DOI: 10.11779/CJGE201607003

间歇疲劳试验对盐岩疲劳特性的影响

姜德义1,范金洋*1,陈结1,2,杨春和1,2,崔遥1

(1. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 中科院武汉岩土力学研究所, 武汉 湖北 430071)

摘要:通过间歇疲劳试验和传统疲劳试验的对比,研究了无应力间歇时间对盐岩疲劳特性的影响。经过间歇疲劳试验的盐岩试样与传统疲劳试样差异巨大。表现出的不同点主要有:①在相同的应力加载条件下,盐岩的间歇疲劳寿命 与传统疲劳寿命相比缩短了 50%以上;②间歇疲劳试验中间歇后的每个循环不可逆变形更大,不可逆变形的累计速率 更快;且随着间歇时间的增加,变形越大,累计速率越快;③卸载弹性模量总体上逐渐增大,间歇疲劳试验中,卸载 弹性模量随间歇时间的变长而增大。间歇疲劳的机理是:在盐岩内部缺陷发育生长时,缺陷周围由于屈服的时空顺序 差异引起了应力应变的不协调响应,导致了残余应力;在残余应力作用下,晶粒内部产生的位错做反向运动,且间歇 时间越长,反向运动距离越大;再次加载时,由于包申格效应,导致位错滑移引发的塑性变形更大。 关键词:盐岩;疲劳寿命;塑性变形;不协调响应;残余应力

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2016)07 - 1181 - 06 **作者简介:** 姜德义(1962 -),男,教授,博士生导师,主要从事岩土力学、采矿工程、安全工程方面的研究。E-mail: deyij@cqu.edu.cn。

Influence of interval fatigue tests on fatigue characteristics of salt rock

JIANG De-yi¹, FAN Jin-yang¹, CHEN Jie^{1, 2}, YANG Chun-he^{1, 2}, CUI Yao¹

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute

of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The influence of no-stress intervals on the fatigue activities is studied by comparing the characteristics of the conventional fatigue tests with those of interval fatigue tests, which combine the cyclic stress and intervals with no stress. The samples from the interval fatigue tests and conventional fatigue tests present a large variety of differences caused by intervals: (1) Under the same conditions of stress, the fatigue lives of samples from the interval fatigue tests are lower more than 50 percent than those from the conventional fatigue tests; (2) The residual deformation of each stress period varies from the duration of interval and increases with it. The accumulated rate of plastic deformation behaves similarly to residual deformation; (3) In the mass, The unloading elastic modulus increases with the stress period number. This parameter of samples from the interval fatigue tests increases as the duration becomes longer. The mechanism of these phenomena is as follows: when the internal flaws develop and grow, the adjacent area yields in different spatial-temporal orders, resulting in uncoordinated response and the corresponding residual stress. Taking into account the Bauschinger effect, the plastic deformation will be larger in the following loading procedure.

Key words: salt rock; fatigue life; plastic deformation; uncoordinate response; residual stress

0 引 言

疲劳特性是材料在受到交变荷载或变形时,内部 缺陷不断发展演化,最终引发失稳的过程。材料的疲 劳特性是岩土工程领域中设计和评估的非常重要的一 项指标。如水利大坝受周期涨落潮的影响,路面路基 受频繁车行荷载的影响,井工矿山工作面受周期来压 的影响,均是工程中不可忽略的影响因素^[14]。针对疲 劳的研究涉及到各种工况,需要考虑复杂影响因素的 影响,如温度、应力、应变率、孔隙压力、水文地质 环境等,都对材料的疲劳特性产生深刻的影响^[5-13]。 作为理想油气储存介质,地下盐岩储库近些年来在中 国被大量建设。盐岩疲劳特性的研究对保障工程的安 全稳定具有重大意义^[14-16]。国内诸多学者对盐岩疲劳 的温度特性、应力特性和应变率特性展开了深入的研

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20130191130003);重庆市研究生科研创新项目;国家自然科学基金 青年基金项目(51304256) 收稿日期: 2015 - 07 - 02 *通讯作者

