

设计计算

用动坐标迭代法分析海洋管道敷设时的应力

帅 健* 吕英民 张进国

(石油大学(北京))

帅 健 吕英民等:用动坐标迭代法分析海洋管道敷设时的应力,油气储运,1996(10)15,21~24。

摘 要 在海洋管道敷设期间,对管道应力分析要考虑的因素很多,如托管架的曲率和长度、管道的张力和浮力、管道的覆盖层及其输送的介质,特别是当用敷管船敷设管道时,有很长一段管子悬在海水中,使管子存在较大的弯矩。另外,由于管道存在大转角,产生较难处理的非线性问题。因此,需要精确地计算管子的变形、荷载和应力,将动坐标迭代法应用于海洋管道敷设期间的应力分析,并用一种新的“接触”与“放松”的迭代算法求解管道和海洋的接触受力问题。结果表明,该算法能很快地收敛到精确结果,满足工程分析要求。

主题词 水下管道 管道敷设 应力分析

管道的应力分析方法及要考虑的因素很多^[1,2],
动坐标迭代法是其中的一种。

一、单元模式

选用两个结点的管单元,设单元的位移模式^[3]为:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ \theta \end{Bmatrix} = N \{\delta\}^e \quad (1)$$

式中 u, v —— 梁单元的位移;

θ —— 转角;

N —— 形函数矩阵;

$\{\delta\}^e$ —— 列阵,共有 6 个分量,即

$$\{\delta\}^e = \{u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j, \theta_j\}^T \quad (2)$$

单元的荷载向量为:

$$\{f\}^e = \{N_i, V_i, M_i, N_j, V_j, M_j\}^T \quad (3)$$

并且 $[k]^e \{\delta\}^e = \{f\}^e \quad (4)$

式中 $[k]^e$ —— 单元弹性刚度矩阵。

在线性分析时,由单元刚度矩阵集成的总体刚度矩阵与位移无关,可一次求解总体平衡方程组,得出结点位移;而在非线性分析时,总体刚度矩阵和位移是相关的,需迭代求解。

二、动坐标迭代

图 1(a)中给出了整体坐标系 xoy 中一个未变形的管单元,从结点 i 和 j 的坐标值出发,计算出 x_0, y_0, L_0 和 θ_0 。当单元变形后,结点位移为 $u_i, v_i, \theta_i, u_j, v_j$ 和 θ_j ,单元移动到图 1(b),建立起变形后结点 i 和 j 的局部坐标系 $x'iy'$ 。

由图 1(b)可得:

$$\left. \begin{aligned} x_L &= x_i + u_j - u_i \\ y_L &= y_i + v_j - v_i \\ \theta &= \arctg \left(\frac{y_L}{x_L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

于是,单元在局部坐标系 $x'iy'$ 中的结点位移可表示为:

$$\left. \begin{aligned} u'_i = v'_i = v'_j = 0 \quad u'_j = L - L_0 = (x_L^2 + y_L^2)^{\frac{1}{2}} - L_0 \\ \theta'_i = \theta_i - (\theta - \theta_0) \quad \theta'_j = \theta_j - (\theta - \theta_0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

也可以用结点位移列阵表示为:

