

水射流技术在石油工程中的应用及前景展望

沈忠厚, 李根生, 王瑞和

(石油大学石油工程学院, 山东 东营 257061)

[摘要] 论述了水射流技术在我国石油工程中的研究和应用情况。应用实验方法建立了淹没非自由射流压力及水功率衰减计算模型, 建立了以井底获得最大水功率, 优选水力参数设计的新方法和新模型。应用瞬态流理论及水声学原理建立了两种谐振腔的基本关系式和结构数学模型。建立了在钻井双向应力作用下, 岩石裂纹发展方向模型。介绍了研制的3种新型高效钻头, 即加长喷嘴牙轮钻头、自振射流钻头和射流及机械联合破岩钻头。展望了水射流技术在超高压射流钻井、稠油及低渗油藏开采、提高采收率等方面的应用前景。

[关键词] 水射流技术; 石油钻井; 油气开采; 高压和超高压射流

[中图分类号] TE248 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)12-0060-06

1 水射流技术发展简况

19世纪中叶,在北美洲第一次用水射流开采非固结的矿床^[1]。20世纪50年代初,前苏联和我国用水射流进行采煤(称水力采煤)。随着水力采煤技术的推广,人们认识到提高水的压力可以显著地提高水射流落煤效果。于是人们开始研究高压水源(高压泵和增压器)和高压脉冲射流(俗称水炮)。进入20世纪60年代,大批高压柱塞泵和增压器的问世大大推动了水射流的研究工作。当时,部分学者片面认为水射流的压力越高越好,日本研究出1700 MPa的增压器,前苏联和美国研究出5600 MPa的脉冲射流发生器。到20世纪70年代末,水射流技术出现一个新的转向,即从单一提高射流压力转向研究如何提高水射流的威力,开始出现了高频冲击射流、共振射流和磨料射流。进入20世纪80年代,磨料射流、空化射流、气水射流和自振射流的发展,把水射流技术推向一个新的阶段。如用磨料水射流精密切割金属板材、合金钢、硬质合金、玻璃和陶瓷,已在工业中推广应用,它

与激光束、电子束和等离子切割,合称现代工业切割的四大高新技术^[2]。同时,各国学者也开始对各种射流的基础理论和切割机理等方面进行研究。水射流技术的应用也由采矿扩大到航空、建筑、建材、交通运输、市政建设、化工、机械、轻工业等领域。水射流作为一种良好的切割、破碎和清洁工具,已被人们所公认。一大批水射流切割机、采煤机、掘进机、打桩机和清洗机已进入市场。

2 提高钻井射流在井底工作效率

自20世纪50年代喷射钻井问世以来,石油钻井的速度和质量大幅度提高。从实践中人们认识到提高射流在井底的压力和水功率,可以有效提高钻井速度,而通常是采用提高地面泥浆泵的压力和功率来实现的。这就带来泥浆泵体积过大、地面柴油机功率增大和钻机搬运困难等不利因素,不仅增大了设备投入,而且增大了日常的燃料费用。为此,钻井工程界早已提出在不增加地面泥浆泵压力和功率条件下如何提高射流在井底工作效率的研究课题。钻井射流属复杂的淹没非自由射流,由于其

[收稿日期] 2002-07-10

[基金项目] CNPC 钻井工程重点实验室资助项目

[作者简介] 沈忠厚(1928-),男,四川大竹县人,中国工程院院士,石油大学教授

约束条件复杂，国内外专家研究较少。目前射流理论中，尚未见到淹没非自由射流流动规律的系统报导。

2.1 淹没非自由射流轴心压力衰减规律

射流喷速和喷嘴直径大小是影响轴心压力衰减最主要的因素。分别对不同喷速和不同喷嘴直径的淹没非自由射流轴心压力的衰减规律进行了实验研究^[3]，并引入 2 个特征参数，即无因次等速核长度 \bar{L}_1 （等速核长度 L_1 除以喷嘴直径 d_0 ）和无因次半衰距 $\bar{L}_{0.5}$ （定义为射流轴心压力衰减到喷嘴出口

