文章编号:1007 - 4252(2023)03 - 0003 - 178　　DOI:10.20027/j.gncq.2023.0022

剪切增稠液及其在缓冲减振领域应用研究进展

刘　强*,范吉庆
(1.哈尔滨理工大学 先进制造智能化技术教育部重点实验室,哈尔滨,150080;
2.哈尔滨理工大学 高效切削及刀具国家地方联合工程实验室,哈尔滨 150080)

摘要:剪切增稠液是一种智能材料,其独特的流变特性引起了学术界的广泛关注。当下的研究热点是将其应用到缓冲减振领域,但由于性能存在制约,制约了器件的应用和发展。因此,总结了剪切增稠液的剪切增稠机理,并概述了器件应用方面的表现。最后,总结了剪切增稠液及其器件应用的优势和不足之处,为新型剪切增稠材料的研究和发展提供一定的启示。

关键词:剪切增稠液;剪切增稠机理;缓冲减振
中图分类号:TB381　　**文献标志码**:A

Research progress of shear thickening fluid and its application in cushioning and damping field

Liu Qiang*, Fan Jiqing
(1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Intelligent Technology, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080;
2. The Lab of National and Local United Engineering for High-Efficiency Cutting & Tools, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080)

Abstract: Shear thickening fluid is a kind of intelligent material. The unique rheological properties have attracted extensive attention in academia The current research focus is to apply it to the field of cushioning and damping, but due to the performance constraints, the application and development of devices are restricted. Therefore, the shear thickening mechanism of shear thickening solution is summarized, and the performance of device application is summarized. Finally, the advantages and disadvantages of shear thickening fluid and its device applications are summarized, which provides some enlightenment for the research and development of new shear thickening materials.

Key words: Shear thickening fluid; Shear thickening mechanism; Vibration attenuation

收稿日期:2023-04-27;　　**修订日期**:2023-06-05
基金项目:黑龙江省自然科学基金(YQ2021E035);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2020193);
作者简介:范吉庆(1998—),男,硕士研究生,研究方向为智能减振刀具及振动控制。E-mail:f18845643102@163.com;
通信作者:刘　强(1988—),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为智能刀具技术,切削加工过程检测监控技术、仿生刀具设计与制备技术;E-mail: liuqianglink@163.com.

0　引言

由于材料学科的迅速发展,以智能材料为驱动的缓冲减振技术,为各领域结构振动控制提供了新的研究方向。

剪切增稠液(Shear thickening fluid,STF)就是智能材料的一种,是由分散相和分散介质组成的分散体系,随着剪切速率的不同而表现出不同的特性。剪切增稠效应对剪切应变率敏感,因此在工作时不需要像磁流变和电流变材料那样外加磁场或电场。所以采用 STF 材料研制的器件属于无源器件,该器件更适用于自适应控制。

近年来,国内多所高校相继开展了剪切增稠液的研究。其中,中国科学技术大学、重庆大学、哈尔滨工业大学等高校的科研人员对 STF 材料的制备和器件应用进行过较多的研究。

本文综述了近年来剪切增稠液及其在缓冲减振领域应用方面的最新研究,并指出了当前研究存在的问题,以期能够为各领域的研究人员在该方面的研究和应用提供参考。

1　剪切增稠液

1.1　剪切增稠液概述

随着剪切速率增大,液体粘度迅速提升的现象被定义为剪切增稠,而具有该性质的液体被称为剪切增稠液。STF 是一种非牛顿可逆流体,是由分散相和分散介质组成的分散体系。分散相为固体微颗粒,分散介质为低分子有机或者无机液体,也可以将两种或多种混合溶剂作为分散介质。在平衡状态下,分散体系表现出的流动性较好;当受到的剪切作用力超过其临界作用力时,其分散体系的黏度会急剧增加,进而出现剪切增稠现象,此时表现出类固体的状态;当所受的剪切作用力消失后,会很快恢复成可流动状态。STF 的剪切增稠性能与其分散相、分散介质、添加剂以及外加电场或磁场等因素密切相关。下面对影响其剪切增稠性能的因素逐一进行介绍与分析。

