

复合管道气液固三相流浆体水击压强 和水击波速计算

周云龙 洪文鹏 孙斌

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要 浆体中的含气量对水击压强和波速产生重要的影响。提出了考虑含气量的浆体即气液固三相流浆体水击波速计算公式, 分析了考虑气泡的存在对浆体水击波速的影响, 对某一复合管道内气液固三相流浆体水击压强进行了计算。

关键词 气液固三相流; 水击; 复合管道

中图分类号: TB126 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)Suppl.1-0209-04

THE CALCULATION ON PRESSURE AND WAVE SPEED OF THE SLURRY WATER HAMMER OF GAS-LIQUID -SOLID THREE-PHASE FLOW IN COMPLEX PIPE

ZHOU Yun-Long HONG Wen-Peng SUN Bin

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract The air capacity of slurry water was very important effect on pressure and wave speed of water hammer. This paper had presented calculation formula of wave speed of slurry water hammer considering air capacity for gas-liquid-solid three-phase flow. The effects of air bubble on wave speed of slurry water hammer were analyzed. The calculation of the slurry water hammer pressure of gas-liquid-solid three-phase flow was done for a complex pipe.

Key words gas-liquid-solid three-phase flow; water hammer; complex pipe

1 前言

水击是管道设计中要考虑的一种不稳定流。发生在水力输送固体物料的管道中的水击称为浆体水击。浆体水击的冲击力会引起管道系统中的压力脉动, 形成超压和气穴, 造成管道扭曲变形, 严重时可导致管道破裂, 甚至跑浆跑水, 引起停产, 影响管道系统的安全稳定运行^[1]。

浆体中的含气量对水击产生重要的影响, 两相流管道中由于各种原因会掺入少量的气体, 而气体的弹性模量远小于固体和液体, 因此气体的量尽管很少, 对水击波速的影响却很大。T.S.Kobori 等人研究了清水条件下气体对水击波速的影响, 研究表明: 即使气体含量很少, 仅为千分之一, 波速可减少一半^[2]。而原有的水击计算方法不论是清水的还是浆体的都没有考虑气泡的影响^[3~5]。所以本文分析

了含气量对浆体水击的影响, 提出了考虑含气量的浆体水击波速计算公式, 在此基础上对某一复合管道内气-液-固三相流浆体水击压强进行了计算。

2 气-液-固三相流浆体水击压强计算方法

在管道末端阀门突然关闭时, 气固液三相的流速可以统一考虑, 这与单相流很相似。所不同的是流体的压缩变形, 由于固体、液体和气泡的弹性模量不同, 其压缩的体积有固体颗粒的压缩量和液体的体积压缩量和气泡压缩量组成。

如图 1 所示, 假定管道初始流速为 U_{m0} , 关闭阀门后的终了流速为 U_{m1} , 则 $\Delta t = \Delta L/a_{m1}$ 时段进入 ΔL 段的浆体体积为:

