

缓倾夹砂土岩复合地层在隧道施工扰动下的失稳机理研究

颜秉成¹, 张素磊^{1,*}, 杜世明²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 宁波舜通集团有限公司, 宁波 315400)

摘要:近年来,由于地铁建设导致的地面塌陷事故屡见不鲜,给城市居民的安全带来了极大的威胁,引发了全社会的高度重视。依托青岛地铁某区段工程,采用离散元模拟方法对隧道施工扰动下缓倾夹砂土岩复合地层失稳机理进行研究。结果表明:随地层倾斜角度和夹砂层厚度的增大,塌方高度及宽度也随之增大;随隧道上方覆岩厚度的增加,塌方范围随之减小,并得出倾斜角度、夹砂层厚度和覆岩厚度 3 个影响因素分别对塌方范围影响的关系曲线。借助 PFC2D 对围岩应力进行监测分析并得出围岩应力变化曲线,随塌方发展,塌落区边界最大主应力逐渐从竖向分布转化为水平分布;距隧道水平距离越大,开挖对应力变化影响越小。借助 PFC2D 的接触力链变化图揭示了塌落拱存在的应力形式及其成拱效应。从地表沉降槽曲线可以看出,随倾斜角度、夹砂层厚度及覆岩厚度的变化,地表沉降主要由隧道中线位置向两侧对称减小,最大地表沉降值随夹砂层厚度变化较大。研究成果可为缓倾夹砂土岩复合地层隧道施工提供技术参考。

关键词:隧道工程;夹砂土岩复合地层;缓倾地层;离散元模拟;PFC2D

中图分类号:U455 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2025)04-0046-10

Study on the instability mechanism of the gently dipping soil-sand-rock composite strata under tunnel construction disturbance

YAN Bingcheng¹, ZHANG Sulei^{1,*}, DU Shiming²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Ningbo Shuntong Group Co., Ltd., Ningbo 315400, China)

Abstract: In recent years, ground subsidence accidents caused by subway construction have been common, posing a great threat to the safety of urban residents and attracting high attention from the whole society. Based on a certain section of Qingdao Metro project, this study adopts the discrete element simulation method to investigate the instability mechanism of the gently dipping soil-sand-rock composite strata under tunnel construction disturbance. The results indicate that: with the increase of the strata slope angle and the sand layer thickness, the height and width of the collapse also increase; with the increase of the thickness of the covered rock above the tunnel, the scope of the collapse decreases accordingly, and the relationship curve between the three influencing factors of slope angle, sand layer thickness and rock thickness on the collapse rang is obtained. The surrounding rock stress is monitored and analyzed by using PFC2D and the stress change curve is obtained. As the collapse

收稿日期:2023-06-07

基金项目:国家自然科学基金(51978356);宁波市交通运输科技项目(202303)

作者简介:颜秉成(1997—),男,山东青岛人。硕士,研究方向为隧道及地下工程。E-mail:1903354890@qq.com。

*通信作者:张素磊(1983—),男,山东临朐人。博士(后),教授,主要从事隧道及地下工程等方面的研究。

E-mail:zhangsulei@qut.edu.cn。

develops, the maximum principal stress at the boundary of the collapse area gradually transforms from vertical distribution to horizontal distribution, and the greater the horizontal distance from the tunnel is, the smaller the impact of excavation on stress changes is. The force chain diagram of PFC2D reveals the stress forms and arching effects of collapsed arches. From the surface settlement trough curve, it can be seen that with the changes in slope angle, sand layer thickness and rock thickness, surface settlement mainly decreases symmetrically from the centerline position of the tunnel to both sides, and the maximum surface settlement value varies greatly with the changes of sand layer thickness. The research results can provide technical reference for the construction of tunnels in gently dipping soil-sand-rock composite strata.

Key words: tunnel engineering; soil-sand-rock composite strata; gently dipping strata; discrete element simulation; PFC2D

近年来我国隧道塌方事故频发,闫惠娇等^[1]统计结果表明地面坍塌事故占总地铁施工事故的39.1%。以青岛市为例,青岛市地质存在缓倾夹砂土岩复合地层,3号线君振区间和1号线开封路至胜利桥区间的坍塌事故均存在同样的复杂地层^[2]。由于受地层的复杂性和随机性以及探测技术不成熟、施工员经验不足等不良因素影响,隧道可能不具备安全顶板厚度,上方覆岩如果发生坍塌,极易引起中间砂层的快速垮塌,进而加速上层土体的坍塌速度及范围。因此,只有深入研究缓倾夹砂土岩复合地层隧道失稳机理,才能更好地预防地铁隧道坍塌事故的发生。

针对缓倾地层隧道失稳机理的研究,考虑到围岩破裂、塌落是非连续性的过程,所以数值模拟多采用离散元分析。LIU等^[3]采用模型试验和离散元法研究了浅层地铁隧道在上软下硬复合地层中的坍塌机理,详细介绍了复合地层的应力演化和坍塌特征,并分析了复合地层的承载力。HUANG等^[4]通过模型试验和数值分析对软弱夹层附近隧道开挖进行模拟,研究了软弱夹层对隧道周围岩体破坏的影响。陈稳^[5]借助PFC2D软件模拟土质围岩隧道塌方过程,得出塌方过程整体为先塌落、再成拱、再塌落、再成拱,最终形成塌穿型塌方的变化过程。房倩等^[6]通过模型试验对圆形洞室围岩破坏模式进行研究,得出黏性材料洞室破坏过程存在剪切楔塌落和塌落拱形成两部分。汪成兵等^[7]早期借助PFC2D软件得到了3种隧道塌方形态,验证了颗粒流方法的可行性。屈若枫^[8]、张铭举^[9]应用PFC软件分析均得出砂层塌陷过程也存在短时稳定的塌落拱。高峰等^[10]采用UDEC模拟了隧道塌方过程,并指出隧道埋深主要影响塌方范围,斜向节理易产生塌落拱。张自光等^[11]对地铁隧道拱顶安全覆岩厚度进行了研究,得出覆岩厚度对围岩自稳起关键控制作用。王秋生等^[12]对某隧道塌方事故分析,得出围岩软弱是引发隧道塌方的主要因素的结论。张成平等^[13]通过模型试验研究了均质软弱围岩浅埋、深埋隧道塌方特征及演化规律,得出浅埋、深埋隧道均在塌方过程中存在成拱现象,其中浅埋隧道的成拱效应是短暂的,深埋隧道最终会形成稳定的塌落拱。杜建明^[14]利用FLAC软件得出了倾斜地层盾构隧道开挖地表沉降大致呈“V”字形。周志^[15]研究了缓倾地层隧道开挖的围岩松动形态,得出松动形态呈垂直于层理方向对称分布的特征。徐海岩等^[16]研究了土砂复合地层隧道塌方规律,得出塌方范围与跨厚比和砂土比均有关的结论,即跨厚比与砂土比越大,塌方范围越大,塌方过程越显著。张坤鹏^[17]借助PFC2D软件研究了施工扰动下土岩复合地层的塌方演化规律。

