

# 裂纹管道失效评定中的有限元方法<sup>\* \*</sup>

帅 健<sup>\*</sup> 许 葵  
(石油大学(北京)机电学院)

帅 健 许 葵: 裂纹管道失效评定中的有限元方法, 油气储运, 2003, 22(3) 18~21.

**摘 要**  $J$  积分的精确计算是含缺陷结构安全评定的基础。对管道上的表面裂纹采用线弹簧单元, 建立了裂纹管道  $J$  积分计算的有限元模型, 给出了  $J$  积分的计算实例。基于  $J$  积分理论, 利用这种有限元模型得到了裂纹管道的精确失效评定曲线, 根据计算结果, 讨论了影响失效评定曲线的各种因素。分析表明, 裂纹尺寸和管材材料性能参数等都对失效评定曲线产生影响, 用单一的失效评定曲线进行评定会出现精度较差的问题, 因此, 采用提出的有限单元方法对裂纹管道的失效进行精确评定具有重要意义。

**关键词** 油气管道 裂纹  $J$  积分 有限元方法 安全评定

## 一、前 言

含缺陷结构的安全评定普遍采用失效评定图的方法, 这种方法最早是由英国中央电力局(CEGB)于1976年首先提出并采用的<sup>[1]</sup>, 之后美国电力研究院(EPRI)提出用  $J$  积分取代窄条区屈服模型, 给出了新的失效评定曲线, 大大发展了这一方法<sup>[2]</sup>。目前常提到的是1986年发表的R6修订版<sup>[3]</sup>, 其失效评定曲线与较老的失效评定曲线在理论上有着本质的不同, 典型的老R6是以COD理论为依据, 并根据D-M模型推导出老R6失效评定曲线的方程。而新R6是对老R6的彻底修改, 它考虑了材料的应变硬化效应, 不再沿用由D-M模型得到的失效

评定曲线, 而以弹塑性断裂力学的  $J$  积分理论为基础建立失效评定曲线。

近年来, 先进的断裂力学分析法开始应用于油气管道, 并有了管环试验结果的验证<sup>[4]</sup>, 笔者采用水压试验中失效的管道验证了该方法的正确性。应用失效评定图方法的前提条件是能够准确计算表征裂纹尖端应力-应变场的断裂参量—— $J$  积分, 其精确计算是在役管道安全评估关键技术研究的基础。

## 二、基于 $J$ 积分的失效评定理论

失效评定曲线是按严格的弹塑性断裂理论建立的, 且以  $J$  积分理论为基础, 其基本方程为<sup>[3]</sup>:

$$f(L_r) = (J^e/J)^{1/2} \quad (1)$$

### 参 考 文 献

1. 刘雯: 天然气管道的运行可靠性评价技术, 天然气工业, 2001, 2(4).
2. 曲慎扬: 油气管道可靠性评价指标及计算, 油气储运, 1996, 15(4).
3. 牟致忠等: 机械可靠性设计, 机械工业出版社(北京), 1994.

(收稿日期: 2002-08-12)

编辑: 刘春阳

\* 102200, 北京市昌平区水库路; 电话: (010)89733271.

\*\* 中国石油天然气集团公司创新基金项目 CX98-27.

式中  $J$  —— 弹塑性  $J$  积分值;  
 $J^e$  ——  $J$  积分值的弹性分量。

按照这种方法得到的失效评定曲线考虑的因素比较全面, 因而更具合理性。

### 三、裂纹管道 $J$ 积分计算的有限元方法

由于管道上主要应力是管内压力引起的环向应力, 因此, 对于管道断裂而言, 最重要的是轴向裂纹, 实际情况多为未穿透的表面裂纹, 规则化为表面半椭圆裂纹。

按照表面裂纹的实际构形,  $J$  积分的计算需要对包括裂纹前缘在内的三维实体结构进行离散, 这样的方法必须对裂纹前缘进行复杂的单元划分, 由于单元数量相当大, 计算耗时多。对管道上未穿透裂纹的  $J$  积分进行计算, 采用线弹簧单元可以达到快速和简便的目的。这种单元的最大优点是不需要对含裂纹的实体进行三维划分, 而仅按薄壳处理即可, 大大减少了单元数目和计算工作量。