$$V_m = (U_{m0} - U_{m1}) A \Delta t = \Delta U_m A \Delta t \quad (1)$$

若固体颗粒体积浓度为 S_s ，气相体积浓度为 S_g (含气量)，浆体水击引起的附加压强为 P ， ΔL 管段内液体的体积压缩变形量为：

$$V_l = \frac{P}{K_l}(1 - S_s - S_g)A\Delta t \quad (2)$$

同理 ΔL 管段内，固体颗粒的体积压缩变形量 V_s ，可由固体颗粒弹性模量 K_s 求出：

$$V_s = \frac{P}{K_s}S_sA\Delta L \quad (3)$$

气泡的体积压缩变形量 V_g 可由气体体积弹性模量 K_g 给出：

$$V_g = \frac{P}{K_g}S_gA\Delta L \quad (4)$$

管道膨胀变形量 V_p 如上所述为：

$$V_p = \frac{PD}{E_p e}A\Delta L \quad (5)$$

式中， D 为管径， E_p 为管壁的弹性模量， e 为管壁厚。

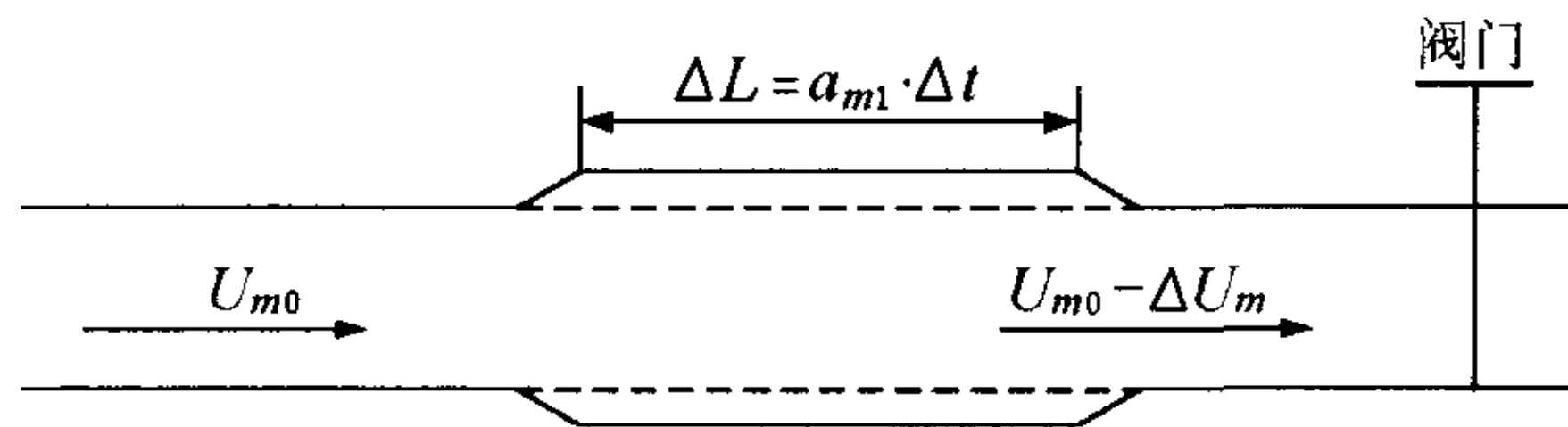


图 1 水击波速推导用图

根据流体连续性原理，流入的浆体量等于液体、固体颗粒、气泡的体积压缩量和管道膨胀的体积：

$$V_m = V_l + V_s + V_g + V_p \quad (6)$$

式 (1)~(5) 代入式 (6) 得：

$$\begin{aligned} \Delta U_m A \Delta t = & \frac{P}{K_l}(1 - S_s - S_g)A\Delta t + \frac{P}{K_s}S_sA\Delta L + \\ & \frac{P}{K_g}S_gA\Delta L + \frac{PD}{E_p e}A\Delta L \end{aligned} \quad (7)$$

由

$$a_{m1} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (8)$$

又由动量定理 $AP\Delta t = \rho_m A\Delta L\Delta U_m$ 得：

$$\Delta U_m = \frac{P}{\rho_m a_{m1}} \quad (9)$$

将式 (7) 代入式 (9) 得：

$$a_{m1} = \sqrt{\frac{K_l/\rho_m}{1 - S_s - S_g + \frac{K_l}{K_s}S_s + \frac{K_l}{K_g}S_g + \frac{K_l D}{E_p e}}} \quad (10)$$

该式为气液固三相流浆体水击波速的计算公式。其中， $\rho_m = \rho_s S_s + \rho_g S_g + (1 - S_s - S_g)\rho_l$ 为混合流体的密度。

对于具有三层复合管道的弹性模量 E_p 可由下式计算：

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{E_1 \ln(D_1/D)}{1 - \mu_1^2} + \frac{1}{2} \frac{E_2 \ln(D_2/D_1)}{1 - \mu_2^2} + \frac{E_3 e_3}{D_2} \quad (11)$$

式中， E_1 为第一层管道的弹性模量，Pa； E_2 为第二层管道的弹性模量，Pa； E_3 为第三层管道的弹性模量，Pa； D 为第一层管道的内径，mm； D_1 为第一层管道的外径 (第二层管道的内径)，mm； D_2 为第二层管道的外径 (第三层管道的内径)，mm； e_3 为第三层管道的壁厚，mm； μ_1 为第一层管道的泊松比； μ_2 为第二层管道的泊松比。

在管道水力输送中，由于要考虑到气液固三相流的稳定性，一般固体颗粒和气泡尺寸均较小，绝大多数可认为是均质流。均质流由于固体颗粒、气泡和水的流速一致，因此气液固三相流浆体水击压强计算关系式，可以借助单相流的水击压强计算关系式：

$$p = \rho_m a_{m1} (V_0 - V_1) \quad (12)$$

式中， ρ_m 为浆体混合物的密度， kg/m^3 ； a_{m1} 为浆体压力波的波速， m/s ； V_0, V_1 为浆体混合物的初始速度和终止速度， m/s ； p 为浆体的浆击压强，Pa。

3 考虑气泡的存在对浆体水击波速的影响

以文献 [3] 中的单一管道为例，我们来计算一下气泡的存在对浆体水击波速的影响，计算中的一些参数取值如下：管径 $D=0.148 \text{ m}$ ，浆体中固相密度 $\rho_s = 4.76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，固相体积含量 $S_s = 0.168$ ，固相弹性模量 $K_s = 1.05 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，水的弹性模量 $K_l = 2.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，气相的弹性模量估得 $K_g = 2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，A3 钢管的弹性模量为 $E_p = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，管壁厚为 $e=0.005 \text{ m}$ 。通过计算得出含气量和浆击波速曲线如图 2 所示。