(1)分散相

分散相的性质会影响 STF 剪切增稠性能,影响因素主要包括:分散相粒子的体积分数、分散相粒子的形状、分散相粒子的尺寸、分散相粒子硬度及对分散相粒子的改性处理等。分散相粒子的体积分数被定义为分散相体积与液体总体积之比。Barnes 等[1]研究表明只要分散相体积分数达到一定值后 STF 才具有产生剪切增稠能力的行为,并且该值的大小会随着 STF 材料固有属性的不同而改变。Maranzano 等[2]研究表明临界剪切速率会随着分散相体积分数的提升而减小。这是因为在分散相浓度较大的剪切增稠液中,分散相粒子之间的距离会显著减小,流体动力变大,此时需要较小的剪切速率来克服斥力。

为了探究分散相粒子的形状对 STF 流变性能的影响,Wei 等[4]使用聚乙二醇和球形或不规则形状的二氧化硅颗粒设计了两种 STF,试验结果表明,虽然在不规则形状的二氧化硅基 STF 中剪切速率较低,但仍会发生剪切增稠现象。Wetzel 等[5]研究表明分散相粒子形状对 STF 流变性能的影响与粒子的长径比密切相关,在流动过程中高长径比的粒子接触到相邻粒子的概率较低长径比的高,使用高长径比粒子更容易使 STF 产生剪切增稠行为。Wu 等[6]发现使用方形的 ZIF-8 颗粒作为分散相的 STF 具有优于传统球形颗粒 STF 的剪切增稠性能。

研究表明,分散相粒子的尺寸会影响 STF 的剪切增稠性能。Li 等[7]研究了 SiO_2 颗粒大小对复合织物抗穿刺性能的影响,如图 1 所示。结果表明,当 SiO_2 浓度越高、粒径越小时,STF 的剪切速率越低。一般根据分散相颗粒尺寸的不同将 STF 分为两类,一类是气相二氧化硅(SiO_2)、纳米碳酸钙($CaCO_3$)等纳米粒子的分散相胶体体系;另一类是纳米级二氧化硅、微米级的淀粉和亚微米级的聚甲基丙烯酸甲酯或者微米级的分散相悬浮体系。因此,第一类 STF 一般表现为连续性的剪切增稠,而第二类 STF 仅在高浓度时才会表现出非连续性的剪切增稠。

分散相粒子硬度大小与 STF 的剪切增稠性能有着密切的关系。Kalman 等[8]研究表明使用较软颗粒的 STF 在高应力作用下剪切增稠减弱,且伴随着粘度下降。Petel 等[9]发现较硬的粒子作为分散相时更能承受颗粒间的应力。此外,由于粒子间的相互作用对剪切增稠行为有着重要的作用,故分散相粒子的表面粗糙度也会对剪切增稠性能产生较大影响。

分散相粒子的改性处理会改变 STF 性能。Yu 等[11]制备了一系列基于改性 SiO_2 纳米粒子的剪切

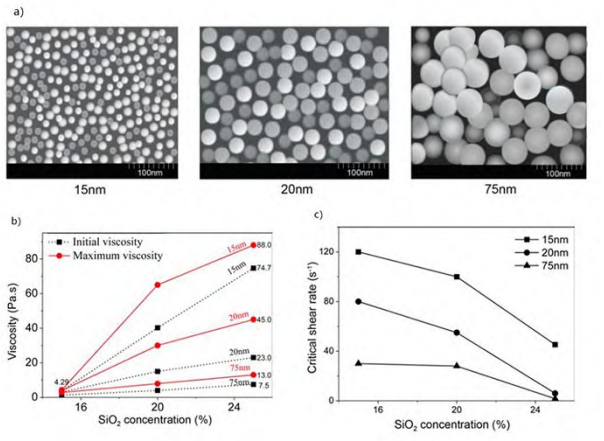

图 1 a)粒子间空隙形态;b)初始粘度和最大粘度曲线; c)临界剪切速率曲线[7]

Fig. 1 a) Morphology of interparticle Spaces; b) Initial and maximum viscosity curves; c) Critical shear rate curve[7]

增稠流体。研究发现,改性处理会显著降低颗粒团聚,改善颗粒分散性能,提高流体中的最大颗粒浓度。Joselin 等[12]使用硅烷偶联剂研究官能化 SiO_2 粒子对体系的影响,发现在硅烷偶联剂的作用下 SiO_2 颗粒与分散介质之间会形成牢固的键。Li 等[13]发现酸处理可增大体系粘度,同时减缓由于浓度过高而引起的 STF 增稠比的增长。