#### 1、线弹簧单元

图 1 给出了在裂纹上的每一个点上定义局部正交坐标  $(\vec{i}, \vec{q}, \vec{n})$ , 其中,  $\vec{i}$  是沿裂纹并与壳相切的方向,  $\vec{n}$  是与壳垂直的方向, 则  $\vec{q} = \vec{i} \times \vec{n}$ 。以裂纹深度的正负号来定义裂纹位于壳体的外侧还是内侧。规定裂纹张开方向在法线  $\vec{n}$  的正方向, 裂纹深度为正, 反之为负。

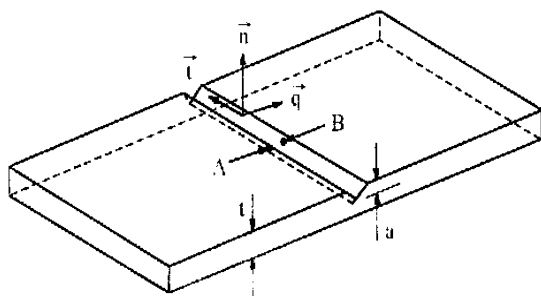


图 1 线弹簧单元

线弹簧单元包含三节点线弹簧单元和六节点线弹簧单元两种类型<sup>[6]</sup>(见图 2)。

图 2 中六节点线弹簧单元是一种通用单元, 可用于任意壳体中的裂纹, 而三节点单元仅限于对称几何体的 I 型裂纹, 且变形对同一平面对称, 图 2

中 A、B 面位于裂纹两侧相对的位置, B 面包含线弹簧单元的 1、2、3 节点, 而对于六节点线弹簧单元在 A 面上还包含 4、5、6 节点。

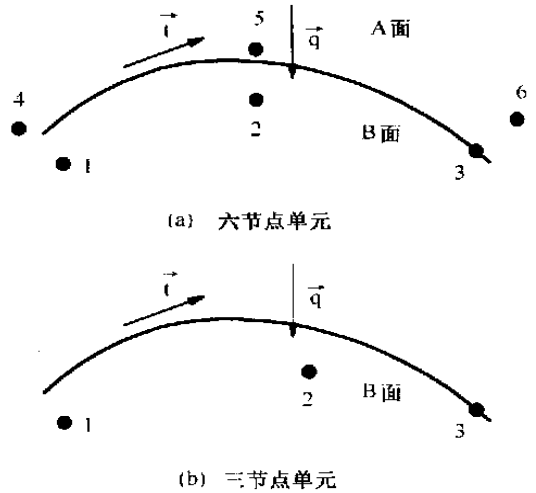


图 2 线弹簧单元的节点布置

#### 2、含表面半椭圆裂纹管道的有限元模型

考虑到对称性, 选取 1/4 含裂纹的管道作为分析对象, 应用 ABAQUS 有限元分析软件建立几何模型并完成前后处理。

(1) 离散方案 壳体采用 8 节点壳体单元离散, 沿着裂纹采用 3 节点的线弹簧单元。由于裂纹尖端区域附近的应力梯度很大, 为了保证  $J$  积分的精确性, 在裂纹的尖端附近区域单元网格内加密(见图 3)。在图 3 中, 沿裂纹长度分布 8 个壳单元和 8 个 3 节点的线弹簧单元, 在裂纹尖端以外, 按照距离裂纹尖端由近到远, 单元的尺寸则由小变大, 即网格由密到疏。

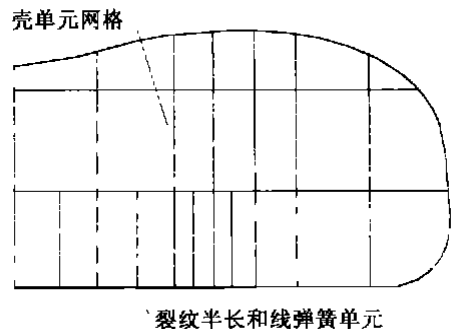


图 3 管道表面裂纹的  $J$  积分计算的有限元网格

(2) 材料模式 考虑到管道材料的硬化效应, 采用 Ramberg-Osgood 应力-应变法则, 其计算式为:

$$\begin{aligned} \epsilon / \epsilon_0 &= \sigma / \sigma_0 + \alpha (\sigma / \sigma_0)^n & (2) \\ \epsilon_0 &= \sigma_0 / E \end{aligned}$$