口压力的 50% 时所达到的无因次距离），得到射流轴心压力衰减规律如图 1 所示，其计算模型如下：

$$\left. \begin{aligned} P_m/P_0 &= 1 - 0.5 \frac{L - L_1}{L_{0.5} - L_1}, \text{当 } L_1 < L < L_{0.5} \text{ 时} \\ P_m/P_0 &= 0.5 \frac{L_{0.5} - L_1}{L - L_1}, \text{当 } L > L_{0.5} \text{ 时。} \end{aligned} \right\} (1)$$

式中： P_m —射流轴心压力， 10^5 Pa； P_0 —喷嘴出口压力， 10^5 Pa； L —喷距，mm； L_1 —等速核长度，mm； $L_{0.5}$ —半衰距，mm。

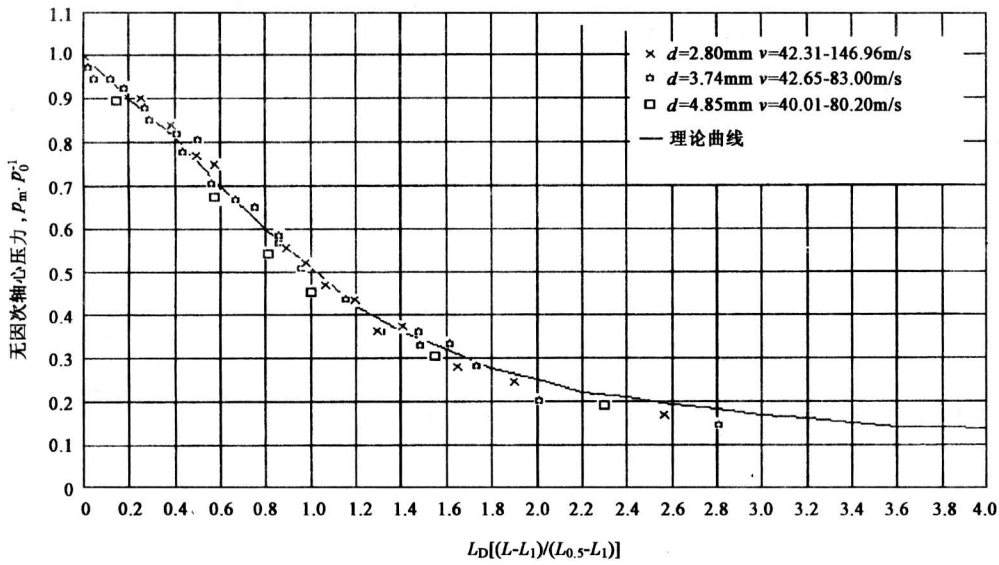


图 1 有漫流影响下锥型小喷嘴的射流轴心压力衰减规律

Fig.1 Jet centerline pressure attenuation for conical nozzles with crossflow

2.2 喷射钻井水力参数设计新方法

由公式 (1) 进一步可以推导出钻井射流到达井底岩面各水力参数的计算模型。

传统的喷射钻井水力设计理论和方法，是由喷射钻井奠基人 H. A Kendall 和 W C Goins 在 1960 年按钻头喷嘴出口处获最大功率、最大冲击力或最大喷速而建立的^[4]。由于，只考虑泥浆进入喷嘴前在循环系统中的水功率损耗，而没有考虑射流出喷嘴后在泥浆介质中的水功率损耗（衰减），两者计算值相差甚远。经过数学推导，得到按井底岩面获最大水功率、钻头喷嘴的最优当量直径计算模型。

2.3 研制新型加长喷嘴牙轮钻头，提高射流在井底的动压力和水功率

由前面理论分析可以看出，如将喷距缩短至射流等速核以内，可以最大限度地提高井底的动压力

和水功率。现有牙轮钻头喷嘴出口距井底的距离为 135~175 mm (8¹/₂"~12³/₄"钻头)，如缩短至 45~60mm，其井底的压力可提高 90%~110%，井底水功率可提高 30%~35%，井底压力梯度可提高 1.5 倍以上。据此研制的加长喷嘴牙轮钻头，在胜利、大庆、辽河、中原、塔里木等 13 个油田大面积使用，平均机械钻速提高 25%~30%，平均钻头进尺提高 35%~40%，已使用 3 000 余只钻头，获显著经济效益。

3 自振新型射流理论及应用

自激振动射流是 20 世纪 80 年代出现的一种新型射流，它是利用流体自激振动原理，将普通连续射流转变为断续的涡环流，涡环中心压力低，易于引发“空化现象”。这种射流有利于破碎岩石和表面清洗，是一种有发展前途的新型射流^[5]。