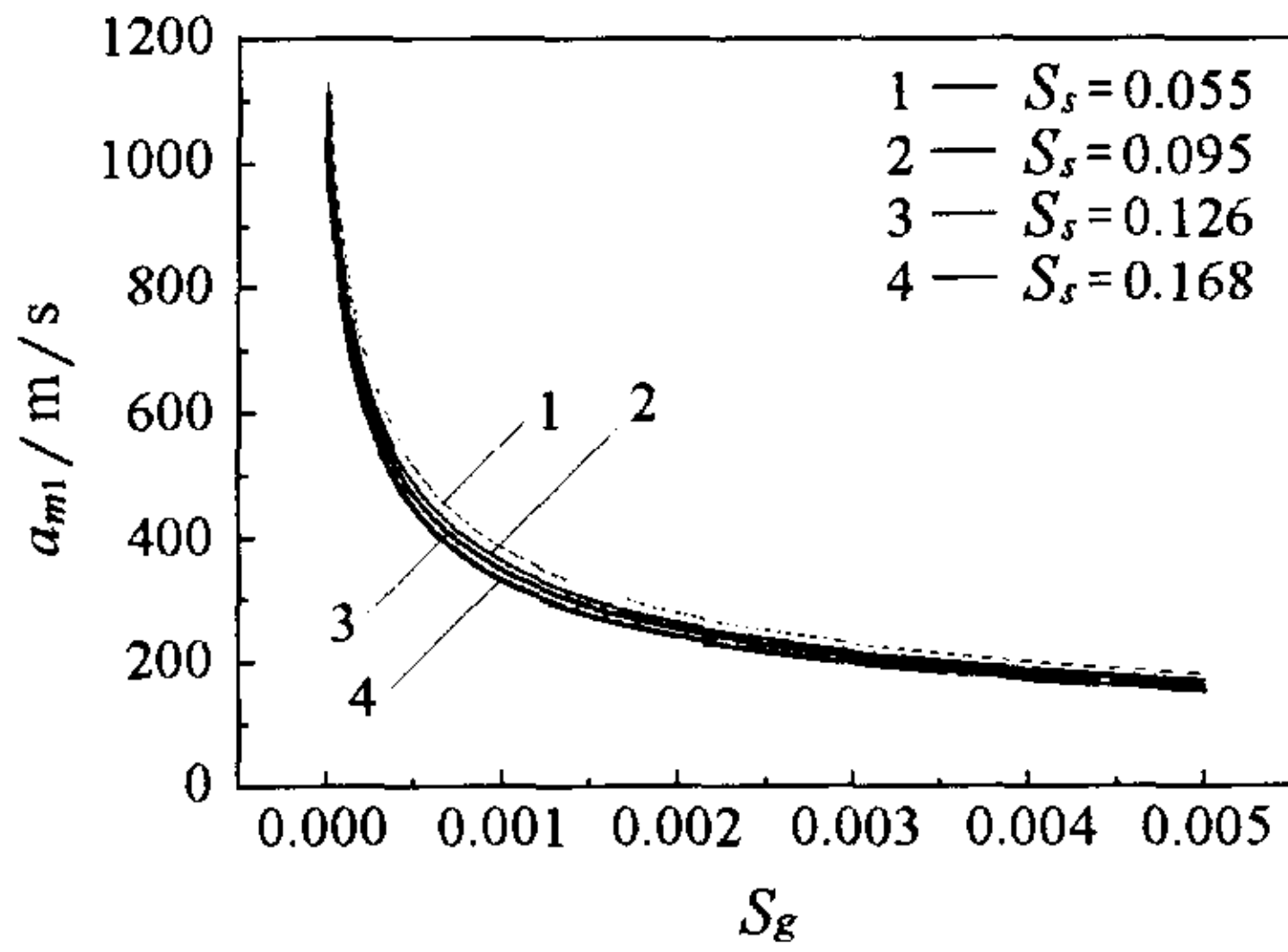


图 2 波速随含气量变化曲线

改变浆体中固相的含量以及固体的种类,可以分别得到类似的曲线图 3 和图 4。从图 2~图 4 中可以看到少量气泡的存在可以使浆击波速明显减小。从图 2 中可以看出: 如当 $S_g=0.001$ 时, 浆击波速 a_{m1} 由原来的 1047.6 m/s, 减小到原来的 32.45%(340 m/s); 当 $S_g=0.002$ 时, 浆击波速 a_{m1} 由原来的 1047.6 m/s, 减小到原来的 23.86%(250 m/s); 当 $S_g=0.005$ 时, 浆击波速 a_{m1} 由原来的 1047.6 m/s, 减小到原来的 14.79%(155 m/s)。所以在水击波速公式中考虑含气量的影响是非常必要的。分析浆体水击波速的公式(10), 当固体体积含量和气相体积含量为零时即得到清水水击的波速公式。