(2)分散介质

分散介质对 STF 剪切增稠能力的影响很明显,不同特性的分散介质对 STF 剪切增稠能力影响程度是不同的,主要表现在分散介质自身粘度以及与分散相粒子相结合的能力。

Jiang 等[14]为了研究分散介质的浓度大小对 ST 特性的影响,使用不同比例甘油和水的混合物作为分散介质制备 STF,结果表明增大甘油与水之间的比例,STF 体系的临界剪切速率明显降低,ST 性能显著提升。Sheony 等[15]研究了分散介质粘度对 STF 流变性能的影响,结果表明临界应变随分散介质粘度改变明显变化。

(3)添加剂

相比于组成 STF 体系的分散相、分散介质,添加剂的含量很少但是却可以明显改善悬浮液的剪切增稠性能。Ye 等[16]发现向悬浮液中加入各类表面活性剂都会提升 ST 性能。Gürgen 等[17]研究表明陶瓷材料作为添加剂时会削弱 STF 剪切增稠现象。纤维素对 ST 效应也是有影响的。Ghosh 等[18]向 STF 中加入纤维素来探究该影响,其微观结构如图 2 所示。实验结果表明由于纳米纤维上的大量羟基增强了它们与纳米颗粒间氢键的相互作用,使 STF 的 ST 效应增强。

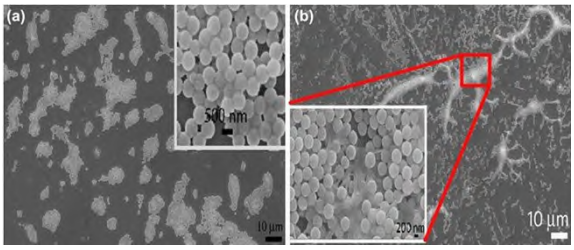

图 2 扫描电镜图像:(a)硅-聚乙二醇 STFs;(b)纤维增强硅-聚乙二醇 STFs[18]

Fig. 2 SEM images: (a) silica-PEG; (b) cellulose-reinforced silica-PEG STFs[18]

(4)外加电场或磁场

外加电场或磁场通过对分散相粒子和分散介质产生极化作用来影响其特性。Shenoy 等[19]研究了电场对剪切增稠效应的影响,结果表明随着电场强度的提升,STF 的临界剪切速率会产生滞后作用,同时体系峰值粘度降低,即对 STF 剪切增稠有阻碍效应。Zhang 等[20]通过向含有 SiO_2 的单分散相悬浮液体系中加入羰基铁粉,制得了磁流变剪切增稠液(Mr Shear thickening fluid, MRSTF),并发现悬浮液的剪切增稠程度会因羰基铁粉含量提高而减弱。上述研究表明了电场或磁场都会对剪切增稠现象产生阻碍作用,如何正确“利用”阻碍作用是未来科研工作的研究重点。

除电场、磁场外,温度场也会对 STF 性能有影响。Liu 等[21]研制了一种可变色 STF,并探讨了温度对其流变性能的作用。结果表明温度升高时,STF 的临界剪切速率降低,峰值粘度减小,其对可见光的反射峰值波长逐渐下降。

1.2 剪切增稠现象与剪切增稠机理

1.2.1 剪切增稠现象

当我们在跑道上走路时,会感觉地面很软。但只要加速奔跑或跳跃,跑道地面立刻变的坚硬起来,这种跑道就是由剪切增稠材料制作而成。在厨房,随处可见淀粉和水,将其混合并搅拌均匀,静置等淀粉沉淀后将上方澄清的液体倒掉,剩下的沉淀就具有剪切增稠特性。当缓慢搅拌时感觉不到太大的阻

力;但快速插入或搅拌时,则会表现出明显的增稠现象。鉴于剪切增稠材料这种“智能”的特性:“流体的黏度随剪切速率增大而增大”,STF 材料已经在日常生活中有了较为广泛应用。

