

有压输水管道系统气液两相瞬变流研究综述

郑源,刘德有,张健,索丽生

(河海大学水利水电工程学院,江苏南京 210098)

摘要 综述一个多世纪以来,有压输水管道系统中有关气体释放、空穴流及液柱分离、计算分析方法、水锤防护及实验研究等方面的主要研究进展,并提出还需对气液两相瞬变流基本理论、空气进排气阀的特性、截留气团的动态特性和动力特性、实际工程优化设计理论等诸多方面进一步研究。

关键词 有压输水管道系统;液柱分离;气液两相瞬变流;水锤;综述

中图分类号:TV672.4 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2002)06-0021-05

近年来,国内外学者对有压输水管道系统气液两相瞬变流的研究持续增长,其原因在于随着各国经济的发展和人们日益增长的需水要求,越来越多的城市为了解决日趋尖锐的水资源供需矛盾,不得不兴建大型水泵输水工程到几十公里以外甚至更远的水源取水,这类长距离输水工程,途中有泵、阀门和水锤防护措施等,因某种原因,如输水管路系统发生事故停泵、阀快速关闭等,此时管道内将发生复杂的瞬变流现象,由此产生的内水压力可能导致管道爆裂或凹瘪破坏,因此,输水工程在设计时,都应该事先作水锤分析、预测和模拟事故工况下水锤的发生和传播规律,其中除了考虑常规正压水锤以外,还必须考虑在管道的某些部位可能发生气体释放、产生空穴流和液柱分离等气液两相瞬变流情况,对有压输水管道系统气液两相瞬变流进行全面的理论分析和预测控制研究,是优化工程设计、降低工程造价、确保工程安全运行的关键,具有重要的理论意义和实用价值。

近年来,每年发表有关管道系统气液两相瞬变流方面的学术论文数以百计,本文拟对其中涉及有压输水管道系统内气体释放、空穴流及液柱分离、计算分析方法、水锤防护及实验研究等方面的研究成果进行扼要论述,以探索该领域的研究方向和发展趋势。

1 气体释放的研究

有压输水管道系统水锤的研究自19世纪下半叶便开始了,当时研究主要偏重于对过程的描述,而对于有压管道系统中出现气体释放研究是从20世纪60年代初兴起的,如L^[1]等对矩形截面管中气体释放现象作了理论探讨,但未涉及损失项,未考虑低压气体释放的确定影响,误差比较大,Kobori^[2]等对同一压力条件下,不同含气量与波速的关系进行试验和理论探讨,获得了理论与试验基本一致的结果,Peassal^[3]较系统地,对不同压力条件下波速与含气量的关系进行了研究,建立了公式,并画成图表,以便直接查阅,上述工作仅限于静态过程,在瞬变流动过程中,压力是变化的,且液体在低压过程中将释放气体,因此含气量也是变化的,Schweitzer^[4]指出,一般液体都溶解一定量的气体,这些溶解于液体的气体在低压条件下会释放气体,在新的压力条件下达到新的溶解平衡状态,即所谓的亨利定律,Swaffield提出按亨利定律计算气体释放量,由于在瞬变流过程中的压力是随着时间变化的,因此他假设了一个气体释放系数,因影响此系数的因素很多,主要因素为流体的挠动度、原气体的含量、压力波动幅度及气体溶解系数等,要作定量计算是极其困难的,Driels^[5]对气体释放和重新吸收作进一步试验研究指出,气体在液体中一经释放,它被重新吸收的速率很慢,他认为气体释放过程是一个单向过程,Wylie^[6]等在管道系统伴有气体释放研究和水锤理论与分析方面做出了突出贡献,他们假定气体释放过程为单向过程,并假设一个气体释放率,得出不同的气体释放率瞬变过程

将不同,但就气体释放系数对水锤的影响,则探讨不够。Baasir^[7]等研究了液柱分离期间的气体释放,通过实验和量纲分析,得出了计算气体释放的经验公式。Kranenburg^[8]以气泡动力学为基础,把气体释放和再溶解表示为气泡半径、亨利常数、压力和气泡相对于周围液体的相对速度等函数,但在该模型中气液相之间相对运行速度很难给定,有时凭经验取值,因而产生了较大随意性。Kalkwijk^[9]及 Martir^[10]等也从不同的角度研究了气体释放的影响,建立了几种数学模型,对水锤理论的研究起到了极为重要的推广作用。