式中  $\sigma_0$  —— 屈服应力;  
 $\epsilon_0$  —— 初始应变;  
 $n$  —— 幂硬化指数;  
 $\alpha$  —— 硬化系数;  
 $E$  —— 弹性模量。

(3) 载荷 由施加在所有壳单元上的均匀内压组成, 根据需要, 可在端面施加轴向载荷。

(4) 约束条件 按照对称性条件, 在含裂纹的一边、邻边及其相对的一边施加约束条件。

### 3、算例

已知管道的内径  $R = 181.5 \text{ mm}$ , 壁厚  $t = 7.0 \text{ mm}$ , 管道材料的应力-应变关系符合 Ramberg-Osgood 应力-应变准则, 材料常数为  $\alpha = 2.036$  和  $n = 7.779$ , 屈服极限  $\sigma_0 = 381.3 \text{ MPa}$ , 弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 泊桑比  $\nu = 0.3$ 。  $a$  为椭圆裂纹深度,  $c$  为裂纹半长,  $p$  为管道内压, 3 个算例的参数和  $J$  积分计算结果见表 1。

表 1 含裂纹管道 J 积分计算的算例数据

算例	裂纹深度 $a(\text{mm})$	裂纹长度 $2c(\text{mm})$	内压 $p$ (MPa)	$J^e(\text{kN/m})$	$J(\text{kN/m})$
1	6.0	24.0	5.8	1.577	4.495
2	2.0	20.0	9.6	2.886	2.886
3	3.5	21.0	11.2	4.163	6.696

## 四、失效评定曲线的影响因素分析

使用上述有限单元模型, 可以建立基于  $J$  积分的失效评定曲线(见式(1))。在理论上, 这是一种精确的失效评定方法。由于基于  $J$  积分建立失效评定曲线涉及的因素较多, 因此, 有必要根据计算结果进行单因素影响分析。

### 1、裂纹深度的影响

图 4 表示了同一材料中裂纹深度的影响, 所用的管道和管材的基本数据与上述算例相同。图 4 是在裂纹形状满足  $a/c = 0.33$  的条件下得到的。由图 4 可知, 随着裂纹深度的增加, 失效评定曲线随之降低, 即安全区减小。这是因为随着裂纹深度的增加,  $J$  积分变得对载荷非常敏感, 即载荷稍微增加,  $J$  积分值便迅速增加, 而且对大范围屈服而言, 塑性  $J$  积分值相对弹性  $J$  积分值的增加要快得多, 这使得在几乎相同的横坐标下, 裂纹深度大的纵坐标要比裂纹深度小的纵坐标值小。

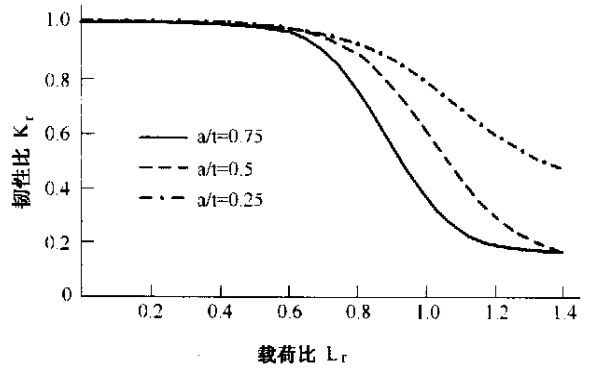


图 4 不同  $a/t$  值对失效评定曲线的影响

### 2、裂纹形状的影响

图 5 示出了裂纹形状  $a/c$  对失效评定曲线的影响。由图 5 可以看出, 随着裂纹的形状接近于圆形 ( $a/c \rightarrow 1$ ), 失效评定曲线在靠近纵坐标的区域降低, 但随着横坐标的增大, 失效评定曲线又随之升高。其原因是在靠近纵坐标的区域, 失效评定曲线主要由  $J$  积分控制, 随着载荷的增大, 失效评定曲线转而由外加载荷控制。