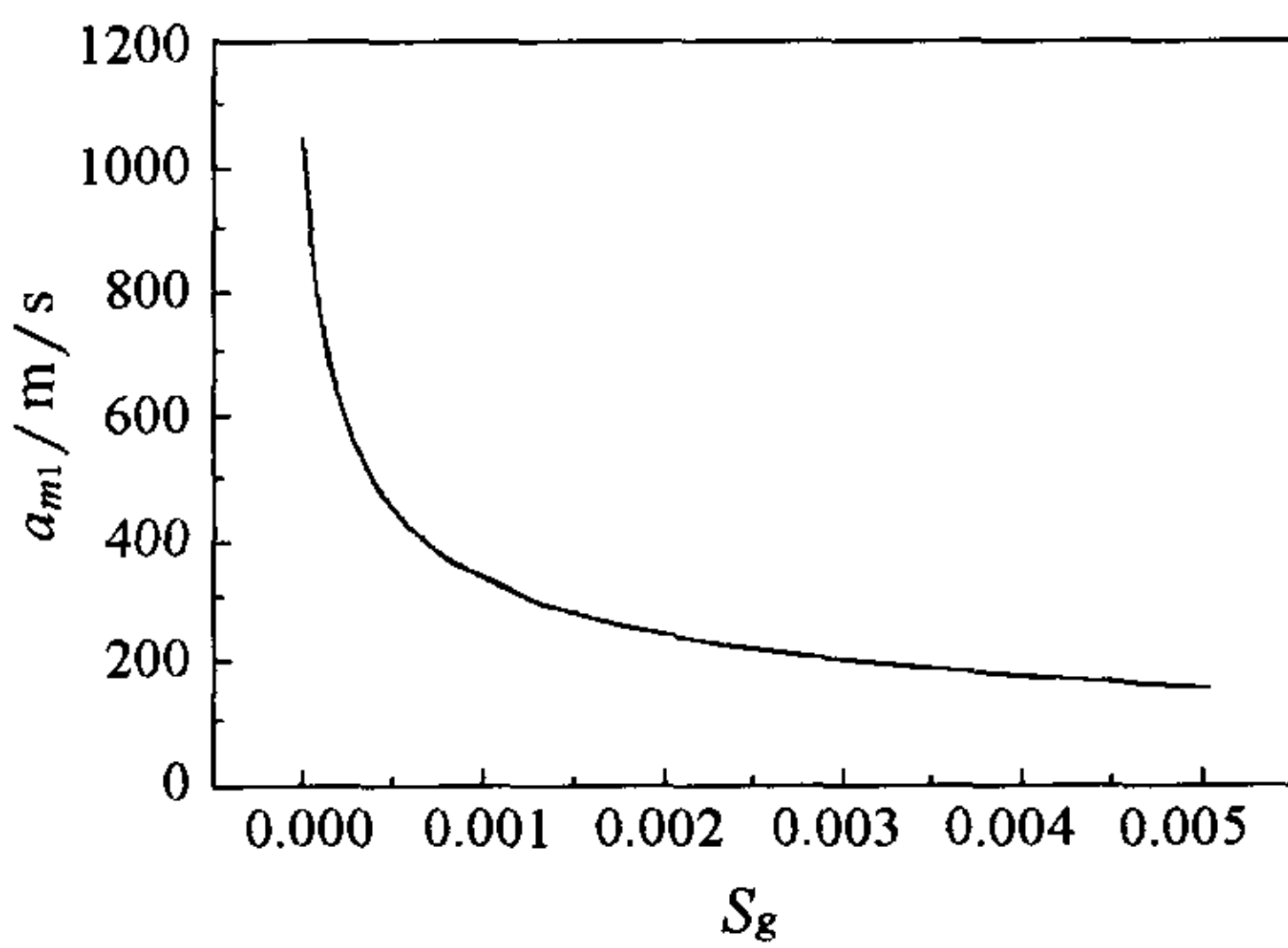


图 3 固相含量改变时波速随含气量变化曲线

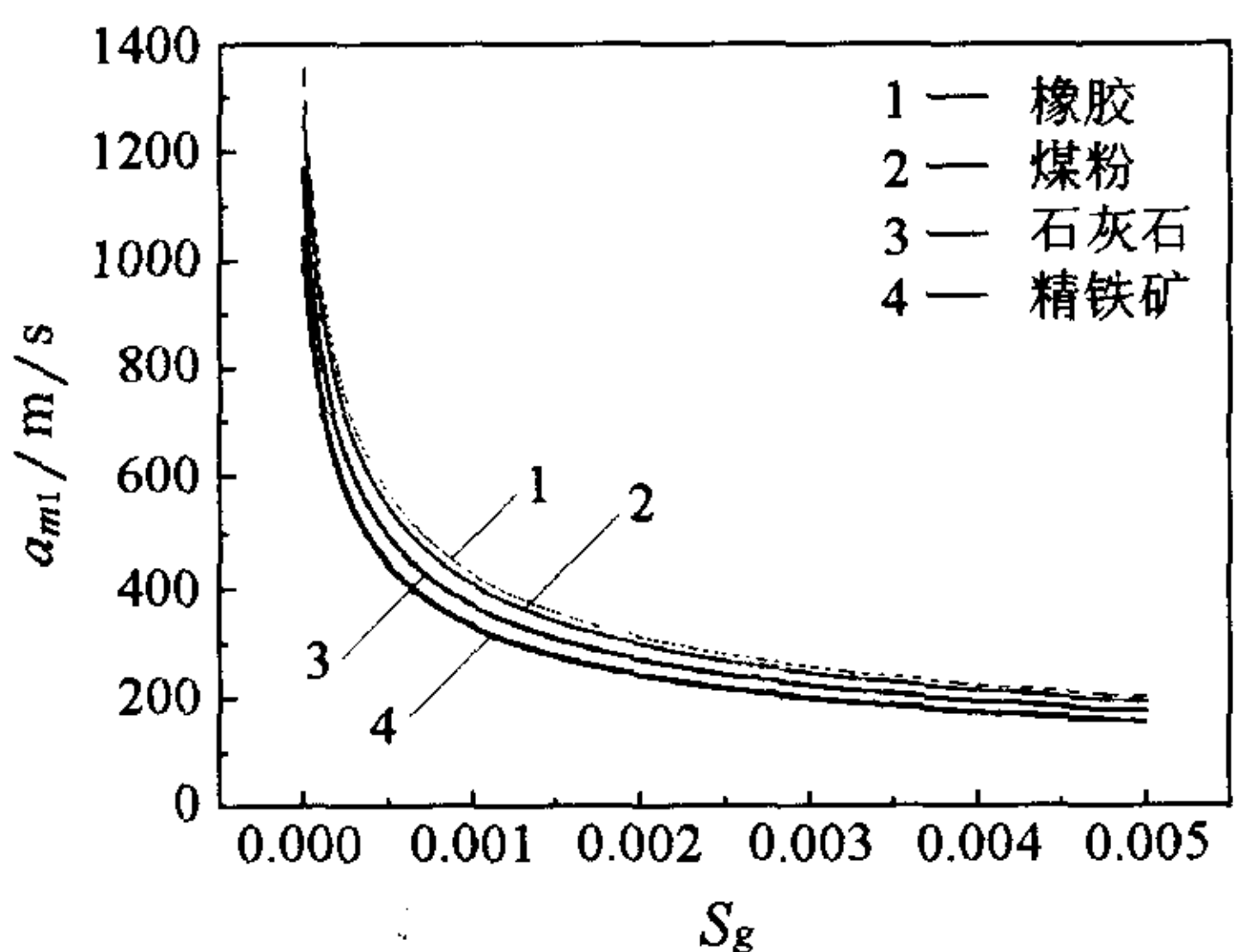


图 4 固相种类改变时波速随含气量变化曲线

4 工程计算

某电厂除灰系统用水力除灰, 灰渣池的灰浆通过渣浆泵加压后, 送往小山后面的灰场, 灰渣泵轴线与小山最高点的位差为 190 m, 灰浆管道是由一平段和一爬坡段组成, 水平段的管长 $L_1=1000$ m, 爬坡段管长 $L_2=2200$ m。如图 5 所示。

输灰系统的特点是, 一是输灰管路长; 二是灰渣泵出口与输灰管路最高点的位差大。因此存在一个问题: 一旦运行过程中灰渣泵突然断电停转后, 在 190 m 落差下, 灰浆必将回流, 产生水击现象, 有可能对灰渣泵产生具大的冲击力, 最后导致灰渣泵的损坏, 威胁着电厂的安全和经济生产, 所以非常有必要对液 - 固两相流系统浆体水击现象进行分析和计算。