3.1 谐振腔基本关系式和结构数学模型

根据瞬态流理论和水声学原理，当流体通过各种类型的谐振腔出口收缩断面时产生压力激动，这种压力激动反射回入口处与来流的压力脉动叠加形成驻波，当激振频率与射流本身的固有频率匹配时产生共振，使射流变成断续的涡环流，从而产生空化。图2是两种谐振腔自振喷嘴结构示意图。应用瞬态流理论和水声学原理推导出两种自振喷嘴谐振腔的基本关系式和结构数学模型^[6]。

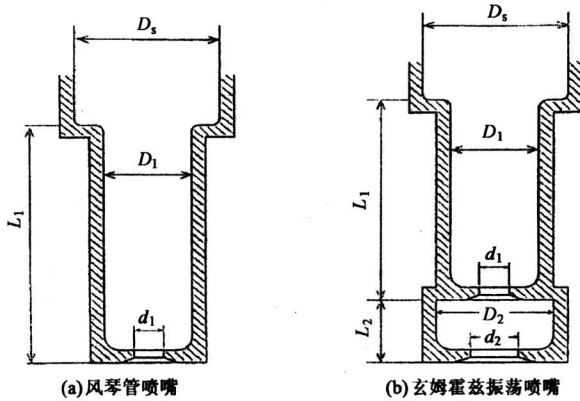


图2 两种自振喷嘴谐振腔结构示意图
Fig.2 Schematic of self-resonating nozzles

风琴管谐振腔的基本关系式和结构数学模型为：

$$\frac{L}{d} = \frac{K_N}{Ma \cdot S_d} \quad (2)$$

$$K_N = \begin{cases} \frac{2N-1}{4}, & \text{当 } \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \gg 1 \text{ 和 } \left(\frac{D}{d}\right)^2 \gg 1 \text{ 时} \\ \frac{N}{2}, & \text{当 } \left(\frac{D_s}{D}\right)^2 \gg 1 \text{ 和 } \left(\frac{D}{d}\right)^2 \leq 4 \text{ 时} \end{cases}$$

- K_N —模数系数，无因次；
- N —腔室内振动的模数 ($N = 1, 2, 3, \dots$)，无因次；
- Ma —马赫数 = u/c^* ，无因次；
- u —喷嘴出口流速，m/s；
- C^* —液体中的声速，m/s；
- S_d —Strouhal 数，无因次；
- L —风琴管长度，mm；
- d —风琴管出口直径，mm；
- D —风琴管直径，mm；
- D_s —风琴管进口来流直径，mm。

亥姆霍兹谐振腔的基本关系式和结构数学模型为：

$$\frac{D_z}{d_1} = \frac{Ma}{2\pi S d_1} \cdot \sqrt{\frac{d_1}{L_2}} \quad (3)$$

式中各符号代表意义如图2所示。

3.2 自激振动射流压力脉动特性和破岩效果

在实验室测量了自振射流的压力脉动特性，通过数据处理，可计算出脉动压力最大峰值、脉动压力最小峰值、时均压力和脉动幅度。调制的自振射流最大峰值压力比时均压力高40%，比普通连续射流高37%。

破岩试验采用通用的“标准冲蚀试件法”。标准试件采用人造均质砂岩。图3是3种风琴管喷嘴和120°锥形喷嘴在相同泵压下的体积冲蚀速度比较。从图中不难看出，在试验范围内最优喷嘴约为喷嘴出口直径的8~12倍，风琴管喷嘴最大体积冲蚀速度是120°锥形喷嘴的2.3~3.3倍。

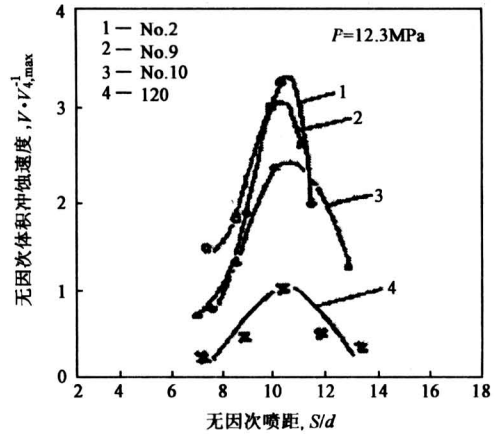


图3 风琴管自振喷嘴和锥形喷嘴体积冲蚀速度比较

Fig.3 Comparison rock erosion rate between self-resonating nozzles conical nozzle