究,它们都为工程实践提供了有利的参考[11,17-19]。

学者研究认为,储库运营期盐岩的自恢复作用较为明显,形成的损伤能够一定程度地愈合,从而改善盐岩的自承能力和力学特性^[20]。盐岩并不仅发生自愈合作用,通过研究发现^[21]盐岩在损伤后的一定时期内,其能够产生应变硬化自弱化现象,从而又使盐岩的承载能力降低。储库周期性注气采气和季节性温差交替变化,致使围岩承受疲劳荷载的影响。然而储库注采周期中,注气压力达到控制值后,直至采气之前,储气压力会维持一个平台期,部分区段围岩处于较小的偏应力环境下,或某些意外因素导致储库暂停注采活动。这些促使围岩在遭受疲劳荷载的同时间杂了时间间歇。本文在周期荷载间隙加入无应力时间间歇,以研究盐岩间歇时间及时长对盐岩疲劳特性的影响。通过对盐岩间歇疲劳特性的研究,使储气库疲劳损伤的设计和评估更加全面。

1 试验方案设计

试验所用加载设备为煤矿灾害动力学与控制国家 重点实验室自行设计和研发的岩石力学刚性试验机。 试样取自喜马拉雅山区 800~1000 m 埋深的深层高纯 度盐岩,其杂志成分含有少量的 K₂SO₄和泥岩。试样 形状为加工成型的标准 Φ50 mm×100 mm 圆柱形试 样,端面平整度控制在±0.02%。试样的基本物理力 学参数:密度为 2600 kg/m³,单轴抗压强度为 41 MPa, 黏聚力为 15.2 kPa,内摩擦角为 20.35°,弹性模量为 5.96 GPa, NaCl 纯度≥96%^[3, 10, 17]。

应力路径采用常规疲劳试验的方法,仅在每个循 环前(前一卸载程序完成后)加入一定时间的时间间 歇(首循环除外)。试验加载速率,上(σ_1)下限压 力分别为2 kN/s,34.8 MPa(单轴抗压强度的85%) 和0。间歇时间依次取0,5,10,15,20 min循环。 应力设计路径如图1(a)所示,试验中测得的对应的 应变路径如图1(b)所示,为保证路径图清晰,路径 图仅截取前几个周期展示,后续为重复路径。试验的 重复试验为5组,由于相差较小,文中选取与平均值 最为接近的数据作为分析对象。





Fig. 1 Schedule of test schemes

试验中,同时做了一组相同应力条件的对照试验, 对照试验为传统的无间歇疲劳试验。每组试验条件下 做5个重复试验。试验方案汇总见表1。

表1 试验方案表

Table 1 Test schemes

试验	上限荷	下限荷	间歇	加载速率	重复试
	载/MPa	载/MPa	时间/min	$/(kN \cdot s^{-1})$	验数量
传统疲劳	34.8	0	0	2	5
间歇疲劳	34.8	0	0,5,10,15,20	2	5

2 试验结果与分析

2.1 残余应变

本文疲劳寿命为应力加载周期的个数,通过人工 统计得到循环数,从而计算得疲劳寿命。图2为对照 试验和间歇疲劳试验的应力应变曲线。可以看出:① 疲劳寿命的不同。与传统疲劳试验相比,间歇疲劳试 验中试样疲劳寿命缩短了 50%以上。间歇疲劳试验的 平均疲劳寿命为 38.8(重复试验的疲劳寿命为 36, 36, 39, 40, 43), 比传统疲劳试验的平均疲劳寿命 90.8 (重复试验的疲劳寿命为82,88,89,96,99)要小 得多。②疏密程度的不同。传统应力应变曲线由疏变 密最后再变疏,间歇疲劳试验不仅表现出了类似的特 征,同时在"大"的稀疏规律下,表现出"小"的稀 疏规律,即5个循环一组的特点。③残余应变的不同。 为更加清晰展示间歇时间对疲劳特性的影响,将每个 循环累计的不可逆变形,即残余变形,示于图 3,当 疲劳变形进入匀速变形阶段时,每个循环并未表现出 基本相同的残余变形,而是随间歇时间呈现波浪式变 化的趋势,每个波浪内残余变形随时间变长而增长。 残余应变是疲劳试验中损伤累计的结果,造成间歇时 间越久疲劳损伤越大的主要原因是盐岩在间歇时间 内,内部结构发生变化,导致晶粒之间相互调整(调 整作用将在后文讨论),内部滑滞作用减弱,从而在再 次加载过程中产生的塑性变形更大。





and interval fatigue tests



图 3 传统疲劳试验和间歇疲劳试验的残余应变对比



2.2 弹性模量

弹性模量的计算方法如图 4 所示, A 点为循环内 最大应力点, B 点为循环内最大应变点, C 点为卸载 段直线段终止点, D 点为卸载段最小应变点。由于在 C 点的定位的过程中,主观性非常大,且 BC 连线和 BD 连线斜率几乎相同,本文取 BD 段斜率为卸载段弹 性模量。图 5 为两组试验的弹性模量的变化情况。表 现出的异同点有:①总体发展趋势,卸载弹性模量基 本呈对数发展趋势,随循环数逐渐增大,如图中虚曲 趋势线所示。这主要是由于卸载模量代表试样在卸载 时的回弹能力,数值越大,回弹能力越弱,因此,随 着试验的进行,试样的弹性能力逐渐丧失。②局部趋 势,传统疲劳试验的局部趋势基本呈随机变化,无明 显规律,间歇疲劳试验的弹性模量在局部范围内随间 歇时间的增大而增大,如图中虚直线所示。

