

文章编号: 1000-7598 (2010) 10-3300-05

层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析

林 杭, 曹 平, 李江腾, 江学良, 何忠明

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 运用FLAC^{3D}模拟层状岩质边坡的破坏模式, 并采用强度折减法分析结构面倾角与稳定性之间的关系。结果表明: ①水平层状边坡坡顶变形破坏早于坡面和坡脚, 形成拉破坏区。当结构面倾角较小时, 顺倾向层状边坡主要发生滑移破坏; 当结构面倾角较大时, 发生弯折-溃曲破坏。直立层状边坡主要发生弯曲-板间拉裂-塌落破坏。逆倾向层状边坡的破坏形式为对于小倾角为滑移破坏, 对于陡倾角为倾倒破坏。②对于顺倾向边坡, 整体安全系数随结构面倾角先减小后增大, 呈现两头高、中间低的形态, 在倾角为30°时安全系数最小; 对于逆倾向边坡, 曲线呈现增大-减小-增大的态势, 并且大部分高于顺倾向边坡曲线, 符合实际情况。③所采用的低强度弹塑性单元能够比较真实地模拟软弱结构面的变形。

关 键 词: 层状边坡; 破坏模式; 数值模拟; 稳定性

中图分类号: TU 457

文献标识号: A

Numerical analysis of failure modes and stability of stratified rock slopes

LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, JIANG Xue-liang, HE Zhong-ming

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The failure modes of stratified rock slopes are simulated by FLAC^{3D} (fast Lagrangian analysis of continua), while the relationship between dip angles of structure planes and stability of slope is analyzed by shear strength reduction method at the same time. Calculation results show that; ① for horizontal layered slope, horizontal deformation failure at the top of slope occurs earlier than that on the surface and toe of slope, which leads to the tensile failure zones. For consequent slope, when dip angle of structure plane is small, the mainly failure mode is slippage; when dip angle is large, the failure is buckling. For vertical layered slope, the failure mode is bending-fissuring-slump. For anti-dip rock slope, the mainly failure mode is slippage for small dip angle of structural plane, and toppling failure for large dip angle of structural plane. ② for consequent slope, the total safety factor F of slope first increases then decreases with structural plane dip angle β ; the outline of curve for the relationship between F and β is like shoulder which is higher on both side, and lower at the middle place. When $\beta=30^\circ$, F reaches its minimum value. For anti-dip rock slope, the outline of curve for the relationship between F and β shows the trend of increase-decrease-increase. And the most parts of its curve are higher than that of consequent slope, which is in accordance with practical case. ③ the elastoplastic element with lower strength can reasonably simulate the deformation of weakness plane.

Key words: stratified slope; failure mode; numerical simulation; stability

1 引 言

层状岩质边坡的破坏与失稳是岩土工程重大灾害之一, 研究其破坏类型、机制以及稳定性具有现实意义^[1]。以往, 一般采用刚体极限平衡法或相似试验法进行分析, 其中刚体极限平衡法对不同类型的边坡破坏型式进行假设, 它建立在丰富的工程经验的基础上, 抽象出简化的力学模型。刘小丽等^[2]

根据弹性板的稳定理论, 利用能量法对缓倾角顺层岩质边坡的弯曲失稳机制进行了探讨; 朱晗逯等^[3]采用特殊函数理论进行分析, 得出各层岩体溃曲曲线的理论公式, 对边坡溃曲破坏的临界坡长和破坏位置进行了求解; 邓荣贵等^[4]结合渝怀铁路论证设计, 并根据一般顺层边坡的结构特征, 对其失稳的临界长度进行了探讨。相似试验法能够形象地得到边坡岩土体的变形破坏机制及其发展过程。陈从新

收稿日期: 2007-11-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20060533071); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20060400264); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50774093); 湖南省研究生创新基金项目 (No. 1343-74236000014)。

第一作者简介: 林杭, 男, 1980年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程理论和数值计算的研究。E-mail: linhangabc@126.com

