

剪切增稠液及其吸能减振作用研究进展

孙丽¹,王耕¹,张春巍²,沙鑫³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院,辽宁 沈阳 110870;3. 华能国际电力股份有限公司营口电厂,辽宁 营口 115007)

摘要 目的 研究剪切增稠液(Shear Thickening Fluid, STF)及其吸能减振方面的应用,为实现更好的结构振动控制效果提供参考。**方法** 通过文献调查法和文献研究法,系统综述了剪切增稠液及其在吸能减振方面的应用,并重点介绍了在STF制备开发中实现复合功能所面临的挑战,如STF增稠机理需要完善、STF功能开发范围较为单一、STF振动控制应用有待拓展等。**结果** 剪切增稠液作为一种新兴的高阻尼智能材料,在材料制备、性能调控、成因机理和应用开发等方面取得了丰硕的研究成果;将剪切增稠液替代传统黏滞阻尼器的阻尼介质,可以显著提高黏滞阻尼器的耗能减振能力,也可用于隔震系统中以缓解隔震层的变形,从而有效保障结构抗震的安全性。**结论** 为进一步拓展STF的实用性,建议研究热点应更多关注功能化STF组分的引入以及与其他智能材料的复合应用,开发出具有复合功能的STF,便于更好地应用于实际项目或在结构构件中发挥其作用。

关键词 结构振动控制;黏滞阻尼器;剪切增稠液;流变性能;复合材料

中图分类号 TU591

文献标志码 A

Progress in Shear Thickening Fluid Study and its Application in Energy Absorption and Vibration Reduction Areas

SUN Li¹, WANG Geng¹, ZHANG Chunwei², SHA Xin³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, 110870; 3. Yingkou Power Plant of Huaneng International Power Co. Ltd., Yingkou, China, 115007)

Abstract: In order to provide a reference for better structural vibration control, shear thickening fluid (STF) and its application in energy absorption and vibration reduction were studied. By means of literature investigation and literature research, this paper systematically reviews shear

收稿日期:2023-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52078310)

作者简介:孙丽(1974—),女,教授,博士,长江学者,博士研究生导师,主要从事结构健康监测、智能材料、海砂珊瑚混凝土等方面研究。

thickening fluid and its application in energy absorption and vibration reduction. The challenges of realizing composite function in the preparation and development of STF are introduced, such as the need to improve the thickening mechanism of STF, the relatively simple development scope of STF function, and the application of STF vibration control needs to be expanded. As a new kind of intelligent material with high damping, shear thickening fluid has achieved fruitful research results in material preparation, property control, genetic mechanism and application development. By replacing the damping medium of traditional viscous dampers with shear thickening fluid, the energy dissipation capacity of viscous dampers can be significantly improved. In addition, the shear thickening fluid can also be used in the isolation system to alleviate the deformation of the isolation layer, so as to effectively ensure the seismic safety of the structure. In order to further expand the practicability of STF, it is suggested that more attention should be paid to the introduction of functional STF components and the composite application with other smart materials. In this way, STF with composite functions can be developed, which is easy to be better applied in practical projects or play its role in structural components.

Key words: structural vibration control; viscous damper; shear thickening fluid; rheological properties; composite materials

随着我国城市需求的转变,建筑功能日益趋向综合化,高层、建筑结构、大跨结构形式也愈发复杂。地震等自然灾害一直是限制高层及大跨结构规模的主要因素^[1-3]。因此,结构振动控制被引入现代结构设计工作。其中,黏滞阻尼器作为一种较成熟的被动减振装置,主要由缸筒、活塞、阻尼介质和导杆等组成,靠阻尼介质的黏性提供阻尼并进行吸能减振^[4-6]。目前,黏滞阻尼器中的阻尼介质主要为硅油及其衍生品,属于剪切变稀流体,其只能在低剪切速率保持稳定的黏度。

剪切增稠液(Shear Thickening Fluid, STF)是一种能够对力信号作出响应的非牛顿流体,也是一种阻尼介质^[7-9]。该阻尼介质由固体纳米颗粒及分散介质组成,其自身表观黏度可以在外力作用下瞬间突破至数十或数百倍,且当外力信号消失后恢复至初始状态^[10-11]。STF所表现出的“流-固转化”及功能复合特性使其在吸能、减振、多功能复合材料等相关领域具有巨大的发展潜力。但国内外学者对于STF增稠理论的研究并不统一,相关理论存在一些亟待解决的问题。此外,STF的制备开发大多停留在调控其流变性能上,而对STF二次开发和减振应用关注

较少。鉴于此,为使STF在吸能减振方面得到更广泛的关注和实际工程应用,笔者系统综述了剪切增稠流体及其在吸能减振方面的应用,并重点介绍了在STF制备开发中实现复合功能所面临的挑战,期望对后续STF开发及减振应用研究提供参考。

1 黏滞阻尼器概况

黏滞阻尼器是一种依靠内部阻尼介质在活塞两侧产生压力差进而形成阻尼力的减振装置^[12-13]。相对于传统的抗震方式,黏滞阻尼器成本低、易更换,具备一定的自我调节能力,能够在结构受到振动危害时充当“安全气囊”,减少灾害对结构的损伤^[14]。例如,陈才华等^[15]根据设有黏滞阻尼伸臂桁架的超高层建筑,设计建造了该建筑的结构缩尺模型并进行振动台试验(见图1)。在振动台试验过程中,该缩尺模型在小震作用下反应不明显,而在中、大震作用下反应较大,特别是在大震作用下,缩尺模型结构振幅剧烈,结构中黏滞阻尼器的滞回曲线出现捏缩现象,但能保持一定的耗能能力;试验结果表明:该超高层结构采取的减震措施有效,能够达到其预设的减震要求。许伟志等^[16]提出了一种

优化阻尼器设置的新方法,并将其运用于日本某钢结构的减震加固项目;通过分析采用该方法在实际地震中所采集的部分楼层加速度时程数据,评估了结构的损伤程度;结果表明:阻尼器的减震优化方案能够改善钢结构楼层变形不均的问题。黄镇等^[17]设计了一种带有压差调节阀的黏滞阻尼器,并进行动态性能测试,得到了该阻尼器的滞回曲线;其滞回曲线形状饱满反映出该型黏滞阻尼器耗能良好,表明了调节阀具有较为稳定的控制黏滞阻尼器最大输出阻尼力的能力。



