

拉拔过程中全长灌浆锚固系统能量演化规律

刘秀军^{1,2}, 马占国¹, 付文光³

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 广东 深圳 518028; 3. 深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518063)

摘要: 锚固系统的拔出破坏实质上是能量驱动的失稳破坏, 能量演化规律能充分反映锚固系统的承载性状和失效破坏过程。为了揭示循环荷载作用下全长灌浆锚固系统变形破坏过程中的能量转化机制及损伤劣化过程, 文章基于热力学第一定律, 给出了锚固系统在拉拔过程中的输入能、弹性能、耗散能、阻尼能以及损伤能等能量计算公式, 并结合某项目全长灌浆锚索的现场拉拔试验, 系统地研究了拉拔过程中全长灌浆锚固系统内部的能量演化规律。研究表明: 1) 随着循环次数和拉拔荷载的增加, 输入能、弹性能、阻尼能以及损伤能均在逐渐增加, 当拉拔荷载接近于极限抗拔力时, 损伤能会呈现出急速增加的现象; 2) 在拉拔过程中, 弹性能的变化幅度较小, 其占比始终维持在 50% 左右; 3) 阻尼能和损伤能的演化是一个“此消彼长”的过程, 阻尼能的占比曲线呈倒“U”型, 其占比总体来说维持在 20% 以下, 而损伤能的占比曲线大体呈“U”型, 且其随着荷载比的变化幅度相对较为明显; 4) 全长灌浆锚固系统在拉拔过程中会产生较大的塑性损伤能, 该过程实际上是不停损伤、刚度逐渐劣化的过程。本文成果对全长灌浆锚固系统的设计、施工、检验及监测预警具有一定借鉴意义。

关键词: 全长灌浆锚固系统; 拉拔试验; 滞回曲线; 能量演化规律; 热力学第一定律

中图分类号: TU470⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)09-0001-07

doi: 10.13402/j.gejs.2024.09.112

Energy evolution law of fully grouted anchorage system during pulling process

LIU Xiujun^{1,2}, MA Zhanguo¹, FU Wenguang³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Shenzhen Geotechnical Investigation & Surveying Institute (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518028, Guangdong, China; 3. Shenzhen Gongkan Geotechnical Group Co., Ltd., Shenzhen 518063, Guangdong, China)

Abstract: The pull-out failure of the anchorage system is essentially an energy driven instability failure, and the energy evolution law can fully reflect the bearing behavior and failure process of the anchorage system. In order to reveal the energy conversion mechanism and damage degradation process of the deformation and failure process of the fully grouted anchorage system under cyclic loading, this paper provides energy calculation formulas for the input energy, elastic energy, dissipation energy, damping energy, and damage energy of the anchorage system during the pulling process based on the first law of thermodynamics. Combining with the on-site pull-out test of a certain project's fully grouted anchor cable, the energy evolution law inside the fully grouted anchorage system during the pulling process is systematically studied. The results have shown that: 1) With the increase of the number of cycles and pull-out load, the input energy, elastic energy,

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFE0118500、2019YFC1904304); 国家自然科学基金资助项目(U22A20598、52104107)

作者简介: 刘秀军(1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 从事岩土工程检测等方面的研究工作。

damping energy, and damage energy all gradually increase. When the pull-out load approaches the ultimate pull-out resistance, the damage energy will show a rapid increase phenomenon; 2) During the drawing process, the change in elastic energy is relatively small, and the proportion of elastic energy remained around 50%; 3) The evolution of damping energy and damage energy is a process of trade-off. The proportion curve of damping energy shows an inverted "U" shape, and the proportion of damping energy generally remains below 20%, while the proportion curve of damage energy generally shows a "U" shape, and its variation amplitude with the load ratio is relatively obvious; 4) The fully grouted anchorage system will generate significant plastic damage energy during the pulling process, and the process of being pulled out is actually a continuous process of damage and gradually deteriorating stiffness. This paper has certain reference significance for the design, construction, inspection, monitoring and early warning of the fully grouted anchorage system.