等^[5]根据相似理论建立地质力学模型,研究了边坡的变形破坏机制以及改变边坡岩体的岩层倾角对边坡稳定性的影响;冯文凯等^[6]利用物理模拟研究方法中的底摩擦试验,分岩层缓倾坡外和缓倾坡内两种情况,再现了该边坡变形破坏的全过程,并对不同阶段的变形及最终破坏机制进行分析;卢增木等^[7]在工程地质分析的基础上,根据相似理论建立了地质力学模型,研究了逆倾层状边坡岩体的变形破坏机制。

而近年来,随着计算机技术的不断发展,采用数值模拟方法分析边坡稳定性成为新的趋势,从而为边坡破坏机制研究开辟了新的道路,该方法根据经典力学理论,通过对微元体的积分效应模拟大型复杂的岩土模型,能直观地得到岩土体的应力-应变关系及破坏模式。其中,快速拉格朗日元法(FLAC^{3D})适用于绝大多数的工程力学问题,尤其适用于材料的弹塑性、大变形分析和施工过程的数值模拟^[8-13]。因此,本文首先运用 FLAC^{3D} 对层状岩质边坡的破坏模式进行了数值模拟;然后,采用强度折减法计算不同结构面倾角对边坡稳定性的影响。

2 数值方法

2.1 数值模型

数值模型中存在一组优势结构面,将其看作软弱结构面,岩体和结构面均采用实体单元模拟,按照连续介质处理,只是材料参数不同而已。结构面倾角为 β , 由于本文主要研究层状边坡的破坏模式,尽管厚度对安全系数有一定影响,但安全系数随结构面倾角的变化趋势相同;同时考虑到模型单元数的大小,因此,厚度取 2.0 m。结构面间距为 8.0 m。利用自编的 ANSYS-FLAC^{3D} 接口程序,按照平面应变建立计算模型,其模型边坡几何尺寸如图 1 所示。

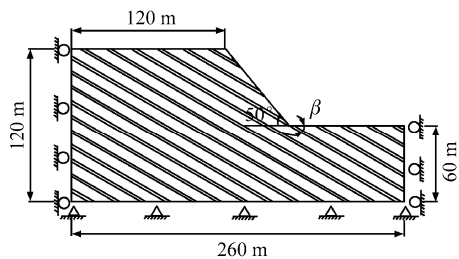


图 1 数值模型
Fig.1 Numerical model

边界条件为下部固定约束,左右两侧法向约束,上部为自由边界;计算收敛准则为不平衡力比率(节

点平均内力与最大不平衡力的比值)^[14]满足 10^{-5} 的求解要求。边坡计算参数见表 1。

表 1 计算参数
Table 1 Calculation parameters

岩层	重度 (kN/m ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比 ν	黏聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	抗拉强度 (MPa)
岩体	25	16	0.21	800	36	1.41
结构面	20	2	0.30	100	20	0.01

2.2 屈服准则

采用能同时考虑关联流动拉伸屈服和非关联流动剪切屈服的 Mohr-Coulomb 准则^[14],其表达式如下。

(1) 剪切屈服准则

$$f = I_1 \sin \varphi / 3 - c \cos \varphi + \sqrt{J_2} (\cos \theta_\sigma + \sin \theta_\sigma \sin \varphi / \sqrt{3}) = 0 \quad (1)$$

(2) 拉伸屈服准则

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (2)$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏量第 2 不变量; θ_σ 为应力罗德角; c 、 φ 分别为黏聚力和内摩擦角; σ^t 为抗拉强度; σ_3 为第三主应力。

3 分析与讨论

3.1 水平层状边坡

如图 2 所示,水平层状岩质边坡的优势结构面呈水平或近水平分布,主要受岩体自重力影响而产生滑移力。坡顶变形破坏早于坡面和坡脚,坡顶变形破坏是由水平拉应力作用,形成上宽下窄的拉破坏区,并逐渐扩展加深。拉伸破坏区随坡高增大,坡角变陡,拉破坏区域面积增大,深度加大^[15]。算例边坡中结构面通过坡脚,从而在重力沿临空面分力的作用下形成沿坡脚滑出的变形破坏,该类破坏属压剪性质。