图1 超高层结构振动台试验

Fig.1 The shaking table test of super high-rise structure

传统的黏滞阻尼器常用硅油作为阻尼介质,特别是甲基硅油阻尼液^[18]。闵为等^[19]针对黏滞阻尼器滞回曲线偏转问题,建立其速度与负载特性的力学模型;通过有限元仿真分析证明,二甲基硅油的稀化特性限制了阻尼器的最大输出力,导致其耗能性能受到限制。王赣城等^[20]认为,单一材料对阻尼器的耗能机制存在一定限制,并在硅油中复合硅胶颗粒,以此作为阻尼器的阻尼介质,利用硅胶颗粒和硅油的耦合作用,来提升阻尼器的抗冲击能力;但硅油作为一种剪切变稀流体,其黏性在较高剪切速率下难以保持稳定,在作为阻尼介质时会限制黏滞阻尼器的吸能减振能力。

2 剪切增稠液概述

剪切增稠(Shear Thickening,ST)现象最初发现于粒子悬浮体系中,如泥浆、玉米淀粉液等。该现象会导致涂料不均、管道堵塞等情况,严重影响工业生产。随着对 STF 的研究不断深入,人们意识到 STF 的高阻尼性能使其在吸能减振、人体防护等领域具有巨大应用潜力^[21-23]。学者们先后开发制备出流变性能较好的 STF,并将其应用于防护减振领域的实际项目中,生产出一系列的相关产品,例如:防弹衣、阻尼器等。此外,还有一些学者通过 STF 组分间相互作用方式,通过大量试验总结相关规律,提出了多个理论模型来解释 STF 增稠现象。

2.1 剪切增稠机理

2.1.1 有序-无序转变理论

R. L. Hoffman^[24]所提出的有序-无序转变(Order-Disorder Transition, ODT)理论认为,剪切增稠液中纳米颗粒受剪切速率影响,在低剪切速率下颗粒运动呈现层状形态,当剪切速率上升至某一阈值后,该状态将被破坏,颗粒运动状态由有序转变为无序,悬浮液出现增稠现象。A. Kabiraj 等^[25]通过油酸包覆的 Fe_3O_4 纳米颗粒流体来探究温度对其流变行为影响,发现温度是导致纳米流体协同运动从有序到无序的主要原因。

2.1.2 水合粒子簇理论

一些剪切增稠现象出现时,其悬浮液中的颗粒运动状态并不符合 ODT 理论,即 ODT 理论对 STF 的增稠阐释存在一定缺陷。因此,学者们逐渐从颗粒受力角度来探究 STF 的增稠机理。G. Bossis 等^[26]提出了“水合粒子簇理论”,认为剪切增稠现象是 STF 内部颗粒间流动作用力所导致的结果。近年来,随着高分辨率光学设备的出现,人们可以通过实验仪器来观察微观颗粒运动的过程。X. Cheng 等^[27]利用共聚焦电子镜观察球形二氧化硅悬浮液在剪切作用的颗粒运动状

态,直观反映了剪切增稠流体的“液-固转化”过程(见图 2)。其他学者通过光学原理也验证了水合粒子簇理论的正确性。尽管“水合粒子簇理论”能够较好解释一些非牛顿流体的剪切增稠现象,但也仅仅针对黏度上升在几倍范围内的流体,对于某些自身黏度可以瞬间提升几十或几百倍的 STF 的非连续性增稠行为,则不能给出合理的解释。

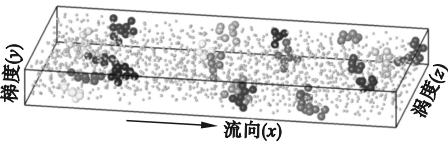


图 2 粒子簇示意图

Fig. 2 The particle cluster diagram

2.1.3 流体润滑-摩擦接触理论

水合粒子簇理论主要针对具有布朗运动的剪切增稠流体,而对非布朗颗粒所产生的增稠现象描述则具有一定局限性。因此,有研究者提出了流体润滑-摩擦接触理论^[28-29]。该理论具体阐释了颗粒间的相互作用,以及颗

粒浓度、界面性质对于非连续增稠的影响。M. Trulsson 等^[30]采用数值模拟方法系统性改变颗粒微观摩擦系数和黏度系数,通过建立 STF 的相图来确定 STF 内部颗粒的三种作用机制:无摩擦、摩擦滑动和滚动。N. Y. C. Lin 等^[31]针对胶体悬浮液关于连续剪切增稠行为的作用机制,建立了颗粒相互作用的仿真模型并进行反转剪切试验;结果表明:在水动力相互作用下,反转剪切前后悬浮液的黏度相似,而在颗粒接触力作用下,反转剪切前后悬浮液的黏度相差巨大。L. E. Edens 等^[32]在二维空间下模拟 STF 摩擦接触过程,并从拓扑度量角度对划分网络内的颗粒进行空间分析(见图 3)。该研究通过非滑动摩擦接触网中空隙面积来阐明网络的相对均匀性,并将其作为体积分数和施加剪切应力的参照,进而映射出粒子间接触反应网络(Contact Response Network, CRN)的特点:一个是接触网络的连通性;第二个是空间的分布地区缺乏粒子区与粒子区之间的联系。

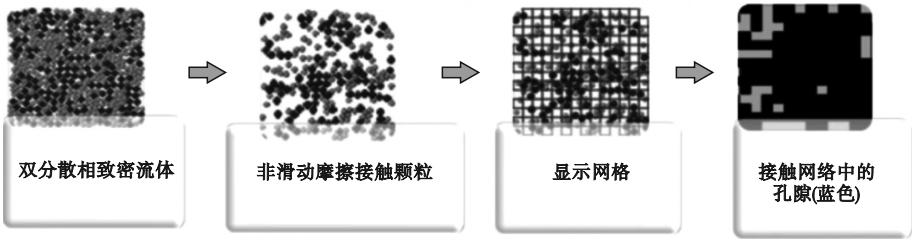


图 3 确定非滑动摩擦接触网中空隙面积的网格分析

Fig. 3 The grid analysis to determine void area in non-sliding frictional contact network

2.2 剪切增稠效应的影响因素

随着研究人员对剪切增稠现象的深入了解,STF 增稠理论不断完善。学者们通过对大量不同剪切增稠液体系进行不断尝试,逐渐总结出影响剪切增稠效应的因素(如 STF 组分、外加剂、外界环境等),以便精准把控 STF 的流变行为、积极拓展 STF 应用领域。