3.3 自激振动射流在石油钻井和采油中的应用

应用上述理论调制的自激振动射流用于钻井和采油生产，开发出若干有实用价值的新技术，获得了显著经济效益。如：**a.** 将自振射流用于钻井，研制出自激振动射流钻头，平均机械钻速提高35%^[6]。**b.** 将自振射流用于处理油井近井地层及解堵，首创自振旋转射流处理近井地层及解堵新技术^[7]。由于射流作用于近井地层，同时对其产生低频水力冲击、高频水力振荡和超声波3种物理效应，故能有效地解堵和处理地层。这项技术自1995年起先后在辽河、胜利、大庆等11个油田和地区的500多口井上应用，平均油井单井增油

20%~30%，注水井单井增注 30%~130%。c. 把自振射流用于油田注水，创制了自激波动注水新技术^[8]，它从源头上预防在注水过程中形成的近井地带堵塞，实现了边注水边解堵，达到了降低注水压力、提高注水量、延长修井周期和降低作业费用的目的。

4 射流结合机械破岩技术

把射流射向井底岩石的着落点，尽可能靠近机械齿的前缘或者后缘，当机械齿破岩在岩石内部产生裂纹，射流随即进入裂纹延伸和扩张裂纹，加速岩石破坏。由于岩石的抗拉强度远低于抗压强度，故射流所需压力也较低。

水射流结合机械齿破岩效果，主要取决于 2 个因素：第一，射流射向井底岩石的着落点，应该尽可能靠近机械齿的前缘或后缘，其最大距离不得大于 2 mm；第二，射流倾斜角应与裂纹的倾斜角一致，以使射流能顺利进入裂纹。关于岩石在双向外载荷条件下裂纹的形成和发展规律研究较少，尚未见报导。

4.1 钻井双向外载作用下，岩石裂纹的产生和扩展模型

在石油钻井中，钻头牙齿的运动是由一个直线运动和一个旋转运动组成的复合运动，相应的钻头牙齿施加于岩石的力为垂直压应力和水平切削力。由此，将钻井岩石的力学特征简化成如下模型^[9]：齿前岩石受到垂直压应力和水平压应力的作用；齿后岩石受到牙齿垂直压应力和水平拉应力的作用。并认为水平拉应力和水平压应力大小相等，方向相反，如图 4 示。

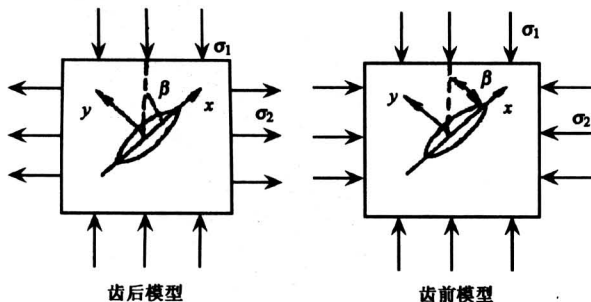


图 4 钻井双向应力下岩石受力模型

Fig.4 Rock stress model under drilling biaxial stress action

根据 Griffith 理论，椭圆形裂纹尖端最易产生

应力集中，推导出裂纹尖端处拉应力大小及发生最大拉应力的裂纹方向。考虑到岩石各向异性及施载方式的影响，在岩石破碎中引入系数 α_1 和 α_2 ，则在钻头牙齿双向应力作用下，岩石裂纹产生及扩展的可能方向为：

$$\text{齿前岩石: } \beta_0 = \alpha_1 \cdot \arccos \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right] \quad (4)$$

$$\text{齿后岩石: } \beta_0 = \alpha_2 \cdot \arccos \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right] \quad (5)$$

α_1 和 α_2 系数与岩石类型、施载方式和齿型等有关，由实验确定。当岩石为各向同性，忽略施载方式影响，齿形采用类弧棱齿和 PDC 齿，可认为 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