Key words: fully grouted anchorage system; pullout test; hysteretic curve; energy evolution law; the first law of thermodynamics

近年来,随着工程建设行业的迅速发展,岩土锚固技术也得到了飞速发展,几乎涉及到土木、交通、采矿、水利等基础设施工程建设的各个领域^[1]。常见的锚固技术有机械锚固、灌浆锚固和摩擦锚固 3 种,其中灌浆锚固技术因其成本低且安装方便等优势在锚固工程中得到了广泛应用^[2]。由于岩土性状的复杂性及锚固方式的多样性,灌浆锚固系统的承载性能研究至今仍是岩土工程领域的热点问题^[3]。

许多学者采用理论分析及现场试验等方法,对灌浆锚固系统的承载机理进行了大量的研究工作。理论研究方面:PHILLIPS 等^[4-5]提出了锚固界面剪应力分布的指数函数形式;CLOUGH 等^[6]提出了锚杆剪应力与相对错动位移之间的双曲线关系模型;WIJK^[7]从 Mindlin 位移解答出发,推导了锚杆沿锚固段分布的轴力和剪应力解答形式;MA 等^[8]采用非线性剪切滑移模型对拉拔荷载作用下全长黏结锚杆的荷载传递及其非线性特征进行了分析。试验研究方面:EVANGELISTA 等^[9-10]针对锚杆在粒状和黏性土体中的拉拔荷载传递特征展开了试验研究,得到锚杆剪应力沿轴向呈现不均匀分布形式的结论;BENMOKRANE 等^[11-13]通过土体与灌浆体界面直剪试验,提出了用三阶段线性函数来描述其应力-位移关系。

锚固系统的拔出破坏实质上是能量驱动的稳定破坏,能量演化规律能充分反映锚固系统的承载性状和失效破坏过程。上述研究工作的重点聚焦于锚固界面上的剪应力分布型式及荷载传递规律方面的研究,对锚固系统在拉拔过程中的能量演化规律并未引起足够的重视,尤其是对循环荷

载下滞回曲线与弹塑性应变能的关系以及锚固系统的变形破坏特征缺乏深入和系统的研究。基于此,本文基于热力学第一定律,并借鉴岩石芯样抗压破坏相关的能量分析研究成果^[14-16],整理出锚固系统在拉拔过程中的输入能、弹性能、耗散能、阻尼能以及损伤能等能量计算公式,结合深坪锚索综合试验项目的全长灌浆锚索的现场拉拔试验,系统地研究了拉拔过程中全长灌浆锚固系统内部的能量演化规律,以为全长灌浆锚固系统的设计、施工、检验及监测预警提供一定的借鉴与参考。

1 锚固系统内部能量演化规律

锚固系统在拔出破坏过程中,可忽略声发射能和辐射能的影响,并假设没有产生热能交换,根据热力学第一定律,外力所做的功即为总输入能,能量传递到锚固系统内部会转化为弹性能和耗散能,各能量指标分别表示:

$$U_i = \int_{s_{0i}}^{s_{Ai}} P_i^+ ds_i \quad (1)$$

$$U_{ei} = \int_{s_{Ci}}^{s_{Ai}} P_i^- ds_i \quad (2)$$

$$U_{di} = U_i - U_{ei} \quad (3)$$

式中: U_i 、 U_{ei} 、 U_{di} 分别为第 i 个循环内的输入能、弹性能、耗散能, kJ; P_i^+ 、 P_i^- 分别为第 i 个循环内加载曲线和卸载曲线上的荷载, kN; s_i 为第 i 个循环内的张拉位移, mm; s_{0i} 、 s_{Ai} 、 s_{Ci} 分别为 O 点、 A 点及 C 点处的位移, mm。

除筋体之外,锚固系统内灌浆体、岩土体以及锚固界面均非均质、连续、各向同性的理想材料,因此在其拉拔过程中,颗粒间的摩擦、孔隙内气体或液体的黏滞性,使得锚固系统的拔出过

程表现出非线性的滞后效应。实际上, 耗散能包含引起塑性损伤的损伤能和克服黏滞性所消耗的阻尼能两部分, 其中损伤能是引起锚固系统内部微裂隙发育扩展、产生塑性变形、导致刚度劣化的主因。

