

任烨, 夏波, 刘菲. 孔底解除法在上海综合深井钻孔原地应力测量中的应用[J]. 华南地震, 2018, 38 (1): 71-76. [REN Ye, XIA Bo, LIU Fei. Application of Hole-bottom Relief Method in Stress Measurement of In-situ Bored Hole in Shanghai [J]. South China journal of seismology, 2018, 38 (1): 71-76.]

孔底解除法在上海综合深井钻孔 原地应力测量中的应用

任 烨, 夏 波, 刘 菲
(上海市地震局, 上海 200165)

摘要: 上海综合深井项目建设第一阶段完成, 作为国内第一个建成的综合深井地震观测站在建设初期开展了许多有关地球物理基础数据的收集, 其中在张江综合深井进行了用孔底解除法对深井原地应力的测量。经过综合分析, 给出试验区地应力的赋存规律和基本特征, 为上海市地震局浦东地震监测中心地震综合观测深井综合观测仪器安装提供地应力背景资料。

关键词: 地应力; 孔底解除法; 综合深井; 地震地质

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2018) 01-0071-06
DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.009

Application of Hole-bottom Relief Method in Stress Measurement of In-situ Bored Hole in Shanghai

REN Ye, XIA Bo, LIU Fei
(Shanghai Earthquake Agency, Shanghai 200062, China)

Abstract: The first phase of Shanghai comprehensive deep well project construction is completed, as the first comprehensive deep seismic observation station built in the early construction, which carried out a lot of relevant basic geophysical data collection, in which deep Zhangjiang integrated were measured in situ with deep hole bottom relief method. Based on the comprehensive analysis, the regularity and characteristics of ground stress in the test area are given, which provides the background information for the installation of the comprehensive observation instrument for the comprehensive observation of the Pudong earthquake monitoring center of Shanghai Earthquake Agency.

Keywords: Ground stress; Hole bottom relief method; Comprehensive deep well; Seismic geology

收稿日期: 2017-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372222); 中国地震局测震骨干基金项目(20150410); 上海市地震局科技专项 (2017-1)

作者简介: 任 烨(1980-), 男, 工程师, 综合深井数据研究等工作。

E-mail: renyereny@126.com.

0 引言

上海浦东张江深井综合地震观测站位于张江南部的浦东监测中心院内,集成了地磁仪、应变仪、倾斜仪、测震仪、强震仪、GPS、孔隙压仪、地温仪、水温仪、水位仪等多手段的综合地球物理观测站。在建设上海市地震综合深井的时候,正是一个很好的契机对上海综合深井钻井孔地应力进行测量,保留第一手收据。为上海地震的中长期预报和工程地质勘查提供依据^[1-3]。

目前国内外能进行深孔地应力测试的方法有水压致裂法和深孔套芯解除法,水压致裂法但要破坏井壁,测试后改变井壁的自然状态,无法满足地震观测的要求^[4];深孔套芯解除法,采用井下应变记录仪进行套芯法地应力测量,相当于将应变仪小型化后放到孔底,测量井下岩石的自然环境,记录解除全过程应变曲线^[5-7]。在张江地震综合观测深井钻孔地应力场测量中,采用了应力解除法和实现完全温度补偿的空心包体应变测量技术,其中采用一些新的理论和技术,可以大幅度提高测量结果的可靠性和准确性。

1 孔壁应变计的测量技术

1.1 深孔套芯地应力测量仪结构特点

在本次地应力测量中,使用的是由中国地质

科学院地质力学研究所研制的深孔专用地应力测量仪 2006 型-深孔套芯地应力测量仪,包括井下专用空心包体探头和井下应变记录仪。其中空心包体探头,是由 12 个 120 Ω 箔式应变片(3 组应变花(90°、0°、 $\pm 45^\circ$),呈径向 120°排列)组成的,一次测量即可获得该点的三维应力;水下胶为丙烯酸树脂或可水下低温固化的双组份环氧树脂两种,下井前配好,适应期 2 h。井下应变记录仪部分则是一台超小型智能化数字仪器,采用 msc1200 微处理器芯片和 Flash 存储器电子开关技术研制开发的技术先进、方便实用的智能数字应变仪^[9]。