现有研究成果大多对平地层或均质地层失稳机理研究进行了分析,针对缓倾夹砂复合地层的失稳机理研究较少。本文主要针对此问题进行深入研究,通过PFC2D软件建立了缓倾夹砂土岩复合地层隧道施工模型,根据不同的地层倾斜角度、隧道拱顶上方覆岩厚度、夹砂层厚度建立了7种不同工况,并实现对不同工况下隧道渐进破坏过程的模拟分析,揭示了缓倾夹砂土岩复合地层下隧道施工扰动影响引发地面塌陷的破坏机理。本文可为地铁隧道施工塌方防控提供参考。

1 PFC2D 数值模拟概况

1.1 颗粒流(PFC)方法概述

颗粒流(PFC)方法是一种细观离散单元法,以摩尔-库伦准则为力学基础,细观颗粒间随机产生的不规则行为进一步导致宏观上整体出现失稳状态。此方法可以用来研究岩土体微观破坏过程,也可以实现围岩大变形及破坏过程,具有更贴近真实的效果。

1.2 接触模型选取

平行黏结模型(Linear Parallel Bond)是一种常用的接触模型,在线性模型(Linear)的基础上,增加了弹性相互作用,即黏结作用。黏结作用可以使颗粒之间传递力和弯矩,提高了材料的抗拉和抗扭能力。当平行黏结模型破坏后,则会变成线性模型,与岩层和土层的地层特点相符合,所以土层和岩层的接触模型选为平行黏结模型,砂层则选为线性接触模型。

1.3 参数标定

采用 PFC2D 软件对土石材料进行模拟时,需要确定一组细观参数,以近似体现土石材料的宏观力学性质。张坤鹏^[17]通过相似模型试验研究了地铁隧道施工影响下土石复合地层渐进破坏模式及演化规律,本文数值模拟材料的参数与文献^[17]中的地层参数保持一致,分别如表 1、表 2 所示。

表 1 土层、岩层宏观参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	黏聚力/MPa
土层	18	0.06	35	0.04
岩层	20	3.10	32	0.64

表 2 土层、岩层细观参数

材料	法向接触刚度 $k_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	切向接触刚度 $k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	黏结法向刚度 $\bar{k}_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	黏结切向刚度 $\bar{k}_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	黏结法向强度 $\bar{\sigma}_c/\text{Pa}$	黏结切向强度 $\bar{\tau}_c/\text{Pa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
土层	5×10^7	5×10^7	8×10^7	8×10^7	1×10^6	1×10^6	32.5
岩层	1×10^8	1×10^8	2×10^{10}	2×10^{10}	2×10^6	2×10^6	35.0

砂层参数中的 k_n 和 k_s 根据岩层取值,这是因为塌方由岩层开始,砂层的接触刚度 k_n 、 k_s 并不影响塌方的形态及过程。而砂层的摩擦系数 μ 的确定需要考虑砂的滑裂角,李淑等^[18]研究表明,实际工程中深埋隧道的滑裂角略大于 $45^{\circ} + \varphi/2$,其中 φ 为摩擦角。在自然状态下滑裂角可近似等于自然休止角,而自然休止角可以通过砂土滚筒试验确定,如图 1 所示。图 2 表示摩擦系数 μ 与自然休止角 θ 的关系。

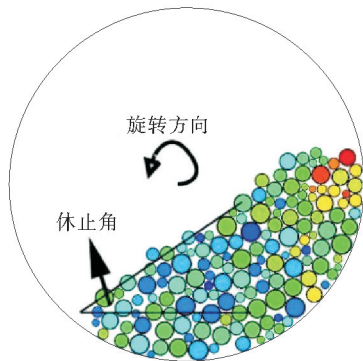


图 1 砂土滚筒试验

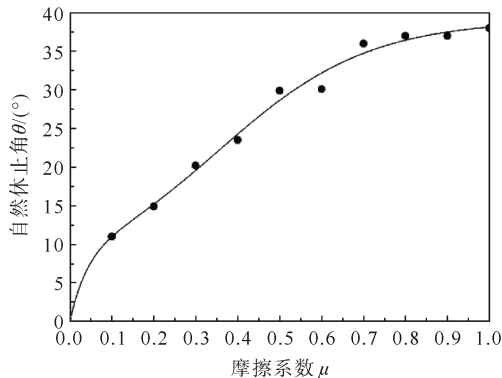


图 2 摩擦系数与自然休止角关系

由图2可以看出,当 μ 达到0.8时, θ 达到最大值且维持在 37° 左右。故选取0.8作为砂层摩擦系数。表3为砂层细观参数。

表3 砂层细观参数

材料	$k_n/(N \cdot m^{-1})$	$k_s/(N \cdot m^{-1})$	μ
砂层	1×10^8	1×10^8	0.8

2 缓倾夹砂土岩复合地层失稳机理数值模拟研究

2.1 数值模型建立及模拟实验工况确定

在本文中,模型的最小粒径设为5 cm,模型的尺寸设为60 m \times 45 m,隧道选择的是圆形断面隧道,直径为6 m,埋深为20 m,拱底和两侧拱腰到模型边界的距离均大于2倍洞径。将土岩复合地层的倾斜角度及夹砂层厚度通过geometry命令导入已绘制好的模型中,并通过wall命令建立模型的左右及下边界的墙体来限制模型在该方向的法向位移,上边界取自由边界。数值模型示意如图3所示。