近年来,国内学者对有压管道系统产生气体释放的研究也取得了不少成果。如,杨建东^[11]详细论述了流体瞬变过程中气体释放的物理过程以及三个必不可少的条件,建立了适用于均匀流模型的气体释放速度公式。刘光临^[12]等探讨了在事故停泵水锤过程中因气体释放而形成的含气均匀流的水锤问题。

2 空穴流、液柱分离的数模研究

有压管道系统中伴有空穴流、液柱分离两相瞬变流现象的研究可以追溯到20世纪30年代,当时,人们对于有压管道系统发生液柱分离已有了初步的认识。从60年代起对其研究得到了重视,70年代初人们开始考虑气体释放与液柱分离现象的联合分析。如,Wylie^[6]等提出了常波速的集中空穴模型,用以解决波速不变、无气体释放情况下液柱分离问题。Kranenburg^[13]等提出了气泡均匀分布模型,认为气泡均匀分布在液体中,波速是气体质量和压力的函数,把伴有气体释放和液柱分离的有压管道中的流动分成三个区域,液柱分离区、空穴区和常规水锤区,这种模型计入了气体释放,考虑了所有三个可能的区域,所给出的方程在空穴区和水锤区都有效,模型把空穴流流态近似看作气泡状气液两相流,无数小气泡均匀地掺混在液体中并随其一起流动,考虑了液柱分离处气体释放和液体汽化的相变作用,而且同时计入邻近液柱分离处的空穴流中其气体含量对水锤波速的影响。Brown^[14]等提出了离散数学模型,认为气泡集中在管道的各个计算断面上,每一个气泡随压力的变化膨胀规律符合完善气体状态方程,而在两个计算断面之间管道液体中没有气体,波速是常数。Simpson^[15,16]、Bergant^[17,18]等比较了几个常见离散数学模型,推荐采用Wylie的自由气体离散模型,该模型适用于各种水力瞬变现象的计算分析。叶开宏^[19]等改进了Wylie的自由气体离散模型。还有些学者提出了其它的数学模型,如,Vreugdenhil^[20]等给出分析长水平管中空穴的两个数学模型,在第一个模型中,假设空穴中气液两相流是均质的,而对于水锤区则采用习惯的常规水锤连续方程和运动方程,第二种模型又叫分离液流模型,假设空穴区管道的顶部有一层薄的空穴,这两种模型均忽略了空气释放影响。Weyler^[21]等根据实验观测的结果,推导了预测空穴区的附加动量损失的半经验公式。

近年来,国内学者对有压输水管道系统伴有空穴流、液柱分离两相瞬变流现象的研究也取得了较大进展。蒋劲^[22]等提出了用矢量通量分解法求解气液两相瞬变流的方法。杨开林^[23]等对输水管道气泡动力特性进行了研究。于必录^[24]等对有压输水管道系统发生液柱分离现象进行理论研究,认为在有压输水管道系统中,液柱分离是当泵系统的瞬态压力降低到汽化压力时,发生在管道系统中的一种局部现象,它涉及诸如气体释放、液体气化、水锤压力波速变化以及气液相之间质量与动量交换等复杂的物理现象。田立言^[25]等采用高速摄影方法对不同流速、不同含沙量中由电火花生成的空泡溃灭进行了研究。索丽生^[26,27]等对水锤进行了理论研究,开展了许多方面的水锤分析,并将理论研究应用于实际,完成了若干工程研究项目。

3 水锤防护的研究

有压输水管道系统两相瞬变流研究目的是为了优化工程设计,降低工程造价,确保工程安全运行,而水锤防护的研究是解决上述问题的关键。为此,国内外众多学者对该问题进行了大量的研究,并提出了若干水锤防护装置。Wylie^[6]等研究了有压输水管道系统水锤防护的多种装置,包括单、双向调压塔,水锤消除器,气压罐,空气阀,止回阀等防护装置。Stephenson^[28]和 Lee^[29]等对空气阀的性能进行了研究。刘竹溪^[30]等对泵站水锤及防护装置进行了大量分析研究。刘光临^[31,32]等研究了水泵出口阀关闭程序对管道系统压力和调压塔水位变化影响。王学芳^[33]等研究了长输水管线中安装空气进排气阀对空泡溃灭水锤的影响,并对空气阀的特性进行了研究。金锥^[34]等对水锤理论、计算和防护进行阐述。刘华^[35]提出了泵房和输水管线设计中应注意的问题及停泵水锤的防护措施。刘梅清^[36]等对单向调压塔防水锤特性进行了数值模拟与研究。