$$\{\delta\}^e = \{0, 0, \theta', u'_j, 0, \theta'_j\}^T \quad (7)$$

单元局部坐标系和整体坐标系之间的转换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

* 102200,北京市昌平区石油大学机电系;电话:(010)69745566-3443。

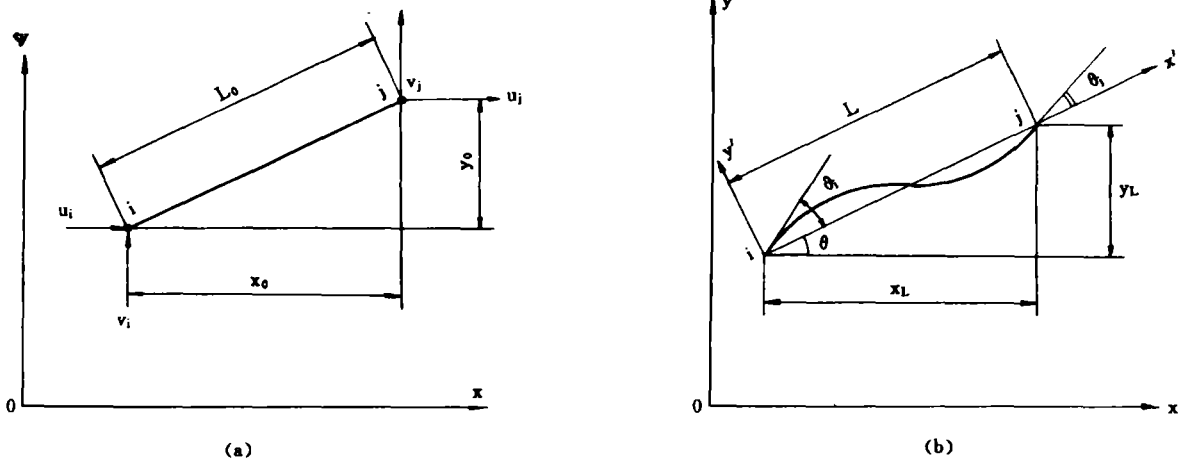


图 1 管单元的变形过程

具体计算步骤如下：

(1)用体系的线性解作为首次近似解,在此基础上建立单元局部坐标系；

(2)在局部坐标系下,计算各单元的位移列阵 $\{\delta\}^e$ 、刚度矩阵 $[k]^e$ 及结点力 $\{F\}^e$, 公式如下：

$$\{F\}^e = [k]^e \{\delta\}^e \quad (9)$$

(3)利用坐标变换得到整体坐标系中的 $[k]^e$ 和 $\{F\}^e$ ：

$$\begin{cases} [k]^e = T[k]^e T^T \\ \{F\}^e = T\{F\}^e \end{cases} \quad (10)$$

(4)集合单元的刚度矩阵,形成当前变形位置的结构刚度矩阵 $K = \sum [k]^e$ ；

(5)计算各单元作用于结点上的力 $\{F\} = -\sum \{F\}^e$, 并算出不平衡力 $\{F\}^e$ ；

(6)求解体系平衡方程式 $K\{\Delta\delta\} = \{F\}$, 得到位移增量 $\{\Delta\delta\}$, 将位移增量加到前一次迭代累积起来的结点位移 $\{\delta\}$, 得到新的结点位移近似值；

(7)检查收敛性,若不满足收敛条件,则返回到步骤(2)。

上述过程,可用迭代公式表示为：

$$\begin{cases} [K]_n \{\Delta\delta\}_{n+1} = \{\Delta F\}_{n+1} \\ \{\Delta F\}_n = \{P\} + \{F\}_n \\ \{\delta\}_{n+1} = \{\delta\}_n + \{\Delta\delta\}_{n+1} \end{cases} \quad (11)$$

在对基本方程迭代求解时,常使用各种范数定义收敛准则,以检查求解过程是否收敛到非线性解。采用总体的收敛准则,如果式(12)成立,那么认为数值求解过程已经收敛。

$$\frac{\sqrt{[\sum_{i=1}^m (\delta_i^r)^2]} - \sqrt{[\sum_{i=1}^m (\delta_i^{r-1})^2]}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^m (\delta_i^r)^2]}} \quad (12)$$

式中 m —— 自由度总数；
 $r, r-1$ —— 连续两次迭代。

三、非线性边界条件

图 2 是管道敷设线路示意图。设管子总长为 l , 在海床上的管子长度为 l_0 , 海水深度为 H , 若取图 2 所示的坐标系,则边界条件可以表示为：

$$\begin{cases} y(x) = -H & 0 \leq x \leq l_0 \\ y'(x) = 0 & 0 \leq x \leq l_0 \\ M(x) = 0 & 0 \leq x \leq l_0 \\ y(l) = 0 \\ y'(l) = \alpha \end{cases}$$