其主要特点是:外壳采用高强度不锈钢和高强度钢化玻璃视窗,端面密封圈防水结构耐静水压 10 MPa;独立微功耗电子定时器,可按事先设定的时间定时启动主机,一次充电可在井下定时待机数月,连续采集工作时间>20 h;1 s~12 h 采集控制时间间隔;RS232C 接口可以实现事后通讯,事后回访主机为 PC 机或笔记本电脑,简明快捷的人机对话窗口,利用主机或 PC 双向设置控制;理想实用的 PC 处理软件-多点曲线实时显示同时生成数据文件, σ - ϵ 曲线自动生成。

1.2 深孔套芯地应力测量仪测量程序

使用深孔套芯地应力测量仪,在井下空心包体环氧树脂三轴应变法的应力解除过程如下(图 1):

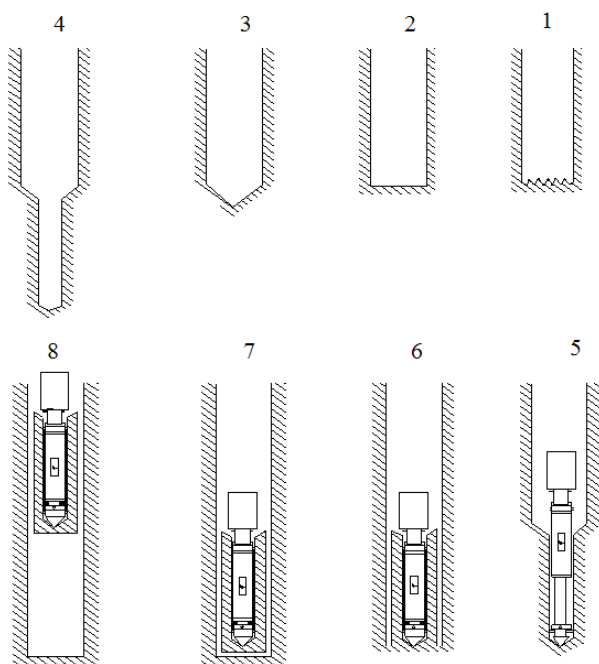


图 1 井下空心包体应变法应力解除过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of stress relieving process of underground hollow inclusion

(1) 打大孔: 在用钻机向围岩钻进应力解除孔, 钻孔深度以巷道围岩应力场的范围为准, 终孔点应不受环境围岩应力场的影响。钻头直径取 130 mm。

(2) 磨平钻孔孔底, 消除残余岩芯和岩块、岩粉, 岩芯管后带取粉筒。

(3) 换锥形钻头做锥形孔底: 以保证后面的小孔与大孔同轴心。

(4) 打小孔: 采用特制的液压钻具, 换上 $\phi 36$ mm 的小钻头, 打 50 cm 深的一段小钻孔。钻具不同深度上开有泻水孔, 通过水压的变化, 判断小孔的深度。

(5) 空心包体安装: 用砂纸将空心包体外侧圆柱面打毛; 按比例配制好粘结剂(A、B 两种液态材料按 1:3), 在空心包体的空腔内倒入适量的粘结剂, 固定好销钉, 将包体安装在定向器上。用钻杆慢慢地将其送入大孔中, 不断地接长钻杆, 并记下长度, 在剩余长度为 5 m 左右时要特别注意慢推, 以保证包体能够完好地进到小孔中。前端近入小孔 20 cm 左右, 应注意包体筒体部分缓慢推入, 探头和安装器脱钩, 包体成功地安装于小孔中。

(6) 应变初始数据: 在安装包体 20 h 左右, 环氧树脂固化。将安装器小心地从钻孔中提出, 安装器中电子罗盘记下探头安装角, 所显示数字为应力计的安装角。

(7) 套芯地应力解除与应变测试: 用薄壁钻头延伸大孔, 使小孔周围岩石与岩石本体分离开来, 从而实现应力解除。由于应力解除而引起的小孔应变或变形由应变计或变形计测试并通过记录仪器记录下来。根据测得的应变值或变形值即可根据有关公式计算出原岩应力值。