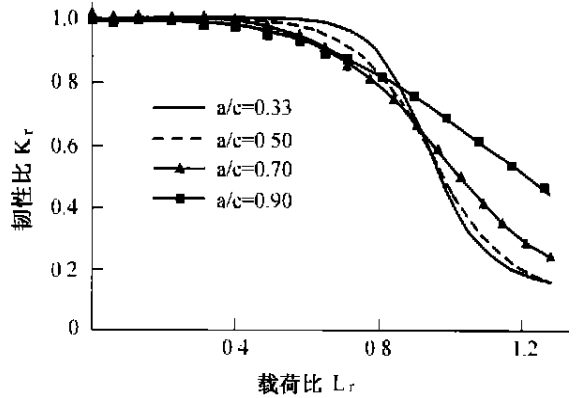


图 5 裂纹形状对失效评定曲线的影响

### 3、硬化系数 $\alpha$ 的影响

为了讨论硬化系数  $\alpha$  对失效评定曲线的影响, 假设材料实际可能的硬化系数分别为  $\alpha = 0.92$ 、 $\alpha = 2.036$  和  $\alpha = 4.20$ , 在满足  $a/t = 0.5$  和  $a/c = 0.33$  的条件下得出了三条失效评定曲线(见图 6)。由图 6 可见, 硬化系数  $\alpha$  越大, 安全区域的范围越小, 即失效评定曲线随着硬化系数  $\alpha$  的增大而降低。这是因为在裂纹尺寸、裂纹形状和结构尺寸相同的条件下, 极限载荷亦相同, 在相同的外加载荷下, 对于硬化系数  $\alpha$  大的材料, 其塑性应变亦大, 即  $J$  积分值中塑性分量所占比例大, 从而造成在横坐标相同的条件下, 硬化系数  $\alpha$  大的材料纵坐标值小, 失效评定曲线降低。

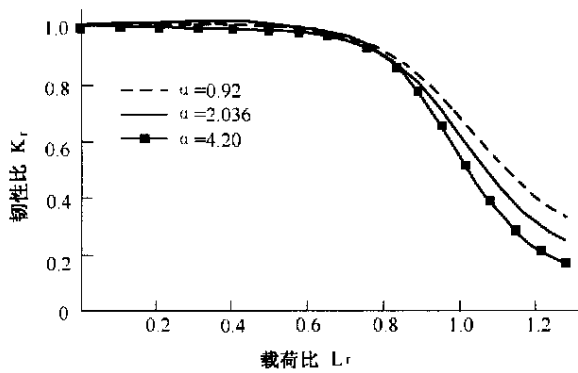


图 6 不同的硬化系统  $\alpha$  对失效评定曲线的影响

#### 4、材料幂硬化指数 $n$ 的影响

图 7 表示了材料幂硬化指数  $n$  的影响。在  $\alpha = 2.036$ 、 $a/t = 0.5$  和  $a/c = 0.33$  的条件下, 假设材料实际可能的幂硬化指数  $n$  分别为  $n = 4.22$ 、 $n = 7.779$  和  $n = 11.0$ 。另外, 还考虑了弹性材料 ( $n = 1$ ) 和塑性材料 ( $n = \infty$ , 在此取  $n = 30$ ) 的影响, 得出如图 7 所示的 5 条失效评定曲线。由图 7 可见, 随着幂硬化指数  $n$  的增大, 安全区域的范围减小, 即失效评定曲线随着幂硬化指数  $n$  的增大而降低, 其原因与硬化系数  $\alpha$  近似。

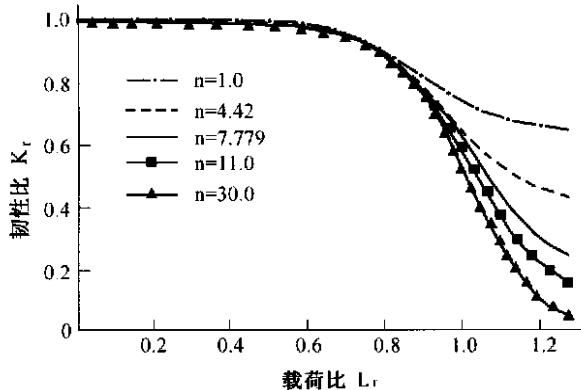


图 7 幂硬化指数  $n$  对失效评定曲线的影响

综上所述, 可得出以下结论。

(1) 对于含表面裂纹管道的断裂分析, 采用线弹簧单元模型能大大减少计算工作量, 并且有满意的精度, 便于工程应用。

(2) 管道裂纹失效评定曲线的影响因素表明, 裂纹的几何尺寸与形状、管材的硬化常数等都有很大影响, 如果采用单一的失效评定曲线, 可能会降低精度, 因此, 应根据裂纹和管材性能的具体情况, 建立精确的失效评定曲线。