4 计算分析方法

有压管道系统两相瞬变流的计算分析方法通常分为解析法、图解法、简易计算法和数值计算方法等4

类.1930年以前,大多采用解析法进行计算,其基本原理是利用 Allievi 的连锁方程式进行逐段计算,此法适用于压力波为全反射且不考虑摩擦损失的简单管路情况.1931~1962年广泛采用图解法^[37],该法是将不考虑管道摩擦损失情况下的水锤基本方程,变换为对管道内两点的两个代数方程(共轭方程),经作图计算,在处理有压管道系统气体释放、液柱分离问题时,图解法忽略空穴区,而假设一旦在某个位置上压力降到液体汽化压力以下,液柱就在该处的整个管道截面发生分离,空穴的体积根据连续方程来计算,计算时采用空穴两边液体的流速,空穴里面的压力假设等于液体的汽化压力,而系统其余部分作为一般水击来分析.图解法概念清晰,简便易行,但由于计算手段的限制并作了许多假设,计算精度不高.简易算法^[30]是利用精确方法事先算出大量结果,绘制成各种可以直接查阅的图表供生产上使用,该法简单易学,能够很快直接求出所需要的数据,但误差较大.20世纪60年代以后,随着电子计算机的普及和计算方法的发展,出现了便于电算的特征线法、L-W 两步格式罗夫法、隐合法和有限元法. Wylie^[6]等提出的特征线法将管道系统非恒定流的水锤偏微分方程,沿其特征线变换为常微分方程,然后再近似地变换为差分方程进行数值计算.该法对各种边界条件容易编制程序,精度较高,在处理含气两相瞬变流现象时,将水锤的分析采用特征线法,而把空穴的发展、增大和溃灭作为一个内部边界条件.由于在数据模型中并没有计入气体释放的影响,所以,用这种方法计算分离液柱溃灭后的压力大于原型实测结果.L-W 两步格式法^[38]适合于变波速的激波问题,在气液两相瞬变流过程中,由于边界条件突然改变,使压缩波波形因瞬态压力急剧增加而变得陡峻,这种变陡的压力波称为激波.在瞬态气液两相流中,激波的形成与压力、空隙比及压缩波的初始波形等因素有关.该法弥补了特征线法的不足,具有便于模拟激波的传播、反射等优点,并且引入一虚拟摩擦阻项的方法,可较好地将近不连续的曲线予以光滑处理. Watt^[39]等学者对有限元法与特征线法进行比较得出如下结论,有限元法对管系的缓慢瞬变流求解精度相当高,且计算时间短,其缺点是对于压力变化急剧的瞬变流,计算结果容易发散.

5 实验研究

国内外对于有压输水管道系统气液两相瞬变流的实验研究也十分重视,并建有若干个实验装置^[40-42].实验装置通常设有上下游水箱、有压供水管道和快速关闭阀门装置组成的循环系统,用以产生气液两相瞬变流.不同的实验装置在有压管道的布置方式、材料、长短、快速关闭阀门的形式、关闭时间、放置位置、测试的目的、现代工艺水平和手段等方面有所不同.但总的说来,实验的目的主要有三个方面:其一,搞清瞬变过程中气液两相流形成、发展和溃灭的机理,为数学模型的建立和完善提供依据;其二,研究主要的初始因素的作用,为实际工程中减轻空穴流、液柱分离及溃灭水锤带来的危害提供依据;其三,分析研究各种水锤防护设施的性能及对液柱分离后产生的溃灭水锤减缓作用.

6 有待进一步研究的内容

6.1 气液两相瞬变流基本理论研究

在长距离输水管道系统中,当水泵事故失电或水泵较快地开启时,管道沿线会出现复杂的气液两相瞬变流.对于这种不同流型的气液两相瞬变流问题,现有的理论尚不能给予满意解决.因此,需进一步建立数学模型,研究其仿真模拟分析方法,编制相应的数值计算软件,并研究长距离输水管道系统发生水锤事故的破坏机理.