弹性模量反映岩石晶粒内部键合作用的强弱,它 的变化过程可以反映内部晶粒的活动状况。岩盐在首 循环发生应变硬化,晶粒内部相邻原子之间的间距缩 小,化学键作用增强,表现出硬化特征,即弹性模量 增大。间歇时间后,盐岩的弹性模量更大,表明盐岩 内部的键合作用力更强。其主要原因是经过间歇时间 调整后盐岩原子在再次加载中内部间距变得更小,导 致弹性模量更大。



图 4 弹性模量的计算方法示意图







Fig. 5 Comparison of elastic moduli between conventional and interval fatigue tests

2.3 破坏特征

由于目前的观测技术方式有限,扫描电镜观察得 到的传统疲劳和间歇疲劳破坏的试样的外观特征基本 相似,主要以劈裂为主,辅以非常多的压剪裂纹。图 6(a)、(b)分别为传统疲劳和间歇疲劳试验试样横断 面(平面的法线方向与加载方向平行)的扫描电镜图 片,可以发现有多组基本平行的晶界裂纹和少量的穿 晶裂纹。这主要是由压缩过程中鼓胀作用产生的拉应 力促使了晶界裂纹的发育和贯通;压剪切应力导致晶 粒出现整齐断裂从而引起穿晶裂纹出现。进一步观察 图 6 (c)、(d) 发现, 晶粒内部由于压剪应力的强烈 揉搓作用,导致了破裂、旋转,出现了盐粒碎末。这 说明了循环荷载作用下的反复错动使晶粒更加破碎, 裂纹带内晶粒遭受损伤更加的发育。但是实时细观观 察的难以实现,很难判断出传统疲劳裂纹和间歇疲劳 裂纹发育过程的区别以及间歇疲劳荷载对盐岩晶粒的 影响。实际上, 传统疲劳试验是所有间歇时间均为零 的间歇疲劳试验的一种特例。间歇疲劳试验的应力加 载模式同样是循环加卸载,其并未超出疲劳损伤的范 畴,因此,最终试样的破裂形态和细观(SEM)裂纹 形态与传统的疲劳破坏基本类似。





图 6 破裂面扫描电镜 (SEM) 细观图 Fig. 6 SEM images of rupture cross of salt samples

3 机理讨论

晶粒的变化是引发间歇后一系列力学行为变化的本质原因。虽然在间歇时间内没有外力作用,但是这个阶段内晶粒内部必然在残余应力作用下经历了自我调整的过程。周扬^[22]研究预制桩在静压过程中,由于压缩未完全恢复而残留在内部的应力的分布状态和影响参数。权磊等^[23]通过建立三维有限元模型,对切缝过程中混凝土板的响应进行数值模拟。赵锐^[24]研究了金属焊接过程中内部残余应力的分布规律并建议了焊后控制消除残余应力的方法。尽管对天然岩石内部残

余应力的研究尚鲜有提及,姜德义等^[18]在研究盐岩剪 切时发现盐岩的应变硬化自弱化现象时,认为可能为 内部残余应力的作用,并认为残余应力源于内部位错 弹性力和不协调变形的摩擦力综合作用。因此,岩石 内部的残余应力可能是一种普遍现象,是岩石在卸载 后驱动内部晶粒发生变化和自我调整的主要动力。残 余应力的产生主要源于内部对于应变或是应力的不协 调响应,如不同性质的材料的喷层,不同胀缩系数的 合金,不同添加成分的混凝土等。

岩石是一种具有非常多微缺陷的结构体,内部有 孔洞,裂隙,结构面等。这些缺陷在应力作用下,逐 渐扩展发育贯通形成岩石的破裂。针对具有塑性变形 的材料,在裂纹扩展的过程中,尖端区域会优先屈服 形成临近塑性区。相比远离的弹性区,塑性区内的岩 石材料的属性会发生变化,影响卸载过程中的应力响 应。