循环加卸载能量计算示意如图 1 所示, 其中 $O(s_{oi}, 0)$ 为某一循环加载曲线的起始点; $A(s_{Ai}, P_{Ai})$ 为该循环内加载曲线的峰值点; $C(s_{Ci}, 0)$ 为该循环内卸载曲线的截止点, 即下一循环加载曲线的起始点。某一循环的卸载曲线与下一循环的加载曲线汇交于 $B(s_{Bi}, P_{Bi})$ 点处, 即下一循环加载至 P_{Bi} 时产生的位移与上一循环卸载至 P_{Bi} 时产生的位移刚好相等, 均为 s_{Bi} , 从而形成滞回环 BCB。其形态取决于锚固系统的黏滞性和塑性, 当锚固系统塑性变形较大时, 可能无法形成闭合的滞回环。在由 B 点卸载至 C 点再加载至 B 点的过程中, 弹性能不发生损耗, 该周期内的能量损耗即为黏滞阻尼所做的功。滞回环 BCB 的面积即为克服黏滞性所损耗的应变能, 即阻尼能。耗散能减去该部分阻尼能, 即为造成锚固系统损伤的损伤能, 如式(4)、(5)所示。

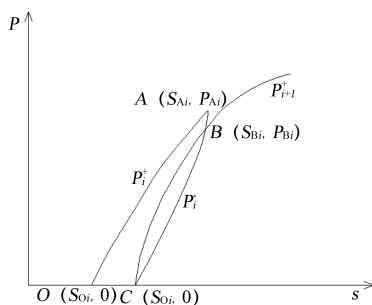


图 1 循环加卸载能量计算示意

$$U_{dzi} = \int_{s_{Ci}}^{s_{Bi}} (P_{i+1}^+ - P_i^-) ds_i \quad (4)$$

$$U_{dsi} = U_{di} - U_{dzi} \quad (5)$$

式中: U_{dzi} 和 U_{dsi} 分别为第 i 个循环内的阻尼能和损伤能, kJ; P_{i+1}^+ 为第 $i+1$ 个循环内加载曲线上的荷载, kN; s_{Bi} 为 B 点的位移, mm。

2 现场试验

2.1 试验概况

灌浆锚索的大型综合性试验在深圳市坪山新区海普瑞建设用地上进行(简称“深坪锚索综合试验项目”), 如图 2 所示。试验场地在锚索长度范围

内地层单一, 均为残积砂质黏性土。试验锚索有全长黏结型、压力集中型、压力分散型、拉力扩底型等共 9 种约 180 条, 拉拔试验类型分为极限试验(即破坏性试验)、适应性试验、验收试验、蠕变试验等共 14 种, 测取数据 400 余组。由于极限试验能够充分反映锚固系统内部的能量演化过程, 且 A6-d[#]、A9-d[#]、A12-d[#]、A15-d[#]、A18-d[#] 及 A24-c[#] 等 6 条试验锚索在开始极限试验前未受到其它试验的干扰, 因此选取该 6 条试验锚索的极限试验结果作为研究对象展开研究。



图 2 试验现场

2.2 试验锚索施工概况

试验锚索筋体由 6 条强度等级为 1 860 MPa、直径为 15.2 mm 的钢绞线组成, 钻孔直径为 180 mm, 灌浆体为 P. O. 42.5、水灰比为 0.5 的水泥砂浆。所有试验锚索施工依次经历定位、编锚、钻孔注浆及成型 4 个过程, 并按锚固长度进行分组, 每组各 3~4 根, 从 a~d 进行编号, 如图 3 所示。



图 3 试验锚索编号示意

2.3 试验装置及设备

试验采用混凝土条作为基础梁, 上置工字钢梁作为千斤顶的反力支座, 采用工具锚对锚头进行锁定及张拉, 采用高精度位移传感器对锚头位移进行观测, 如图 4 所示。同时, 试验还采用水

准仪及塔尺测量锚索孔口附近地面隆起量及锚固体上拔位移量。



图 4 试验反力装置

试验采用高精度自动化加卸载控制系统、自动化记录系统以及实时无线数据传输技术，在人工操作系统的基础上增加液压泵自动启动、油阀自动换向、油压荷载自动换算、自动保压回路、自动测读及记录等装置，以便高频地测读油压及位移数据，既保证试验精度，又节省试验时间。