由于管子的悬空长度和管子的变形有关,不能预先确定,因此边界条件的处理特别困难。采用文献[4]中类似的接触问题算法求解,迭代步骤如下：

(1)设定一悬空长度,计算悬空结点的位移和与海床接触结点的约束反力。

(2)对于悬空段,检查结点位移是否超过海水深 H_0 。如果结点位移达到或超过海水深度,那么设定此结点为“接触”结点。

(3)对于与海床相接触的结点,判断其约束反力是否向上。如果约束反力向上,那么此结点的接触状

态是合理的;如果约束反力向下,那么约束反力是不合理的,取消此结点的“接触”状态,设定此结点为“放松”结点。

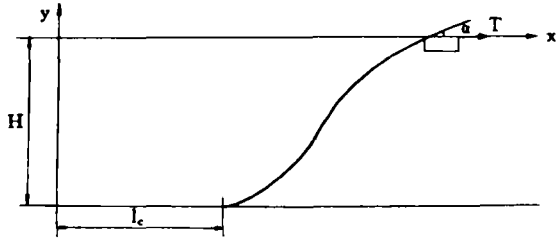


图 2 管道敷设线路示意图

(4)按照新设定的约束条件,重新计算结点的位移和约束反力。

(5)重复步骤(2)~(4),直到不出现新的“接触”与“放松”结点为止。

这种算法特别有效,通过不多的几次迭代,能使问题得到解决。

例:在上述有限元理论上,编制了计算机程序计算。已知:

- 海水深度:50 m;
- 管子外径:1.22 m;
- 管子壁厚:0.014 3 m;
- 混凝土覆盖层厚:0.114 3 m;
- 混凝土相对密度:3 051 kg/m³;
- 管子在海水中的浮重:2.28 kN/m;
- 管材弹性模量:210 GPa。

取管道的计算长度为 300 m,保证在海床上有足够长的管道。

图 3 是在不同管道张力的情况下管道的变形曲线。管道的张力增大时,管子在海水中的悬空长度也增加。根据悬在海水中管道的变形特征,将其分为垂弯段和拱弯段两部分,垂弯段是管段下凹产生正弯矩的部分,拱弯段是管道上凸产生负弯矩的部分。水平张力可以改善管道中的弯矩分布,减小垂弯段的正值弯矩。

