

文章编号: 1006-4710(2015)04-0448-06

# 土初始状态结构性定量化的研究与验证

秦鹏成<sup>1,2</sup>, 邵生俊<sup>1,2</sup>, 安中秋<sup>1,2</sup>, 褚峰<sup>1,2</sup>, 郑晓锋<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 土的初始结构性综合反映了初始颗粒联结特征和初始颗粒排列特征。本文通过重塑饱和的方法来破坏原状土的初始结构性, 用原状土的无侧限抗压强度与重塑饱和土的无侧限抗压强度的比值, 定义一个反映土初始结构性的参数  $m_{is}$ , 分析了该参数与黄土基本物性指标、力学特性指标的关系。结果表明: 粒度、密度、湿度是影响初始结构性的主要因素, 同时, 粒度、密度、湿度、初始结构性具有相关性; 该参数具有很好的实用性。

**关键词:** 重塑饱和土; 初始结构性; 基本物性指标; 力学特性指标

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

## The initial state of the soil structural quantitative research and verification

QIN Pengcheng<sup>1,2</sup>, SHAO Shengjun<sup>1,2</sup>, AN Zhongqiu<sup>1,2</sup>,

CHU Feng<sup>1,2</sup>, ZHENG Xiaofeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Province Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Soil initial structure can reflect the initial particle coupling behaviors and the initial particle arrangement features comprehensively. In this paper, the method of remolding saturation is used to destroy the initial soil structure behaviors, the specific value between the undisturbed soil unconfined compressive strength and remolded saturation soil unconfined compressive strength is used to define a parameter  $m_{is}$  to reflect the soil initial structure behaviors. This paper analyzes the relations between this parameter and the loess basic physical property indexes and mechanical property indexes. The results indicate that soil particle sizes, density and humidity are the main factors affecting soil initial structures, at the same time, soil particle sizes, density, humidity and initial structure are of correlation, and the parameters are of better practicability.

**Key words:** remodeling saturated soil; initial structure; the basic physical indicators; mechanical properties index

土的结构性量化研究分两个方向: 一是研究土在加荷条件下变形过程中的结构性参数; 二是研究土初始状态的结构性参数。对于加荷条件下变形过程的结构性研究比较成熟, 基本形成了一个框架体系, 其变形主要包括压缩变形、剪切变形, 主要利用压缩试验仪、常规三轴仪、真三轴仪及动三轴仪来研究结构性, 概括起来, 提出了 9 种变形过程的结构性参数: 应变结构性参数<sup>[1]</sup>、应力结构性参数<sup>[2]</sup>、振次结构性参数<sup>[3]</sup>、应力比结构性参数<sup>[4]</sup>、孔隙比结构

性参数<sup>[5-6]</sup>、动应力结构性参数<sup>[3]</sup>、动剪应力结构性参数<sup>[3]</sup>、模量结构性参数<sup>[7]</sup>、等向应力(或球应力)结构性参数<sup>[8]</sup>。变形过程结构性参数既反映了初始状态的结构性, 又反映了次生结构性, 是初始结构强度和次生结构强度的集中体现, 可以充分说明土在荷载作用下结构强度是动态变化的, 在荷载作用下, 表现为初始结构性破坏(即初始结构强度丧失)次生结构性形成(即次生结构强度的发挥), 且形成的次生结构强度不足以抵抗外荷载的强度而导致土体最终

收稿日期: 2015-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272320); 陕西省黄土力学与工程重点实验室重点科研计划资助项目(2010JS084)。

作者简介: 秦鹏成, 男, 硕士生, 研究方向为黄土力学与工程。E-mail: 18292838583@163.com。

通讯作者: 邵生俊, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为黄土力学、黄土动力学等。E-mail: sjshao@xaut.cdu.cn。