6.2 空气进排气阀的特性研究

以往对于空气进排气阀(简称空气阀)的研究大多采用了下列假设(a)经空气阀进入管道的气体始终积聚在空气阀附近,并在水压力升高时可充分排出(b)气体在管道水体内的体积相对很小,气液两相间的流动无滑移等.进一步的研究应综合应用水动力学、空气动力学、热力学、气液两相瞬变流和水力系统瞬变流等多领域的基本理论,从研究空气阀的工作特性入手,结合物理模型实验,分析空气阀对有压管道系统气液两相瞬变流的影响,为长距离输水管道系统的优化设计和安全运行提供理论依据.

6.3 截留气团的动态特征和动力特性研究

研究在长管道系统的水力瞬变过程中截留气团迁移、胀缩、裂变和溃灭的动态特征、动力特性及机理,研究管道特征参数、管道布置形式和管道内的水压力、流速、瞬态过程特征参数等对截留气体动态特征和动力特性的相互关系.

6.4 实际工程优化设计理论研究

结合实际工程,研究长距离输水管道系统优化设计的基本原则、基本方法和关键技术路线以及相关的水锤防护措施.

参考文献:

- [1] Li W H, Walsh J P. Pressure generated by cavitation in a pipe[J]. Eng Mech Div, ASCE, 1964, 90(6): 113 ~ 117.
- [2] Kobori T S. Propagation velocity of pressure waves in pipeline[J]. Hilachi Hyoron, 1955(10): 137 ~ 141.
- [3] Peassall I S. The velocity of water hammer waves in pipe-lines[J]. Proc Inst Mech Eng, 1965(3): 180 ~ 185.
- [4] Schweitzer P H. Gas evolution in liquid and cavitation[J]. Applied Physics, 1966, 21: 1218 ~ 1224.
- [5] Driels M R. An investigation of pressure transients in a system containing a liquid capable of air absorption[J]. Fluid Eng, ASME, 1973(9): 408 ~ 414.
- [6] Wylie E B, Streeter V L, Suo Lisheng. Fluid transients in system[M]. Engle Wood Cliffs. Prentice-Hall Inc, 1993. 287 ~ 305.
- [7] Baasiri M, Tullis J P. Air release during column separation[J]. Fluid Eng, ASME, 1983(3): 113 ~ 117.
- [8] Kranenburg C. Gas release during transient cavitation in pipes[J]. Hydro Div, ASCE, 1974(10): 11 ~ 15.
- [9] Kalkwijk J P T. Cavitation in horizontal pipelines due to water hammer[J]. Hydro Div, ASCE, 1971(10): 97 ~ 101.
- [10] Martin C S. Experimental investigation of column separation with rapid closure of downstream valve[A]. 4th Inter Conf on Pressure Surges[C]. England: BHRA, 1983. 77 ~ 88.
- [11] 杨建东. 空化理论与气液两相流瞬态过程的研究[D]. 武汉: 武汉水利电力学院, 1988.
- [12] 刘光临, 匡许衡. 考虑管道系统中水流气体释放的事故停泵水锤计算分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998(6): 1 ~ 6.
- [13] Kranenburg C. The Effects of free gas on cavitation in pipe-lines[A]. 1st Inter Conference on Pressure Surges[C]. England: British Hydromechanics Research Assoc, 1972. 41 ~ 52.
- [14] Brown R J. Water column separation at two pumping plants[J]. Basic Eng Trans, ASME, 1968, 90(10): 521 ~ 531.
- [15] Simpson A R, Bergant. Numerical comparison of pipe column-separation models[J]. Hydr Engrg, ASCE, 1994, 120(3): 361 ~ 377.
- [16] Simpson A R, Wylie E B. Large water hammer pressures due to column separation in pipelines[J]. Hydr Engrg, ASCE, 1991, 117(10): 1310 ~ 1316.
- [17] Bergant A, Simpson A R. Pipeline column separation flow regimes[J]. Hydr Engrg, ASCE, 1999, 125(11): 835 ~ 847.
- [18] Bergant A, Simpson A R. Water hammer and column separation measurements in an experimental apparatus[A]. Envir Engrg[C]. Australia: The University of Adelaide, 1995. 124 ~ 129.
- [19] 叶开宏, 何枫, 陈国样. 管路中有气泡时的水锤计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1993(5): 17 ~ 21.
- [20] Vreugdenhil C B, Vries A H, Kalkwijk J P, et al. Investigation into cavitation in long horizontal pipeline caused by water-hammer[J]. Int Assoc for Hyd Research, 1972(9): 13 ~ 18.
- [21] Weyler M E. An investigation of the effect of cavitation bubbles on the momentum loss in transient pipe flow[J]. Fluids Eng, ASME, 1971(3): 1 ~ 7.
- [22] 蒋劲, 梁柱. 管路系统气液两相流瞬变流的矢量通量分裂法[J]. 华中理工大学学报, 1997(3): 79 ~ 81.
- [23] 杨开林, 董兴林. 水电站长输水管道气泡动力特性研究[J]. 水利学报, 1998(11): 11 ~ 14.
- [24] 于必录, 刘超, 杨晓东. 泵系统过渡过程分析与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993. 93 ~ 120.
- [25] 田立言, 丁彤, 陈嘉范, 等. 挟沙水流中空泡溃灭的实验研究[J]. 水力发电学报, 1999(1): 68 ~ 73.
- [26] Suo L, Wylie E B. Hydraulic transients in rock-bored tunnels[J]. Hydraul Eng, ASCE, 1990(2): 194 ~ 208.
- [27] Suo L, Wylie E B. Complex wavespeed and hydraulic transients in viscoelastic pipes[J]. Fluids Eng, ASME, 1989(12): 496 ~ 500.
- [28] Stephenson D. Effects of air valves and pipework on water hammer pressure[J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1997(3): 101 ~ 106.
- [29] Lee T S. Air influence on hydraulic transients on fluid system with air valves[J]. Fluids Eng, ASME, 1999(9): 646 ~ 650.
- [30] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤及其防护[M]. 北京: 水力电力出版社, 1988. 201 ~ 240.
- [31] 刘光临, 蒋劲. 大型轴流泵站停泵水锤的调压塔防护研究[J]. 水利水电技术, 1993(2): 42 ~ 46.
- [32] 刘光临, 刘梅清, 匡许衡. 长管道系统中的水锤及其防护研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999(5): 111 ~ 113.
- [33] 王学芳, 叶宏开. 工业管道中的水锤[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 79 ~ 102.
- [34] 金锥, 姜乃昌, 汪兴华. 停泵水锤及其防护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. 483 ~ 517.
- [35] 刘华, 鞠小明, 陈家远. 供水管道系统中的水力过渡过程研究[J]. 四川大学学报, 1999(1): 56 ~ 59.
- [36] 刘梅清, 冯卫民. 单向调压塔防水锤特性的数值模拟与研究[J]. 水利学报, 1995(10): 44 ~ 48.