图 4 是在不同管道张力的情况下管道中的弯矩。随着张力的增大,管道中的最大正值弯矩减小,而负值弯矩(拱弯段的弯矩)受张力的影响不大。

图 5 是在不同管道张力的情况下的剪应力。除管道张力外,托管架的斜率对管道中的弯矩影响也较大。

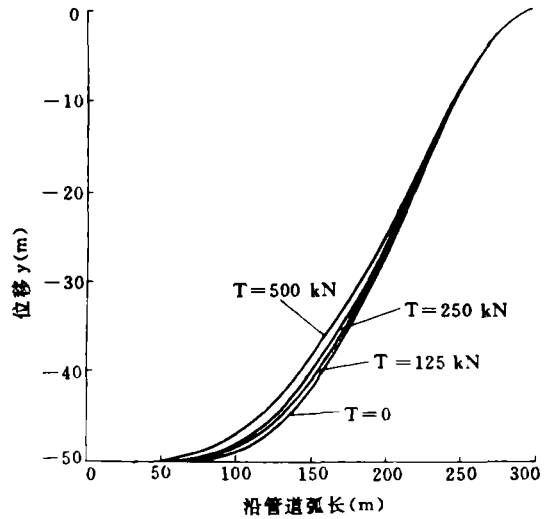


图 3 不同水平张力时管道的变形

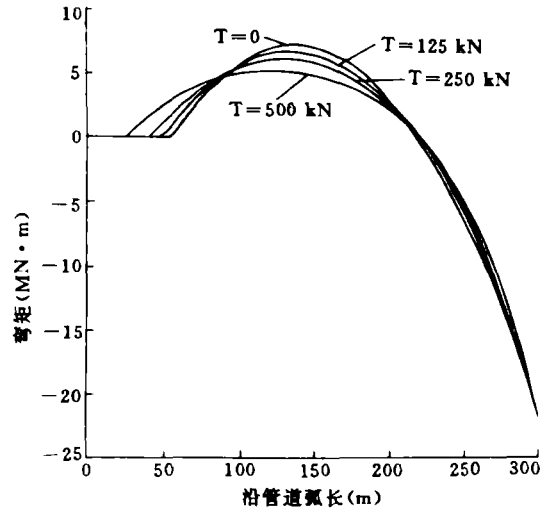


图 4 不同水平张力时管道中的弯矩

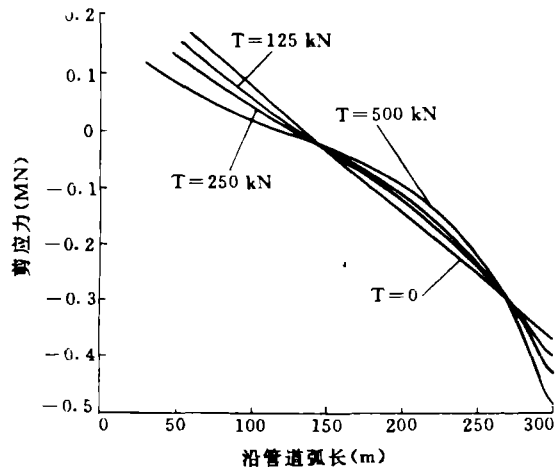


图 5 不同张力时管道中的剪应力

图 6 是在不同情况下管道中的弯矩。从图 6 中可以看出,托管架的斜率对垂弯区的正值弯矩影响不大,而对拱弯区的负值弯矩产生很大影响。

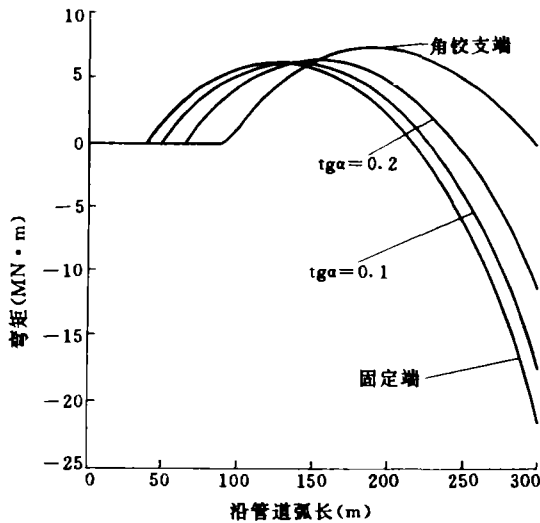


图 6 不同托管架斜率时管道中的弯矩 ($T=250 \text{ kN}$)

图 7 是不同情况下管道的位移。从图 4 和图 5 可以看出,在管道与海床接触段上,满足零弯矩的边界条件,表明此算法的精确度较高。

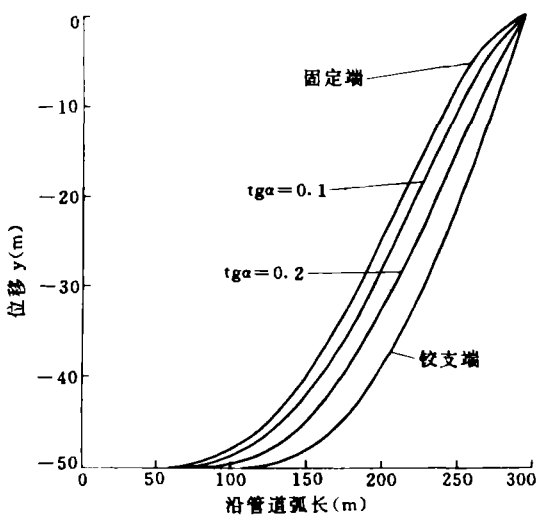


图 7 不同托管架斜率时管道的位移 ($T=250 \text{ kN}$)

动坐标迭代法已成功地应用于管道敷设时的应力分析,接触问题的迭代算法也是可靠的。算例表明,该算法能很快收敛到精确结果,得出满足工程分析要求的答案。

参 考 文 献

1. Dareing, D. W. and Neathery, R. F. : Marine Pipeline Analysis Based on Newton's Method with an Artic Application, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME Series B, 1970(4) 92, 827~833.
2. Schmidt, W. F. : Submarine Analysis with an Elastic Foundation by the Finite Element Method, Journal of Engineering for Industry, Trans. ASME, Series B, 1970(2)103, 480~484.
3. 谢贻权 何福保:弹性和塑性力学中的有限元法,机械工业出版社(北京),1982。
4. 帅健 蔡强康等:弯曲井眼中下部钻具组合的有限元分析,石油学报,1990(4)11,95~105。

(收稿日期:1995-11-21)
(修改稿收到日期:1996-05-20)
编辑:康力平

下 期 要 目

我国 LPG 发展现状	
及趋势	周惠峰
管道的鞭击分析	徐思浩
东北林区沼泽地	
管道建设经验	赵元弼等
热媒-水换热器水侧的	
腐蚀与缓蚀剂	曹殿珍等
管道封堵抢修作业中	
应注意的问题	孙盛普
海底管道起吊时最佳吊点	
位置的选择	帅 健
“拒、引”结合防雷技术	
在油库中的应用	刘德海等
长输管道固定墩处漏油	
引起的思考	张学舜
长输成品油管道沙区	
护坡保护实践	姚志祥
紊流状态下含气含蜡原油	
的蜡沉积	吴海浩