破坏,此过程中结构的可稳性(联结特征)和结构的可变性(排列特征)均起主要作用,结构的可稳性要小于结构的可变性,其应力-应变曲线表现为硬化型。对于土的初始结构性研究,目前,研究者在量化分析方面,提出的结构性参数还不多,主要由冯志焱<sup>[8-9]</sup>和邵生俊<sup>[10-11]</sup>提出的结构性参数来研究土的初始结构性,初始结构性是一个定值,反映了土的基本物理性质,在荷载作用下,不随应变的发展而改变,只反映土的初始结构,不反映土的次生结构,其结构的可变性发挥作用要小于结构的可稳性,应力-应变曲线表现为软化型。

由冯志焱提出的圆锥贯入度结构性参数和邵生俊提出的构度指标,都是以谢定义<sup>[11]</sup>提出的综合结构势为基础,利用重塑土和原状饱和土来充分释放综合结构势。冯志焱在锥形稠度试验仪上,利用原状土、重塑土以及饱和土测定试锥的入土深度,定义了初始结构性参数  $m_s(w)$ ,具有方便实用的价值。邵生俊在无侧限压缩试验仪上,利用原状土、重塑土以及饱和土在无侧限抗压强度定义结构性参数构度  $m_u$ ,该参数宏观反映了土单元体的结构性。

## 1 初始结构性参数的表达式

本文通过扰动重塑饱和土释放综合结构性,分别进行相同干密度的原状土和重塑饱和土的单轴抗压强度试验,以原状土和无侧限抗压强度与重塑饱和土的无侧限抗压强度之比来定量确定土初始状态的结构性。定义如下初始结构性参数:

$$m_{is} = \frac{(q_u)_y}{(q_u)_{rs}} \quad (1)$$

式中,  $m_{is}$  为土初始结构性参数;  $(q_u)_y$ 、 $(q_u)_{rs}$  分别为原状土和重塑饱和土的无侧限抗压强度。

从式(1)看出,土初始颗粒联结越强、初始颗粒排列越不稳定,重塑饱和土结构强度损失越大,得到重塑饱和土的无侧限抗压强度越小,土初始结构性参数越大。初始结构性参数可以反映土在剪切过程中初始结构性的损失,该参数对土结构性强弱的灵敏度很高。

## 2 研究思路

通过原状土的无侧限抗压强度与重塑饱和土的无侧限抗压强度的比值定义初始结构性参数,研究分析初始结构性参数与基本物理性质指标(粒度、密度、湿度)和力学特性指标(压缩系数、压缩模量、湿陷系数)的关系,从而验证初始结构性参数的灵敏度、稳定性及合理性。

## 3 试验方案

试验土样取自西安市雁塔区月登阁村场地,取土深度分别为 12 m、15 m、22 m、25 m。经现场和试验鉴定,12 m 和 15 m 深黄土属于  $Q_3$  黄土,22 m 和 25 m 深黄土属于  $Q_2$  黄土,黄土的物性指标见表 1。

表 1 土的物性指标  
Tab. 1 Physical properties for test looses

取土深度	干密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	天然 w/ %	$e_0$	$W_p$ / %	$W_L$ / %	$I_p$ / %
12 m	1.36	19.94	0.977 5	23.4	33.6	10.2
15 m	1.35	16.11	0.966 3	18.4	28.2	9.7
22 m	1.43	21.84	0.963 8	21.1	30.9	9.8
25 m	1.41	22.14	0.906 3	21.5	31.1	9.6

### 3.1 无侧限抗压强度试验方案

应用由应变控制式三轴剪切仪改装的应变式无侧限压缩仪,对原状土和相同干密度重塑饱和土进行无侧限抗压强度试验,试验剪切速率为 0.828 mm/min,轴向位移计每移动 0.1 mm,测记轴向测力计读数一次。原状土含水率分别设定为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、饱和,用于反映不同含水率对初始结构性参数的影响。试样采用直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱样。

### 3.2 侧限压缩试验

试验采用三联中压固结仪,分别对不同含水率的原状土做压缩试验。加压等级为:50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、800 kPa。试样尺寸  $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,用于反映压缩系数和压缩模量对初始结构性的影响。