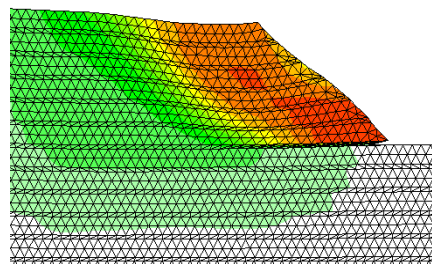


图 2 水平层状边坡破坏模式
Fig.2 Failure mode of level rock slope

3.2 顺倾向层状边坡

顺倾向层状边坡是指坡体内的优势结构面与边坡具有相同的倾向,如图 3 所示。其主要受自重而

引起的顺层滑移力作用, 稳定性受岩层走向、夹角大小、坡角与结构面倾角组合关系、结构面的发育程度及强度所控制^[15]。当结构面倾角 β 小于坡角 α 时, 变形破坏多是沿层面的剪切滑移 (如图 3(a)~(d)), 坡后缘出现向坡外偏移, 前缘出现沿层面滑出及产生滑移-压致拉裂裂隙等现象。滑移-压致拉裂裂隙主要出现在结构面上缘与坡顶交切处。当岩层倾角 β 大于临空面倾角 α 时, 破坏形式除了沿层面的剪切滑移外, 还包括坡脚处的应力集中导致岩层的溃曲变形 (如图 3(e)~(h)), 这是由于层面倾角 β 远大于层面内摩擦角 φ (即 $\beta \gg \varphi$), 岩层面不具备临空条件下, 并长期受重力作用, 边坡中下部结构面产生弯曲隆起, 岩体沿结构面滑动。随着荷载的进一步作用及岩层的蠕变, 在层状结构面比较密集、层状体较薄时, 弯曲变形进一步加剧, 形成类似褶曲的弯曲形态。浅表部岩层发生明显的层间差异错动, 后缘拉裂, 并在局部地段形成拉裂陷落带。溃曲程度取决于岩层倾角、岩层抗弯刚度、边坡坡角和岩层面抗剪强度等因素^[3, 5, 6, 16]。

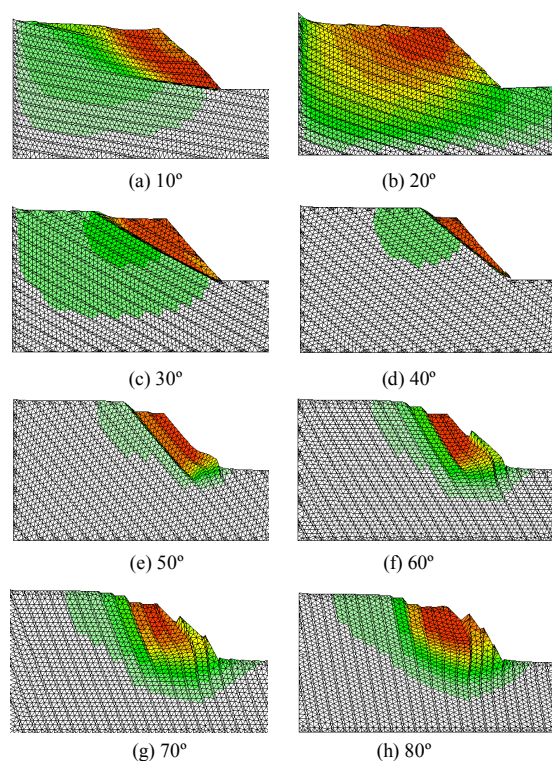


图 3 顺倾向层状边坡破坏模式

Fig.3 Failure mode for consequent rock slope

3.3 直立层状边坡

从图 4 中可见, 直立层状边坡的弯曲部分主要在结构面上缘, 不似顺层结构面的中下部溃曲。在重力作用下, 板状岩层产生向坡外弯曲变形, 板间拉裂, 并逐渐塌落。距临空面较近的岩层主要发生