作 者 介 绍

- 权忠奥** 详见本刊 1996 年第 1 期。
- 李锦昕** 工程师, 1964 年生, 1986 年毕业于成都理工学院, 1992 年毕业于物化探研究所, 获工学硕士学位。现从事降凝剂研制, 红外光谱、液相色谱分析工作。
- 曾多礼** 详见本刊 1996 年第 2 期。
- 吴天云** 详见本刊 1996 年第 9 期。
- 杨炳泉** 高级工程师, 1945 年 2 月生, 1968 年毕业于华东化工学院。现任江苏输油管理处仪征分输站生产组组长。
- 帅 健** 副教授, 1963 年 8 月生, 1982 年 8 月毕业于武汉化工学院, 1987 年毕业于石油大学(北京)研究生部。现为石油大学(北京)机电系综合强度教研室主任, 并在职攻读储运工程专业博士学位。
- 陈三强** 工程师, 1955 年 11 月生, 1985 年毕业于原中国石油天然气管道职工学院管道线路工程专业。现任中国石油天然气西北管道指挥部库鄯管道工程项目经理, 主要从事管道建设。
- 姚志祥** 详见本刊 1996 年第 2 期。
- 原武明** 工程师, 1963 年 9 月生, 1985 年毕业于江汉石油学院机械系矿机专业。现任中国石油天然气总公司工程技术研究院工艺装备研究室副主任。
- 赵大喜** 工程师, 1964 年生, 1986 年毕业于中国人民解放军重庆后勤工程学院油料系。现任广州军区 54034 部队郴县油料仓库技术队队长。
- 何文光** 助理工程师, 1971 年 2 月生, 1994 年毕业于南京解放军国际关系学院军事外交系。现从事国内外油料储运资料的研究工作。
- 汪敬峰** 助理工程师, 1968 年 9 月生, 1991 年毕业于抚顺石油学院石油储运专业。现在中国石化沧州炼油厂油品车间从事工艺技术管理工作。
- 朱连章** 讲师, 1965 年 12 月生, 1986 年 6 月毕业于华东石油学院计算数学专业, 1988 年 12 月毕业于中国科学院沈阳计算技术研究所计算机系统结构专业, 获硕士学位。现在石油大学(山东)计算机系工作, 主要从事微型计算机工业自动化的教学和科研工作。
- 赵广森** 详见本刊 1996 年第 5 期。
- 王凡喜** 详见本刊 1996 年第 1 期。
- 万世清** 助教, 1968 年 2 月生, 1991 年毕业于石油大学(山东)机械系石油储运专业, 现在山东省东营市胜利油田职工大学从事储运专业的教学与科研工作。
- 马书定** 翻译, 1967 年 12 月生, 1989 年毕业于北京第二外国语学院英语系。现在辽河油田设计院信息所从事科技情报翻译工作。
- 赵东瑞** 翻译, 1966 年生, 1989 年毕业于西北大学。现任中国石油天然气管道勘察设计院技术信息室主任, 从事翻译工作。

(15)10,12~14.

Golmud—Lhasa products pipeline was designed to transport in batch gasoline, jet fuel, illuminating kerosene, and diesel oils (—35[#] and —20[#]). With the economic development in Tibet, the demand for —10[#] diesel oil is increasing because of its low price and potential economic benefit. As a result, it is considered to transport —10[#] diesel oil by Golmud—Lhasa pipeline. After analysing the atmospheric temperature, ground temperature and wind velocity along pipeline route and on the temperatures of the incoming and outgoing oil at pump stations, it is believed feasible, by duly adjusting operating parameters, to transport —10[#] diesel oil in every August and September, when the oil passing through frozen soil zones can maintain above 5°C.

Subject Headings: products pipeline, transportation, diesel oil, feasibility study, tundra.

• OIL & GAS STORAGE •

Wu Tianyun and Ge Jingpeng: **Stress Analysis and Strength Design for the Bottom Node of Cylindrical Metal Tanks**, *OGST*, 1996(15)10,15~18.