### 3.3 湿陷试验

试验设备为三联中压固结仪,采用双线法进行湿陷试验,用于反映湿陷系数对初始结构性的影响。

## 4 无侧限抗压强度与含水率的关系

对 4 种原状黄土在不同含水率(0%、5%、10%、15%、20%、25%、饱和)下进行无侧限抗压强度试验,其原状土无侧限抗压强度随含水率的关系曲线如图 1 所示。可以看出:4 种黄土的无侧限抗压强度均随含水率的增加而减小,含水率较小( $w=0\% \sim 15\%$ )时,随含水率的增大而急剧减小,表现出对水灵敏度高;含水率较大( $w$  从 15% 到饱和)时,随含水率的增加而缓慢减小,表现出对水灵敏度低。由于 12 m、15 m 黄土属于  $Q_3$  黄土,22 m、25 m 黄土属于  $Q_2$  黄土,表现出无论  $Q_3$  黄土还是  $Q_2$  黄土,其无侧限抗压强度均随含水率的增加而减小。因此

湿度(增湿、减湿)是影响黄土结构强度的重要因素。

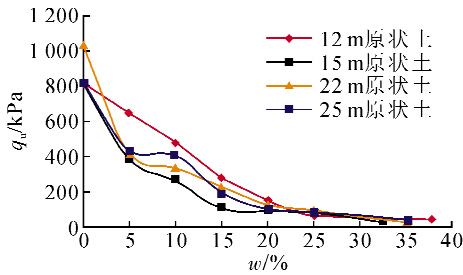


图 1  $q_u-w$  关系曲线

Fig. 1 The curves of  $q_u-w$  of different loess samples

### 5 初始结构性与基本物性的关系

黄土的基本物性指标(粒度、湿度、密度、结构性)是决定黄土力学性质及其变化规律的内在因素,且 4 个物性指标既相互独立又相互依存,文中通过研究初始结构性参数与粒度、密度、湿度的关系来验证其稳定性、合理性及灵敏度。其中粒度用液限、塑限和塑性指数表示;湿度用含水率、饱和度、液性指数表示;密度用干密度、孔隙比、孔隙率表示。本文对 12 m、15 m、22 m、25 m 黄土分别在  $w=0\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$ 、 $20\%$ 、 $25\%$  及饱和条件下进行了试验,研究初始结构性参数与含水率、塑限、孔隙比、干密度与孔隙比比值、综合物理特征量的关系。

#### 5.1 初始结构性参数与含水率 w 的关系

由式(1)定义的初始结构性参数  $m_{is}$  随含水率的变化曲线如图 2 所示,4 种黄土的初始结构性参数均随含水率增加而减小。含水率较小( $w=0\% \sim 15\%$ )时,随含水率的增加,初始结构性参数减小幅度大,受含水率影响大,对水灵敏;含水率较大( $w > 20\%$ )时,随含水率的增加,初始结构性参数减小幅度小,受含水率影响小。 $Q_3$  黄土的初始结构性参数在相同含水率下大于  $Q_2$  黄土的初始结构性参数,特别是在较低含水率下,两者相差较大;由于  $Q_3$  黄土的架空空隙大,结构的可变性较大,较  $Q_2$  黄土稳定性差,浸水破坏后,结构势充分释放,初始结构性参数较大,说明  $Q_3$  黄土比  $Q_2$  黄土对水灵敏。

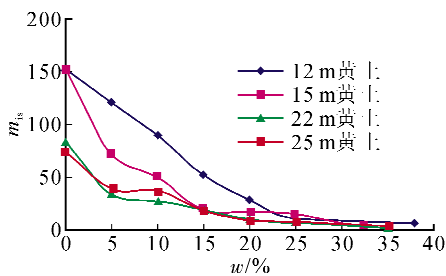


图 2  $m_{is}-w$  关系曲线

Fig. 2 The curves of  $m_{is}-w$  of different loess samples

#### 5.2 初始结构性参数与塑限 $w_p$ 的关系

为了研究塑限  $w_p$  对初始结构性的影响,以含水率  $w=0\%$  和  $w=20\%$  为例,分析初始结构性参数  $m_{is}$  随塑限的变化规律,如图 3。初始结构性参数随塑限增大呈增大趋势,且随着塑限的增大,其增大幅度有所增加。随着含水率由  $0\%$  逐渐增至饱和状态,趋势线逐渐由陡直向平缓过渡,说明低含水率时,塑限是影响初始结构性大小的主要因素。

