

橡胶砂混合物的物理力学特性研究综述

钱啸瑞

同济大学 地下建筑工程系，上海，200092；

摘要：橡胶砂混合物是一种新型土工材料，具有质轻、变形能力强、阻尼大、耐久性强且低成本等优点，已广泛应用于土木工程领域。为进一步推进其在相应工程中的应用以及改善废旧轮胎的回收现状，本文从静、动力特性试验研究角度归纳总结了橡胶砂混合物工程特性的研究成果，重点分析了材料压缩特性、抗剪强度、动剪切模量和阻尼比等力学参数的影响因素，研究成果可为橡胶砂混合物的科学的研究和工程应用提供参考。

关键词：废旧轮胎；橡胶砂；静力特性；动力特性

DOI：10.69979/3041-0673.24.11.033

引言

近年来随着全球机动车保有量和使用量的持续增加，废旧轮胎的产生量也在逐年攀升。大量废旧轮胎难处理的现状成为了社会热点问题，2022年中国废旧轮胎总产生量为1450万吨，回收量仅为550万吨，生产量远大于回收量^[1]。传统的废旧轮胎处理手段包括就地堆积、直接燃烧、填埋以及翻新等，又分别存在着浪费资源、污染环境、回收成本高且产能低等问题^[2]。在土木工程领域，将由废旧轮胎机械破碎并去除钢丝得到的橡胶颗粒与砂土按一定比例混合后形成的新型土工材料橡胶砂，具有轻质、弹性好、阻尼大、耐久性强且成本低廉等特点，已被广泛应用于边坡、挡土墙后填料、软土地基处理以及基础隔震等工程中^[3]。废旧轮胎的工程应用既可加大回收量、降低成本，又不会二次污染环境，实现了资源的再利用。

基于工程应用的需求，目前关于橡胶砂混合物性质的研究已从试验研究、数值模拟等方面展开，探讨了不同橡胶含量、粒度特征的橡胶砂混合物在不同加载条件下的物理力学特性。为进一步探究橡胶砂的工程性质并推进其在相应工程中的应用，本文将从材料的静-动力特性角度对现有研究成果进行归纳总结。

1 橡胶砂混合物静力特性研究现状

橡胶砂混合物的静力特性主要指压缩特性和剪切特性。橡胶砂混合物的静力参数是该材料静力学的重要组成部分，主要包括材料的压缩模量、抗剪强度、破坏模式等。目前，橡胶砂混合物静力特性的研究主要通过一维压缩试验、直剪试验以及三轴试验等实现。

1.1 压缩特性

橡胶砂材料的压缩特性反应了材料在受压条件下的力学行为，包括材料的弹塑性应变、孔隙度以及压缩模量等，主要受橡胶含量、荷载等级、加载模式等因素影响。

1) 橡胶含量

随着橡胶含量的增加，橡胶砂的压缩特性越接近于纯橡胶颗粒，相较于纯砂，橡胶砂的可压缩性更强，在砂土中加入橡胶颗粒会增强材料整体可压缩性。刘路路等[2]根据材料压缩系数将橡胶砂分为了低压缩性材料($a_v < 10\%$)、中压缩性材料($10\% < a_v < 50\%$)、高压缩性材料($a_v > 50\%$)。张永富等[3]研究发现橡胶砂的总应变、孔隙比、压缩系数均随橡胶含量的增大而增大，压缩模量随橡胶含量的增大而减小。

2) 荷载等级

周恩全等^[4]研究表明橡胶砂的累积沉降量、压缩模量均与竖向应力成正比；压缩过程表现为前期迅速增长、后期增速减慢的应变发展模式，并且初始应力的存在可以使橡胶砂材料的压缩性能接近于纯砂，较高的初始应力可以增大材料的压缩模量，限制后续加载所产生的应变，进而在较高初始应力下的压缩中表现出更线性的应力-应变关系。