- [37] Bergeron L. Water hammer in hydraulic and wave surges in electricity[M]. New York : Wiley , 1961 . 87 ~ 92 .
- [38] Martin C S , Padmanbham M , Wiggert D C . Pressure wave propagation in two-phase bubbly air-water mixtures[A]. Second Int Conf on Pressure Surges[C]. England : BHRA , 1976 . 11 ~ 17 .
- [39] Watt C S . Combination of finite different and finite element techniques in hydraulic transients problems[A]. 3rd Int Conf Pressure Surges [C]. New York : BHRA , 1980 . 37 ~ 42 .
- [40] Zielke W , Perko H D , Keller A . Gas release in transient pipe flow[A]. 6th Int Conf Pressure Surges[C]. England : BHRA , 1989 . 3 ~ 13 .
- [41] Simpson A R , Wylie E B . Towards an improved understanding of waterhammer column separation in pipelines[A]. Civil Eng[C]. Australia : Trans Inst Eng , 1989 . 113 ~ 120 .
- [42] Chaudhry M H , Bhallamudi S M , Martin C S , et al . Analysis of transient pressure in bubbly , homogeneous , gas-liquid mixtures[J]. Fluids Eng , ASME , 1990(6) 225 ~ 230 .

Gas-liquid two-phase transient flows in pressurized water conveyance pipe system

ZHENG Yuan , LIU De-you , ZHANG Jian , SUO Li-sheng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Advances are summarized in the research of gas release , cavitation flows and column separation , water-hammer protection , and methods for their calculation and experiments . It is suggested that a further study should be performed on the basic theory of gas-liquid two-phase transient flow , the characteristics of air valves , and dynamic state of trapped air , and on the theory of optimal design of projects .

Key words : pressurized water conveyance pipe system ; liquid column separation ; gas-liquid two-phase transient flow ; water hammer ; summary