为研究缓倾夹砂土岩复合地层倾斜角度、隧道上方覆岩厚度及夹砂层厚度对隧道塌方过程特征的影响,本文共建立了7种实验工况,如表4所示。

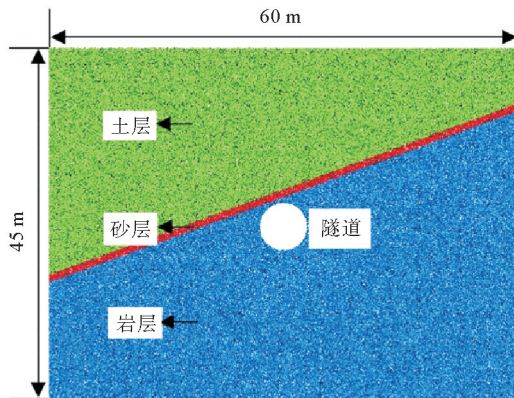


图3 数值模型示意(单位:m)

表4 数值模拟实验工况

数值模拟 工况	倾斜角度/ ($^\circ$)	覆岩厚度/ m	夹砂层 厚度/m
1	10	1	1
2	20	1	1
3	30	1	1
4	20	1	2
5	20	1	3
6	20	2	1
7	20	3	1

2.2 缓倾夹砂土岩复合地层隧道塌方特征

通过分析各工况模型的数值模拟结果,隧道塌方最终形态可以反映围岩失稳的最终破坏程度(图4),且可以反映出一定的规律性(图5)。

由图4可知,各工况最终塌方形态均类似为拱形,但随着倾斜角度的逐渐增大(工况3 $>$ 工况2 $>$ 工况1),可以看出塌方形态会出现由最初沿垂直于夹砂层斜向上发展到竖直向上发展的演变过程,倾斜角度的影响在塌方过程中逐渐减弱。这是因为塌方发展初期破坏主要由隧道围岩失稳造成,即由围岩承受力薄弱处开始沿斜向上发展。当塌方发展到夹砂层时,砂层颗粒之间由于没有黏结作用而大范围迅速塌落,且塌落范围随着地层倾斜角度的增加而增大,其中塌方高度基本以线性关系成比例增大,倾斜角度每增大 10° ,塌方高度增大2.5 m,而塌方宽度由于受颗粒间的黏结作用呈逐渐减缓的趋势,如图5(a)所示。

在既有倾斜角度(20°)下,随着夹砂层厚度的增大(工况5 $>$ 工况4 $>$ 工况2),塌方高度的增长速率逐渐增大,如图5(b)所示,当夹砂层厚度从2 m增大到3 m时,塌方高度和宽度增大变化明显,分别增大了4和2 m左右,这是由于塌方发展到夹砂层时会迅速引起大范围塌落从而导致在土层下方形成大面积的塌空区域。可见,夹砂层的存在是塌方发展范围瞬时扩大的潜在因素。

在既有倾斜角度(20°)下,随覆岩厚度的增加(工况7 $>$ 工况6 $>$ 工况2),塌方宽度及高度都有所减少,如图5(c)所示。当隧道上部覆岩厚度从2 m增大到3 m时,塌方只会发生在隧道开挖面周围,不会发展到上部地层。因此可以看出,隧道上部覆岩厚度在维持隧道稳定状态过程中起到了至关重要的作用。