(8) 在井下应变仪到达预定时间时, 应变仪将自动启动, 开始测量, 此时应按预定深度开始缓慢钻进, 进行套芯解除, 套芯解除至一定深度后, 应变计读数趋于稳定。每隔 10 s 读数一次, 连续记录 10 h 以上, 达到预定深度后, 不再解除。将包含包体的岩芯折断并取出, 并对岩芯的岩性进行描述。

每个测孔第一测点完成后, 在下一预定测段孔底重新锥形孔底, 再打小孔, 重复以上步骤, 进行第二测点的测试。

2 张江深井综合观测井地应力测量结果与分析

2.1 观测井概况

张江深井综合观测井位于上海市地震局浦东地震监测中心院内, 设计深度为 410 m, 完井深度为 435 m, 最大井斜 0.5°, 观测井岩芯性质及其描述见表 1。

表 1 浦东地震井地层表
Table 1 Stratigraphic table of Pudong seismic well

序号	层顶深度/m	层底深度/m	层厚/m	土(岩石)名	地层描述
1	0	15.8	15.8	淤泥质粘土	软塑
2	15.8	26.3	10.5	淤泥质粘土夹薄层粉砂	软塑
3	26.3	43.7	17.4	含粘粒粉砂	稍密
4	43.7	45.5	1.8	粘土	可塑-硬塑
5	45.5	68.2	22.7	粉、细砂	稍密-中密
6	68.2	77.9	9.7	淤泥质粘土夹薄层粉砂	软塑
7	77.9	84.5	6.6	淤泥质粘土	软塑
8	84.5	122.4	37.9	细砂	中密
9	122.4	143.3	20.9	中粗砂	中密-密实
10	143.3	158.8	15.5	细砂	中密
11	158.8	173.2	14.4	粘土	可塑-硬塑
12	173.2	182.2	9	粉质粘土	可塑-硬塑
13	182.2	216	33.8	中砂	中密-密实
14	216	233.4	17.4	细砂	中密-密实
15	233.4	247.7	14.3	中砂	中密-密实
16	247.7	258.1	10.4	细砂	中密-密实

(转下表)

(接表 1)

序号	层顶深度/m	层底深度/m	层厚/m	土(岩石)名	地层描述
17	258.1	264.3	6.2	粘土	硬塑
18	264.3	285.5	21.2	中粗砂	密实
19	285.5	355.6	70.1	粘土	硬塑-坚硬
20	355.6	363.7	8.1	中风化泥岩	深红色, 岩质较软, 岩芯多呈短柱状。岩芯锤击可碎, 暴露在空气中数日, 失水, 崩解。
21	363.7	367.5	3.8	中风化粉砂岩	粉红色, 岩质较硬, 岩芯完整, 多呈长柱状。
22	367.5	372.1	4.6	中风化泥岩	深红色, 岩质较软, 岩芯多呈短柱状。岩芯锤击可碎, 暴露在空气中数日, 失水, 崩解。
23	372.1	379.2	7.1	中风化粉砂岩	粉红色, 岩质较硬, 岩芯完整, 多呈长柱状。
24	379.2	385.3	6.1	强风化泥岩	深红色, 岩质软, 岩芯多呈块状、短柱状。部分层位 382.7~382.9m 和 384.1~384.45m 松散, 胶结不好, 岩芯较破碎, 不完整。
25	385.3	397.4	12.1	中风化含粉砂泥岩	深红色, 岩质较软, 岩芯多呈短柱状、长柱状。
26	397.4	407.8	10.4	中风化粉砂岩	粉红色, 岩质较硬, 岩芯完整, 多呈长柱状。
27	407.8	412.0	4.2	中风化含粉砂泥岩	深红色, 岩质较软, 岩芯多呈短柱状、长柱状。
28	412	418	6	中风化粉砂岩	粉红色, 岩质较硬, 岩芯完整, 多呈短柱状、少量块状。
29	418	425	7	中风化含粉砂泥岩	深红色, 岩质较软, 岩芯多呈短柱状、长柱状。
30	425	435	10	强风化泥岩	深红色, 岩质软, 岩芯多呈块状、短柱状。部分层位 425.3~433.7 m 松散, 胶结不好, 岩芯较破碎, 不完整。