假设经过屈服后的岩石材料的变形模量由 *E*₁ 变 化为 *E*₂ (*E*₁<*E*₂, 应变硬化岩石);加载阶段时,材 料在弹性区和塑性区的变形是协调的(如图 7 (a))。 卸载过程中盐岩的不协调响应可以分为以下 2 步:① 卸载开始至塑性区外力卸载至零,弹性区应力仍然有 应力(如图 7 (b)):

$$\sigma_{\rm e} = \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E_2}\right) E_1 \quad . \tag{1}$$

②弹性区继续卸载,塑性区发生相反的响应,以使变 形连续。并且达到应力平衡(如图7(c))。应力大小 与弹塑性区的尺寸有关系。若相关尺寸相等,且应力 均匀分布,则弹塑性区的应力均为

$$\sigma_{\rm r} = \left(\varepsilon_0 - \frac{\sigma_0}{E_2}\right) \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \quad . \tag{2}$$

盐岩在经过屈服之后,进入应变硬化阶段,卸载 变形模量(如前文分析)逐渐增大,变形能力减弱。 残余应力在间歇时间内的作用体现在:屈服之后,盐 岩晶粒内部累积了大量的位错,卸载时,位错在自身 弹性力作用下做反向运动,弹性力得到释放。进入间 歇期后,在残余应力的作用下仍然做反向运动。且时 间越长,反向运动的距离就越远。但是随着时间增长, 残余应力在不断的变小,位错的反向位移也越来越弱, 并最终进入稳定状态。虽然文中试验没有达到稳定的 状态,但这是可以想象。当再次加载时,位错又重新 做运动回原来的位置或超越原来的位置,周期荷载下, 位错反复地做这样的往复移动。根据包申格效应,反 向移动的距离越大,位错往复滑移更加容易,从而, 产生了更大的塑性变形,即2.1节中残余变形的增大。 传统疲劳试验的所有间歇时间均为零。包申格效应在



Fig. 7 Schematic diagram of residual stress during unloading procedure

传统疲劳试验中并不发挥较大作用,表现并不明显,因此,再次加载过程中位错的滑移、增殖等活动,没 有得到"易化",匀速变形阶段每个循环的残余变形基 本一致。

4 结 论

因此,在储气库寿命设计和评估过程中,应充分 考虑储气库储气峰值压力和最低压力保持时间的长短 对不同层位盐岩围岩的力学特性和疲劳寿命的削弱作 用,保守地确保储气库的安全运营。本文通过对盐岩 试样在间歇疲劳试验中的表现与传统疲劳试验的对 比,得到如下结论:

(1)间歇疲劳试验中盐岩的疲劳寿命大幅度地缩 减,由原来的90个左右的循环,减小到39个循环; 应力应变曲线随间歇时间表现出了稀疏规律,其主要 是由于残余应变的影响,残余应变由随循环数表现出 波浪式的发展趋势,在每个波浪内随间歇时间残余应 变增大。

(2)自定义卸载弹性模量总体上随着循环数逐渐 变大,是弹性能力逐渐丧失的标志;间歇疲劳试验中, 间歇时间越久,卸载弹性模量越大。

(3)通过电镜观察发现,盐岩在周期荷载作用下, 晶界裂纹和穿晶裂纹都比较明显,表现出了劈裂和压 剪的复合特征。

(4)残余应力是驱动盐岩在间歇时间内产生自我 调整的主要动力,其主要源于盐岩内部缺陷发育过程 中的不协调响应。间歇时间内,残余应力作用下位错 做反向运动。滑移距离越远,后续循环产生的塑性变 形越大。

参考文献:

[1] FRANCO Zunino, JAVIER Castro, MAURICIO Lopez. Thermo-mechanical assessment of concrete microcracking damage due to early-age temperature rise[J]. Constr Build Mater, 2015, **81**: 140 - 153.