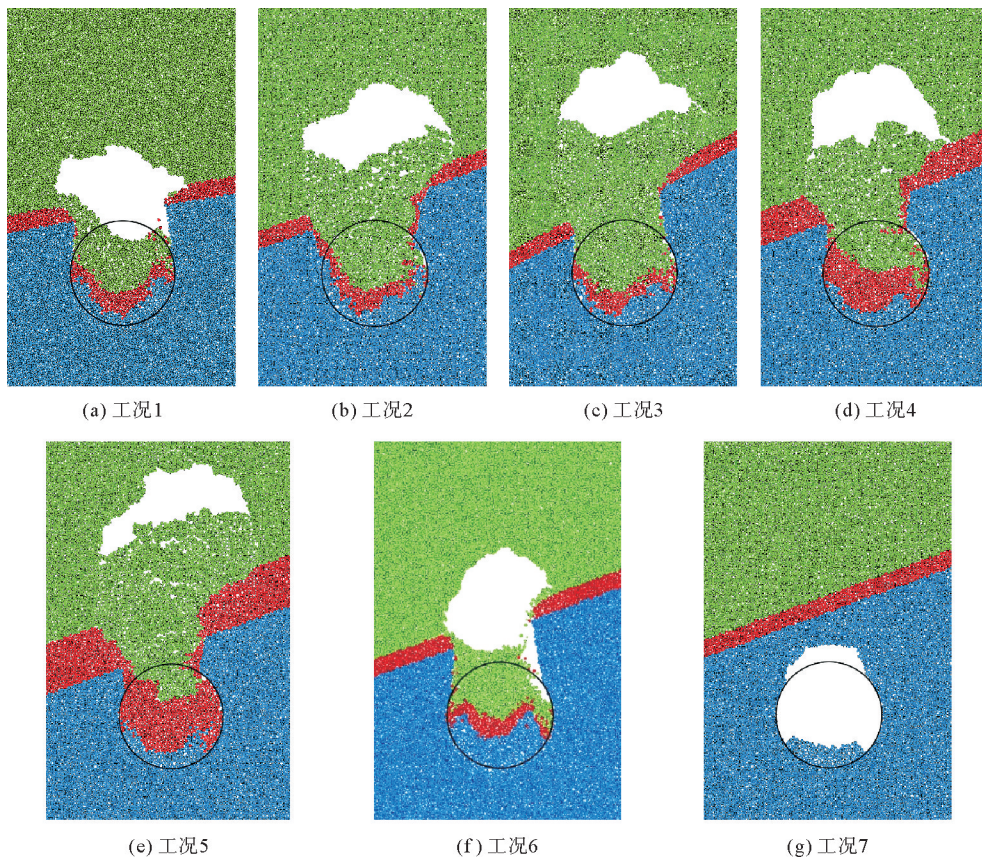
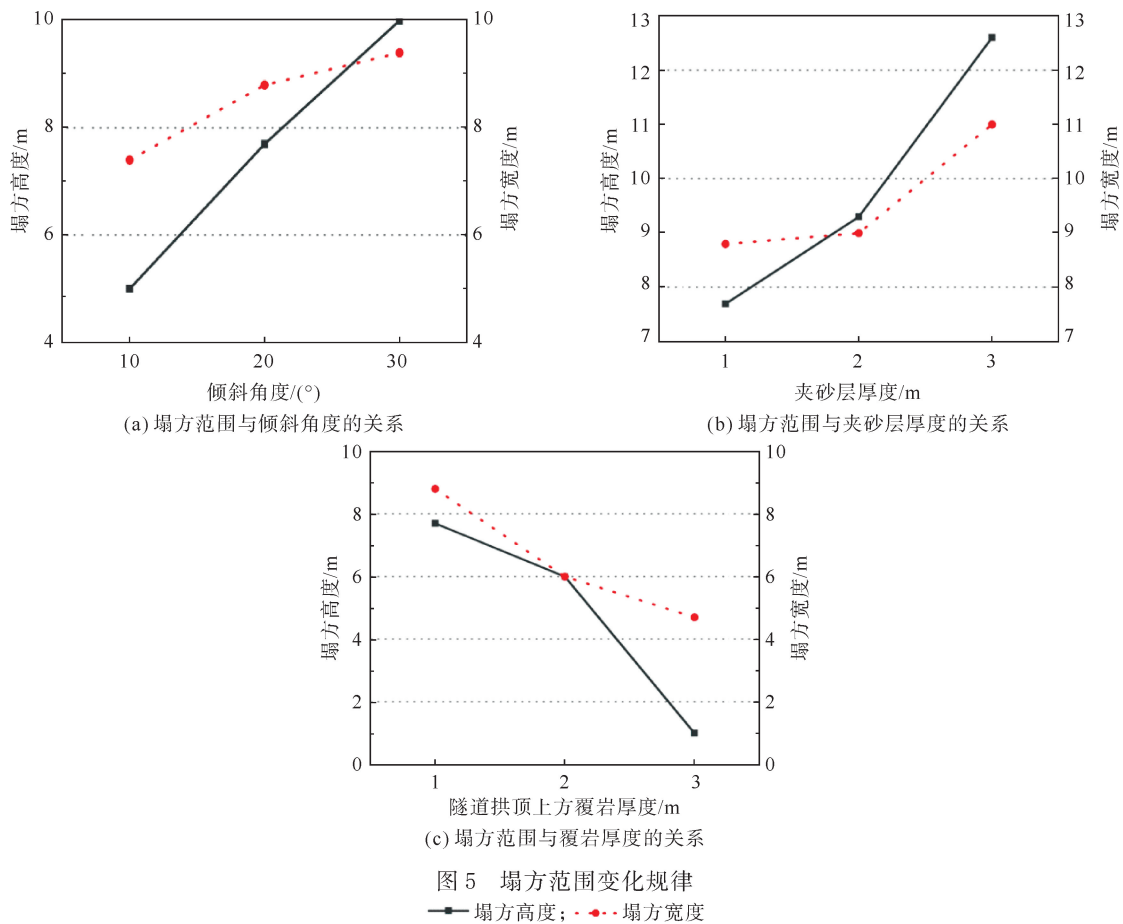


图4 隧道最终塌方形态



2.3 隧道塌方过程围岩应力分析

通过试算,发现开挖运算 5 万步后,塌落拱基本形成,塌方形态基本稳定,故以 5 万步为计算终点。地表沉降监测点及测量圆布置如图 6、图 7 所示。由于数值模型实验工况较多,选取工况 1(倾斜角度 10° ,覆岩厚度 1 m,夹砂层厚度 1 m)进行围岩应力分析,如图 8 所示,图中压应力为负,拉应力为正。

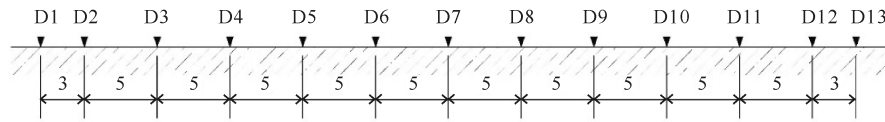


图 6 地表沉降监测点布置示意(单位:m)

隧道拱顶上方竖向应力如图 8(a)所示,隧道开挖时,拱顶竖向应力变化显著,N1—N8 各处的竖向应力迅速减小,计算达到 3.6 万步时,位于塌空区域的监测点 N1 首先减小到 0 MPa,随即 N2、N3 也减小到 0 MPa。值得注意的是 N3 和 N4 处的土体塌落情况,在计算达到 4.2 万步时虽然 N4 处下方少量土体未发生完全塌落,但是 N3 下方土体的塌空导致应力释放,应力监测的结果显示,N4 的竖向应力已减小到 0 MPa 并达到稳定状态,即已形成一种应力拱——塌落拱。同时,由图 8(b)可知,在 4.1 万步前 N4 处的水平应力先减小后达到稳定状态并保持在 0.05 MPa,当计算达到约 5 万步时应力再次减小并最终稳定在 0.03 MPa,而此时处于塌落边界的 N3 的水平应力迅速增大,并最终稳定在 0.10 MPa。这是因为塌落拱形成的同时会产生应力的聚集,即形成一个类似拱形的应力结构,在塌落形态的上部,会出现最大主应力方向由竖向方向向水平方向的转变,塌落拱的形成阻碍了隧道开挖处围岩塌方的进一步发展。当计算达到 5.1 万步时,处于塌落区域边界的 N3 水平应力为最大值 0.12 MPa,此时的竖向应力向水平应力转化最显著。

