

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3803-06

高分子材料 SH 固沙性能与微结构相关性研究

和法国^{1,2}, 谌文武^{1,2}, 韩文峰^{2,3}, 张景科^{1,2}

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000;
3. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384)

摘 要: SH 作为一种环保型、节约型有机高分子固化材料, 用于沙漠治理具有广阔的应用前景。采用不同浓度 SH、不同加固方式对沙体进行加固, 加固后沙体微结构会发生变化, 其物理力学性能也会出现显著变化。通过图形处理软件对固化后沙体的 SEM 图像进行计算分析; 利用多元逐步回归分析方法对其性能参数与微结构参数之间的相关性进行计算, 并对其相关性进行分析评价。计算结果表明, 二者之间存在着良好的相关关系, 各向异性、等效直径、扁圆度、充填比和面积比是对固化沙土力学性质影响较为显著的 5 个微结构参数。从微观角度证明了 SH 是一种较为理想的高分子固沙材料。

关 键 词: 高分子材料; 加固性能; 微结构; 相关性; 多元逐步回归分析

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Correlation of microstructure indices and performance of sand solidified with polymer material SH

HE Fa-guo^{1,2}, CHEN Wen-wu^{1,2}, HAN Wen-feng^{2,3}, ZHANG Jing-ke^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Lanzhou 730000, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Organic polymer material SH, as an economical and environmentally solidified material, possesses useful properties in control of desert. Sand with different densities is solidified by SH material of different consistencies with different means of reinforcement. After being solidified, microstructure of the sand will be changed; and accordingly the mechanical property will change also. Graphics manipulation has been used to count and analyze the stereoscan photographs of solidified sand. Multivariate stepwise regression method has been used to calculate the correlation of microstructure indices and the mechanical property, and analyze and evaluate them. The result shows that there exists good correlation between the mechanical property and microstructure indices of sand after solidified by SH material. Anisotropy, equivalent diameter, aspect ratio, fill ratio and ratio are the five significant indices effecting on the mechanical property of sand with SH. It is shown that SH is an ideal polymeric soil consolidator in terms of microstructure.

Key words: polymer material; reinforcement property; microstructure indices; correlation; multivariate stepwise regression method

1 引 言

20 世纪 50 年代, 我国开始对土地沙化进行研究和治理^[1], 1956 年开始研究化学固沙。先后试验了水玻璃液态高效复合材料、聚乙烯醇 (PVA)、聚乙烯酸酯 (PVAC)、聚丙烯酰胺 (PAM)、LVA、LVP、WBS、STB 及乳化沥青、乳化原油等固沙剂。目前国内外至少有几十种化学固沙胶结材料, 但绝大多数都没有得到推广, 这是由于有的操作工艺复

杂, 成本较高, 有的材料稀缺, 有的效果不佳, 有的污染环境。所以研究新型化学固沙材料一直是防沙治沙一项重要的科研工作^[2]。

对于有机材料固沙的研究, 大多集中在宏观力学特性上, 而对其微观结构的研究比较少。尤其对高分子材料宏观性质与微结构之间存在的关系, 研究得更少^[3]。为了弄清其相互作用机制, 本文在 SH 固化沙体试验研究的基础上, 利用扫描电镜和多元逐步回归分析方法等手段, 分析了性能参数与微

收稿日期: 2009-03-25

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (No. 2001AA322010)。

第一作者简介: 和法国, 男, 1980 年生, 博士研究生, 从事地质工程与文物保护方面的研究。E-mail: hefg03@lzu.cn

通讯作者: 谌文武, 男, 1966 年生, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程和文物保护方面的教学科研工作。E-mail: sungp@lzu.edu.cn

结构参数之间的相关性。探讨 SH 固沙的机制,从而深刻认识这种新型固化材料,为其推广应用提供理论依据,提高实用性。

2 试验材料的性质

2.1 SH 材料

2001 年兰州大学自行研制开发出了新型高分子 SH 固化材料。SH 为水溶性高分子材料,分子量在 20 000 左右,透明无色,密度 1.09 g/cm^3 ,黏度低,凝胶时间易于控制,遇水可无限稀释,其 SH 原液固含量为 6%。大量的室内外试验^[4]表明,SH 具有良好的物理力学性能。SH 固化沙试样抗压强度在 1.1~6.0 MPa 之间,超过国际上对固沙强度 1 MPa 的要求;沙体固化后抗剪强度明显提高;压缩性能未受到破坏;水稳定性提高,固沙体渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