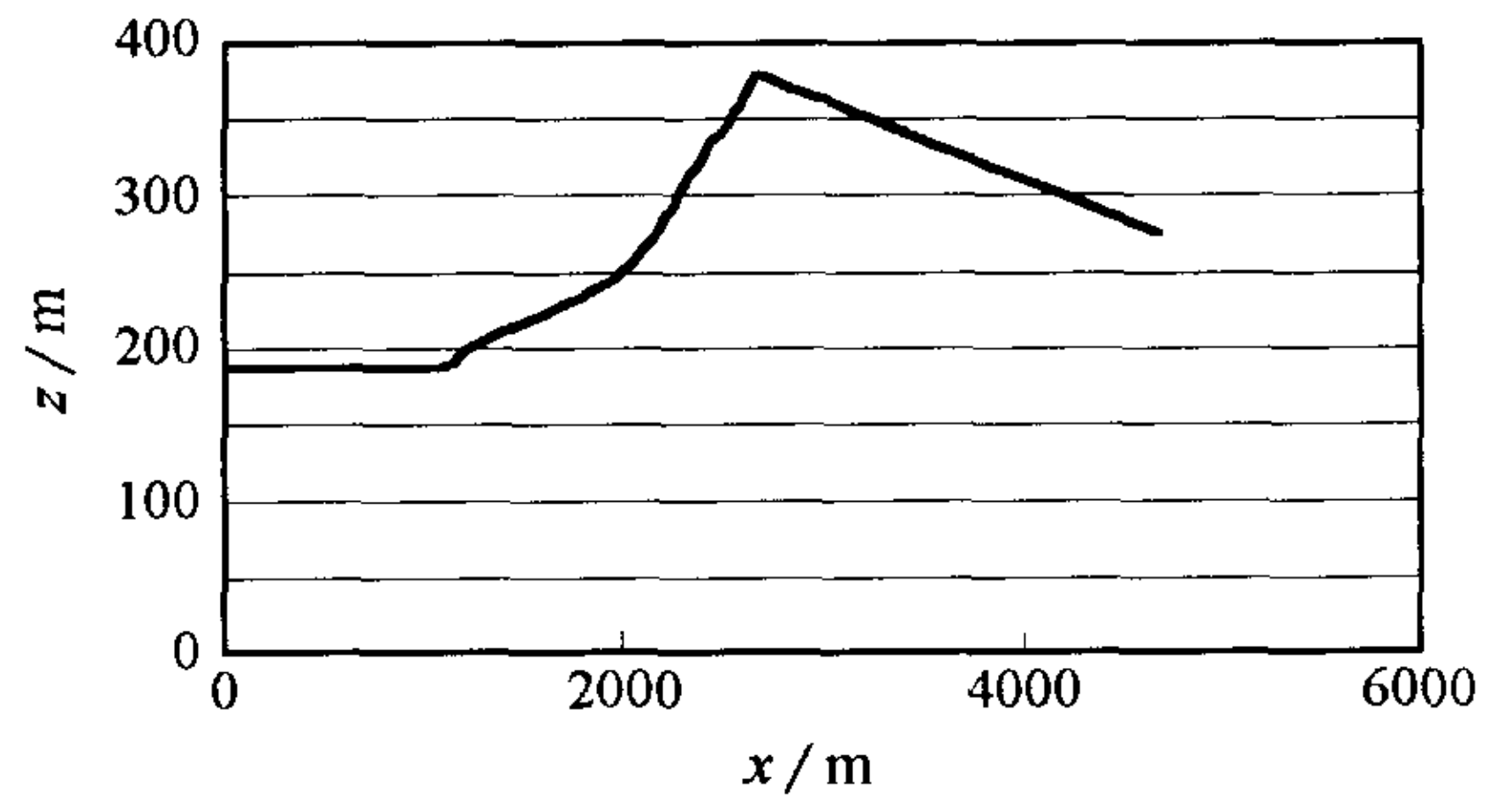


图 5 输灰管道布置示意图

除灰泵选用国产 250ZJ-A90 型渣浆泵, 其参数: $L_1=137$ m, $n=960$ r/min, 由两台泵串联使用。输灰管道采用铸石复合管, 如图 6 所示。该铸石复合管由三层材料组成, 外壁为钢管, 中间为水泥砂浆充填层, 内层为铸石管。灰浆管的尺寸和有关理化性能如表 1 所示。