2.4 试验方法

极限试验的目的是测试锚杆(索)等锚固系统的极限承载力值及其变形特性，为锚固系统设计提供依据。

极限试验加卸载程序如图 5 所示，极限试验采用多循环加卸载方式，各分级荷载为预估最大

试验荷载 P_p 的 0.3、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 及 1.0 倍。加载至 P_p 后如未发生破坏，每级荷载按 0.05 P_p 的增量继续分级加载至破坏。初始荷载 P_a 为 0.1 P_p 且不大于 50 kN。当出现下列情况之一时，应判定锚固系统达到破坏状态并应中止加载：1) 筋体断裂；2) 非预应力型锚索累计位移量大于 100 mm；3) 锚固系统蠕变率未达到稳定指标。

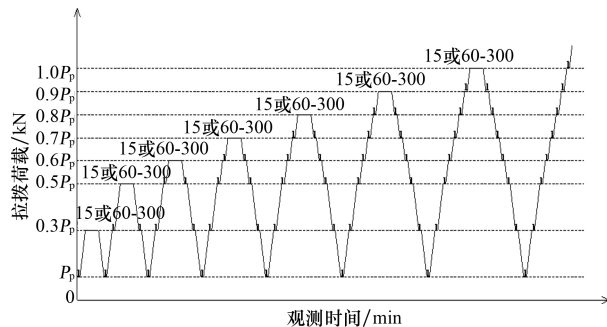
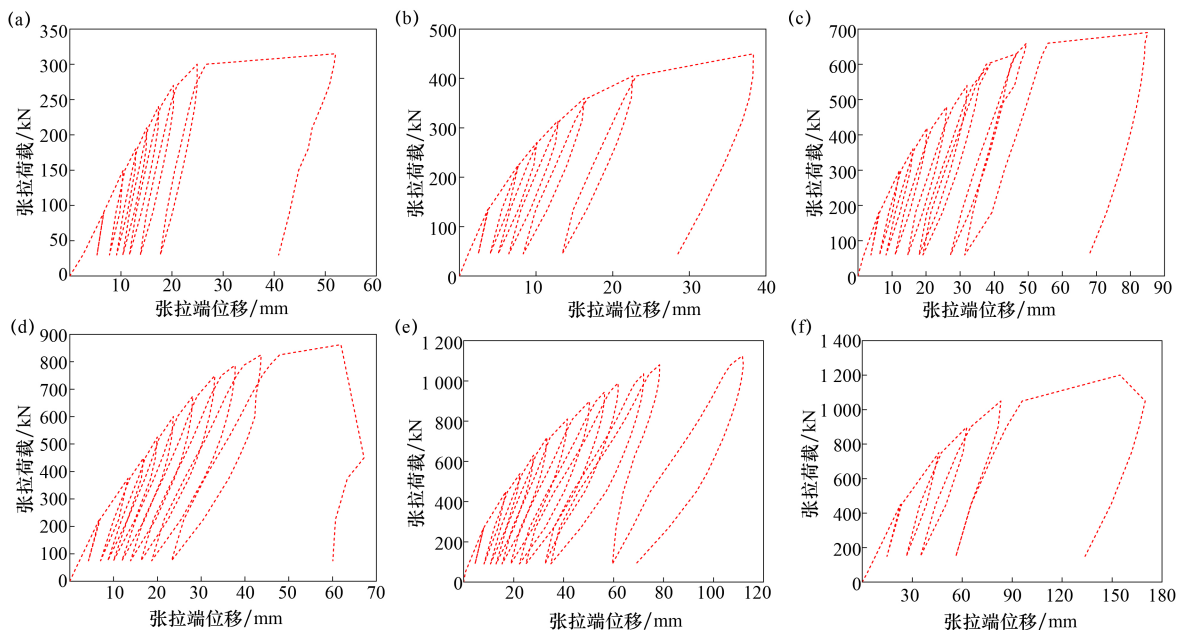