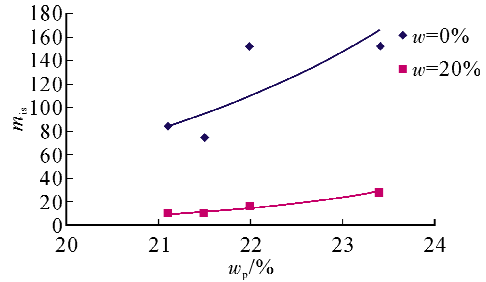


图 3  $m_{is}-w_p$  的关系曲线

Fig. 3 The curves of  $m_{is}-w_p$  of different loess samples

#### 5.3 初始结构性参数与初始孔隙比 $e_0$ 的关系

黄土的密实度可以通过干密度和孔隙比来反映,干密度越大,其孔隙比越小,黄土越密实;干密度越小,其孔隙比越大,黄土越疏松。以含水率  $w=0\%$ 、 $w=10\%$  和  $w=20\%$  为例,初始结构性参数  $m_{is}$  与孔隙比的关系曲线,如图 4。初始结构性参数随初始孔隙比增大而呈增大趋势,这说明随着孔隙比增大,土的密实度降低,经扰动、浸水、加荷作用后,结构势释放越充分,结构强度损失越大,对应初始结构性参数  $m_{is}$  也越大。低含水率时,随孔隙比的增加,初始结构性参数的趋势线增加幅度大,表现出对孔隙比较高的灵敏度;高含水率时,初始结构性参数的趋势线随孔隙比的增加而缓慢加大,表现出对孔隙比较低的灵敏度。

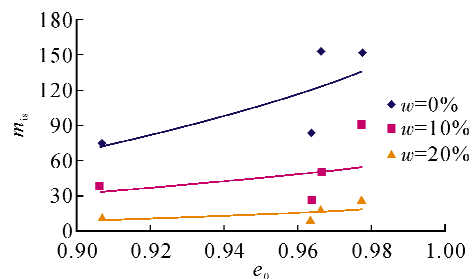


图 4  $m_{is}-e_0$  的关系曲线

Fig. 4 The curves of  $m_{is}-e_0$  of different loess samples

#### 5.4 初始结构性参数与 $\rho_d/e_0$ 的关系

干密度  $\rho_d$  和孔隙比  $e_0$  都是影响初始结构强度的主要因素,可以利用干密度与孔隙比的比值来综

合反映初始结构强度对初始结构性参数  $m_{is}$  的影响。以含水率  $w=5\%$  和  $w=25\%$  为例,如图 5,初始结构性参数随干密度与初始孔隙比比值的减小而减小,且含水率较低时,随干密度与初始孔隙比比值的减小而大幅度减小;含水率较高时,随干密度与初始孔隙比比值的减小而缓慢减小。这说明干密度越小,初始孔隙比越大,比值越小,结构的可稳性和结构的可变性较强,初始结构遭到破坏后,释放的结构势越充分,结构强度损失越大,初始结构性参数越大;干密度越大,孔隙比越小,比值越大,结构越密实,结构遭到破坏后,结构强度损失越小,初始结构性参数越小。