SH 用于固沙,固沙性能优良、成本低(为低成本制备),且有较好的环境效应。材料经对小白鼠作急性毒理试验,结论为无毒,完全达到了环保要求,不会对环境产生负面影响和破坏,为环保型修复材料。而用较稀浓度的 SH 固沙后表面还可长出植物,从而可与植树种草有机结合,相容性好,材料对沙还有团粒作用^[5-7]。所以,SH 在沙漠治理方面应用具有广阔前景。

2.2 风沙土

试验用沙子取自宁夏中卫沙坡头流动沙丘细沙,其基本物理性质如表 1。

3 试样制备与测试

试验中沙体试块的质量根据拟加固试块的密度,分别采用干密度 1.55、1.60、1.65 g/cm^3 设计,SH 掺量分别采用 20、40、60 ml 逐步增加。试验中使用的 SH 溶液固含量为 6%。

3.1 无侧限抗压强度测试

参照美国 ASTM 有关水泥土规程及我国土工和混凝土规程^[8],固化沙体试块采用 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 立方体。SH 和沙子按比例充分混合搅拌均匀,拌合时间不超过 10 min,后在压力机下采用双向挤压法压制成形。然后在室内自然风干养护 28 d 待测。本试验使用 WE-30 型液压力式万能

材料试验机对 SH 固化试样进行抗压强度测试。

3.2 剪切试验

根据试样性能与试验要求,采用自然快剪试验,试验用应变控制盒式直剪仪,根据设计密度称沙重,掺入适量的 SH,拌匀后轻轻压实装入环刀,风干后测试其 c 、 φ 值。

3.3 压缩性能测试

按设计密度称沙重,再掺入一定量的固沙剂拌和均匀,装入环刀,自然养护至干。采用杠杆式侧限固结仪,依据土工试验方法标准《GB/T50123—1999》中的规定进行测试。

3.4 渗透系数测定

制样方法与压缩试验相同,试样风干后用南 55 型渗透仪进行测定其渗透系数。

3.5 扫描电镜

将相同龄期、不同密度、不同 SH 固含量的加固试样,切割为直径和高度分别为 5 mm 和 10 mm 的圆柱体,作为微结构试样。采用液氮真空冷冻法干燥试样,保证失水过程中土微结构不发生变化^[9]。风干后将其用手掰开取新鲜面,取平整断面,轻吹将浮土清理干净,在试样表面镀金,使用日本电子光学公司 JSM-5600LV 低真空扫描电镜对微结构进行图像采集(图 1、2)。

3.6 图像处理

借助德国 Leica QWin 图像处理软件,对采集的 SEM 照片进行影像处理和计算,获取等效直径、扁圆度、充填比、面积比、各向异性等与土颗粒有关的微结构参数。

试验结果及采集数据如表 2。

4 相关性分析

4.1 多元逐步回归分析

多元逐步回归分析是指有两个或两个以上的自变量或者至少有一个非线性解释变量的回归分析,分析模型的表达式为^[10-11]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k \quad (1)$$

式中: β_0 为回归常数; β_1 为自变量 X_1 的偏回归系数; β_2 为自变量 X_2 的偏回归系数; β_k 为自变量 X_k 的偏回归系数; k 为自变量的个数。

表 1 宁夏沙坡头流沙的基本物理性质
Table 1 Basic physical parameters of sand in Shapotou of Ningxia

相对 密度	不均匀系数	物质组成/%				颗粒(mm)组成/%			
		石英	长石	方解石	重矿物	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005
2.66	2.09	55.8	36.9	2.5	4.8	74.8	24.9	0.1	0.2