(3) 提出的有限单元方法为精确评定含裂纹的失效油气管道奠定了基础。

#### 参 考 文 献

1. Harrison R P, Loosemore K, Milne I, Dowling A R; Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG Report, No. R/H/6, 1976.
2. Kumar V, German M D, Shih C F; An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis EPRI Topical Report NP, 1931, Electric Power Research Institute Palo Alto CA., 1981.
3. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG R/H/R6, Revision 3, 1988.
4. Balsara M; Application of Advanced Fracture Mechanics to the Assessment of Pipeline Defects, OMAE, 1996, Volume V; Pipeline Technology, Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, Los Angeles.

(收稿日期: 2002-07-18)

编辑: 刘春阳

### 下 期 要 目

不同约束值变化对输油管道	
优化运行的影响 .....	孟振虎等
魏荆输油管道加降凝剂低输量	
运行工艺研究 .....	李  立等
一种新的混油浓度计算方法 .....	朱平辉等
两种管道线路工程施工及验收	
规范比较 .....	陈安利等
任意流动体泄漏自动检测方法 .....	周祖荣
输油气站埋地管道的腐蚀分析	
与防护 .....	张立忠等
一种新型油罐防腐涂料的研制 .....	吴  迪等
钢质储油罐底板腐蚀调查与	
分析 .....	杨占品等
管道超声波检测器的应用与	
发展趋势 .....	于喜元等
管道计算机辅助断裂评定系统	
研究 .....	曲文卿等

## 作 者 介 绍

- 穆 昕 1975 年生, 2000 年毕业于石油大学(北京)石油天然气储运工程专业, 获硕士学位, 现在上海交通大学攻读博士学位。
- 孟振虎 副教授, 1950 年生, 1981 年毕业于石油大学(山东)机械系, 获硕士学位, 现在江苏石油化工学院机械系储运教研室从事教学工作。
- 张 穹 助理工程师, 1973 年生, 1998 年毕业于石油大学(北京)化学工程专业, 现在中国石化集团管道储运公司华东管道设计研究院从事油气储运设计工作。
- 汪 涛 工程师, 1972 年生, 1994 年毕业于西南石油学院油气储运专业, 现在西南石油学院攻读油气储运专业硕士学位。
- 帅 健 教授, 博士生导师, 1963 年生, 1982 年毕业于武汉化工学院, 1987 年毕业于石油大学, 获硕士学位, 2000 年毕业于石油大学, 获博士学位, 现在石油大学(北京)从事工程力学和油气储运系统安全工程的教学和研究工作。
- 姚志祥 高级工程师, 1943 年生, 1967 年毕业于北京钢铁学院金相专业, 1984 ~ 1986 年在中国人民解放军后勤工程学院进修油料储运专业, 现在中国人民解放军 62217 部队从事油料储运和输油管道设备的管理工作。
- 卫 杰 工程师, 1970 年生, 1991 年毕业于西南石油学院油气储运专业, 现在中原石油勘探局工程建设总公司从事油田地面建设工作。
- 喻西崇 博士, 1973 年生, 1999 年毕业于石油大学(山东)油气储运专业, 获硕士学位, 2002 年毕业于西南石油学院油气储运专业, 获博士学位, 现在中海石油研究中心博士后站从事管道防腐机理与应用研究工作。
- 葛志祥 工程师, 1975 年生, 2000 年毕业于同济大学城市燃气工程专业, 现在上海燃气设计院从事输气管道设计工作。
- 李荣晖 工程师, 1968 年生, 1991 年毕业于河海大学工业电气自动化专业, 现在中石化管道储运分公司管道设计研究院从事计量检定和节能测试工作。
- 陈 俊 高级工程师, 1966 年生, 1988 年毕业于石油大学(山东)钻井工程专业, 1991 年获石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位, 现在石油大学(北京)石油天然气储运专业攻读博士学位。
- 周卫民 工程师, 1969 年生, 1991 年毕业于石油大学机械系, 现在河南石油勘探局从事油气集输管理工作。
- 汪冈伟 教授级高级工程师, 1944 年生, 1966 年毕业于浙江大学电气自动化专业, 现为中国石油管道公司专家组成员, 秦京输油处顾问。
- 赵晓刚 副教授, 1963 年生, 1986 年毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料储运专业, 现在中国人民解放军后勤工程学院油料储运教研室从事教学及研究工作。
- 李 立 工程师, 1970 年生, 1992 年毕业于石油大学(山东)油气储运专业, 2000 年毕业于石油大学(山东)油气储运专业, 获硕士学位, 现任中国石油管道分公司管道科技研究中心储运工艺研究所副所长, 从事输油工艺研究工作。
- 韩 璋 工程师, 1960 年生, 1982 年毕业于中国人民解放军后勤工程学院油料应用专业, 现在开封市质量技术监督检测中心从事产品质检计量技术与管理工作。
- 陈文莹 助理工程师, 1975 年生, 1996 年毕业于华东理工大学石油化工学院高分子化工专业, 现在中国石化集团广州石油化工总厂华德石化有限公司从事化验、计量管理工作。
- 曹超勇 工程师, 1968 年生, 1991 年毕业于江苏化工学院石油储运专业, 现在石家庄炼油厂工程处从事工程管理工作。
- 陈晓辉 工程师, 1973 年生, 1996 年毕业于西安石油学院机械工程专业, 现在中石化管道储运公司石油机械厂从事工程技术工作。
- 许德全 副译审, 1940 年生, 1965 年毕业于北京外国语学院(现北京外国语大学)俄罗斯语言文学专业, 现已退休。