1.2.2 剪切增稠机理

为了进一步研究 STF,需要深入了解剪切增稠机理,最终达到其性能可控并满足寻找最优制备方案的需求。而 STF 作为一种非牛顿流体,其流变行为不具有可控性,同时缺乏合适的测试手段和与之匹配的装置,这些都导致不同研究人员对其机理认识的不同。有效的机理解释,不仅仅能为 STF 的性能修正做出指导,更加能大力推动 STF 在相关领域中的应用。

目前,从 STF 概念提出到今天近 60 年的研究历史,针对各种不同体系的 STF,不同研究人员总结归纳提炼出了不尽相同的能自洽的剪切增稠机理。主要有三种理论:“有序-无序转化”机理,“粒子簇”机理和“膨胀”机理。

(1)有序-无序(order-disorder)转变机理

“有序-无序转化”机理最早是由 Hoffman 提出的,该理论可以表述为分散体系在粒子间的斥力作用下,保持一种稳定的有序排列状态[22]。如图 3 所示,当 STF 处于平衡态时,分散体系的粒子处于无序排列状态;开始受剪切时,分散体系中的粒子排列的有序程度会提高并出现层状流动,使得体系的黏度降低;当剪切增加时,作用在粒子上的作用力随之增大,当作用力大到可以打乱有序流动时,粒子排列则变得无序,从而导致黏度增大。

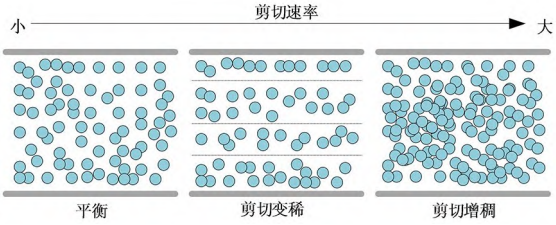

图 3　“有序-无序转化”机理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of "order-disorder transformation" mechanism

但是,Egres 等[23]研究发现,非连续性增稠可以在没有“有序-无序转化”的情况下发生。因此,“有序-无序转变”机理是不必要的。

(2)“粒子簇”机理

Brady[24]等对“有序-无序转变”机理提出了质疑,首次通过流体动力学对剪切增稠现象的模拟研究,也是最早提出关于剪切增稠的“粒子簇”机理。“粒子簇”是基于流体间的相互作用,该理论认为产生增稠的原因是在粒子间的相互流动作用力的作用下,形成较大体积的粒子聚集体,进而产生“粒子簇”。“粒子簇”阻碍流体的流动,使得分散体系的黏度增大,其过程如图 4 所示。

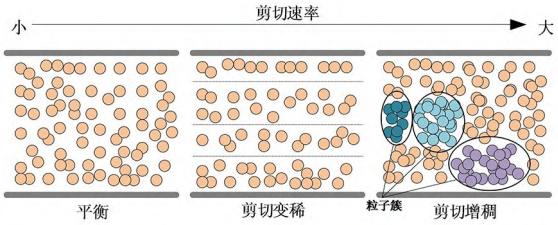

图 4　“粒子簇”机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the “particle cluster” mechanism

Xiang 等[25]将高速共焦显微镜与同步力学测试连用,研究 STF 在增稠过程中的内部结构变化。在发现剪切增稠时,粒子聚集成簇,第一次相对客观的验证了“粒子簇”理论的正确性。但是,Heussinger 等[26]对表面粗糙粒子制备的高浓度分散体系进行模拟研究,认为形成粒子簇的根本原因是粒子间的摩擦力,粒子间的摩擦损耗导致了宏观的剪切增稠;剪切增稠时表观粘度的大小与粒子簇尺寸的二次方呈正比。进一步的,Lin 等[27]通过模拟计算和试验研究得出:粒子在剪切作用下相互接触摩擦是粒子簇形成的主要因素,而流体力对粒子簇的形成影响很小。

(3)“膨胀”机理

“粒子簇”机理确实能够解释剪切增稠液中黏度上升的现象,然而由于其不能够承受太高的剪切应力的作用,只会出现几倍的上升,无法解释大颗粒浓悬浮液中的黏度成百上千倍增长的非连续剪切增稠现象。因此,一些研究者基于剪切增稠液在剪切作用下出现的液体-固体状态转变,提出了膨胀机理来解释非布朗浓悬浮液体系中的非连续剪切增稠行为。