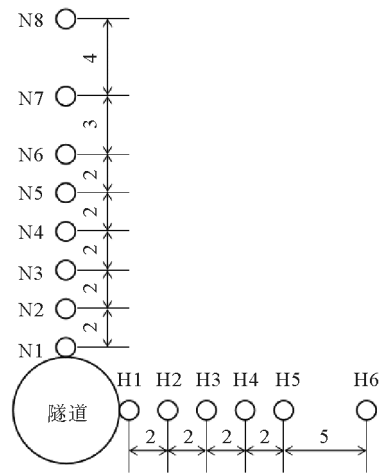
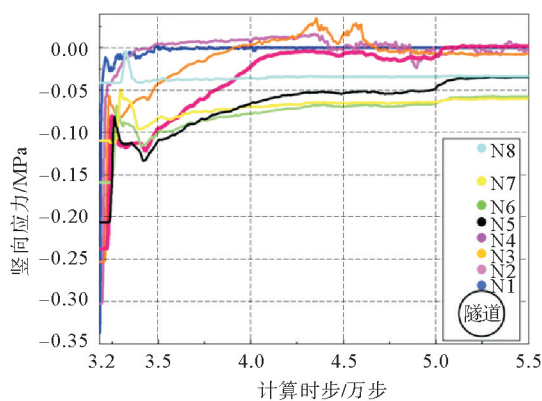
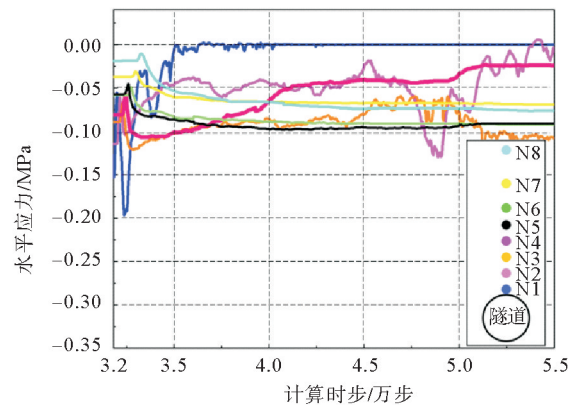


图 7 测量圆布置示意(单位:m)

隧道的拱腰右侧竖向应力如图 8(c)所示,可以明显看出,在隧道施工开始时,离隧道水平距离最近的 H1、H2、H3 竖向应力产生了较大的增长,分别达到了 0.60、0.53、0.54 MPa。随着开挖工作的进行,H1、H2、H3 的竖向应力逐渐减小,变化趋势为 $H1 > H2 > H3$ 。当计算达到 4.3 万步时,塌落拱已形成,可以看出各监测点的竖向应力逐渐达到稳定状态,H1、H2 的竖向应力分别为 0.53、0.51 MPa,而 H3 的竖向