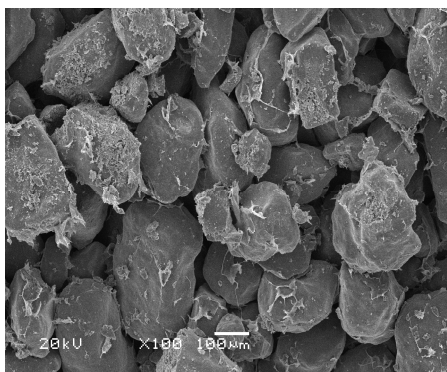
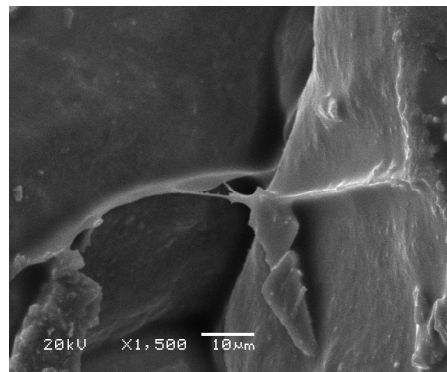
图 1 SH 固化沙体的微观结构($\times 100$)Fig.1 Microstructure of SH-fixed sand($\times 100$)图 2 SH 固化沙体的微观结构($\times 1\ 500$)Fig.2 Microstructure of SH-fixed sand($\times 1\ 500$)

表 2 SH 固化沙体性能参数与微结构参数测试结果

Table 2 Summary of performance and microstructure indices of sand solidified with SH

SH 含量 / mL	试样干密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	物理力学指标				微结构参数				
		无侧限抗压强度	黏聚力	内摩擦角	渗透系数	各向异性	等效直径	扁圆度	充填比	面积比
		q / MPa	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$	$k / (10^{-3} \text{cm}/\text{s})$	(A_n)	(D_e)	(K_{ci})	(F_r)	(A_{frac})
0	1.54	0.045	0	34.27	1.40	0.960	2.848	0.439	0.954	0.302
	1.55	2.25	2.63	21.27	1.19	0.959	2.152	0.427	0.966	0.313
20	1.60	2.80	3.81	22.70	1.09	0.958	2.659	0.422	0.950	0.334
	1.65	3.36	4.72	23.38	0.96	0.947	2.464	0.413	0.953	0.339
40	1.55	3.15	4.45	23.18	0.87	0.969	2.639	0.431	0.953	0.315
	1.60	3.82	6.23	25.23	0.72	0.967	2.831	0.418	0.939	0.336
	1.65	4.48	7.08	26.49	0.59	0.957	2.612	0.405	0.941	0.342
	1.55	3.88	7.04	26.27	0.74	0.978	2.617	0.417	0.950	0.358
60	1.60	4.44	7.29	28.74	0.56	0.975	2.767	0.419	0.952	0.379
	1.65	4.99	7.58	29.83	0.41	0.971	2.614	0.423	0.954	0.412

式(1)中的偏回归系数和回归常数的数值可以通过样本数据分析计算获得。

多元逐步回归分析的基本步骤^[12-13]: 逐个引入自变量, 每次引入对 Y 影响最显著的自变量, 并对方程的老变量逐个进行检验, 把变化不显著的变量逐个从方程中剔除掉。

SH 固化沙体的性能指标选择 4 个, 即黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、无侧限抗压强度 q 、渗透系数 k 。微结构参数选择 5 个, 即各向异性 A_n 、等效直径 D_e 、扁圆度 K_{ci} 、充填比 F_r 、面积比 A_{frac} 。

各向异性 A_n 描述颗粒在水平和垂直方向的排列的差异性。其值大于 1, 说明图像垂直方向被拉伸。 $A_n < 1$ 表明水平方向被拉伸。其值越接近 1, 表明颗粒无定向排列。等效直径 D_e 为与颗粒面积相等的等效圆的直径, 近似地表征单个颗粒的大小。扁圆度 K_{ci} 为颗粒短轴和长轴之比, 数值小于 1, 其值越小, 说明颗粒越趋于长条形, 反之, 愈接近于球体。充填比 F_r 为颗粒面积与其外接圆面积比的平方根, 其值越大, 说明颗粒越趋于呈圆形。面积比 A_{frac} 为颗粒面积占总图像面积的百分比, 也称平面