弯曲变形, 较远处除了发生弯曲变形外, 还伴随明显的溃曲破坏, 薄板状的岩层沿层间挤压带启开, 沿岩层方向发生轻微差异性层间错动^[3]。由于不均匀的层间错动, 岩体在裂隙面上的剪应变累积起来, 坡体后缘出现一系列的拉裂缝, 同时还在层间出现局部的陷落带, 前缘沿弯折破碎带剪出, 形成崩塌。

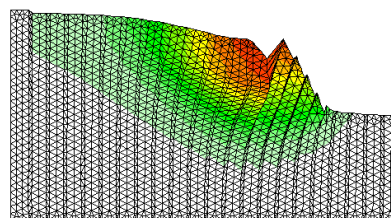


图 4 直立层状边坡破坏模式

Fig.4 Failure mode for vertical rock slope

3.4 逆倾向层状边坡

逆倾向层状边坡 (图 5) 稳定性受坡角与结构面倾角组合、岩层厚度、层间结合能力及反倾结构面发育与否所决定^[7, 16]。当岩层倾角较小时, 边坡的主要破坏形式为沿边坡底层台阶面滑出, 但滑出位置并不在坡脚, 而是距坡脚一定距离的台阶面上, 坡顶和坡体岩层倾倒变形较小 (如图 5(a)~(d))。随着岩层倾角及坡角和坡高增大, 层状岩体产生向坡外的弯折变形, 局部崩塌滑动伴随坡面局部开裂, 出现重力褶皱及重力错动带, 最终主应力、剪应力超过结构面抗拉和抗折强度, 发生折断破坏 (如图 5(e)~(h)组), 引起边坡倾倒失稳。

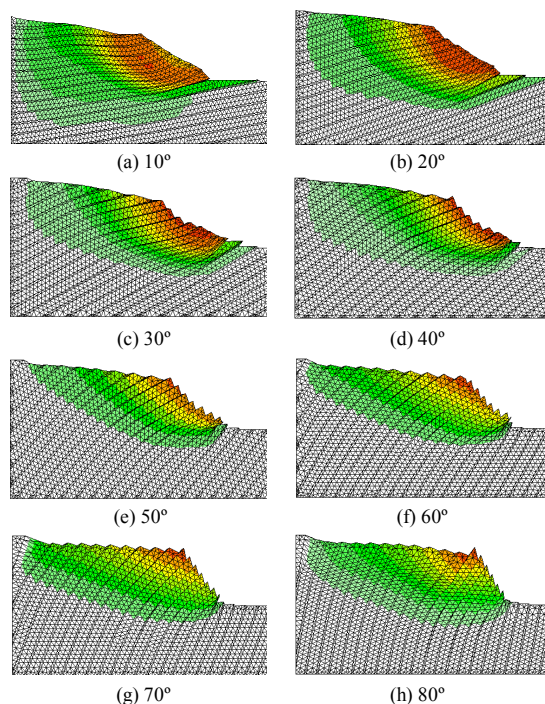


图 5 顺倾向层状边坡破坏模式

Fig.5 Failure mode for anti-dip rock slope

3.5 结构面倾角对稳定性的影响

采用强度折减法^[8-12]计算结构面倾角与边坡安全系数之间的关系, 计算结果见图 6。从图中可见:

①对于顺倾向边坡, 安全系数 F 随结构面倾角 β 先减小后增大, 呈现两头高、中间低的形态, 在 $\beta = 30^\circ$ 时安全系数最小, 且 $\beta = 90^\circ$ 的边坡安全系数大于 $\beta = 0^\circ$ 的安全系数; β 位于区间 $[10^\circ, 60^\circ]$ 时, 曲线基本以 $\beta = 30^\circ$ 为轴呈对称分布; 在此区域内 F 随 β 的变化梯度较大, 当 $\beta > 60^\circ$ 时曲线的斜率逐渐减缓, 并且 $90^\circ > \beta > 80^\circ$ 时, 曲线呈下降状态, 此时边坡破坏形式从滑移—溃曲破坏转变为弯折—崩塌型破坏。

②对于逆倾向边坡, 曲线形式与顺倾向边坡有较大不同, 呈现先增大、后减小、再增大的态势, 其拐点分别位于 $\beta = 20^\circ$ 和 $\beta = 70^\circ$ 位置, 并且曲线大部分高于顺倾向边坡的曲线, 说明逆倾向边坡的稳定性大于顺倾向边坡, 符合实际情况。但当 $\beta > 55^\circ$ 时, 顺倾向边坡的安全系数大于逆倾向边坡, 这是因为此时顺倾向边坡发生下部岩层溃曲破坏, 而逆倾向边坡发生上部岩层弯曲—倾倒破坏。由于下部岩层受到来自右侧岩体的支挡, 而上部岩层为临空面无岩体支挡作用。

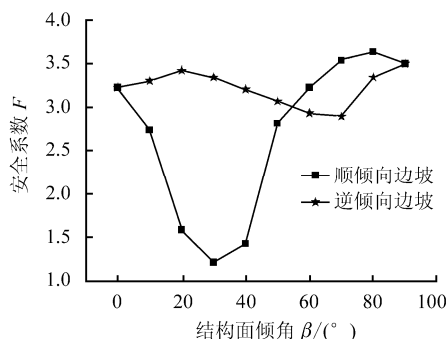


图 6 结构面倾角与安全系数的关系

Fig.6 Relationship between dip angle and safety factor

4 结 论

(1) FLAC^{3D} 能够对层状边坡的破坏模式进行模拟, 采用低强度弹塑性单元模拟夹层可以比较真实地模拟软弱结构面的变形。

(2) 水平层状边坡坡顶变形破坏早于坡面和坡脚, 并形成拉破坏区。对于顺倾向层状边坡, 当结构面倾角较小时, 主要发生滑移破坏; 当结构面倾角较大时, 主要发生弯折—溃曲破坏。直立层状边坡主要发生弯曲—板间拉裂—塌落的破坏形式。逆倾向层状边坡的破坏形式为滑移—倾倒变形。

(3) 通过强度折减法得到结构面倾角与边坡稳

定性之间的关系, 表明对于顺倾向边坡, 安全系数 F 随结构面倾角 β 先减小、后增大, 呈现两头高、中间低的形态, 在 $\beta = 30^\circ$ 时安全系数最小。对于逆倾向边坡, 曲线呈现增大—减小—增大的态势, 并且大部分高于顺倾向边坡的曲线, 说明逆倾向边坡的稳定性要大于顺倾向边坡, 符合实际情况。

参 考 文 献

- [1] 鲜学福. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [2] 刘小丽, 周德培. 用弹性板理论分析顺层岩质边坡的失稳[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 162—165.
LIU Xiao-li, ZHOU De-pei. Stability analysis of layered dip rocky slopes with elastic plane theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 162—165.
- [3] 朱晗廷, 马美玲, 尚岳全. 顺倾向层状岩质边坡溃曲破坏分析[J]. 浙江大学学报, 2004, 38(9): 1144—1149.
ZHU Han-ya, MA Mei-ling, SHANG Yue-quan. Analysis of buckling failure of consequent rock slope[J]. **Journal of Zhejiang University**, 2004, 38(9): 1144—1149.
- [4] 邓荣贵, 周德培, 李安洪, 等. 顺层岩质边坡不稳定岩层临界长度分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 178—182.
DENG Rong-gui, ZHOU De-pei, LI An-hong, et al. On the critical length of unstable rock stratum on bedrock slope [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 178—182.
- [5] 陈从新, 黄平路, 卢增木. 岩层倾角影响顺层岩石边坡稳定性的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 476—481.
CHEN Cong-xin, HUANG Ping-lu, LU Zeng-mu. Study on correlation between stability of consequent rock slope and obliquity of rock layer by simulation experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 476—481.
- [6] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 32—36.
FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, CHAI He-jun, et al. Study of mechanism of deformation failure of a low-angle bedded high slope with physical simulation method[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(2): 32—36.
- [7] 卢增木, 陈从新, 左保成, 等. 对影响逆倾层状边坡稳