图 5 极限试验加卸载程序

3 试验结果分析

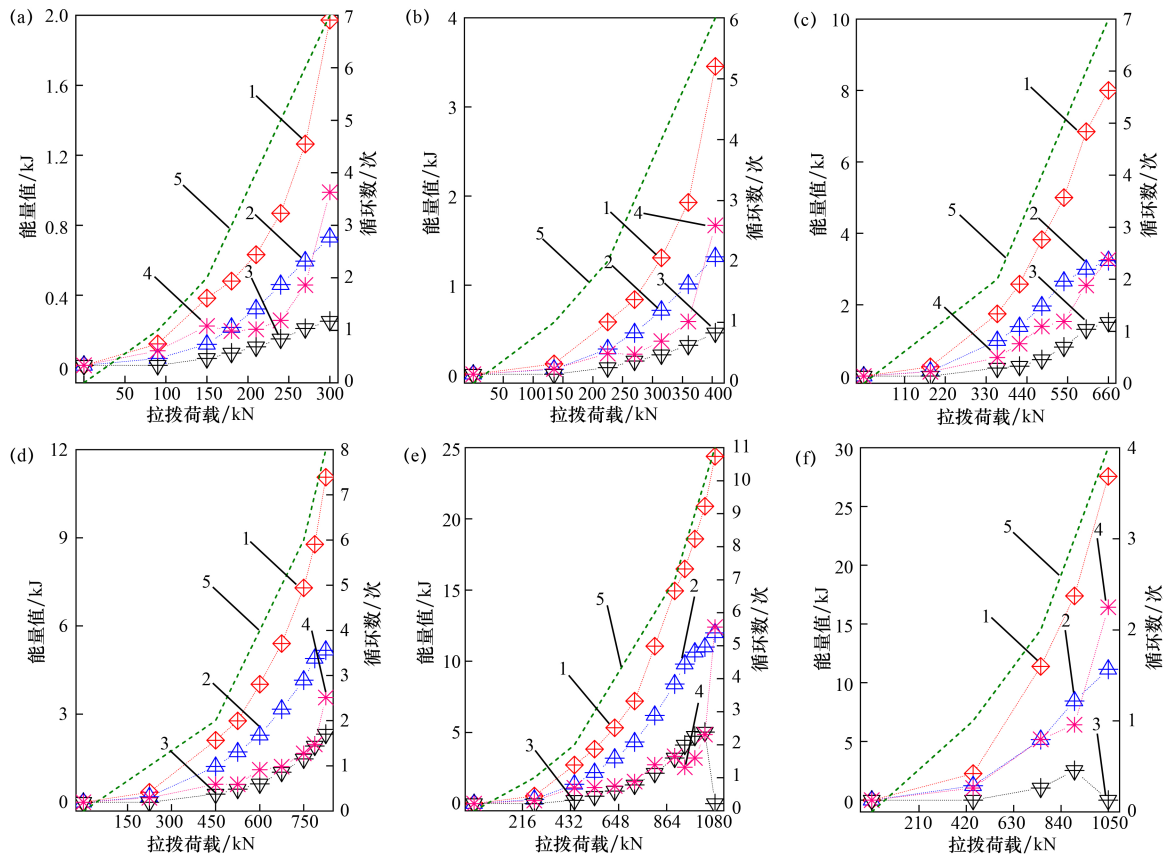
3.1 拉拔过程中的能量演化规律分析

图 6 为 6 条不同锚固长度的全长灌浆试验锚索的极限试验荷载位移 ($P-s$) 曲线。基于图 6，按照式(1)~(5)分别统计出该 6 条试验锚索在极限试验过程中的输入能、弹性能、阻尼能以及损伤能等能量演化曲线，如图 7 所示。



编号：(a) A6-d；(b) A9-d；(c) A12-d；(d) A15-d；(e) A18-d；(f) A24-c

图 6 试验锚索极限试验过程中的 $P-s$ 曲线



编号: (a) A6 - d; (b) A9 - d; (c) A12 - d; (d) A15 - d; (e) A18 - d; (f) A24 - c

1—输入能; 2—弹性能; 3—阻尼能; 4—损伤能; 5—循环数。

图 7 极限试验过程中能量演化规律

由图 7 可知: 不同锚固长度的 6 条试验锚索的能量演化曲线大体上较为相似。随着循环次数和拉拔荷载的增加, 输入能、弹性能、阻尼能以及损伤能均在逐渐增加; 损伤能的演化规律与其他几种能量略有差异, 当拉拔荷载接近于极限抗拔力时, 损伤能会呈现出急速增加的现象; A18 - d[#] 和 A24 - c[#] 试验锚索在破坏后产生了较大的塑性位移, 使得滞回环面积为 0, 因此当拉拔荷载达到极限抗拔力时阻尼能也降低至 0, 进而使得损伤能产生跳跃式增长。