根据设计院提供此除灰系统设计流量 $q_v=1180$ m³/h, 灰水重量比为 1:10。灰的真实密度为 $\rho_s=2000$ kg/m³。

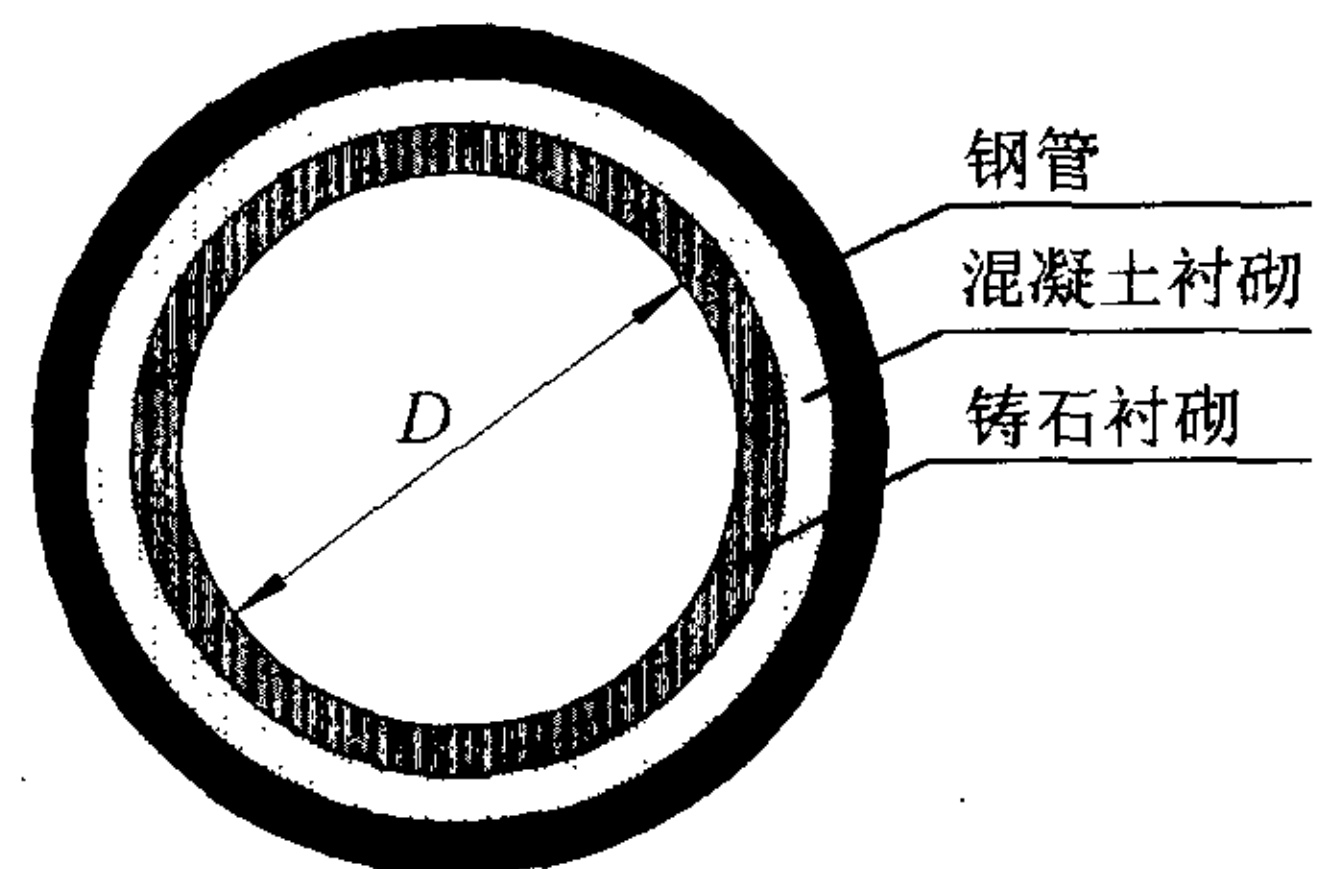


图 6 铸石复合管示意图

表 1 输灰浆的铸石复合管尺寸和有关理化性能

	内径 D (mm)	壁厚 e (mm)	弹性模量 E (Pa)	泊松比 μ
铸石	400	20	167×10^9	0.25
混凝土	440	4	$14 \times 10^9 \sim 30 \times 10^9$	0.1~0.5
钢管	448	6	212×10^9	0.27

作者^[1]对此输灰系统浆击压强进行了计算。表 2 为文献 [1] 灰浆回落速度计算结果。表 3 为文献 [1] 典型工况下浆击压强计算结果。表 4 为文献 [1] 典型工况下浆体水击波速计算结果。从表中可以看出，浆击总压强大于泵体能承受的压强 (4.0 MPa)。为了降低浆击压强，对渣浆泵或输灰管道需要采取一定的措施，以保证安全生产。降低浆体压强的一个非常有效的措施，就是参气降低波速，缓和浆击压强。

表 2 灰浆回落速度计算结果一览表

序 号	管内沿程 阻力系数	管内流速 (m/s)	灰浆开始倒 流时间 (s)	灰浆向上运 动距离 (m)	灰浆回落 速度 (m/s)
1	0.0165	2.61	2.747	3.585	2.166
2	0.0170	2.61	2.734	3.568	2.154
3	0.0175	2.61	2.722	3.551	2.141
4	0.018	2.61	2.709	3.535	2.129
5	0.0183	2.61	2.70	3.525	2.12

表 3 典型工况下浆击压强的计算结果

序 号	浆击波速 a_{m1} (m/s)	浆体回落速度 V' (m/s)	浆击压强 P (MPa)	浆击总压强 P_{Total} (MPa)
1	1071.254	2.12	2.379	4.29
2	1071.254	2.166	2.43	4.34
3	1072.424	2.12	2.381	4.29
4	1072.424	2.166	2.433	4.34

表 4 典型工况下浆体水击波速

序 号	管道弹 性模量 $E_p \cdot 10^{10}$ Pa	灰粒弹 性模量 $E_s \cdot 10^9$ Pa	水弹性 模量 $E_w \cdot 10^9$ Pa	混凝土 泊松比 μ	灰浆混合 物密度 $\rho \text{ kg/m}^3$	浆击 波速 a_{m1} m/s
1	2.839	14	2.0	0.1	1047.6	1071.254
2	2.839	14	2.0	0.5	1047.6	1071.254
3	2.839	14	2.0	0.1	1047.6	1071.254
4	2.839	14	2.0	0.5	1047.6	1071.254
5	2.839	30	2.0	0.1	1047.6	1072.424
6	2.839	30	2.0	0.5	1047.6	1072.424
7	2.839	30	2.0	0.1	1047.6	1072.424
8	2.839	30	2.0	0.5	1047.6	1072.424