(a) 隧道拱顶上方竖向应力



(b) 隧道拱顶上方水平应力

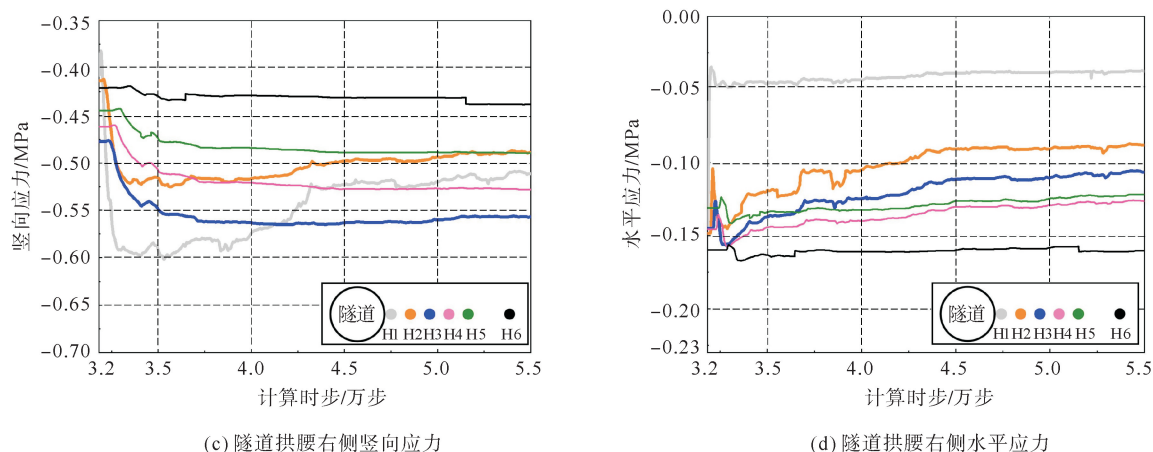


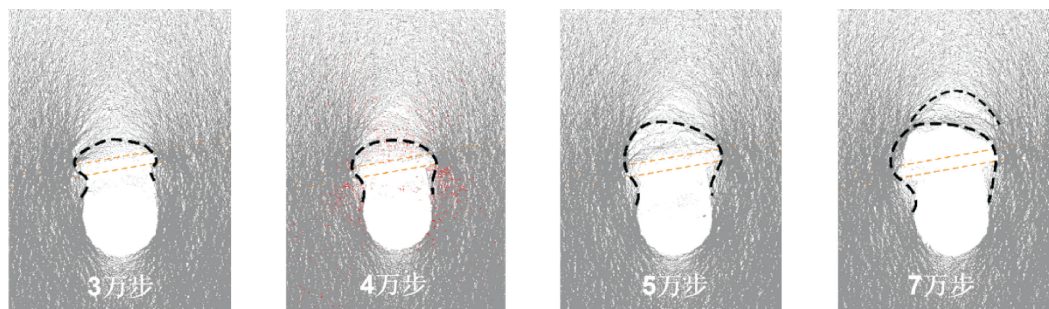
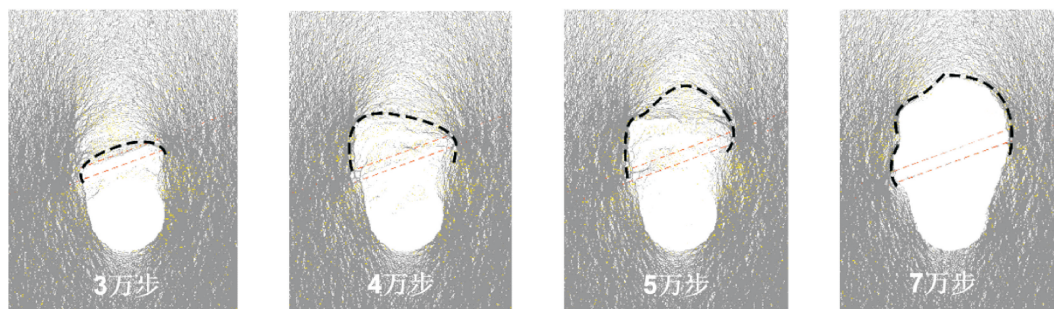
图8 围岩应力分析

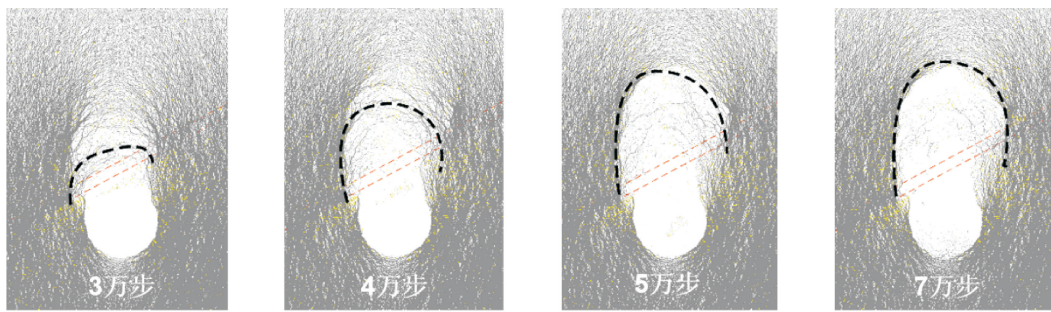
应力最大,达到 0.55 MPa,这是因为 H3 处于塌落拱拱腰的延伸处,此处的应力主要呈竖向分布。距隧道水平距离更远的 H4、H5、H6 的竖向应力受塌方影响较小,所以 3 点的竖向应力变化非常小。

隧道拱腰右侧水平应力如图 8(d)所示,由于隧道开挖工作导致隧道周围岩体瞬时卸荷,H1、H2、H3 水平方向应力快速减小,H1 的水平方向应力大小维持在 0.05 MPa。随着塌方继续发展及塌落拱的形成,水平方向应力逐渐趋于稳定,H2—H6 水平向应力分别维持在 0.09、0.12、0.14、0.13、0.16 MPa。

2.4 接触力链分析

根据塌落拱存在位置可将实验结果分为在土层(工况 1—6)和在岩层(工况 7)两类。本文主要研究地层倾斜角度对塌方渐进破坏过程的影响,故选取工况 1、2、3、7 为主要研究对象,接触力链变化如图 9、图 10 所示,图中灰色力链代表压应力状态,黄色力链代表拉应力状态,橙色虚线代表原砂层位置,黑色虚线代表塌落拱成拱位置。

(a) 工况1接触力链变化(倾斜角度 10° , 覆岩厚度1 m, 夹砂层厚度1 m)(b) 工况2接触力链变化(倾斜角度 20° , 覆岩厚度1 m, 夹砂层厚度1 m)



(c) 工况3接触力链变化 (倾斜角度30°, 覆岩厚度1 m, 夹砂层厚度1 m)

图 9 在土层工况接触力链变化

由图 9 可以看出, 3 个不同工况下隧道开挖后由于覆岩厚度较小, 塌方很快由岩层发展到夹砂层, 而夹砂层的接触模型是线性刚度模型, 颗粒很快受挤压排出而掉落, 夹砂层的力链是瞬间消散的。塌方继续发展到土层的时候, 力链由最初的竖向分布逐渐转化为环向分布, 即拱效应产生。在塌方过程中, 松动区上方每一次塌方的产生都是接触力到达极限而继续增大的结果, 直到塌方达到稳定状态。此时, 从各工况最后一张图标出的黑色虚线处可以看出, 当逐渐达到临近破坏的相对稳定状态时, 力链逐渐增粗。而从工况 1 中还可以看出最终状态可能会存在多个塌落拱。同时也可以看出工况 2、3 塌方开始的形态与工况 1 大致相同, 随着倾斜角度的增大, 成拱过程先垂直于夹砂层斜向上发展, 再到后来铅垂向上发展, 最终形成稳定塌落拱, 且最终塌方范围大小随着倾斜角度的增加而增加。

图 10 反映的是塌落拱存在于岩层中的力链变化, 第 1 次塌方发生在接触力达到破坏极限的位置, 破坏后的力链向外呈环形发展, 内侧的岩体成块掉落, 松动区附近竖向的接触力链逐渐向水平方向发展, 当岩体的颗粒间接触力增大到不足以达到破坏值时, 塌方停止发展, 最终产生稳定塌落拱。根据分析, 当隧道上方的岩层厚度达到一定程度时, 拱形力链会变得更加粗壮, 这是因为岩层具有极强的抗塌方能力。由于覆岩厚度的减少, 相同的接触力会被迅速传递至砂层, 导致上部地层出现大范围的塌落现象。可见, 隧道上方覆岩厚度是决定隧道开挖后能否稳定的关键因素。