3.2 能量占比随荷载比的变化规律分析

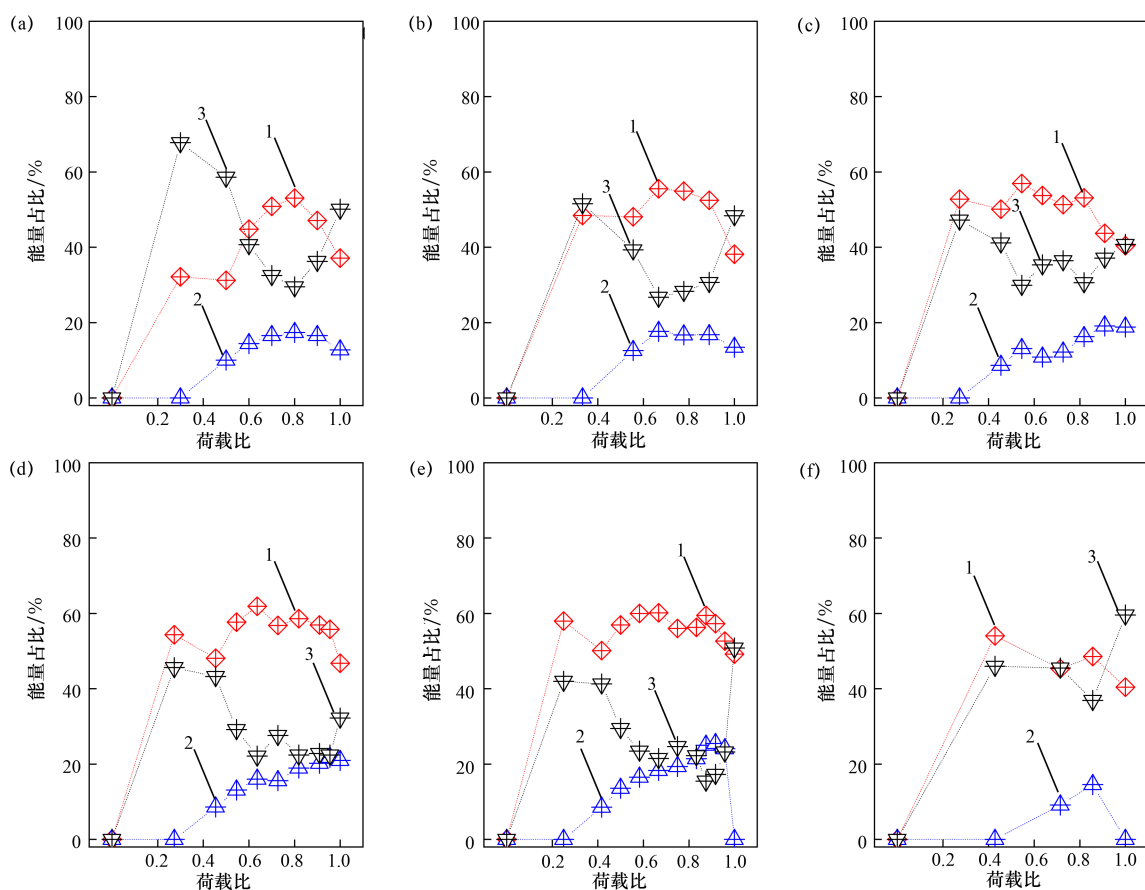
图 8 为 6 条试验锚索在极限试验过程中能量占比随着荷载比(分级荷载/极限抗拔力)的变化曲线。

由图 8 可知: 6 条试验锚索的能量占比随着荷载比的变化规律也存在一些共性特征。弹性能相较阻尼能和损伤能而言, 其变化幅度相对较小, 弹性能占比始终维持在 50% 左右; 阻尼能的占比曲线呈倒“U”型, 其占比总体来说维持在 20%