- 定性因素的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 629—647.
- LU Zeng-mu, CHEN Cong-xin, ZUO Bao-cheng, et al. Experimentataion research on factors influencing stability of anti-dip layered slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 629—647.
- [8] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡安全系数间接解法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1147—1151.
- LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. The indirect calculation method for the safety factor of slope based on generalized Hoek-Brown criterion[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(10): 1147—1151.
- [9] 林杭, 曹平, 宫凤强. 位移突变判据中监测点的位置和位移方式分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1433—1438.
- LIN Hang, CAO Ping, GONG Feng-qiang. Analysis of location and displacement mode of monitoring point in displacement mutation criterion[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1433—1438.
- [10] 林杭, 曹平, 赵延林, 等. 强度折减法在 Hoek-Brown 准则中的应用[J]. 中南大学学报, 2007, 38(6): 1219—1224.
- LIN Hang, CAO Ping, ZHAO Yan-lin, et al. The application of strength reduction method in Hoek-Brown criterion[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2007, 38(6): 1219—1224.
- [11] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 边坡临界失稳状态的判定标准分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 643—647.
- LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. Analysis of the standards for critical failure state of slope[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(6): 643—647.
- [12] 沈金瑞, 林杭. 多组节理边坡稳定性 FLAC^{3D} 数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 29—33.
- SHEN Jin-rui, LIN Hang. The numerical analysis on the stability of slope with several sets of joints by FLAC^{3D}[J]. **China Safety Science Journal**, 2007, 17(1): 29—33.
- [13] GRASSELLI G. 3D Behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, (42): 13—24.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. FLAC^{3D} (fast Lagrangian analysis of continua in three-dimensions), version 2.1, User's Mannual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [15] 黄洪波. 层状岩质边坡的稳定性研究[硕士学位论文 D]. 浙江大学, 2003.
- [16] 金小萍. 层状岩体高陡边坡底摩擦模拟试验研究[J]. 金属矿山, 1998, (3): 7—12.
- JIN Xiao-ping. Experimental research in bottom friction simulation of high and steep slope of layered rock mass[J]. **Metal Mine**, 1998, (3): 7—12.

上接第 3299 页

- [10] 杨思玉, 宋新民. 特低渗透油藏井网型式数值模拟研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 64—67.
- YANG Si-yu, SONG Xin-min. Numerical simulation for the well pattern of low-permeability oil reservoirs[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2001, 28(6): 64—67.
- [11] 张士诚, 温庆志, 王凤和, 等. 水平缝四点井网整体压裂裂缝参数优化设计[J]. 石油学报, 2004, 25(1): 74—78.
- ZHANG Shi-cheng, WEN Qing-zhi, WANG Feng-he, et al. Optimization design of integral fracturing parameters for four-spot well pattern with horizontal fractures[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2004, 25(1): 74—78.
- [12] 李阳. 低渗透油藏矢量井网设计与整体压裂优化研究[J]. 石油大学学报, 2005, 29(6): 53—56.
- LI Yang. Design of vector well pattern and optimization of integral fracturing in low permeability reservoir[J]. **Journal of China University of Petroleum**, 2005, 29(6): 53—56.
- [13] FREDERIC J. New correlations to predict non-Darcy flow coefficients at immobile and mobile water saturation[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1994.