泡雷诺数})$$

$$a = r_p / R_b \quad (\underline{v} \text{ 项是向量})$$

符号: v_p = 和气泡相对的矿粒速度; v_f = 和气泡相对的液体速度; U_b = 气泡上升速度; R_b = 气泡半径; r_p = 矿粒半径; ρ_p = 矿粒密度; ρ_f = 液体密度; η = 液体粘度; g = 重力加速度。

对方程式(1)积分,就能确定与气泡相对的矿粒轨迹。需要的是寻找刚好碰到气泡的矿粒轨迹,以及在气泡前并同它实际碰撞的矿粒量。很清楚,通常碰撞效率是三个参数的函数:

$$E_c = E_c(\text{Stk}, v_{s,p}^*, \text{Re})$$

环绕球形物体的液体运动可用对称轴流函数 ψ 表示,由 ψ 可

计算出球体周围的速度场。流函数主要取决于上升气泡的雷诺数。

如果上述流函数适用，为了求 E_c ，可用于积分式（1）。此积分一般必须采用逐步数值法。在简化情况下，当惯性项和另外各项（ $Stk < 0.1$ ）相比可忽略不计时，可得一解析解。这时， E_c 可写成

$$E_c = \frac{(1+a)^2}{(1+v_{sp}^*)} \left[v_{sp}^* + \frac{2}{(1+a)^2} \psi \right] \quad (2)$$

其中，流函数 ψ 就是取自气泡“赤道”直径处、并离开它一个矿粒半径处的值。

图4表示（a）斯托克斯型缓流（ $Re \ll 1$ ）；（b）势流（ $Re_b > 1000$ ）及（c） $Re_b = 40$ 的计算碰撞效率。可参阅文献[18]的表或文献[13]的显函数（近似的）。它们得出了相同的 ψ 值。

由图3可见，实验得到的捕收效率与碰撞效率的理论计算值，在试验误差范围内是一致的，5个粒级中至少有4个粒级如此。只有最大颗粒的偏差值得注意。

计算值似对 $Re = 40$ （气泡直径 ~ 0.6 毫米）最准；然而，对较大气泡的一般计算结果，用相同流函数表示也是相当好的。

因此看来，这种体系中的浮选速度完全受流体动力学碰撞率的控制，同气泡碰撞的每一个矿粒都被捕收。

图4所示结果，也有力地证明这领域全部理论的正确性（这是实际浮选中具有重要意义的因素之一），并说明选择缓流或势流的假设在此都会有重大差错。

值得注意的是，非常疏水的石英矿粒，在碰撞之后，具有100%的捕收效率。静电双电层的效应显然不大。当然，如果用低疏水性矿粒进行类似的试验，预期会降低捕收率。证明有无扩散电泳效应的干扰，必须采用比本文研究的矿粒要小的矿粒。

韩寿林 译
胡力行 校