浦东综合深井结构是在深度 0~84.5 m, 放入了直径为 168 mm 的套管; 从深度 84.5 开始到井底 435 m 为止, 井孔直径为 146 mm 的裸孔, 且为了满足地震观测的需要, 井斜控制在 1°左右(图 2)。此次进行了两个应力解除法地应力测量点, 其测量部位在 365 m 和 385 m。

2.2 测量数据结果

根据各测点应力片读取数值, 可以分别得出两个测点的应力解除曲线, 选取在 385 m 处的读数(表 2)绘制应力解除曲线(图 3), 发现当套心的深度达到测试点附近的时候, 各应力片的读数增大超过了仪器的测量误差, 且数据趋向平稳, 大部分曲线变化规律正常, 表示数据可信。只有通道 5 数据异常, 有可能是仪器自身原因, 可不参加计算。同样的, 在 365 m 处所得数据也是如此。

之后根据实测应变数据求解地应力值, 同时要知道岩石的弹性模量和泊松比。由于试验用的应力仪中的属于空心包体应力计, 应变片不是直接粘贴在孔壁上的, 所以使用的岩石弹性模量公式为^[4]:

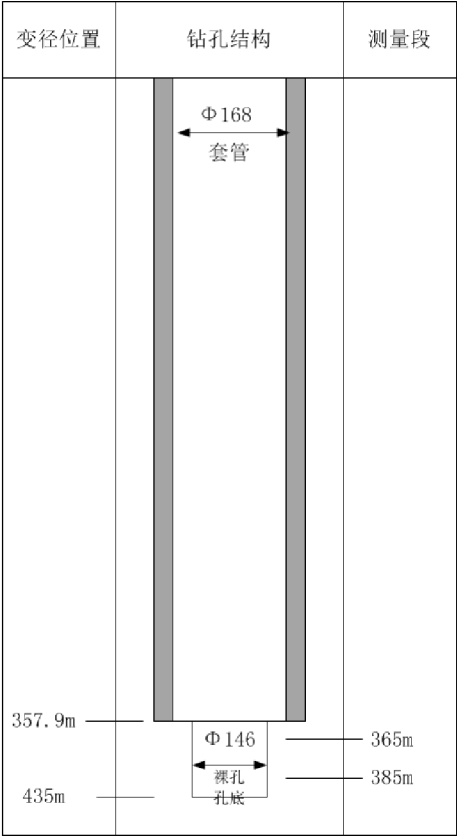


图 2 钻孔结构图

Fig.2 Borehole structure

表 2 385 m处应力片读数
Table 2 Stress sheet readings at 385 m

时间/s	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4	通道 5	通道 6	通道 7	通道 8	通道 9	通道 10	通道 11	通道 12
50	-6.15	-7.66	9.17	-6.32	1.25	-5.89	6.93	-5.55	-7.23	-4.93	8.74	-9.91
100	1.23	-1.66	1.51	3.47	3.51	-1.78	2.11	2.36	1.88	4.67	1.37	-2.12
150	44.43	-0.96	0.12	28.51	12.73	0.45	0.7	15.23	57.71	31.26	-0.96	18.31
200	63.37	12.34	2.36	37.48	20.14	12.44	2.32	39.67	69.89	46.16	2.13	28.47
250	67.62	20.43	2.57	36.72	20.01	20.58	2.54	40.39	72.15	48.42	2.67	29.16
300	66.12	17.21	3.19	35.31	30.37	17.89	3.41	39.96	72.03	48.71	3.33	29.08
350	65.89	16.38	4.45	31.26	23.45	16.03	4.43	39.87	70.17	46.96	4.86	28.16
400	65.01	15.52	6.52	29.57	37.46	15.36	6.25	38.77	69.58	44.61	6.15	27.36
450	64.99	14.93	5.78	28.63	51.38	15	6.16	38.71	68.32	41.3	5.86	26.17
500	64.36	14.89	3.49	27.96	55.46	14.67	4.01	35.62	66.01	40.06	3.88	25.93
550	62.83	14.75	4.49	27.42	57.15	12.23	4.9	33.01	65.13	38.73	4.84	25.64
600	61.53	15.01	5.37	26.73	58.64	13.56	5.57	28.31	65.09	35.32	5.21	26.06
650	60.94	14.61	4.99	26.26	58.99	13.31	5.09	26.93	64.99	33.99	4.89	24.91