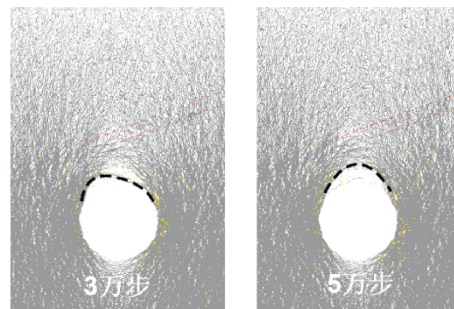


图 10 在岩层工况(工况 7)接触力链变化 (倾斜角度 20°, 覆岩厚度 3 m, 夹砂层厚度 1 m)

2.5 地表沉降分析

各工况不同塌落破坏对地表沉降的影响如图 11 所示, 从地表沉降槽曲线可以明显看出, 各工况的地表最大沉降值均发生在隧道中心线处。在工况 5 (倾斜角度 20°, 覆岩厚度 1 m, 夹砂层厚度 3 m) 中, 地表各监测点的沉降量均达到最大值, 其中最大值高达 28 mm。工况 7 (倾斜角度 20°, 覆岩厚度 3 m, 夹砂层厚度 1 m) 的地表各监测点沉降值均为最小, 最大沉降值约为 6 mm。当隧道上方覆岩厚度 (1 m) 和夹砂层厚度 (1 m) 一定且倾斜角度增大 (工况 1 < 工况 2 < 工况 3) 时, 受倾斜角度的影响, 地表最大沉降变化并不大, 分别对应工况 1、2、3 的 15.2、16.1、15.9 mm。当地

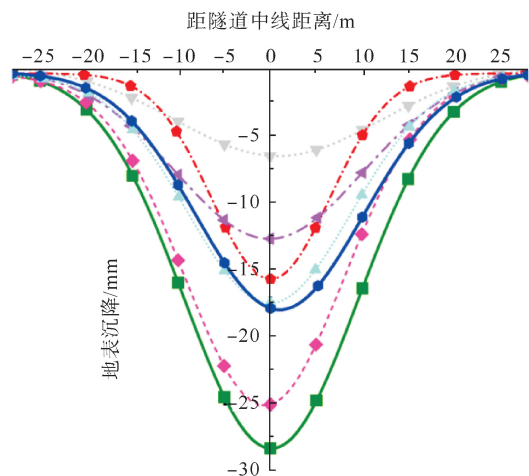


图 11 塌落拱稳定形成后各工况的地表沉降槽曲线
—●— 工况1; —■— 工况2; —▲— 工况3; —◆— 工况4;
—■— 工况5; —▼— 工况6; —▽— 工况7

层倾斜角度(20°)和隧道上方覆岩厚度(1 m)一定且夹砂层厚度越大(工况 2<工况 4<工况 5)时,受隧道开挖扰动影响,地表各点沉降值越大,从图 11 可以看出工况 4、5 的地表最大沉降值较大,分别为 25.0、28.0 mm,所以可以得出在既有倾斜角度的土岩复合地层中,夹砂层厚度的增加大大增加了塌方的破坏范围及对地面的影响。当地层倾斜角度(20°)和夹砂层厚度(1 m)一定且隧道上方覆岩厚度越大(工况 2<工况 6<工况 7)时,受隧道开挖扰动影响的地表最大沉降值越小,分别对应工况 2、6、7 的 16.1、13.1、6.5 mm。因此可以看出隧道上方覆岩厚度是防止隧道塌方的关键因素。

3 结论

本文采用离散元法研究了缓倾夹砂土岩复合地层在隧道施工扰动下的塌方机理。详细分析了地层倾斜角度、隧道上方覆岩厚度以及夹砂层厚度 3 种因素对塌方机理的影响,主要研究结论如下:

1) 借助 PFC2D 对缓倾夹砂土岩复合地层的隧道开挖进行模拟计算,通过最终的塌方形态分析可得出地层倾斜角度、隧道上方覆岩厚度以及夹砂层厚度 3 个因素分别对塌方影响的重要程度。其中砂层厚度对塌方的潜在影响最大,在实际工程中,要确保避开砂层地层,或者进行注浆加固等措施防止塌方向上发展至软弱地层;随隧道上方覆岩厚度的增加,塌方高度及宽度均有明显减小的趋势,所以实际中安全顶板覆岩厚度决定了实际工程的安全性。

2) 通过对围岩应力的分析,得出了隧道拱顶及拱腰处的应力变化规律。从拱顶的竖向及水平应力变化曲线可以看出,随着塌落拱形成,塌落区边界最大主应力逐渐从竖向分布转化为水平方向分布;从拱腰右侧的竖向应力变化曲线可以看出,在塌落拱形成时,位于塌落拱的拱腰延伸处 H3 的竖向应力值为所有水平监测点中的最大值。从拱腰右侧的水平应力曲线可以看出当距隧道水平距离越大时,开挖对围岩应力变化的影响越不明显。

3) 借助 PFC2D 可以通过力链图直观地看出地层成拱效应。塌落区边界处力链明显较粗,即颗粒间接触力较大,同时可以明显看出类似拱形的力链形式,即塌落拱的存在形态。围岩破坏的条件是当颗粒间接触力大于围岩的黏结强度时,颗粒间的接触发生断裂,宏观显示岩体呈楔块掉落。因此,从接触力链的角度可以较好地揭示地层的塌方机理。

4) 借助 PFC2D 对地表沉降进行了监测分析,绘制出的地表沉降槽曲线可以反映出随着地层倾斜角度的增大(10° 、 20° 、 30°)以及夹砂层厚度的增加(1、2、3 m),地表沉降值也随之增加,其中倾斜角度的增大(10° 、 20° 、 30°)对最大地表沉降的影响较小,分别对应工况 1、2、3 的 15.2、16.1、15.9 mm;而夹砂层厚度的增加对最大地表沉降的影响更为明显,其中工况 4(倾斜角度 20° 、覆岩厚度 1 m、夹砂层厚度 2 m)和工况 5(倾斜角度 20° 、覆岩厚度 1 m、夹砂层厚度 3 m)的最大地表沉降值分别对应 25.0、27.9 mm;随隧道上方覆岩厚度的增加(1、2、3 m),最大地表沉降值明显减小,分别对应工况 2、6、7 的 16.1、13.1、6.5 mm。