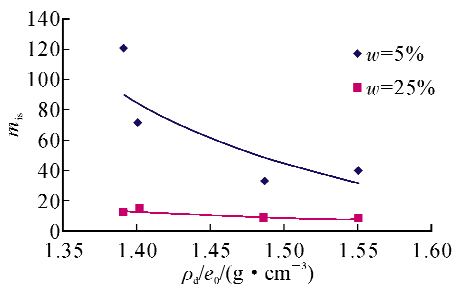


图 5  $m_{is}-\rho_d/e_0$  的关系曲线

Fig. 5 The curves of  $m_{is}-\rho_d/e_0$  of different loess samples

### 5.5 初始结构性参数与综合物理特征量的关系

定义一个综合物理特征量  $I_L \rho_d / (\rho_w e_0)$  来综合反映粒度、密度、湿度等基本物理性质,其中液性指数  $I_L$  反映了土的粒度和湿度,干密度和孔隙比反映了土的密度。对 4 种黄土进行了试验,以 12 m 黄土和 22 m 黄土为例,初始结构性参数  $m_{is}$  与该综合物理特征量的关系如图 6,初始结构性参数随综合物理特征量的增加而减小,具有很好的单调变化特性。这说明初始结构性参数与粒度、密度、湿度具有很好的关联性、相关性。12 m 黄土属于  $Q_3$  黄土,22 m 黄土属于  $Q_2$  黄土,在综合物理特征量相同的条件下, $Q_3$  黄土的初始结构性参数大于  $Q_2$  黄土的初始结构性参数。

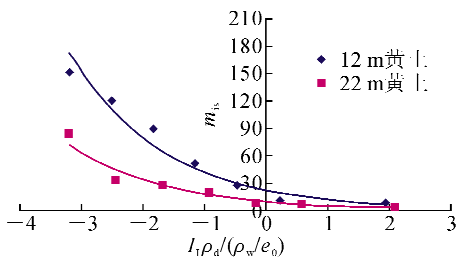


图 6  $m_{is}-I_L \rho_d / (\rho_w e_0)$  的关系曲线

Fig. 6 The curves of  $m_{is}-I_L \rho_d / (\rho_w e_0)$  of different loess samples

## 6 初始结构性与力学特性指标的关系

本文分别对 12 m、15 m、22 m、25 m 黄土进行室内压缩试验和双线法湿陷试验,来验证初始结构性参数  $m_{is}$  在实际工程中的实用性和合理性;验证初始结构性参数与压缩性指标(压缩系数  $a$ 、压缩模量  $E_s$ )和湿陷性指标(湿陷系数  $\delta_s$ )是否具有直接而灵敏的关系。

### 6.1 初始结构性参数与压缩系数 $a$ 的关系

土的压缩系数  $a$  反映了在一定压力范围内土孔隙比的变化范围,压缩系数  $a$  越大,表明在一定压力范围内孔隙比变化越大,土的压缩性越高,土粒在受力后调整位置,重新排列,相互挤紧的速率越快。大量试验已得出:对于同一种土,在干密度相同的情况下,压缩系数随含水率的增大而增大,即低湿度时,压缩系数小,高湿度时,压缩系数大。以 12 m 和 22 m 黄土为例,初始结构性参数  $m_{is}$  与压缩系数  $a$  的关系如图 7,随压缩系数  $a$  的增大,初始结构性参数  $m_{is}$  逐渐减小;对于同一种土,在含水率较低时,压缩系数  $a$  较小,对应的初始结构性参数较大,表明低湿度下,黄土颗粒排列特征没有遭到破坏,土的结构强度较大;随着湿度从 0% 逐渐增加到饱和,黄土的颗粒排列遭到破坏,结构势逐渐释放,初始结构强度逐渐损失,对应的压缩系数  $a$  越大,初始结构性参数越小。