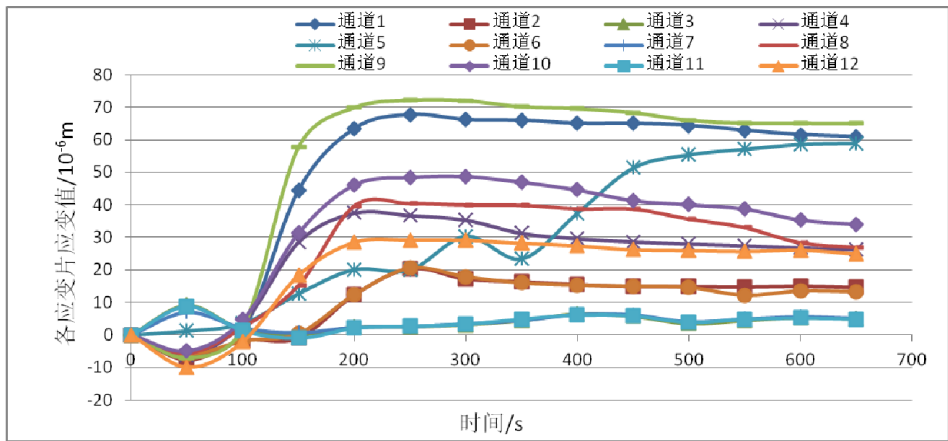


图 3 385 m处应力解除曲线
Fig.3 Stress relieving curve at 385 m

$$E=k_1 \frac{P_0}{\varepsilon_\theta} \frac{R^2}{(R^2-r^2)} \tag{1}$$

泊松比公式:

$$\nu=\frac{\varepsilon_\theta}{\varepsilon_z} \tag{2}$$

其中， P_0 为围压值； ε_θ 、 ε_z 为围压引起的平均周向应变和平均轴向应变； r 、 R 为套孔岩芯的

内、外径。该式中的 k_1 值与岩石和空心包体材料的弹性模量、泊松比、钻孔直径、空心包体的内外径及应变片的径向位置有关，不是固定的常熟必须用迭代法求解。因此，需要取岩石试样作单轴或三轴压缩试验，以获得测点岩石的弹性模量值从而确定 k_1 的值(表 3)。

表 3 弹性模量 E 、泊松比 ν 和 k 系数
Table 3 Elastic modulus E , Poisson's ratio ν and coefficient of K

测深/m	张江观测钻孔			E/GPa	ν	k_1	k_2	k_3	k_4
	方位角/(°)	倾斜角/(°)	安装角/(°)						
365	0	90	153	30.0	0.35	1	1	1	1
385	0	90	140	30.0	0.35	1	1	1	1

在已知各测点的岩石弹性模量和泊松比之后。沃罗特尼基和沃尔顿对空心包体应力计计算

原岩应力分量的公式进行了修改，得到了下面两个公式：

$$\varepsilon_\theta=\frac{1}{E}\left\{(\sigma_x+\sigma_y)K_1+2(1-\nu^2)[(\sigma_y-\sigma_x)\cos2\theta-2\tau_{xy}\sin2\theta]K_2-\nu\sigma_zK_4\right\} \tag{3}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4)$$

$$\gamma_{\theta} = \frac{4}{E} (1 + \nu) (\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) K_3 \quad (5)$$

式中： ε_{θ} 、 ε_z 、 γ_{θ} 分别为空心包体所测周向应

变、轴向应变和剪切应变值。

根据公式(3)~(5)即求得各测点的地应力值(表4)。

表4 各测点主应力计算结果

Table 4 Calculation results of principal stress at each measuring point

测点/m	最大主应力 σ_1			中间主应力 σ_2			最小主应力 σ_3		
	数值/Mpa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/Mpa	方向/(°)	倾角/(°)	数值/Mpa	方向/(°)	倾角/(°)
365	8.44	92.76	-0.54	7.87	2.73	-2.57	7.56	194.52	-87.37
385	8.99	95.80	1.29	8.51	6.00	-8.72	8.25	177.41	-81.18