膨胀机理的基本思想是当颗粒剪切流动时,由于受到流体边界的限制而挫败,剪切会对边界产生一个正应力。边界会提供一个等大反向的作用力,这个力会沿着流体中的临近粒子间的摩擦接触形成

力链传播,如图 5 所示[28]。摩擦接触所产生的剪应力与正应力成正比,引起剪切应力随着剪切速率急剧增大,从而形成非连续性的剪切增稠。在剪切增稠的转化过程中粒子形成了接触网络,这些网络由摩擦力来支持并在整个系统内传递,出现液体-固体状态转变。

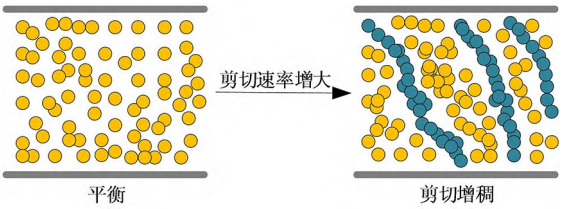

图 5 “膨胀”机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the "expansion" mechanism

2 剪切增稠液在缓冲减振领域的应用

剪切增稠液是一种软材料物质,它同时具备流体和固体的特性,在剪切作用下具有液体-固体转换的特点且这些变化都是可逆的。所以,这种智能材料在人体防护、减振缓冲以及其他各相关领域有广泛应用。本节主要对 STF 器件的缓冲减振领域应用情况及优缺点进行介绍,并对其应用前景进行展望。

2.1 STF 缓冲器件

防刺防弹衣可以有效地防止锋利的器械对被保护部位的攻击,减少对人体的威胁。Wei 等[29]设计制作了经 STF 处理的织物。试验结果如图 7 所示,表明经 STF 处理的织物在穿刺测试中的峰值穿刺力比未处理的织物明显增加。这是因为 STF 限制了刀具穿透织物时纤维束的滑移,对保持织物结构的紧密性和完整性起到了作用。

将间隔织物与 STF 进行复合可以制备出积极抗冲击防护材料。陆振乾等[30]针对传统个体防护材料柔韧性不好刚硬性强及限制人体活动等缺点设计了一种 STF 填充经编间隔织物(WKSF)柔性复合材料,并对其冲击性能进行研究。结果表明加入的复合材料具有较好的能量吸收性能和明显的应变率效应。但是 STF 在亚麻等天然织物上却鲜有研究,针对该问题,Fehrenbach 等[31]首次将 STF 应用于天然织物,结果表明经 STF 处理的亚麻织物和 STF 处理的杂交种织物的抗穿刺和抗弹道冲击性能均有提高。

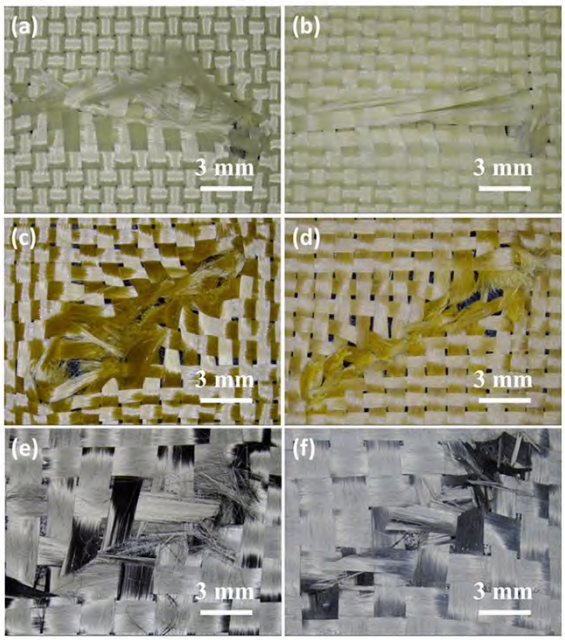

图 7 (a)芳纶织物受损部分的光学显微照片;(b) STF/芳纶织物;(c) PBO 织物;(d) STF/PBO 结构;(e) C 织物;(f) STF/C 织物对 D2 工具[29]

Fig. 7 Optical micrographs of the damaged part of (a) aramid fabric; (b) STF/aramid fabric; (c) PBO fabric; (d) STF/PBO fabric; (e) C fabric; (f) STF/C fabric against the D2 tool.[29]