2.2.1 分散相颗粒

分散相颗粒作为 STF 组成部分之一,其粒径范围一般为纳米或微米级。另外,研究人员在制备 STF 过程中发现,分散相的种

类、界面性质、粒径等都会影响 STF 的增稠效果^[33]。目前,实验室中常用纳米级二氧化硅作为分散相制备剪切增稠液,科研人员一般采用改变分散相颗粒种类的方式来改性 STF。S. Gürgen 等^[34]提出多相 STF 的概念后,组成 STF 的分散相更加复杂,这使得相关领域学者能够根据实际需求来调控 STF 的性能,定向制备剪切增稠液,拓宽了 STF 的应用范围。魏明海等^[35]利用纳米金属粒子(ZrO_2)改性硅基剪切增稠液,并通过微观表征、流变测试等方法分析了其材料特性

(见图4),其中 ZrO_2 与 SiO_2 质量比为1:1;结果表明:纳米 ZrO_2 能够有效增强ST效应,并在高应力区间ST表现出显著的耗能性能。另外,分散相颗粒的粒径及分散相颗粒界面性质能够改变粒子间的相互作用方式

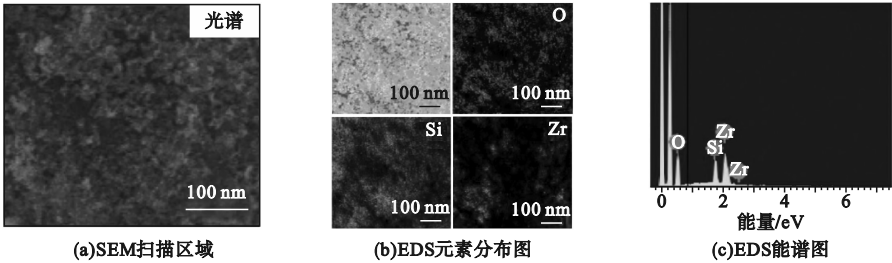


图4 纳米 ZrO_2 与 SiO_2 混合样品的EDS扫描特征图

Fig. 4 The EDS mapping results of nano- $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ mixed sample

2.2.2 分散介质

分散介质是固体颗粒分散的溶剂,也是制备剪切增稠液不可或缺的材料。在制备STF的过程中,只有充分考虑分散相和分散介质两者的适配性,才能精确调控STF的流变行为。陈红霞等^[38]将分子量分别为200、400、600的聚乙二醇(PEG)作为分散介质制备不同类型的硅基STF,利用旋转流变仪测得PEG分子量越大,所对应的STF增稠效果越好。其原因在于分子链较长的PEG在单位体积内不易与纳米二氧化硅颗粒形成的氢键,大量纳米颗粒不被氢键所约束,颗粒间相互碰撞几率增加,STF增稠效果得到增强。W. Q. Jiang等^[39]利用丙三醇和水作为分散介质,并通过控制两者比例,研究了分散介质与PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)颗粒之间作用关系对该STF增稠效果的影响;结果表明:甘油能够有效分散PMMA颗粒并破坏其与丙三醇所形成的氢键,使得STF增稠效果得到明显提升。

2.2.3 外加剂

基于分散相或分散介质的特性,添加相适应的外加剂能够有效改善剪切增稠液的流变性能。L. Sun等^[40]将聚乙烯吡咯烷酮(PVP)与多壁碳纳米管(MWCNTs)作为外加剂添加到硅基STF中,制备出MWCNTs-

进而影响STF流变性能。王论等^[36]、R. G. Egres等^[37]均利用不同长径比的分散相纳米颗粒制备剪切增稠流体(STF),并从非连续性增稠角度分析其剪切增稠效应与粒径的关系。

PVP/ SiO_2 -STF。由于PVP可以与MWCNTs发生接枝反应,使得MWCNTs的表面积增大而团聚性减弱,形成数量更多、吸附能力更强的粒子团(见图5)。这种粒子团能更容易吸附纳米二氧化硅颗粒,从而使得该新型剪切增稠液具有良好的剪切增稠性能。Z. H. Tan等^[41]将石墨烯作为外加剂,以改善分散相颗粒间的流体动力润滑力,来提高硅基剪切增稠液的黏度和剪切增稠效率;研究表明,石墨烯可以看作是一个板,均匀分布在纳米二氧化硅颗粒之间;在剪切作用下,石墨烯会产生两种额外的流体动力润滑力:纳米二氧化硅颗粒和石墨烯之间的力,以及石墨烯与石墨烯之间的力。这些额外的润滑力会明显提高STF的黏度。X. Z. Zhang等^[42]将在硅基STF中掺入碳基铁粉,制备出具有磁感应功能的剪切增稠液(MRSTF)。相较

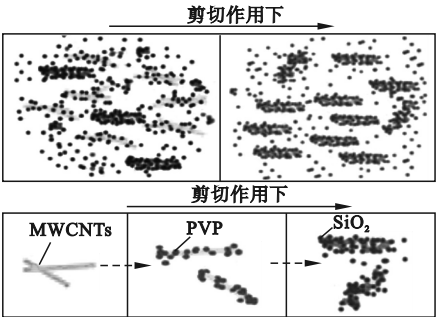


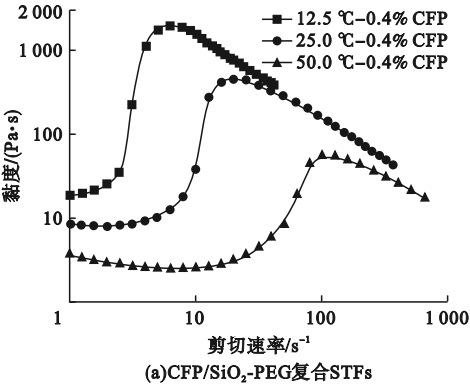
图5 MWCNTs-PVP/ SiO_2 增稠过程

Fig. 5 The MWCNTs-PVP/ SiO_2 formation process

于常规磁流变液,MRSTF 在长期储存过程中没有沉淀,并始终处于高黏度状态,能够在外部磁场的干预下表现出优异的耗能能力。即使在没有电流输入的情况下,由于其在零磁场中的剪切增稠行为,它也可以在高剪切速率下提供高黏度。

2.2.4 外界环境

剪切增稠液对外界环境的敏感性同样会



影响其流变性质^[43-44]。例如过高的温度会导致纳米颗粒与分散介质分子两者的布朗运动更加剧烈,进而促使其悬浮液黏度降低,直接影响到 STF 的流变性能。L. Sun 等^[45]探究了不同试验温度下 compounded STF 的剪切变稀及剪切增稠行为。STFs 在不同温度下的流变性能如图 6 所示。