以上理论模型，在实验室用较均质红砂岩和黄砂岩，钻头采用常用的类弧棱齿和 PDC 齿，加压和旋转较平稳，在钻压、转速和排量变更条件下，检验理论模型计算的 β_0 和实验所得 θ_0 十分接近，证明理论模型是正确的^[10]。

4.2 研制机械及射流联合破岩钻头

应用上述理论，研制了射流结合机械齿破岩钻头，该钻头在南阳油田试验成功，平均机械钻速提高 25%~32%。射流结合机械破岩裂纹发展方向模型不仅可用于石油钻头，而且可用于采煤、金属矿山、巷道掘进等工程中。

5 高压旋转射流钻径向水平井技术

高压水射流钻径向水平井技术是利用高压旋转水射流直接破碎岩石，在直井内转向 90°向周围辐射钻出若干水平井眼群的一种新技术^[11]，如图 5 所示。依据流体力学基本理论，结合断裂力学和岩石力学原理，全面系统地研究了旋转射流的结构特性（压力和速度分布）、破岩机理和过程，建立了描述旋转射流速度衰减的数学模型；发现旋转射流在比普通圆射流的破岩效率提高近 10 倍；适当地控制射流的扩散程度，即可钻出足够大的连续孔眼，满足钻径向水平井的要求^[12]。石油大学在有关单位的合作下，于 1997 年 8 月首次在辽河油田锦 45-04-19 井利用高压旋转射流钻出了我国第一口径向水平井。该井产油量与钻水平井前相比增加 7 倍。以后相继在南阳油田古 2206 井、辽河油田锦 45-38-303 井和锦 45-检 1 井进行井下工业试验，获得成功。这项新技术有利于提高油田采收率、开发薄油层、稠油和低渗油气层。

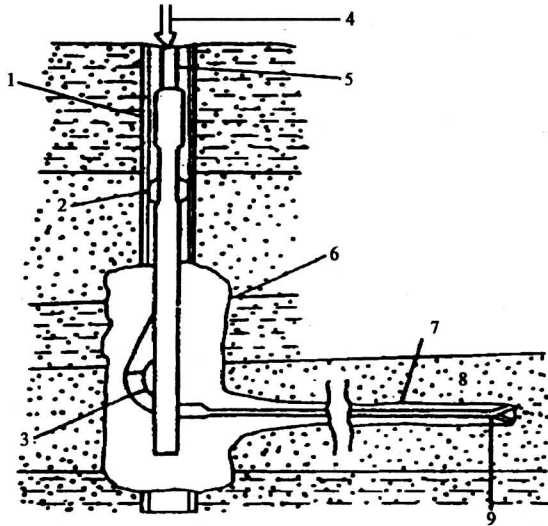


图5 高压水射流钻径向水平井示意图

Fig.5 Schematic of radial horizontal well drilling with high pressure water jets
1—套管; 2—锚定卡瓦; 3—斜向器; 4—高压水
5—高压管柱; 6—井眼扩大区; 7—径向水平井眼;
8—油气层; 9—射流钻头

6 前景展望

20年来,作者将水射流技术应用于石油工程,把水射流技术与石油工程相结合,做出了初步成绩,使水射流技术表现出强大的生命力。展望未来前景有以下几点看法:

1) 开展高压和超高压射流(150~200 MPa)动力学及辅助机械破岩机理研究,为今后研究高压和超高压射流辅助机械破岩新钻井方法提供理论基础。这种新钻井方法是近10年国际钻井界努力追求的目标,是钻井工程研究的前沿重大课题,它可以从根本上解决深井和超深井的钻井速度。预计深井钻井速度可提高1倍以上。

2) 开展高温高压条件下空化射流“空泡”的起始、成长和破灭机理研究。根据理论计算,空化射流“空泡”爆破时的瞬时压力约为连续射流滞止压力的8~124倍。将这样高的瞬时压力用于井底破碎岩石、处理油层、开拓新的油流通道和裂缝,将会开发出若干提高钻井速度、增加原油产量和注水量的新技术。

3) 推广应用高压水射流钻径向水平井技术和高压水射流深穿透无污染射孔技术,将会有效地开采剩余油和提高原油单井产量,进而提高原油采收率。

4) 综合应用空化射流、高压水射流钻径向水平井和高压水射流深穿透射孔新技术,可能找到开采低渗油气藏、薄油层和裂缝性油气藏的有效技术。目前我国已探明低渗油气藏的储量约 50×10^8 t,占总探明储量的25%~30%,因无有效开采技术而不能投入开发,这是一项急待解决的重大难题。