- [2] BAGDE M N, PEDROS V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. Int J Rock Mech Min, 2005, 42: 237 - 50.
- [3] 姜德义,范金洋,陈结,等.盐岩在围压卸荷作用下的 扩容特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1881 - 1886.
 (JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Study on the characteristics of the salts capacity expansion under the action of confining pressure unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1881 - 1886. (in Chinese))
- [4] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1 20. (GE Xiu-run. Deformation control law of rock fatigue failure, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 1 20. (in Chinese))
- [5] ZHAN Z X, HU W P, ZHANG M, et al. The fatigue life prediction for structure with surface scratch considering cutting residual stress, initial plasticity damage and fatigue damage[J]. Int J Fatigue, 2015, 74: 173 - 182.
- [6] ZANG P, XU Jian-guang, NING L. Fatigue properties analysis of cracked rock based on fracture evolution process[J]. J Cent South Univ T, 2008, 15: 95 - 9.
- [7] DHOUHA Mellouli, NADER Haddar, ALAIN Koster, et al. Hardness effect on thermal fatigue damage of hot-working tool steel[J]. Eng Fail Anal, 2014, 45: 85 - 95.
- [8] 祝效华,罗 衡,贾彦杰.考虑岩石疲劳损伤的空气冲旋 钻井破岩数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 754 - 761. (ZHU Xiao-hua, LUO Heng, JIA Yan-jie.

Numerical analysis of air hammer bit drilling based on rock fatigue model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 754 – 761. (in Chinese))

- [9] 肖建清. 循环荷载作用下岩石疲劳特性的理论与试验研究
 [D]. 长沙: 中南大学, 2009. (XIAO Jian-qing. Theoretical and experimental investigation on fatigue properties of rock under cyclic loading[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese))
- [10] 姜德义,范金洋,陈结,等. 围压卸载速率对盐岩扩容 损伤影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3154 - 3159. (JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Research on capacity expansion damage of the salt under the different rates of confining pressure unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3154 - 3159. (in Chinese))
- [11] REN Song, BAI Yue-ming, ZHANG Jing-peng, et al. Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock[J]. Int J Rock Mech Min, 2013, 64: 68 - 72.
- [12] ERARSLAN N, WILLIAMS D J. Mechanism of rock fatigue damage in terms of fracturing modes[J]. Int J Fatigue, 2012, 43: 76 - 89.
- [13] KITTITEP Fuenkajorn, DECHO Phueakphum. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. Eng Geol, 2012, 112: 43 - 52.
- [14] 任建喜,蒋 宇, 葛修润. 单轴压缩岩石疲劳寿命影响因 素试验分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 47 - 50. (REN Jian-xi, JIANG Yu, GE Xiu-run. Test and analysis on rock fatigue life due to affecting factors under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 47 - 50. (in Chinese))
- [15] REN Song, BAI Yue-ming, ZHANG Jing-peng, et al. Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock[J]. Int J Rock Mech Min, 2013, 64: 68 - 72.
- [16] 纪文栋,杨春和,姚院峰,等. 应变加载速率对盐岩力学 性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507 - 2513. (JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2507 - 2513. (in Chinese))
- [17] KITTITEP Fuenkajorn, DECHO Phueakphum. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham

salt[J]. Eng Geol, 2012, 112: 43 - 52.

- [18] 姜德义,范金洋,陈 结,等.应力因素下的岩盐卸荷扩 容试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 41 - 46. (JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Test study of unloading capacity expansion characteristics of salt rock under stress factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 41 - 46. (in Chinese))
- [19] 刘建锋,徐 进,杨春和,等. 盐岩拉伸破坏力学特性的 试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 580 - 586. (LIU Jian-feng, XU Jin, YANG Chun-he, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 580 - 586. (in Chinese))
- [20] 姜德义,王 雷,陈 结,等. 损伤盐岩短期自恢复特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 594 600.
 (JIANG De-yi, WANG Lei, CHEN Jie, et al. Experimental research on properties of short-term self recovery of damaged salt rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 594 600. (in Chinese))
- [21] 姜德义,范金洋,陈结,等.盐岩的压剪疲劳特性与位错损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5):1-12.
 (JIANG De-yi, FAN Jin-yang, CHEN Jie, et al. Research on salt rock compression-shear fatigue properties and dislocation damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(5):1-12. (in Chinese))
- [22] 周 扬. 静压开口混凝土管桩残余应力的理论分析与试验 研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014. (ZHOU Yang. Theoretical analysis and experimental studies on residual stress of jacked open-ended concrete pipe piles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [23] 权 磊,田 波,牛开民,等.切缝法测定水泥混凝土路 面残余应力数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2014(6):118
 - 125. (QUAN Lei, TIAN Bo, NIU Kai-min, et al. Numerical analysis of notch-cutting method for determining the residual stress in PCC Slab[J]. China Civil Engineering Journal, 2014(6):118 - 125. (in Chinese))
- [24] 赵 锐. 焊接残余应力的数值模拟及控制消除研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (ZHAO Rui. Study of welding residual stress's numerical simulation and relieving[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))