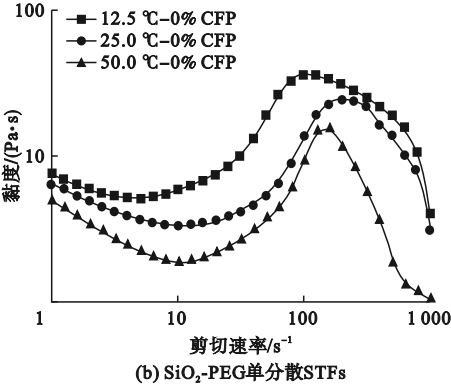


图 6 STF 在不同温度下的流变性能

Fig. 6 The rheological properties of STF at different temperatures

由图 6 可知,随着温度降低,体系的黏度显著增加,但温度对于剪切增稠行为的影响大于剪切变稀行为。其原因是温度越高,氢键越弱,不利于 SiO₂ 颗粒在 PEG200 中的分散,故体系流变性能随着温度降低而升高。另外,一些剪切增稠液的流变性能因分散相颗粒本身特殊的材料属性,会受到外加电场或磁场影响。G. Bossis 等^[46]将磁性羟基铁与非磁性的碳酸钙制备成双分散相的剪切增稠液,探究颗粒协同效应以及磁场对 STF 的黏度影响。S. Navidbakhsh 等^[47]将 γ -Fe₂O₃ 纳米颗粒分散在不同分子量的 PEG 溶液中制备剪切增稠液测量其流变性能,并利用动态光散射、zeta 电位等方式探究流体稳定性。

2.3 剪切增稠液性能表征及吸能防护应用

2.3.1 流变性能

剪切增稠液作为一种可以实现“液-固转换”的软物质,其流变性能主要分为稳态流变和动态流变^[48]。稳态流变中所表示的流体黏度随剪切速率变化,主要体现流体的增

稠、稀化特性。M. H. Wei 等^[49]利用碳纳米管(MWNT)制备不同 MWNT 质量分数的 STF,该 MWNT/SiO₂-STF 通过稳态流变测试确定了剪切增稠效应较优的材料配合比,其峰值黏度相较于硅基 STF 提升了 360.88%,从微观角度解释了 MWNT/SiO₂-STF 黏度提升的原因,主要是纳米 SiO₂ 颗粒能够吸附在 MWNT 上形成饱满且紧密的“粒子簇”,进而提升剪切增稠液的剪切增稠效应。

动态流变是指材料模量与扫描频率之间的关系。俞科静等^[50]通过动态流变测试发现,STF 在较小剪切应力区间内,其整体处于线性黏弹状态。而当 STF 在较高剪切应力区间时,自身储能模量得到提升,并与耗能模量接近(见图 7)。这是因为硅微粉与二氧化硅所形成粒子簇界面粗糙,粒子间摩擦力增大,这种结构的粒子簇能够有效提升流体的储能能力。Y. S. Lee 等^[51]通过对硅基 STF 进行动态测试发现,动态剪切增稠所需临界应变在低频范围内与频率成反比,STF 的剪

切增稠频率大约是 30 rad/s、最小临界应变为 2。

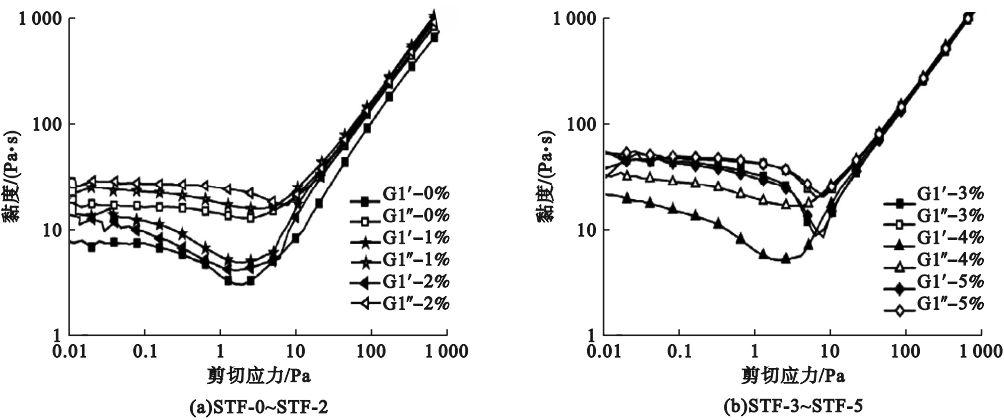


图 7 不同硅微粉含量的试样的动态剪切流变性能曲线图

Fig. 7 The dynamic shear rheological properties of samples with different mass fraction of silicon powder

2. 3. 2 抗冲击性能

传统的流变性能测试是通过剪切对 STF 进行流变性能表征,不能直观反映其他条件下的力学性能。因此,一些学者对剪切增稠液进行了抗冲击测试^[52-53]。K. W. Liu 等^[54]利用不锈钢球对剪切增稠电解液进行冲击测试时发现,钢球在剪切增稠电解液的顶部表面停留几秒钟,然后钢球慢慢浸入电解液中(见图 8)。这可归因于冲击引起的电解液黏度的增加。当钢球的动量逐渐消散后时,电解质溶液将在短时间内恢复到低黏度状态,与此同时钢球慢慢沉入电解液中。另外,O. E. Petel 等^[55]将三种不同硬度的分散相(玉米淀粉、二氧化硅和碳化硅)制备为相同体积分数的 STF 并进行抗子弹冲击测试,其测试结果表明,玉米淀粉硬度最小,抗冲击性能最差。S. R. Waitukaitis 等^[56]利用高速摄像机以及力学传感元件,通过图像和力信号采集方式分析落杆冲击下的非布朗颗粒 STF(玉米面粉/水)的增稠过程。当液面受到杆的接触冲击时,局部流体因冲击作用会受到挤压,导致流体内部固体颗粒相互碰撞接触,在该处形成一条长长的阻塞体。该堵塞体随着流体局部冲击力的增大而不断生长。