Mohsen 等[32]研究了非浸渍和 STF 浸渍三维玻璃织物作为复合缓冲材料在低速冲击载荷下的动态压缩响应,实验设计如图 6 所示。试验结果表明,应用 STF 会提高复合材料的压缩和缓冲性能。

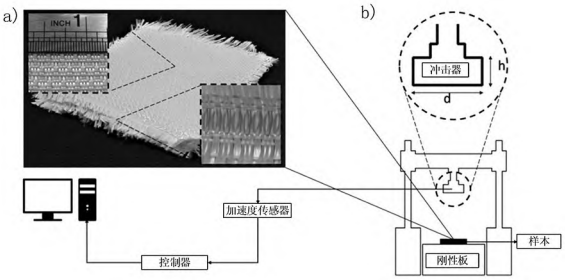

图 6 落锤试验机原理图;(a)织物外观 (b)冲击器[32]

Fig. 6 Schematic of the drop-weight testing machine; (a) the fabric appearance (b) impactor[32]

2.2 STF 减振器件

振动是生活中乃至自然界常见的现象,通常情

况下振动对系统本身及所处环境都是有害的。机械振动是振动的一种,它直接影响设备的功能,降低设备的精度和生产效率,甚至会引起结构的疲劳破坏,所以振动控制这项工作具有重要意义。振动控制就是采取隔振、消振、吸振及阻尼耗能等技术来减轻设备和工程结构的振动并阻断振动的传播。减振器件作为振动控制的执行器件,是振动控制系统的重要组成部分。

目前,减振器件的设计主要在传统机械结构设计、采用高刚度高阻尼材料设计及智能材料设计等方面展开研究,其中智能材料结构减振器件[33]是研究的热点也是重点。作为一种剪切应变敏感材料的STF,其在剪切增稠过程中具有能量耗散及刚度变化的特性,该特性使其在振动控制领域占有一席之地。

在 STF 减振器件的设计、开发及应用方面,研究者们已开展较多研究[34-36]。Zhang 等[37]基于 STF 研制了速度激励型阻尼器原型,并进行了一系列试验测试其在不同载荷条件下的响应。他们发现剪切增稠的影响使得在高动态载荷速度下工作的阻尼器比在低速度下工作的阻尼器具备较大的刚度和阻尼,并吸收更多的能量。Tian[38]设计了一种扭转型 STF 制动器,同时制备了三种不同浓度、分散相颗粒和分散介质的 STF 材料并将其加入制动器中进行相关测试,如图 8 所示。测试结果表明扭转型 STF 制动器在 3 种不同 STF 材料填充时均可以长期稳定地工作。Zhao 等[39]开发了一种新型非线性 STF 阻尼器,测试结果表明与传统的线性阻尼器相比具有更好的同频吸能效果,其输出阻尼力随着频率和幅值的变化急剧增大。该设计说明了 STF 阻尼器在旋转机械自适应控制中的可行性及优越性。

Zhou 等[40]制作了一种新型的 STF 阻尼器,如图 9 所示。通过改变 STF 的流变特性,得到了具有不同力学特性的 STF 阻尼器。

Wei 等[41]设计了剪切增厚流滑摩擦(STF-SF)隔振器,如图 10 所示。研究了 STF-SF 隔振器的力学性能,并从理论角度讨论了其在抗震工程中应用的可行性。

智能 STF 阻尼器通过改变加载频率、加载幅值和流体间隙可以实现可控的输出阻尼力。Zhao 等[42]设计了一种智能 STF 阻尼器,如图 11 所示。通过建立基于模态激振器的振动测试系统,对其动

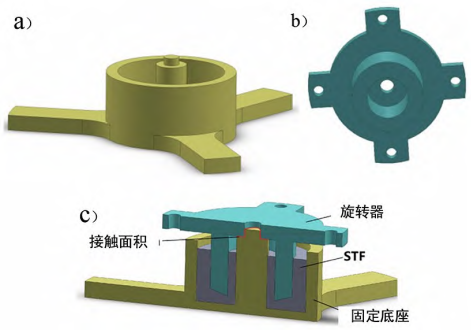

图 8　旋转 STF 制动器:(a)支架,(b)旋转器,(c)带 STF 的制动器横截面[38]