3) 加载模式

刘方成等^[5]发现在单次加卸载试验中，初始塑性应变较大是因为橡胶砂材料内部颗粒进行了大量的滚动、重排造成颗粒间孔隙减小。随着循环加卸载次数增加，不同颗粒之间的压力和接触面积的增加，颗粒的运动能力降低，表现为塑性应变增量降低；在大应力范围内循

环时，橡胶砂的弹性应变变化较大，塑性应变随循环次数的增加而积累；在小应力范围内循环时，橡胶砂的弹性应变变化较小。

4) 其他

张小燕等^[6]研究表明基质砂类型对橡胶砂的压缩特性有显著影响，颗粒可破碎的砂（石英砂等）在压缩试验中存在竖向应力阈值，当竖向应力超过该值后，橡胶砂的压缩模量增量明显放缓；颗粒不可破碎的砂（风化岩等）则无竖向应力阈值。

1.2 抗剪强度

橡胶砂材料的抗剪强度是用于评估和量化材料在载荷下抵抗剪切破坏能力的指标，包括材料的内摩擦角和假粘聚力，主要受橡胶含量、粒度特征、围压等因素影响。

1) 橡胶含量

对于纯砂而言，掺入少量橡胶颗粒有助于提高砂土的抗剪强度，橡胶掺量存在阈值。邓安等^[7]研究发现随着橡胶含量的增加，橡胶砂材料的抗剪强度呈先增后减的趋势，橡胶含量越高，抗剪强度降低越明显。张涛等^[8]研究发现，在三轴试验中，橡胶砂试样的破坏模式表现出随橡胶掺量增加由脆性破坏向韧性破坏（转变的趋势）。

2) 粒度特征

散体材料的抗剪强度是由颗粒间产生的咬合和嵌锁贡献而成，所以橡胶颗粒和砂的粒度特征对材料的剪切特性有显著影响。张永富等^[9]研究发现与粉末状橡胶相比，颗粒状橡胶组成橡胶砂的峰值强度更高，破坏时轴向应变更低，峰后强度损失更小。刘飞禹等^[10]研究表明连续级配的橡胶砂材料的抗剪强度最高，间断级配次之，升级配材料最低。闫欣宜等^[11]研究发现相较于橡胶颗粒，橡胶纤维弯曲能力强、加筋作用显著，对应的橡胶砂材料的抗剪强度更高。

3) 围压

在三轴试验中随着围压的增加，试样颗粒间孔隙减小彼此接触更加紧密，对应的颗粒间的摩擦力和咬合互锁力也相应增加。刘启菲等^[12]研究发现在三轴试验中，橡胶砂试样在剪切过程中的峰值偏应力、应力-应变曲线的硬化水平随着围压的增加而变大，峰值偏应力所对应的破坏应变随围压的升高而降低。张永富等^[13]研究表明，橡胶砂的剪胀性随围压的增大而减弱，剪缩性随围

压的增大而增强。

4) 其他

刘启菲等^[12]研究表明，与围压增加同理，橡胶砂材料相对密实度的增加以及击实功增加会导致试样内部孔隙减少，颗粒排列更密实且不易发生错动，并且密实程度越高，变形空间越小，越容易发生剪胀。张永富等^[13]研究发现，相较于干燥橡胶砂，湿润橡胶砂的抗剪强度较低，更易于发生剪缩。

2 橡胶砂混合物动力特性研究现状

橡胶砂混合物的动力特性主要指减震耗能特性和抗液化特性。橡胶砂混合物的动力参数是该材料动力学的重要组成部分，是工程应用的前提。橡胶砂混合物的动力学参数包括动剪切模量、阻尼比等。目前，橡胶材料动力特性研究主要通过动三轴试验、循环剪切试验、共振柱试验以及波速试验等实现。

2.1 动剪切模量

橡胶砂材料的动剪切模量是橡胶-砂混合土动力学参数中的重要指标，反映了土体在动态加载条件下的抗剪切变形能力，定义为动荷载作用下材料剪切应力与剪应变的比值，主要受橡胶含量、加载条件、粒度特征等因素影响。