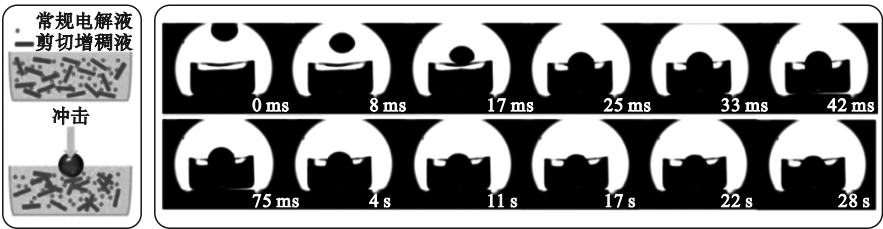


图 8 低速冲击试验的帧序列

Fig. 8 Frame sequence of the impact test at low speed

2. 3. 3 剪切增稠液吸能防护应用

剪切增稠液所表现出的高阻尼、高耗能特性,使其在吸能防护、复合材料等领域具有较高的研究价值和广阔的应用前景。L. Sun 等^[57]将三种不同的纤维材料(玄武岩纤维材料(BFRP)、碳纤维(CFRP)、玻璃纤维增强

塑料(GFRP))浸润在 STF 中,并对 STF 处理过的三种复合材料进行 SEM 电镜扫描,观察到 STF 浸渍后的 GFRP 纤维变粗,且表面出现大量凸起,表明了该复合材料韧性得到提升,并且细丝间摩擦力提高,连接更加牢固。当 STF-GFRP 纤维受到冲击时,该纤维

能够有效抵抗的细丝增多、细丝间相互作用,韧性提高,使其具有更好的抗冲击性能。A. F. Ávila 等^[58]将纳米二氧化硅和碳酸钡按不同配合比制备成双相 STF3、STF4(其中 STF3 所用碳酸钡比例高于 STF4),并通过超声分散和喷枪两种方式使其充分在芳纶纤维上浸润。该 STF 复合纤维防护下的仿真人体,通过子弹冲击测试后所留创伤腔的损伤情况如图 9 所示。

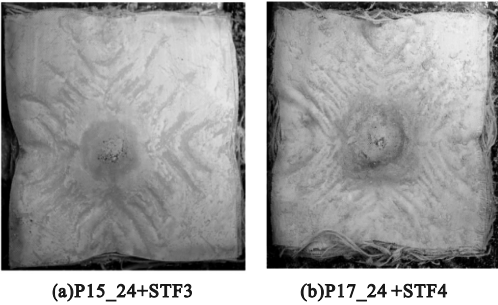


图 9 STF 复合纤维受冲击损伤情况

Fig. 9 The impact damage of STF composite fiber

图 9(a)所示样品在相同冲击下,创伤腔体积较小,STF 复合纤维褶皱数量较少,其损伤情况优于图 9(b)所示样品。从 STF 复合纤维角度来看,由于 STF3 相较于 STF4 中碳酸钡比例较高,使得纤维间摩擦力增大,纤维整体强度增加,其防护能力大大提升。因此,子弹对仿真人体所做的功减小,STF3 复合纤维可以有效减少仿真人体所受到的伤害。

有一些科研工作者则把目光投向了新能源领域,他们将 STF 抗冲击性能与锂电池结合,开发出安全性更高的锂电池。B. H. Shen 等^[59]通过 PMMA(甲基丙烯酸甲酯)对二氧化硅表面进行修饰(见图 10),并掺入锂电池的电解质中,在保证锂电池基本功能的前提下增加其抗冲击性能以增强新能源电池的安全性。G. M. Veith 等^[60]研究了一种新型剪切增稠电解质,该新型电解质能够在受到落球冲击时避免电极短路,并保持工作状态,从而降低车祸造成电池失火的风险。

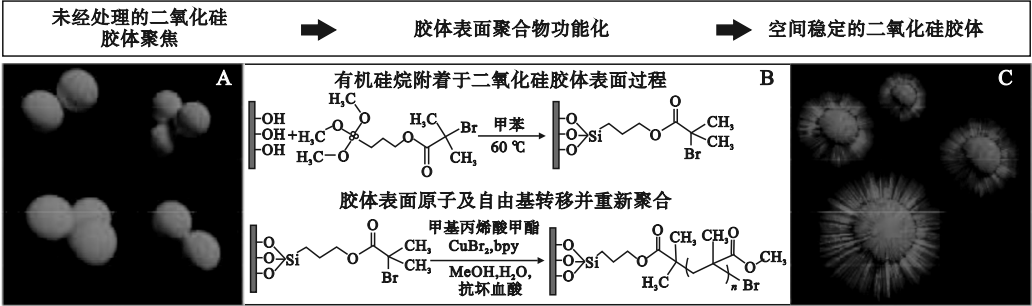


图 10 卡通描绘聚(甲基丙烯酸甲酯)(PMMA)对二氧化硅纳米颗粒的界面修饰过程

Fig. 10 Cartoon depicting the interfacial modification of silica nanoparticles by poly (methyl methacrylate) (PMMA)

3 STF 减振控制发展现状

近年来,STF 因独特的材料特性使其在隔震、吸能减振等领域引起了相关学者的关注。科研人员基于 STF 材料特性,开发出 STF 减振装置,并深入讨论了不同装置的吸能减振机制以及存在的技术难题。余慕春等^[61]将硅基剪切增稠液作为阻尼介质应用于隔振器中(见图 11),并建立了该隔振器的

动力学模型;通过对 STF 隔振器及传统隔振器进行仿真,对比两模型在相同共振频率下所产生的阻力;结果表明:在共振区附近,STF 隔振器所产生共振峰远低于传统隔振器所产生的共振峰,解决了传统隔振器线性阻尼的缺陷。周鸿等^[62]运用乳液聚合法制备出聚苯乙烯-丙烯酸乙酯纳米颗粒,并将其作为分散相制备出剪切增稠液,以替换双出杆间隙式阻尼器传统的阻尼介质;在确定 STF

增稠区间后,通过不同频率下的正弦位移加载机制进行 STF 阻尼器的动态测试,得到了不同工况下阻尼器的滞回曲线;结果表明:当活塞速度小于 STF 增稠区间时,STF 阻尼器的输出力较小;而当活塞速度大于等于 STF 增稠区间时,STF 阻尼器的输出力、有效刚度、有效黏滞阻尼均有较大提升。

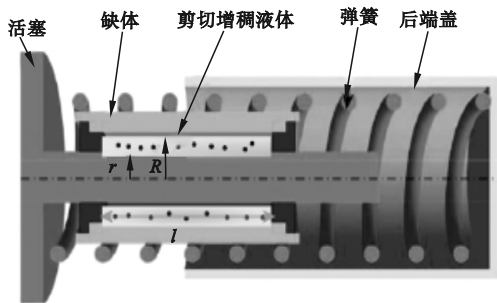


图 11 STF 隔振器

Fig. 11 The STF vibration isolator

4 结 语

(1)剪切增稠液作为一种新兴的高阻尼智能材料,在材料制备、性能调控、成因机理和应用开发等方面取得了丰硕的研究成果。笔者依托结构振动控制背景对黏滞阻尼器、剪切增稠液以及 STF 减振控制的发展过程和前沿成果进行了概述。不难发现,剪切增稠液在相关领域的开发应用中虽已得到较大的发展,但在仍存在一些问题,需要进行深入研究。