颗粒率, 可以从平面面积上说明颗粒的多少^[14-16]。

对 SH 加固风沙土的性能指标与微结构参数进行多元逐步回归分析, 计算其相关系数(表 3), 得各物理性能指标与微结构参数间的线性回归方程。

表 3 SH 固化沙体性能与微结构参数的单相关系数

Table 3 Coefficient of correlation analysis of performance and microstructure indices of sand solidified with SH

参数	各向异性 A_n	等效直径 D_e	扁圆度 K_{ci}	充填比 F_r	面积比 A_{frac}
抗压强度	0.731 6	0.758 9	-0.256 5	-0.504 0	0.750 6
黏聚力	0.551 9	0.643 9	-0.495 2	-0.563 3	0.782 7
内摩擦角	0.579 6	0.552 6	-0.308 1	-0.340 0	0.919 6
渗透系数	-0.535 6	-0.607 4	0.348 0	0.479 8	-0.806 5

4.2 SH 固化沙体性能与微结构参数的单相关系数

由表 2、3 可以看出, 在各微结构参数中, 各向异性、等效直径和面积比与无侧限抗压强度的相关系数最大, 面积比和等效直径与黏聚力的相关性最显著, 面积比也是与内摩擦角和渗透参数相关系数最大的微结构参数。

4.3 SH 固化沙体性能与微结构参数的线性回归方程

利用多元逐步回归分析计算得到了 SH 固化沙体性能参数与微结构参数的相关系数 (表 3) 以及回归方程式如下:

$$q = -33.6339 + 36.6531A_n + 1.5280D_e - 32.2193K_{ci} + 9.3233F_r + 6.8823A_{frac} \quad (2)$$

$$c = 31.3845 + 80.4259A_n - 0.9586D_e - 83.378K_{ci} - 79.975F_r + 29.3346A_{frac} \quad (3)$$

$$\varphi = 3.5786 + 80.2681A_n - 0.0550D_e - 68.0199K_{ci} - 53.3206F_r + 67.9197A_{frac} \quad (4)$$

$$k = -11.0152 - 7.1694A_n + 0.387D_e - 0.7946K_{ci} + 21.16518F_r - 5.9673A_{frac} \quad (5)$$

4.4 微结构参数对 SH 固化沙体性能的影响

(1) 各向异性对 SH 固化沙体性能的影响

颗粒的各向异性与无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角呈正相关,与渗透性呈负相关。说明 SH 固化沙体随着土颗粒各向异性值越大且小于 1,土的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角增大。即土颗粒的水平方向拉伸程度越大,水平方向面积就越大,水平方向颗粒就越多,颗粒间咬合嵌固程度相对就越好,颗粒要发生相对滑动需要克服的能量就越大,土就会表现出较好的抗压和抗剪性能。各向异性越接近于 1,说明土体越均匀,渗透性就越差。

(2) 等效直径对 SH 固化沙体性能的影响

颗粒的等效直径与无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角呈正相关,与渗透性呈负相关。即随着颗粒的等效直径增大,无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角也相应增大,渗透性相对减弱。说明 SH 固化沙体后,使小颗粒聚集成大颗粒,增强了颗粒间的联结力,提高了土的整体性,使结构更加紧密,孔隙减少,也减少了小颗粒之间发生滑动的机率,故无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角增大,而渗透系数减小。

(3) 扁圆度对 SH 固化沙体性能的影响

扁圆度与无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角呈负相关,与渗透性呈正相关。即扁圆度值越大,SH 固化沙体的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角越小。颗粒扁圆度值越大,颗粒形状越近于球体,形成骨架的颗粒越浑圆,越容易产生滑动,无侧限抗压强度和抗剪强度也就越小。而扁圆度越大,土