采用本文提出的计算方法，计算了参气即气液固三相流浆体水击压强和浆击总压强，如图 7 所示。

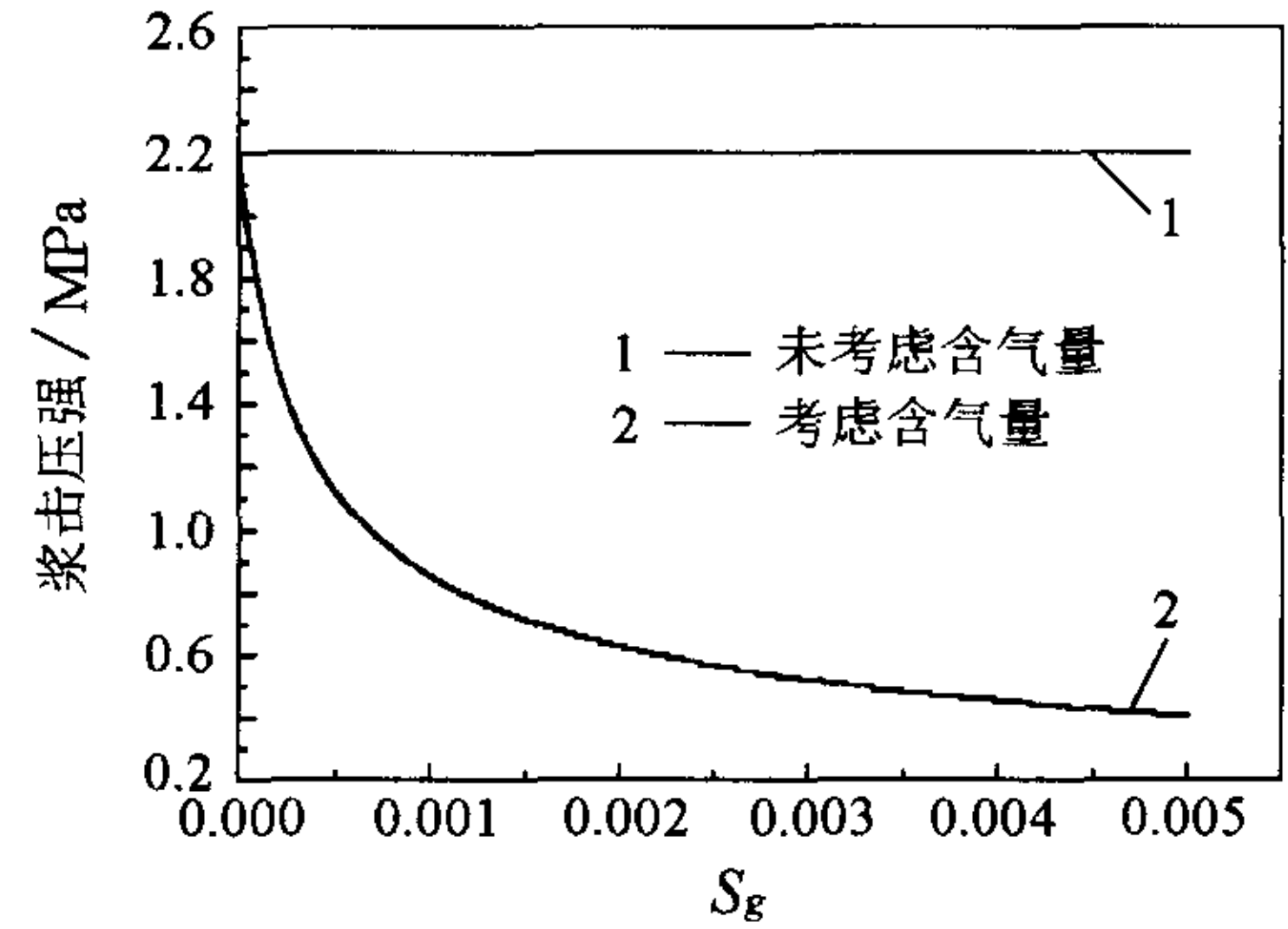


图 7 含气量变化对浆击压强的影响

从图 7 中可以看出：当 $S_g=0.001$ 时，浆击压强 p 由原来的 2.2 MPa，减小到原来的 36.8% (0.81 MPa)；当 $S_g=0.002$ 时，浆击压强 p 由原来的 2.2 MPa，减小到原来的 28.18% (0.62 MPa)；当 $S_g=0.005$ 时，浆击压强 p 由原来的 2.2 MPa，减小到原来的 14.54% (0.32 MPa)。由此可见，采用参气确实是减低浆击压强的主要措施。

5 结 论

(1) 本文推导了考虑含气量的气液固三相流浆体水击波速计算公式，计算了含气量对气液固三相流水击波速的影响，计算表明，少量气泡的存在将会使水击波速明显降低。

(2) 对某一复合管道内气液固三相流浆体水击压强进行了计算。结果表明参气确实可以明显降低浆击压强。

参 考 文 献

- [1] 周云龙. 复合管道内液 - 固两相流浆体水击压强计算. 工程热物理学报, 2004, 25(2): 251-254
- [2] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学. 北京: 清华大学出版社, 1994. 242-251
- [3] 韩文亮. 伪均质固液两相流水击的数值模拟: I - 理论. 有色金属, 2000, 52(1): 37-41
- [4] Yang Jian-dong, Wu Rong-qiao. On Basic Equation of Water Hammer. Journal of Hydrodynamics, 1996 Ser.B, 8(2): 62-71
- [5] 韩文亮. 关于浆体水击压力波波速的实验研究. 水利学报, 1990, (11): 41-47