以下, 且平均值明显小于弹性能和损伤能的占比; 损伤能的占比曲线大体呈“U”型, 且其随着荷载比的变化幅度也相对较为明显。

产生上述现象的原因: 弹性能的占比较为稳定, 因此阻尼能和损伤能的演化是一个“此消彼长”的过程。当荷载比较低时, 荷载暂未传递至锚固系统远端, 因此其内部的黏滞阻尼无法完全激发, 阻尼能较低, 损伤能占比较高, 但此时的损伤能也仅源自于锚固系统浅部; 随着荷载比的增加, 荷载逐渐向锚固系统远端传递, 其内部的黏滞阻尼也逐渐被激发, 因此阻尼能也逐渐增加, 而损伤能的占比逐渐减小; 随着荷载比的进一步增加, 锚固系统能的黏滞阻尼已被完全激发, 当拉拔荷载接近于极限抗拔力时(荷载比接近于 1), 锚固系统内部产生了较大的塑性变形, 此时阻尼能渐趋平稳甚至减小, 因此其占比会呈逐渐减小趋势, 而损伤能的占比则呈逐渐增加趋势。

综上所述, 全长灌浆锚固系统在拉拔过程中



编号: (a) A6 - d; (b) A9 - d; (c) A12 - d; (d) A15 - d; (e) A18 - d; (f) A24 - c

1—弹性能; 2—阻尼能; 3—损伤能。

图 8 能量占比随荷载比的变化规律

会产生较大的塑性损伤能, 其被拔出的过程实际上就是不断损伤、刚度逐渐劣化的过程。

4 结 论

(1) 随着循环次数和拉拔荷载的增加, 输入能、弹性能、阻尼能以及损伤能均在逐渐增加。损伤能的演化规律与其他几种能量略有差异, 当拉拔荷载接近于极限抗拔力时, 损伤能会呈现出急速增加的现象。

(2) 在拉拔过程中, 弹性能的变化幅度较小, 弹性能占比始终维持在 50% 左右。阻尼能的占比曲线呈倒“U”型, 阻尼能占比总体来说维持在 20% 以下, 且其平均值明显小于弹性能和损伤能的占比。损伤能的占比曲线大体呈“U”型, 且其随着荷载比的变化幅度也相对较为明显。阻尼能和损伤能的演化是一个“此消彼长”的过程。

(3) 全长灌浆锚固系统在拉拔过程中会产生

较大的塑性损伤能, 其被拔出的过程实际上是不不断损伤、刚度逐渐劣化的过程。

参考文献:

- [1] 尤志嘉. 土层锚固体应力分布规律与失效机理的细观力学研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [2] REN F F, YANG Z J, CHEN J F, et al. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(3): 361 - 370.
- [3] 刘秀军. Gibson 地基中竖向灌浆锚杆承载力研究[J]. 土工基础, 2022, 36(5): 752 - 759.
- [4] PHILLIPS S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock [R]. London: Cementation Research Ltd, 1970.
- [5] FARMER I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975,

- 12(11):347–351.
- [6] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 1971, 97(12): 1657–1673.
- [7] WIJK G. A theoretical remark on the stress field around prestressed rock bolts[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1978, 15(6): 289–294.
- [8] MA S Q, NEMCIK J, AZIZ N. An analytical model of fully grouted rock bolts subjected to tensile load [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 519–526.
- [9] EVANGELISTA A, SAPIO G. Behaviour of ground anchors in stiff clays [C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 39–47.
- [10] OSTERMAYER H, SCHEELE F. Research on ground anchors in non-cohesive soils [C]//*Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Tokyo: The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977: 92–97.
- [11] BENMOKRANE B, CHENNOUF A, MITRI H S. Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(7): 633–642.
- [12] ESTERHUIZEN J B, FILZ G M, DUNCAN J M. Constitutive behavior of geosynthetic interfaces [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(10): 834–840.
- [13] CHU L M, YIN J H. Comparison of interface shear strength of soil nails measured by both direct shear box tests and pullout tests [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(9): 1097–1107.
- [14] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- [15] 黄锋, 周洋, 彭焱森, 等. 循环荷载下花岗岩强度及变形特征试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(2): 356–364.
- [16] 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(9): 1791–1797.