The bottom node of a cylindrical metal tank consists of bottom shell course, fillet weld and annular plate, and the strength design of the bottom node is of great importance to the whole tank. For the correction of the maximum circumferential stress (primary stress) in tank shell, firstly considered is the combined effect of three circumferential stresses: ① σ_a : resulting from M_0 for axial shell displacement, ② σ_b from M_1 and Q_1 for axial deformation of bottom shell course, and σ_c from the axial bending stress. For the correction of fillet weld, M_0 is used as the bending moment in the junction between bottom shell course and fillet weld, which is the critical point for secondary stress correction. For the strength correction for annular plate, calculations show that the maximum bending moment exists in the two sides near the central line of shell plates, and the correction method is the same as for the secondary stress. In addition to the theoretical analysis and classification for primary and secondary stresses in bottom node, strength correction is also made for existing tanks and suggestions are given for tank modification.

Subject Headings: oil tank, tank bottom, weld, stress analysis, strength, design

Yang Bingquan: **Why Leakage Frequently Occured in Single Deck After Tank Renovation**, *OGST*, 1996(15)10,19~20.

Subject Headings: oil tank, technical renovation, leakage, analysis

• DESIGN & CALCULATION •

Shuai Jian, Lu Yingmin and Zhang Jinguo: **Stress Analysis of Offshore Pipelaying Using the Method of Iteration in Moving Coordinate**, *OGST*, 1996(10)15,21~24.

Many factors shall be considered in terms of stress analysis of offshore pipelaying, including the curvature and length of pipe carrier, the tension and buoyancy on pipeline, pipe coating, and the medium to be transported. It is especially the case when pipe laying barge is used: The moment of flexure in pipe is

considerably large because of the big pipe length suspended in the sea; Also non-linear stress occurs due to large turning moment in pipes. Therefore, it is necessary to calculate accurately pipe deformation, load and stress, to apply moving coordinate in the stress analysis for offshore pipelaying, and to use the iteration method of "contact" and "relaxation" to solve the contact between pipeline and seawater. The results show that this method can quickly converge into the requirements for engineering analysis.

Subject Headings: submarine pipeline, pipelaying, stress analysis

• PIPELINE ROUTE ENGINEERING •

Chen Sanqiang, Hu Wanzhi and Liu Bo: **Kaidu River Crossing in Korla—Shanshan Oil Pipeline**, *OGST*, 1996(10)15,25~28.

Kaidu River is a large river crossed by Korla—Shanshan Pipeline. Used in the project was the method of horizontal directional drilling, which is characterised by high construction speed, adequate depth of cover for pipeline, accurate location and low environmental impact. Described in this paper are the construction techniques and quality control measures. Preheating before welding was made to prevent microcracks. To prevent pipe coating from damage during back dragging, American-made heat shrinkage sleeves were used, which are dedicated to the usage for directional drilling. Sample inspection, 100% x-ray and 100% ultrasonic examinations were made to guarantee welding quality. Joint coatings were inspected by means of high pressure pinhole, peeling test as well as visual examination. Finally, hydrostatic test was made.

Subject Headings: oil pipeline, quality control, welding, measure, corrosion control

• CORROSION CONTROL & INSULATION •

Yao Zhixiang: **The Second Leak Inspection and Repairing for Golmud—Lhasa Pipeline**, *OGST*, 1996(10)15,28~31.

Having being in operation for 20 years, Golmud—Lhasa Products Pipeline suffered from grievous coating damages due to unfavorable environment, complex geology and artificial destructive activities. In a period of four years and at a cost of 1.08 million RMB, the second leak inspection and repairing over the 1,080 km pipeline was made, and 14,236 leak points discovered, excavated and recoated per new specifications with construction method, techniques and expences as well as pipeline corrosion information described in detail. The following reasons for coating damages are introduced: ①soaking with salty water, ②wheathering, ③repeatative rolling by construction machinery on Qinghai-Tibet Highway, and ④poor coating quality. After leakage repairing, the pipeline performances were recovered, and scientific experiences provided for pipeline management and production planning.

Subject Headings: products pipeline, leakage, inspection, corrosion control, construction

Yuan Wuming: **Abrasive Selection for Shot (Impeller) Blasting of Steel Pipes**, *OGST*, 1996(10)15,32~34.

Surface cleaning is critically important for pipe coating, and shot (impeller) blasting is the most suitable derusting method for most kinds of coating materials. Introduced in the paper are the variety, selec-