颗粒变得越浑圆,使得渗透性就越好。

(4) 充填比对 SH 固化沙体性能的影响

颗粒的充填比与无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角呈相关,与渗透性呈正相关。即颗粒的充填比越大,无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角也越小,而渗透系数相对增大。充填比为颗粒面积与其外接圆面积比的平方根,其值越大,说明颗粒形状越接近于其外接圆。颗粒越圆,土颗粒之间的接触面积越小,其联结力就越弱,土粒之间越容易产生滑动,故 SH 固化沙体的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角减小,而渗透系数增大。

(5) 面积比对 SH 固化沙体性能的影响

颗粒的面积比与无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角呈正相关,与渗透性呈负相关。说明单位面积土颗粒数越多,土体密度就越大,颗粒排列越紧密,SH 固化沙体的抗压强度和抗剪强度就越大。同时沙体孔隙减小,渗透性就越小。

4.5 拟合效果分析

通过无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角和渗透系数与各微结构参数的回归拟合曲线 (图 3~6) 可以看出,原始回归值与估计值拟合效果良好,说明利用多元逐步回归方法对 SH 加固风沙土性能与微结构参数关系建立的方程式和模型有意义。

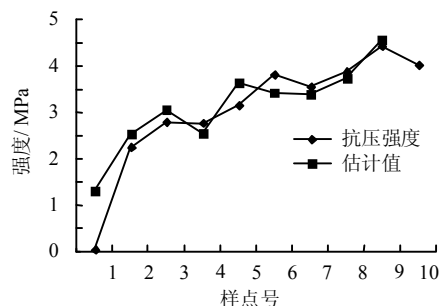


图 3 无侧限抗压强度与微结构参数回归拟合曲线
Fig.3 Regression and fitting curve of pressive strength and microstructure indices

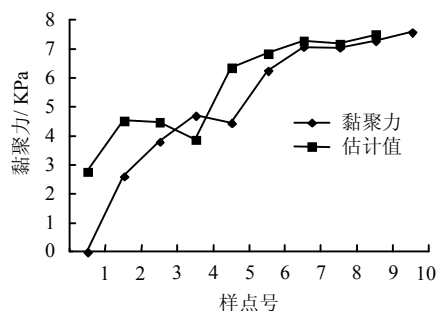


图 4 黏聚力与微结构参数回归拟合曲线
Fig.4 Regression and fitting curve of cohesion and microstructure indices

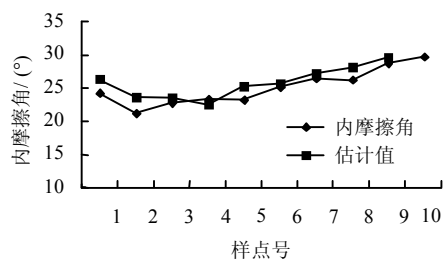


图 5 内摩擦角与微结构参数回归拟合曲线

Fig.5 Regression and fitting curve of internal friction angle and microstructure indices

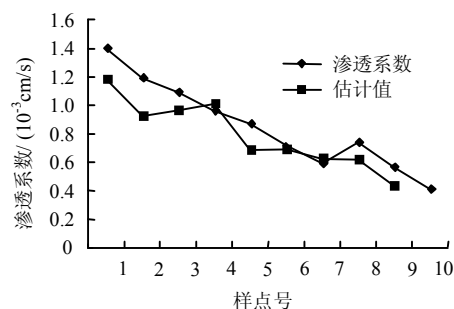


图 6 渗透系数与微结构参数回归拟合曲线

Fig.6 Regression and fitting curve of osmotic coefficient and microstructure indices

5 结 论

(1) SH 材料加固沙体后, 其性能的改善和微结构的变化之间存在不同程度的相关关系。通过多元逐步回归分析计算表明, 颗粒的各向异性、等效直径、扁圆度、充填比和面积比是对 SH 固化风沙土后土的无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角和渗透性影响较为显著的 5 个微结构因素。

(2) 影响无侧限抗压强度最显著的微结构参数为各向异性、等效直径和面积比。均呈正相关; 影响黏聚力最显著的微结构参数为各向异性、扁圆度、充填比和面积比, 其中各向异性、扁圆度和面积比与黏聚力均呈正相关, 而充填比与黏聚力呈负相关; 影响内摩擦角最显著的微结构参数分别是各向异性和面积比, 均呈正相关。各向异性、等效直径、充填比和面积比是影响渗透系数最显著的参数, 其中各向异性、等效直径和面积比分别与渗透系数呈负相关, 而充填比与其成正相关。