1) 橡胶含量

相较于砂颗粒，橡胶颗粒的剪切刚度更低、变形能力更强，引入橡胶颗粒改变了原本颗粒间接触特征，颗粒间摩擦力被削弱，因此混合物在较小应力水平下即可产生较大剪切变形，即强度下降但是变形能力增强。王壮海等^[14]研究发现随着橡胶含量的增加，橡胶砂的动剪切模量逐渐减小。刘方成等^[15]研究表明，橡胶砂的动剪切模量相对于纯砂发生衰减，衰减系数随着橡胶含量的增大而降低。

3) 加载条件

刘启菲等^[16]研究表明，橡胶砂材料在小应变范围内的动剪切模量大于其在大应变范围内的动剪切模量。刘方成等^[17]研究发现，橡胶砂的动剪切模量衰减大致可分为三个阶段：动弹性变形阶段：动剪切模量基本保持不变；动弹塑性变形阶段：动剪切模量随剪应变幅值的增大出现明显衰减；塑性变形阶段：动剪切模量的衰减逐渐减缓并趋于零，衰减系数随着应变幅值的增大而减小。

4) 粒度特征

橡胶砂材料的胶-砂粒径比与橡胶含量均会改变混合物中颗粒的分布状态和接触状态，同时影响材料整体孔隙比。刘方成等^[18]在研究中表明，橡胶含量和胶-砂粒径比对橡胶砂的动力特性影响存在耦合效应，最佳橡胶含量取决于颗粒大小，较大粒径的最佳橡胶屑含量比较小粒径的要少。李博等^[19]研究发现，当橡胶含量较低时，橡胶砂D_d-γ_d曲线随粒径比增大而单调降低；当橡胶含量较高时，D_d-γ_d曲线随粒径比的增大而先减小后增大。

2.2 阻尼比

橡胶砂材料的阻尼比是用于衡量材料吸收动荷载能量能力的重要尺度，定义为阻尼系数与临界阻尼系数之比，主要受橡胶含量、围压、粒度特征等因素影响。

1) 橡胶含量

相较于纯砂，加入橡胶颗粒增强了混合物的阻尼特性。李晓雪等^[20]研究发现，橡胶含量较低时，橡胶含量变化对阻尼比的影响不明显；橡胶含量超过某一范围时，橡胶含量的增加对阻尼比有较大提升。刘方成等^[21]研究发现当剪应变范围较小时，橡胶含量越高，材料阻尼比越大，当剪应变幅值较大且超过某临界值后，材料阻尼比随橡胶含量增加而减小。

2) 围压

围压对橡胶砂材料阻尼比的影响在一定程度上取决于动力试验的剪应变幅值。刘启菲等^[16]研究表明，在小应变范围内，增大围压会导致材料趋于更密实，变形能力即吸能效果下降，对应材料阻尼比减小；在大应变范围内，材料阻尼比随着围压增大小幅提升，增大围压导致橡胶颗粒压缩程度加剧，循环加载作用下颗粒间的错动位移增加，表现为滞回曲线面积增大即阻尼比增大。

3) 粒度特征

橡胶砂混合物的阻尼是由颗粒接触的滑动摩擦和颗粒的变形所构成的，所以胶-砂粒径比对材料阻尼比的影响与围压和橡胶含量均有关，李博等^[19]研究表明，围压较高时粒径比的影响不大，围压较低时胶-砂粒径比对材料阻尼比的影响逐渐显著。丁瑜等^[22]研究表明，随着橡胶含量增加，不同粒径比的橡胶砂阻尼比差异逐渐显著，试样内部土-橡胶骨架滞回特性更强，对应材料的阻尼比减小。

3 思考与展望

本文从橡胶砂混合物的压缩特性、抗剪强度、动剪切模量以及阻尼比等力学参数介绍了橡胶砂混合物静、动力特性研究现状，主要研究成果如下：

1) 橡胶砂混合物的静力特性参数，包括弹塑性应变、压缩模量、抗剪强度以及破坏模式等，主要受橡胶含量、荷载等级、粒度特征影响。橡胶颗粒的引入改变了砂材料的变形能力，但是过高的橡胶含量可能导致混合物材料承载能力和抗剪能力下降，在实际工程在应用时，需要在变形能力和承载能力之间权衡以得到最优配比。