2.3 结论

从表4所示的各测点地应力数据,可以发现张江地应力场分布存在如下的规律:

(1) 每个测点均有二个主应力接近于水平方向,其倾角一般不大于 $\pm 10^\circ$ 。另有一个主应力接近于垂直方向,其与垂直方向夹角不大于 10° 。

(2) 各测点最大主应力位于近水平方向。2个测点的最大主应力方向均与水平面的夹角小于 2° ,最小为 0.54° ,即几乎完全是水平的;最大为 1.29° ,因而都是非常接近于水平的。

(3) 根据上覆地岩层密度(2.4 g/cm^3)计算可知365 m和385 m处铅直应力分别为8.7 MPa和9.2 MPa,由于该地区覆盖层以泥沙为主,故实际应力垂直应力值应略小于计算数值。由此可见,测量所得垂直应力基本上等于或略大于上覆岩层的重量。2个测点中,垂直应力值与自重应力很接近,其与自重应力的比值均接近于1。

(4) 最大水平主应力值、最小水平主应力值与自重应力之比均接近于1,说明张江观测台地应力场是以水平构造应力为主导的,且处于等压力状态。最大水平主应力的走向,位于近东西向,与区域构造应力场最大主应力的方向相一致。

3 结语

根据张江观测台地应力测量结果的初步分析,可得出如下结论:

(1) 钻孔的最大水平主应力值为8.44~8.99 MPa,最小水平主应力值为7.87~8.51 MPa。测区内的地应力值与中国大陆地应力测试统计结果比较,属一般应力水平。

(2) 测区应力场主要以水平应力为主导,最大水平主应力值、最小水平主应力值与自重应力之比均接近于1,说明张江观测台地应力场是以水平构造应力为主导的,且处于等压力状态。

(3) 地应力测试孔实测最大水平主应力方向

分别为 92.76° 和 95.80° ,两个钻孔的平均值为 $\text{NW}85.72^\circ$,表明测区最大主应力方向为近EW向。这一结果符合本区震源机制解得出的挤压应力场方向。同时,与新构造活动及现代震源机制所反映的区域构造应力场方向一致。

(4) 本次测量仅有两个测点结果。因此,关于地应力测量的结果分析和结论仅供观测并安装综合地球物理监测仪器背景值参考使用。

参考文献:

- [1] 李伟,赵文舟,尹继尧. 上海深井地震综合观测地磁资料分析[J]. 地震地磁观测与研究,2013,34(Z2):89-95.
- [2] 任烨,周华根,刘佳敏,等. 上海崇明长江农场深井综合地震观测系统地磁观测数据质量分析[J]. 地震研究,2012,35(3):353-359.
- [3] 赵文舟,温燕林,陈婧. 上海深井项目形变观测资料分析[J]. 中国科技信息,2013(4):34-34.
- [4] 杨建辉,蔡美峰,郭延华. 下分层回采巷道微量内错布置技术研究[J]. 岩石力学与工程,2002,21(8):1 253-1 256.
- [5] 白金朋,彭华,马秀敏,等. 深孔空心包体法地应力测量仪及其应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(5):902-908.
- [6] 彭华,马秀敏,王震,等. 用于断层测量的温度补偿光纤外腔型法布里-珀罗位移传感器[J]. 地质力学学报,2013,19(3):315-324.
- [7] 王佳硕,窦林名,杨增强,等. 空心包体技术在艾维尔沟煤矿地应力测定中的应用[J]. 中国煤炭,2013(9):40-43.
- [8] 康红普,林健,张晓,等. 潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):827-831.
- [9] 李晋平,林健. 水压致裂法测量原岩应力在潞安矿区的应用[J]. 煤炭科学技术,2005,33(3):39-41.
- [10] 曾宪启,付洪岭. 岩体应力测量及其在三山岛金矿的应用[C]// 全国岩石边坡、地下工程、地基基础监测及处理技术学术会议论文集. 景洪:中国岩石力学与工程学会,1993.
- [11] 李方全. 地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报,1985(1):98-114.
- [12] 李方全,孙世宗,李立球. 华北及郑庐断裂带地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报,1982(1):79-92.