本文研究了缓倾夹砂土岩复合地层在隧道施工扰动下的失稳机理,揭示了地层倾斜角度、夹砂层厚度和隧道拱顶上方覆岩厚度对塌方影响的重要程度,其中地层中的夹砂层厚度对塌方的潜在影响最大,在实际中可能存在部分隧道顶板覆岩设计厚度不足的情况,导致开挖过程中发生坍塌。在坍塌向柔软的地层扩展之前,应采取必要的预加固措施,避免发生严重的坍塌事故。此外,对于岩层厚度不足的浅埋隧道,预加固措施对于防止复合地层坍塌至关重要。

参考文献(References):

- [1] 闫惠娇,马永驰.我国地铁建设事故规律分析与安全管理启示[J].地下空间与工程学报,2022,18(5):1731-1741.
YAN Huijiao, MA Yongchi. Regularity analysis and safety management enlightenment of subway construction accidents in China[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(5): 1731-1741.
- [2] 马利柱,窦衍光,王磊,等.青岛市地铁隧道施工常见不良地质问题及对策分析[J].工程建设与设计,2021(14):119-124. DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.07.237.
MA Lizhu, DOU Yanguang, WANG Lei, et al. Analysis of common adverse geological problems and countermeasures in Qingdao metro tunnel construction[J]. Construction & Design for Engineering, 2021(14): 119-124. DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.07.237.
- [3] LIU C, ZHANG S L, ZHANG D L, et al. Model tests on progressive collapse mechanism of a shallow subway tunnel in soft upper and

- hard lower composite strata[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2023,131:104824.
- [4] HUANG F,ZHU H H,XU Q W,et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel:Scaled model tests and numerical analysis[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2013,35:207-218.
- [5] 陈稳.土质围岩隧道塌方规律及开挖面极限支护力分析[D].北京:北京交通大学,2021. DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.000743.
CHEN Wen. Analysis of the collapse mechanism and critical pressure of tunnels in soils[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021. DOI:10.26944/d.cnki.gbfju.2021.000743.
- [6] 房倩,张顶立,王毅远,等.圆形洞室围岩破坏模式模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(3):564-571.
FANG Qian,ZHANG Dingli,WANG Yiyuan,et al. Model test study of failure modes of surrounding rock for circular caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(3):564-571.
- [7] 汪成兵,朱合华.隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J].岩土工程学报,2008(3):450-456.
WANG Chengbing,ZHU Hehua. Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2008(3):450-456.
- [8] 屈若枫.武汉地铁穿越区岩溶地面塌陷过程及其对隧道影响特征研究[D].武汉:中国地质大学,2017.
QU Ruofeng. Research on the evolutive process of karst collapse and the impact mechanism of the karst on subway tunnel in Wuhan subway crossing area[D]. Wuhan:China University of Geosciences,2017.
- [9] 张铭举.砂性隧道围岩破坏模式离散元分析[D].北京:北京交通大学,2016.
ZHANG Mingju. Discrete element analysis of failure mode in sandy tunnel surrounding rock[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2016.
- [10] 高峰,唐星,李星,等.基于 UDEC 离散元法的隧道塌方特征分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(1):24-28.
GAO Feng,TANG Xing,LI Xing,et al. Tunnel collapse characteristics based on UDEC discrete element method[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*,2018,37(1):24-28.
- [11] 张自光,曹广勇,李建立,等.上软下硬地层地铁隧道安全覆岩厚度研究[J].现代隧道技术,2021,58(2):71-77. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2021.02.009.
ZHANG Ziguang,CAO Guangyong,LI Jianli,et al. Research on the safe thickness of overlying rock layer above subway tunnels in upper-soft and lower-hard stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*,2021,58(2):71-77. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2021.02.009.
- [12] 王秋生,董竹勤,李鹏飞,等.深埋大断面隧道土石复合地层塌方机制及处置措施评价[J].中国铁道科学,2018,39(1):59-65.
WANG Qiusheng,DONG Zhuqin,LI Pengfei,et al. Collapse mechanism and treatment measure assessment for deep tunnel with large cross section in soil-stone composite strata[J]. *China Railway Science*,2018,39(1):59-65.
- [13] 张成平,韩凯航,张顶立,等.城市软弱围岩隧道塌方特征及演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12):2433-2442. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.008.
ZHANG Chengping,HAN Kaihang,ZHANG Dingli,et al. Test study of collapse characteristics of tunnels in soft ground in urban areas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2014,33(12):2433-2442. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.008.
- [14] 杜建明.复合地层盾构隧道围岩变形规律的透明岩土试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
DU Jianming. Experimental study on deformation laws of surrounding rock in shield tunnel of composite formation by transparent rock-and-soil[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2018.
- [15] 周志.缓倾地层隧道开挖的围岩松动形态与测试方法研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
ZHOU Zhi. Study on loose rock forming and testing methods for tunnel excavation in slow-deep layer[D]. Huainan:Anhui University of Science & Technology,2018.
- [16] 徐海岩,王志杰,陈昌健,等.土砂互层隧道塌方及演变规律的模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(6):1050-1058.
XU Haiyan,WANG Zhijie,CHEN Changjian,et al. Model tests on characteristics and evolution of tunnel collapse in soil-sand interbedded strata[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2021,43(6):1050-1058.
- [17] 张坤鹏.地铁隧道施工影响下土岩复合地层渐进破坏模式及演化规律[D].青岛:青岛理工大学,2021. DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2021.000475.
ZHANG Kunpeng. Progressive damage pattern and evolution of soil-rock composite strata under the influence of subway tunnel construction[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2021. DOI:10.27263/d.cnki.gqudc.2021.000475.
- [18] 李淑,张顶立,李志佳.北京地铁浅埋暗挖区间隧道塌方机理[J].北京交通大学学报,2012,36(1):24-29.
LI Shu,ZHANG Dingli,LI Zhijia. Study on mechanism of collapse based on shallow buried subway tunnel of Beijing[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*,2012,36(1):24-29.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)