5) 发展的高压水射流破岩理论,不仅可用于石油钻井和油气开采,而且可用于采煤、金属矿山、巷道掘进、地铁及隧道工程,提高钻掘速度,降低钻掘成本,具有广阔应用前景。

参考文献

- [1] Labus T J. Fluid Jet Technology: Fundamentals and Applications [M]. Waterjet Technology Association, Missouri, USA, 1995
- [2] 沈忠厚.水射流理论与技术[M].东营:石油大学出版社,1998:1~7
- [3] Shen Zhonghou, Sun Qingxiao. A Study on the pressure attenuation of submerged non-free jet and a method of calculation for bottom hole hydraulic parameters [J]. SPE Drilling Engineering, 1988, 3 (1): 69~76
- [4] Kendall H A & Goins W C Jr. Design & operation of jet-bit programs for maximum hydraulic horsepower, impact force, or jet velocity [J]. Journal of Petroleum Technology, Oct. 1960: 238~247
- [5] Shen Zhonghou. Water Jet Technology in Petroleum Engineering [M]. Dongying: Petroleum University Press, 1997
- [6] Shen Zhonghou, Li Gensheng, Wang Zhiming. New jet theory and prospects of application in petroleum engineering [A]. Proceedings of the 13th World Petroleum Congress [C], Buenos Aires, Argentina 1991: 397~405
- [7] 李根生,马加计,沈晓明,等.高压水射流处理地层机理及试验[J].石油学报,1998,19(1):96~99
- [8] 李根生,张德斌,等.自激波动注水机理与实验[J].石油学报,2002,23(6)
- [9] 袁建强,沈忠厚.机械和水力联合破岩的力学模型[J].江汉石油学院学报,1993,15(4)
- [10] 袁建强,沈忠厚.射流喷射角及方位影响破岩效果的研究[J].石油钻探技术,1992,20(4):39~42
- [11] 王瑞和,周卫东,沈忠厚,等.旋转射流破岩射孔机理研究[J].中国安全科学学报,1999,9:1~5
- [12] 杨永印,沈忠厚,王瑞和,等.径向水平井钻进技术实验研究[J].石油钻探技术,1998,26(1):4~8

Application and Prospects of Water Jet Technology in Petroleum Engineering

Shen Zhonghou Li Gensheng Wang Ruihe

(*College of Petroleum Engineering, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China*)

[**Abstract**] This paper presents the study and applications of water jet technology in petroleum engineering. A mathematic model of pressure and water power attenuation, under the condition of submergence and non-freedom, is setup through experiments. A novel method and its model are established to gain maximum hydraulic power at bottomhole and optimize water parameters. In addition, the basic equation and structure model of two kinds of resonating chamber are set up according to transient flow theory and hydro-acoustics. Under the impact of drilling biaxial stress, a model of predicting the fracture propagation is founded utilizing rock fracture mechanics. On the base of above models and theories, three new kinds of bits, i. e. extended nozzle roller bit, self-resonating water jet bit and combined jet and mechanical rock-cutting bit, are developed. Also, the paper points the prospects of applications of water jet technology in deep-well drilling, low-permeability reservoir production, and enhanced oil production.

[**Key words**] water jet technology; oil well drilling; oil & gas production; high and ultra-high pressure jet

(cont. from p. 52)

The electrical output of the first phase can be supplied to Southeast Asia and that of the subsequent phases to southeastern China (especially Guangdong Province). The cost estimated for the project is less than that of the Three Gorges project due primarily to the fact that there is no need to consider such factors as flood control, shipping rerouting and population resettlement, all of which translate into immediate economic benefits. Meanwhile, the project will set four straight world records, namely, the largest hydropower station, the largest generating unit, the highest waterfall and the largest gorge. As a result, the project is of immense significance to the sustainable development of Tibet and to China as a whole, and is also bound to exert tremendous international influence. Due to the complexities and size associated with the project, a huge number of difficulties and problems must be fully addressed beforehand. It is hoped that all the involved difficulties will be discussed and analyzed in-depth with a view to reaching scientific and practical conclusions for the project.

[**Key words**] the Yalu Tsangpo River; hydropower; development; investment; benefit