(3) 试验与分析结果表明, 经 SH 材料加固后, 风沙土的无侧限抗压强度、抗剪强度得到了明显的提高, 渗透性降低不明显, 同时微结构发生了微小的变化。说明 SH 材料可以显著提高风沙土的强度。因此 SH 用于沙漠化治理, 是一种比较理想的高分子材料。

参 考 文 献

- [1] 聂文果, 魏怀东. 荒漠化监测与防沙治沙法[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(3): 78—82.
NIE Wen-guo, WEI Huai-dong. Monitor of desertification and law of China for desert control[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(3): 78—82.
- [2] 朱震达. 治沙工程学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [3] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2554—2559.
WANG Yin-mei, YANG Zhong-cun, CHEN Wen-wu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2554—2559.
- [4] 王银梅, 孙冠平, 谌文武, 等. SH 固化沙体的强度特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2883—2887.
WANG Yin-mei, SUN Guan-ping, CHEN Wen-wu, et al. Strength characteristics of sand fixated by SH[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(Supp.2): 2883—2887.
- [5] 王银梅. 新型高分子固化材料在治沙工程中的应用研究[博士学位论文 D]. 兰州: 兰州大学, 2004.
- [6] 王银梅, 谌文武, 韩文峰. SH 固沙机制的微观探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 650—654.
WANG Yin-mei, CHEN Wen-wu, HAN Wen-feng. Microstudy on mechanism of sand fixation with SH[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 650—654.
- [7] 和法国. 岩土工程加固新材料试验研究[硕士学位论文 D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [8] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [9] 柴寿喜, 韩文峰, 王沛, 等. 用冻干法制备微结构测试用土样的试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(2): 46—48.
CHAI Shou-xi, HAN Wen-feng, WANG Pei, et al. Experiment on artificially-prepared clay samples by freeze-drying for SEM[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(2): 46—48.
- [10] 肯·布莱克, 戴维 L. 埃尔德雷奇. 以 Excel 为决策工具的商务与经济统计[M]. 张久琴, 张玉梅, 杨琳译. 北京: 机械工业出版社, 1999: 381—412.

- [11] 李兆敏, 林日亿, 张平, 等. 胜坨油田岩石三轴抗压强度的多元回归分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2471—2275.
LI Zhao-min, LIN Ri-yi, ZHANG Ping, et al. Multivariable regression analysis of triaxial compression strength of rock in Shengtuo oil field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(14): 2471—2275.
- [12] 高回璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000: 125—130.
- [13] 高平. EXCEL 在多元线性回归分析中的应用[J]. 青海统计, 2006, (12): 27—29.
GAO Ping. Excel and its applications in multivariate stepwise regression method[J]. **Qinghai Statistics**, 2006, (12): 27—29.
- [14] 王志强, 柴寿喜, 仲晓梅, 等. 多元逐步回归分析应用于固化土强度与微结构参数相关性评价[J]. 岩土力学, 2007, 8(28): 1650—1654.
WANG Zhi-qiang, CHAI Shou-xi, ZHONG Xiao-mei, et al. Multivariate stepwise regression method use in correlation analysis of microstructure indices and strength of solidified soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 8(28): 1650—1654.
- [15] 尚彦军, 王思敬, 岳中琦, 等. 全风化花岗岩孔径分布-颗粒组成-矿物成分变化特征及指标相关性分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1545—1550.
SHANG Yan-jun, WANG Si-jing, YUE Zhong-qi, et al. Variation features of pore radius and particle diameter distributions and mineral content of completely decomposed granite and correlation of parameters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1545—1550.
- [16] 柴寿喜, 王沛, 韩文峰, 等. 王晓燕高分子材料固化滨海盐渍土的强度与微结构研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1067—1072.
CHAI Shou-xi, WANG Pei, HAN Wen-feng, et al. Research on strength and microstructure feature of solidified saline soil in inshore with polymer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1067—1072.