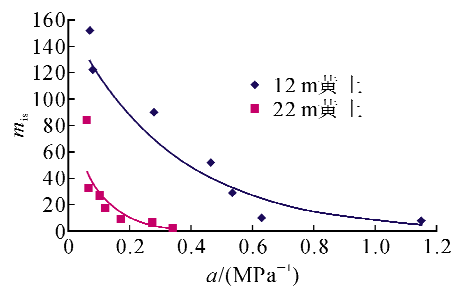


图 7  $m_{is}-a$  的关系曲线

Fig. 7 The curves of  $m_{is}-a$  of different loess samples

### 6.2 初始结构性参数与压缩模量 $E_s$ 的关系

土的压缩模量是侧限条件下,铅直向应力与应变的比值,与压缩系数成反比,即  $a$  越大,  $E_s$  越小,以 12 m 和 22 m 黄土为例,初始结构性参数  $m_{is}$  与压缩模量的关系如图 8,初始结构性参数随压缩模量的增大而增大,呈非线性的变化规律。对于同一种土,随含水率由小到大,对应的压缩模量由大到小,表现为初始结构性参数逐渐减小,这再一次证明了含水率既影响土的压缩性又影响土的初始结构性。随含水率的增加,黄土逐渐从低压缩性土过渡到高

压缩性土。

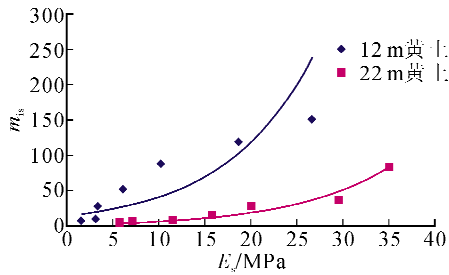


图 8  $m_{is}-E_s$  的关系曲线

Fig. 8 The curves of  $m_{is}-E_s$  of different loess samples

### 6.3 初始结构性参数与湿陷系数 $\delta_s$ 的关系

湿陷试验采用双线法,环刀尺寸  $50\text{ cm}^2 \times 2\text{ cm}$ ,以 12 m 和 25 m 黄土为例,初始结构性参数与湿陷系数的关系如图 9,初始结构性参数随湿陷系数的增大而增大;随含水率由 0% 增至 25%,湿陷系数由大逐渐减小,初始结构性参数由大减小。12 m 黄土属于  $Q_3$  黄土,25m 黄土属于  $Q_2$  黄土,可以看出,相同含水率条件下, $Q_3$  黄土的湿陷系数比  $Q_2$  黄土的湿陷系数大, $Q_3$  黄土对应的初始结构性参数比  $Q_2$  黄土上大。

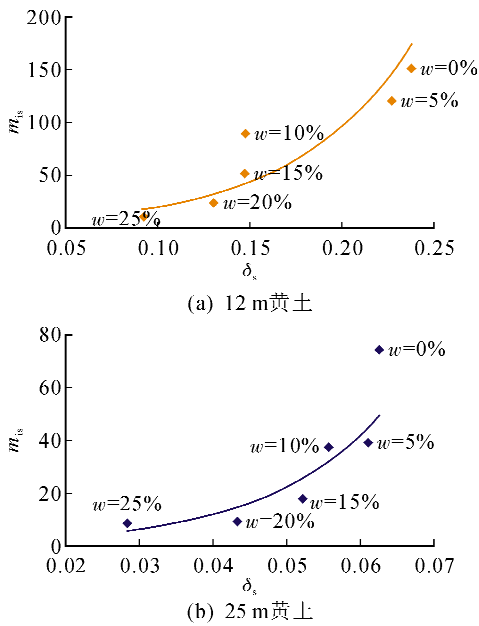


图 9  $m_{is}-\delta_s$  的关系曲线

Fig. 9 The curves of  $m_{is}-\delta_s$  of different loess samples

## 7 结论

1) 本文通过扰动重塑饱和土释放原状土的结构性,用原状土的无侧限抗压强度与重塑饱和土的无侧限抗压强度的比值定义了一个反映土初始结构性的参数,该参数可以综合反映黄土的初始颗粒联结和初始颗粒排列特征。

2) 初始结构性参数与土基本物性指标(粒度、密度、湿度)的关系曲线表明:初始结构性参数  $m_{is}$  随含水率的增加而减小,随塑限的增大而增大,随初始孔隙比的增加而增大,随干密度与孔隙比比值的增加而减小。

3) 初始结构性参数与综合物理特征量的关系曲线表明:初始结构性参数随综合物理特征量的增加而减小,它综合反映了粒度、密度、湿度对初始结构性的影响,以及粒度、密度、湿度、初始结构性的相关性。

4) 初始结构性参数与力学特性指标的关系曲线表明:初始结构性参数  $m_{is}$  随压缩系数增加而减小,随压缩模量增加而增大,随湿陷系数增加而增大。

5) 黄土的基本物性指标是影响黄土初始结构性的主要因素;通过初始结构性参数  $m_{is}$  与工程力学特性指标的关系,反映出该初始结构性参数在工程实际应用中的合理性和可行性。

### 参考文献:

[1] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.  
Xie Dingyi, Qi Jiling. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656.