(2)STF 增稠机理需要完善。虽然从微观角度研究人员通过大量试验及模拟仿真等方式,已经总结出一些 STF 增稠规律并提出了相关增稠理论,但现有的理论不能很好地解释所有增稠现象。另外,STF 所使用的分散相形态多样,而目前因技术限制所通用的模型无法对特殊形态分散相进行详细建模,影响了 STF 增稠理论的发展。

(3)STF 功能开发范围较为单一。目前,剪切增稠液的制备开发范围受到很多因素限制,大部分的 STF 只具有增稠效果,并

不能很好地适应外部环境或实际结构的需要。为了进一步拓展 STF 的实用性,研究应更多关注功能化 STF 组分的引入,开发具有复合功能的 STF,以便更好地应用于实际项目或结构构件中。

(4)STF 振动控制应用有待拓展。随着人工智能时代的来临,基于剪切增稠液的结构减振方式将不局限于被动控制。STF 与其他智能材料的复合应用,使其在满足被动振动控制的基础上能够实现半主动控制或主动控制。另外,人们还可以在减振控制功能基础上,进一步开发 STF 的其他功能,如实时监控材料受力位置、智能减振及自供能等,这也将是未来 STF 开发应用的热点之一。

参考文献

- [1] 仇建磊,李庆祥,许伟,等. 不同阻尼器布置机构下超高层建筑风振舒适度控制效果对比分析[J]. 建筑结构,2021,51(增刊2):746-752.
(QIU Jianlei, LI Qingxiang, XU Wei, et al. Comparative analysis of wind vibration comfort control effect of super tall buildings with different damper arrangement mechanism [J]. Architectural structures, 2021, 51 (S2): 746-752.)
- [2] 孙利民,狄方殿,陈林,等. 斜拉索-双阻尼器系统多模态减振理论与试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(7):975-985.
(SUN Limin, DI Fangdian, CHEN Lin, et al. Theoretical and experimental research on multi-mode vibration reduction of cable-double damper system [J]. Journal of tongji university (natural science), 2021, 49(7):975-985.)
- [3] 薛松涛,谢丽宇,唐和生. 强震下减振高层建筑破坏机理的研究现状及思路[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(增刊1):810-814.
(XUE Songtao, XIE Liyu, TANG Hesheng. Review and future trend in limit state of vibration-controlled high-rise buildings under extreme earthquakes [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014, 34(S1):810-814.)
- [4] 信任,张强,黄炜,等. 黏滞阻尼器加固大空间混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(3):20-29.
(XIN Ren, ZHANG Qiang, HUANG Wei, et al. Shaking table test of large-space RC frame reinforced by viscous dampers [J]. Journal of building structures, 2023, 44(3):20-29.)
- [5] 周宇,甘露一,赵青,等. 基于模型确认的附着

- 黏滞阻尼器门式刚架地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(4): 794 – 802.
(ZHOU Yu, GAN Luyi, ZHAO Qing, et al. Seismic vulnerability analysis of steel portal frames with viscous dampers based on model validation [J]. China earthquake engineering journal, 2022, 44(4): 794 – 802.)
- [6] 李祖玮, 潘文, 兰香, 等. 中间柱型黏滞阻尼器装配式钢框架减振性能研究[J]. 世界地震工程, 2022, 38(3): 78 – 89.
(LI Zuwei, PAN Wen, LAN Xiang, et al. Analysis of aseismic properties of assembled steel frame with intermediate column containing viscous damper [J]. World earthquake engineering, 2022, 38(3): 78 – 89.)
- [7] 尹根, 姚松, 刘凯, 等. 低速冲击条件下剪切增稠液力学特性的试验和数值仿真研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1327 – 1336.
(YIN Gen, YAO Song, LIU Kai, et al. Experimental and numerical simulation of mechanical properties of shear thickening fluid during low velocity impact [J]. Journal of central south university (science and technology), 2021, 52(4): 1327 – 1336.)
- [8] WU Y X, CAO S S, XUAN S H, et al. High performance zeolitic imidazolate framework-8(zif-8)based suspension;improving the shear thickening effect by controlling the morphological particle-particle interaction [J]. Advanced powder technology, 2020, 31(1): 70 – 77.
- [9] LIU M, JIANG W, CHEN Q, et al. A facile one-step method to synthesize SiO₂ @ polydopamine core-shell nanospheres for shear thickening fluid [J]. RSC advances, 2016, 6(35): 9279 – 29287.
- [10] MAHESH V, HARURSAMPATH D, MAHESH V. An experimental study on ballistic impact response of jute reinforced polyethylene glycol and nano silica based shear thickening fluid composite [J]. Defence technology, 2022, 18(3): 401 – 409.
- [11] 秦建彬, 张广成, 史学涛. 剪切增稠液及其复合材料[J]. 材料导报, 2017, 31(7): 59 – 64.
(QIN Jianbin, ZHANG Guangcheng, SHI Xuetao. Shear thickening fluid and their composites [J]. Materials reports, 2017, 31(7): 59 – 64.)
- [12] 王伟, 李俊霖, 曹纵. 自复位黏滞阻尼器的构造设计与抗震韧性提升[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 59 – 69.
(WANG Wei, LI Junlin, CAO Zong. Development of self-centering viscous damper and seismic resilience enhancement [J]. Journal of building structures, 2023, 44(3): 59 – 69.)
- [13] 汪梦甫, 梁晓婷. 带伸臂桁架减振层高层结构抗风效果分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 1 – 7.
(WANG Mengfu, LIANG Xiaoting. Analysis on wind resistance effect of high-rise building with damped outrigger storeys [J]. Journal of Hu'n'an university (natural sciences), 2018, 45(3): 1 – 7.)
- [14] 李波, 张云浩, 严国虔, 等. 基础隔震层附加黏滞阻尼器结构优化设计方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 101 – 110.
(LI Bo, ZHANG Yunhao, YAN Guoqian, et al. Optimal design method for structures with viscous dampers in base isolation layer [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2022, 54(4): 101 – 110.)
- [15] 陈才华, 张宏, 董皓, 等. 采用黏滞阻尼伸臂桁架的超高层结构模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(3): 9 – 21.
(CHEN Caihua, ZHANG Hong, DONG Hao, et al. Shaking table test of super high-rise structure with viscous damping outrigger truss [J]. China civil engineering journal, 2023, 56(3): 9 – 21.)
- [16] 许伟志, 杜东升, 笠井和彦, 等. 黏滞阻尼器的优化布置及其在高层钢结构加固中的应用[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 32 – 44.
(XU Weizhi, DU Dongsheng, KASAI Kazuhiko, et al. Optimization layout of viscous dampers and its application in retrofitting of a high-rise steel structure [J]. Journal of building structures, 2022, 43(8): 32 – 44.)
- [17] 黄镇, 李爱群. 新型黏滞阻尼器原理与试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6): 61 – 65.
(HUANG Zhen, LI Aiqun. Experimental study on a new type of viscous damper [J]. China civil engineering journal, 2009, 42(6): 61 – 65.)
- [18] 文登, 唐璐, 韩鹏飞, 等. 基于代理模型的黏滞阻尼器介质幂律参数反演[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 225 – 230.
(WEN Deng, TANG Lu, HAN Pengfei, et al. Material power-law parameters inversion technique of viscous damper based on surrogate model [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014, 34(5): 225 – 230.)
- [19] 闵为, 杨珂, 李成, 等. 孔隙式黏滞阻尼器的力学特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(9): 125 – 132.
(MIN Wei, YANG Ke, LI Cheng, et al. Mechanical characteristics of pore type viscous damper [J]. Journal of vibration and shock, 2021, 40(9): 125 – 132.)
- [20] 王赣城, 焦素娟, 孙靳雅, 等. 弹性胶泥阻尼器的冲击实验研究及建模分析[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(6): 55 – 57.
(WANG Gancheng, JIAO Sujuan, SUN Jinya, et al. Shock experiments research and modeling analysis of elastomer damper [J]. Noise and vibration control, 2010, 30(6): 55 – 57.)
- [21] 杜苏睿, 刘亚青, 樊益泽, 等. 气相二氧化硅分散性对剪切增稠液体稳态流变学性能的影响[J]. 化工新型材料, 2022, 50(4): 220 – 224.
(DU Surui, LIU Yaqing, FAN Yize, et al. Influence of the dispersibility of fumed silica on the steady-state rheological property of STF