**Subject Headings:** oil pipeline, gas transmission pipeline, transformation, stress and residual strength analysis and calculation, technological analysis

### ° DESIGN & CALCULATION °

WANG Tao, ZHANG Peng *et al* : **Analysis on the Safety and Reliability of City Gas Pipeline Network**, *OGST*, 2003, 22 (3) 15 ~ 18.

According to the features of city gas pipeline network, this paper analyzes its running reliability, gives the assessment contents of reliability and proposes the classification principle of city gas pipeline network. The authors put all the process of pipeline management into three phases, that is, the beginning phase, the middle phase and the end phase. In addition, the probability method is applied to discuss the reliability for the beginning and the middle phase, and the failure tree of city gas pipeline network used in the beginning phase is presented. For the running safety of city gas pipeline network, the assuring measures are also brought forward.

**Subject Headings:** gas pipeline network, operation, reliability, failure tree analysis, assessment

SHUAI Jian and XU Kui: **Finite Element Method of Failure Assessment of Cracked Pipe**, *OGST*, 2003, 22 (3) 18 ~ 21.

The precise calculation of J integration is fundamental to safety assessment of structure containing defects. For surface crack in pipe, this paper presents the finite element model including line spring element that is used for J integration calculation, as well as numerical examples. With the model in this paper the precise failure assessment curves can be generated based on J integration theory. Numerical results are provided as to the analysis of the effects of the various kinds factors on the failure assessment curve. It is showed that a single failure assessment curve is not enough precise because such factors as crack size and material performance parameter have effects on failure assessment curves. Therefore, the finite element method presented in the article is particular valuable to the precision failure assessment of cracked pipe.

**Subject Headings:** oil and gas pipeline, crack, J integration, finite element method, safety assessment

### ° CONSTRUCTION TECHNIQUE °

YAO Zhixiang: **Removal Construction for a Crossover Products Pipeline Section**, *OGST*, 2003, 22 (3) 22 ~ 23.

A 2km—long crossover products pipeline section in Golmud—Lhasa Products Pipeline will be removed from No. 1 Bridge to No. 2 Bridge to meet the needs of local economic development. In the article, the program of pipeline section removal and new pipe section installation construction in winter and construction process are introduced.

**Subject Headings:** products pipeline, crossover line, pipeline removal and installation, construction

WEI Jie, WANG Tieshan *et al* . **The Crossing Construction of Gas Transmission Pipeline in Kalakashi River**, *OGST*, 2003, 22(3) 24 ~ 25.

A gas transmission pipeline served for Hetian Power Station with 355.6mm in diameter will cross over Kalakashi River in Xinjiang Province. According to the special geological conditions around the crossing area, the construction plan about trench digging, water draining and pipe towing is worked out. The project is successfully carried out within a month.

**Subject Headings:** gas transmission pipeline, river crossing, construction, method