[2] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.  
Shao Shengjun, Zhou Feifei, Long Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.

[3] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力条件下的土结构性参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 4248-4251.  
Luo Yasheng, Xie Dingyi, Shao Shengjun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 4248-4251.

[4] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.  
Deng Guohua. Research on structure parameter of loess and structure constitutive relations under true tri-axial condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.

[5] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1891-

1896.

Chen Cunli, Hu Zaiqiang, Gao Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (11): 1891-1896.

- [6] 陈存礼, 高鹏, 胡再强. 黄土的增湿变形特性及其与结构性的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1352-1360.

Chen Cunli, Gao Peng, Hu Zaiqiang. Moistening deformation characteristic of loess and its relation to structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1352-1360.

- [7] 夏旺民. 黄土弹塑性损伤本构模型及工程应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.

Xia Wangmin. The elasto-plastic damage constitutive model of loess and its engineering application [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.

- [8] 冯志焱. 非饱和黄土结构性量化参数与结构性本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

Feng Zhiyan. Research on soil structural parameters and structural constitutive model of unsaturated loess[D]. Xi'

an: Xi'an University of Technology, 2008.

- [9] 冯志焱, 谢定义. 复杂加载条件下原状黄土结构性量化参数变化全过程分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 72-75.

Feng Zhiyan, Xie Dingyi. Quantitative analysis of soil structure variations in whole process under complex loading conditions of intact loess[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1): 72-75.

- [10] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15-20.

Shao Shengjun, Zheng Wen, Wang Zhenghong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15-20.

- [11] 邵生俊, 王丽琴, 陶虎, 等. 黄土的构度及其与粒度、密度、湿度之间的关系[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1387-1393.

Shao Shengjun, Wang Liqin, Tao Hu, et al. Structural index of loess and its relation with granularity, density and humidity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1387-1393.

(责任编辑 周蓓)

(上接第 442 页)

## 4 结 论

变位自转双平面研磨机是在克服双轴式、直线式、行星式双平面等研磨原理缺陷的基础上设计的一种研磨机床。通过对变位自转双平面研磨机研磨轨迹仿真和实验对比可知:①变位自转双平面研磨机从原理和机构上克服了传统研磨机的诸多缺点, 有较好的研磨轨迹和研磨效果;②相比较而言, 下研磨盘在平面螺旋线运动模式下的研磨轨迹好, 研磨质量高。

### 参考文献:

- [1] Zhang Zefang, Yan Weixia, Zhang Lei, et al. Effect of mechanical process parameters on friction behavior and material removal during sapphire chemical mechanical polishing[J]. Microelectronic Engineering, 2011, (88): 3020-3028.
- [2] Takei Yoshinori, Mimura Hidekazu. Effect of focusing flow on stationary spot machining properties in clastic e-

mission machining [J]. Nanoscale Research Letters, 2013, (8): 237-242.

- [3] Sidpara Ajay, Jain V K. Analysis of forces on the free-form surface in magnetorheological fluid based finishing process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, (69): 1-10.

- [4] David A K. Precision fabrication and development of charging and testing methods of fixed-abrasive lapping plates[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2003.

- [5] Zhang L, Tam H Y, Yuan C M, et al. An investigation of material removal in polishing with fixed abrasives[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216 (1): 103-112.

- [6] Chiou Y C, Lcc R T, Yau C L. A novel method of composite electroplating on lap in lapping process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, (47): 361-367.

(责任编辑 王卫勋)