- [J]. *New chemical materials*, 2022, 50 (4): 220 – 224.)
- [22] 周浩, 谭柱华. 石墨烯对剪切增稠液挤压流动力学性能的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2021, 29(1): 66 – 73.
(ZHOU Hao, TAN Zhuhua. Study on the influence of graphene on the squeeze flow mechanical properties of shear thickening fluid [J]. *Materials science and technology*, 2021, 29(1): 66 – 73.)
- [23] 田明月, 孙润军, 王蕊宁, 等. 多相剪切增稠液的流变性能[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2019, 32(3): 264 – 269.
(TIAN Mingyue, SUN Runjun, WANG Ruining, et al. The rheological properties of multiphase shear thickening fluids [J]. *Basic science journal of textile universities*, 2019, 32(3): 264 – 269.)
- [24] HOFFMAN R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. ii: theory and experimental tests [J]. *Journal of colloid and interface science*, 1974, 46(3): 491 – 506.
- [25] KABIRAJ A, RATH S. Observation of order-disorder phase transition in sheared nanofluids [J]. *Materials today: proceedings*, 2022, 62: 6001 – 6003.
- [26] BOSSIS G, CUFFREO A, GRASSELLI Y, et al. Analysis of the rheology of magnetic bidisperse suspensions in the regime of discontinuous shear thickening [J]. *Rheologica acta*, 2023, 62 (4): 205 – 223.
- [27] CHENG X, MCCOY J H, ISRAELACHVILI J N, et al. Imaging the microscopic structure of shear thinning and thickening colloidal suspensions [J]. *Science*, 2011, 333 (6047): 1276 – 1279.
- [28] RICHARDS J A, O'NEILL R E, POON W C K. Turning a yield-stress calcite suspension into a shear-thickening one by tuning inter-particle friction [J]. *Rheologica acta*, 2021, 60 (2/3): 97 – 106.
- [29] SINGH A, NESS C, SETO R, et al. Shear thickening and jamming of dense suspensions: the “roll” of friction [J]. *Physical review letters*, 2020, 124(24): 248005.
- [30] TRULSSON M, DEGIULI E, WYART M. Effect of friction on dense suspension flows of hard particles [J]. *Physical review E*, 2017, 95(1): 012605.
- [31] LIN N Y C, GUY B M, HERMES M, et al. Hydrodynamic and contact contributions to continuous shear thickening in colloidal suspensions [J]. *Physical review letters*, 2015, 115(22): 228304.
- [32] EDENS L E, PEDNEKAR S, MORRIS J F, et al. Global topology of contact force networks: insight into shear thickening suspensions [J]. *Physical review E*, 2019, 99(1): 012607.
- [33] ZHENG J Z, LIU Q, WEI W, et al. Roughness surface of raspberry-shaped silica nanoparticles effect on shear thickening colloidal suspensions [J]. *Applied surface science*, 2022, 606: 154917.
- [34] GÜRGEN S, KUŞHAN M C, LI W H. Shear thickening fluids in protective applications; a review [J]. *Progress in polymer science*, 2017, 75: 48 – 72.
- [35] 魏明海, 孙丽, 张春巍, 等. 纳米氧化锆和氧化硅混合体系剪切增稠液的流变性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(12): 1969 – 1974.
(WEI Minghai, SUN Li, ZHANG Chunwei, et al. Rheological properties of shear thickening fluid of zirconia and silica nanoparticles mixed system [J]. *Materials reports*, 2019, 33 (12): 1969 – 1974.)
- [36] 王论, 潘泳康, 唐颂超. 基于棒状介孔 SiO₂ 剪切增稠流体的流变行为[J]. *功能高分子学报*, 2017, 30(2): 208 – 214.
(WANG Lun, PAN Yongkang, TANG Songchao. Rheological behavior of shear thickening fluid based on rod-like mesoporous silica [J]. *Journal of functional polymers*, 2017, 30 (2): 208 – 214.)
- [37] EGRES R G, WAGNER N J. The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition [J]. *Journal of rheology*, 2005, 49(3): 719 – 746.
- [38] 陈红霞, 曹海建, 黄晓梅. 剪切增稠液流变性能的影响因素研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(11): 137 – 140.
(CHEN Hongxia, CAO Haijian, HUANG Xiaomei. Influence factor of rheological property on STF [J]. *New chemical materials*, 2019, 47 (11): 137 – 140.)
- [39] JIANG W Q, SUN Y Q, XU Y L, et al. Shear-thickening behavior of polymethyl methacrylate particles suspensions in glycerine-water mixtures [J]. *Rheologica acta*, 2010, 49(11/12): 1157 – 1163.
- [40] SUN L, WANG G, ZHANG C W, et al. On the rheological properties of multi-walled carbon nano-polyvinylpyrrolidone/silicon-based shear thickening fluid [J]. *Nanotechnology reviews*, 2021, 10 (1): 1339 – 1348.
- [41] TAN Z H, MA H Q, ZHOU H, et al. The influence of graphene on the dynamic mechanical behaviour of shear thickening fluids [J]. *Advanced powder technology*, 2019, 30(10): 2416 – 2421.
- [42] ZHANG X Z, LI W H, GONG X L. Thixotropy of MR shear-thickening fluids [J]. *Smart materials and structures*, 2010, 19(12): 125012.
- [43] KHORSHID N K, ZHU K, KNUDSEN K D, et al. Novel structural changes during temperature-induced self-assembling and gelation of PLGA-PEG-PLGA triblock copolymer in aqueous solutions [J]. *Macromolecular bioscience*, 2016, 16 (12): 1838 – 1852.
- [44] SHARMA R, VERMA S K, BISWAS I, et al. Effect of thermal surface activation of silica nanoparticles on the rheological behavior of shear thickening fluid [J]. *Materials research*