2) 橡胶砂混合物的动力特性参数，包括动剪切模量、阻尼比等，主要受橡胶含量、加载条件、粒度特征影响。橡胶砂混合物的减震耗能特性和抗液化特性通常是多因素共同作用的结果，因此在基础隔震、软基修复等工程中，需要详细探究不同变量之间的耦合效果。

参考文献

- [1] 中国再生资源回收行业发展报告（2023）[J]. 资源再生, 2023, (05): 16-22.
- [2] 刘路路, 蔡国军, 刘晓燕. 橡胶-砂轻质填料压缩特性及颗粒破碎研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(05): 882-888.
- [3] 张永富, 刘方成, 岳洪涛, 等. 橡胶颗粒-砂混合物侧限压缩试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(3): 1-9.
- [4] 周恩全, 王琼, 陆建飞. 干燥及饱和橡胶砂压缩和剪切特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(06): 104-110.
- [5] 刘方成, 吴孟桃, 王海东. 废轮胎颗粒砂混合物双轴压缩力学特性细观机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(04): 1055-1065.
- [6] 张小燕, 张益, 张晋勋, 等. 含橡胶纤维钙质砂的渗透和固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(08): 2115-2122.
- [7] 邓安, 冯金荣. 掺入轮胎橡胶颗粒对砂土剪切性状的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(05): 483-487.
- [8] 张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 橡胶-砂颗粒混合物强度特性及微观机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(06): 1082-1088.
- [9] 张永富, 刘方成, 任东滨, 等. 橡胶颗粒-砂混合物三

- 轴CD剪切试验研究[J].湖南工业大学学报,2015,29(01):17-23.
- [10]刘飞禹,李昊泽,符军,等.橡胶砂级配对混合土体剪切特性影响研究[J].岩土力学,2023,44(03):663-672.
- [11]闫欣宜,胡新丽,付茹.橡胶纤维-砂混合料力学特性的离散元三轴试验研究[J].地质科技通报,2020,39(2): 168-174.
- [12]刘启菲,庄海洋,陈佳,等.废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合料抗剪强度与破坏模式试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(10):1887-1895.
- [13]张永富,刘方成.不同初始状态橡胶砂直剪试验研究[J].工业建筑,2016,46(07):145-153.
- [14]王壮海,甘晓洁,吴栋桥,等.饱和橡胶砂抗剪强度和动变形特性试验研究[J].工程技术研究,2024,9(08):109-111+127.
- [15]刘方成,杨峻,王海东.大应变下干燥橡胶砂动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016, 35(A02): 4265-4278.
- [16]刘启菲,庄海洋,吴琪,等.不同应变条件下橡胶颗粒-砂混合土动模量和阻尼比的联合试验研究[J].振动工程学报,2021,34(04):712-720.
- [17]刘方成,杨峻,王海东.大应变下干燥橡胶砂动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4265-4278.
- [18]刘方成,姚玉文,补国斌,等.胶-砂粒径比对橡胶砂小应变动力特性的影响[J].岩土工程学报,2020,42(09):1659-1668.
- [19]李博,黄茂松.掺有橡胶粉末砂土液化特性的动三轴试验研究[J].岩土力学,2017,38(05):1343-1349.
- [20]李晓雪,庄海洋,张沁源,等.橡胶颗粒土动剪模量与阻尼比的共振柱试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(02):265-271.
- [21]刘方成,陈璐,王海东.橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究[J].岩土力学,2016,37(07):1903-1913.
- [22]丁瑜,张家生,陈晓斌,等.橡胶颗粒-砂混合物新型路基填料动力参数特性的试验研究[J].工程科学与技术,2020,52(05):170-177.
- 作者简介:钱啸瑞(1998),男,回族,安徽,硕士研究生,岩土工程,同济大学地下建筑工程系,上海。