- express,2019,6(6):065710.
- [45] SUN L,LIANG T Q,ZHANG C W, et al. The rheological performance of shear-thickening fluids based on carbon fiber and silica nanocomposite [J]. Physics of fluids,2023,35(3):032002.
- [46] BOSSIS G,GRASSELLI Y,CIFFREO A, et al. Tunable discontinuous shear thickening in capillary flow of MR suspensions [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2021,32(12):1349-1357.
- [47] NAVIDBAKHSH S,MAJDAN-CEGINCARA R. Effect of γ -Fe₂O₃ nanoparticles on rheological and volumetric properties of solutions containing polyethylene glycol [J]. International journal of industrial chemistry,2017,8(4):433-445.
- [48] 王瑞,李昶阳,刘星,等. 氧等离子体处理碳纳米管对剪切增稠液增强芳纶织物防刺性能的影响[J]. 材料导报,2020,34(18):18188-18193.
(WANG Rui,LI Danyang,LIU Xing, et al. Effect of carbon nanotubes treated by oxygen plasma on anti-sting properties of aramid fabric reinforced by shear thickening solution [J]. Materials review, 2020, 34(18):18188-18193.)
- [49] WEI M H,Lü Y R,SUN L, et al. Rheological properties of multi-walled carbon nanotubes/silica shear thickening fluid suspensions [J]. Colloid and polymer science, 2020,298(3):243-250.
- [50] 俞科静,张涵,田美玲,等. 硅微粉对剪切增稠液流变性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2019,37(3):93-97.
(YU Kejing,ZHANG Han,TIAN Meiling, et al. Effect of silicon powder on rheological property of shear thickening fluid [J]. Journal of materials science and engineering,2019,37(3):93-97.)
- [51] LEE Y S,WAGNER N J. Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions [J]. Rheologica acta,2003,42(3):199-208.
- [52] 张汪洋,赵小强,闫文哲,等. STF-芳纶织物复合材料防刺性能研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2021,42(5):475-480.
(ZHANG Wangyang,ZHAO Xiaoliang,YAN Wenzhe, et al. Study on stab fabric resistance of STF aramid fabric composites [J]. Journal of north university of China (natural science edition),2021,42(5):475-480.)
- [53] 王丽娟,俞科静,张典堂,等. 纺织结构/STF柔性复合材料的机械防护性能[J]. 材料科学与工程学报,2019,37(6):1022-1029.
(WANG Lijuan,YU Kejing,ZHANG Diantang, et al. Study of mechanical protective properties for textile structures/STF flexible composites [J]. Journal of materials science and engineering, 2019,37(6):1022-1029.)
- [54] LIU K W,CHENG C,ZHOU L, et al. A shear thickening fluid based impact resistant electrolyte for safe Li-ion batteries [J]. Journal of power sources,2019,423:297-304.
- [55] PETEL O E,OUELLET S,LOISEAU J, et al. The effect of particle strength on the ballistic resistance of shear thickening fluids [J]. Applied physics letters,2013,102(6):064103.
- [56] WAITUKAITIS S R,JAEGER H M. Impact-activated solidification of dense suspensions via dynamic jamming fronts [J]. Nature, 2012,487(7406):205-209.
- [57] SUN L,WEI M,ZHU J. Low velocity impact performance of fiber-reinforced polymer impregnated with shear thickening fluid [J]. Polymer testing,2021,96:107095.
- [58] ÁVILA A F,DE OLIVEIRA A M,LEÃO S G, et al. Aramid fabric/nano-size dual phase shear thickening fluid composites response to ballistic impact [J]. Composites part A: applied science and manufacturing,2018,112:468-474.
- [59] SHEN B H,ARMSTRONG B L,DOUCET M, et al. Shear thickening electrolyte built from sterically stabilized colloidal particles [J]. ACS applied materials & interfaces, 2018,10(11):9424-9434.
- [60] VEITH G M,ARMSTRONG B L,WANG H, et al. Shear thickening electrolytes for high impact resistant batteries [J]. ACS energy letters,2017,2(9):2084-2088.
- [61] 余慕春,李炳蔚,牛智玲,等. 基于剪切增稠液体的变阻尼隔振器动力学特性研究[J]. 装备环境工程,2019,16(8):33-38.
(YU Muchun,LI Bingwei,NIU Zhiling, et al. Dynamical properties of variable-damped vibration isolator based on shear thickening fluid [J]. Equipment environmental engineering,2019,16(8):33-38.)
- [62] 周鸿,郭朝阳,宗路航,等. 剪切增稠液及阻尼器性能研究[J]. 振动与冲击,2013,32(18):15-20.
(ZHOU Hong,GUO Chaoyang,ZONG Luhang, et al. Performance of shear thickening fluid and a damper as its application [J]. Journal of vibration and shock,2013,32(18):15-20.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)