Fig. 8 Rotating STF brake: (a) bracket; (b) rotator; (c) brake cross section with STF[38]

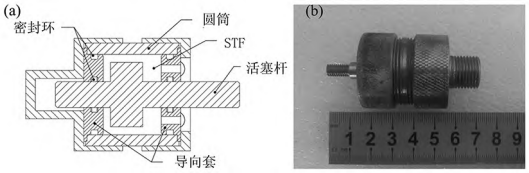

图 9　STF 阻尼器:(a)原理图;(b)实物图[40]

Fig. 9 STF brake: (a) schematic diagram; (b) prototype[40]

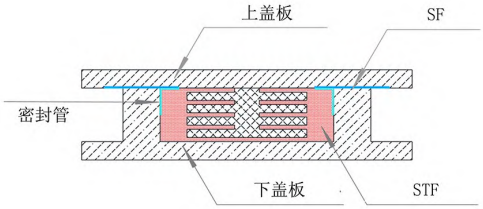

图 10　STF-SF 隔离器示意图[41]

Fig. 10 The Sketch of STF-SF isolator[41]

态性能进行分析,结果表明:通过控制加载频率、加载幅值和液隙,STF 阻尼器可以输出可变阻尼力。但是该 STF 阻尼器的设计没有针对于实际的应用场景,其实用性有待测试。不可否认的是,这个研究可以为智能 STF 阻尼器在减振耗能领域的进一步理论和应用研究提供有效的指导。

各类车辆的减振器中常常有液压阻尼器的应用,但存在减振器减振和恢复效果不理想等问题。若将液压油换成 STF 可做成 STF 阻尼器,上述问题会得到解决。Zhang 等[43]设计了一种 STF 减振器,填充的 STF 是使用纳米 SiO_2 分散在乙二醇中制备而成,如图 12 所示。测试结果表明,减振器具有明

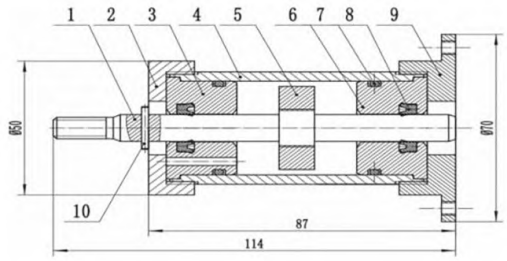

图 11 智能 STF 阻尼器示意图[42]

Fig. 11 The Sketch of intelligent STF-SF isolator[42]

显的滞后行为,在不同的振动频率下,阻尼器的刚度和阻尼性能会随之变化。

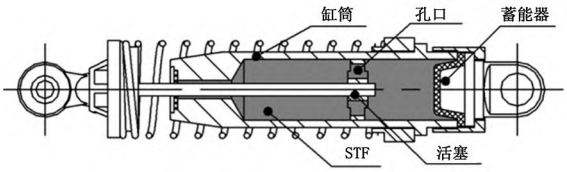

图 12 STF 减振器结构示意图[43]

Fig. 12 Structure diagram of STF shock absorber[43]

Urda 等[44]设计了用于摩托车转向的 STF 阻尼器,测试实验表明,尽管原型设计简单、制造成本降低,但其性能不输于传统的高性能赛车转向阻尼器。证明在摩托车转向阻尼器中使用剪切增稠液作为工作液的可行性。这对降低阻尼器的成本具有重要意义。

事实上,无论哪种类型的 STF 阻尼器,其本质都可视为质量-弹簧-阻尼器系统,如图 13 所示。该模型[45]可解释为,质量为 m 的物体通过弹簧做往复运动,STF 阻尼器与弹簧是平行的。当振幅达到临界值时,STF 阻尼器将发生剪切增稠的现象,从而使整个阻尼器有效刚度增加。这进而从根本上减小了共振振幅,并达到了减振的效果。

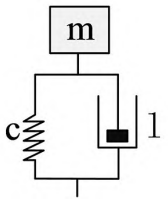

图 13 质量-弹簧-阻尼器系统图

Fig.13 STF Mass - spring - damper system diagram

在机械加工领域,切削过程中很容易产生振动现象,导致工件加工精度降低,影响工件的使用性能甚至造成工件报废。为了减小刀具的振动,Selim 等[46]设计了一种填充 STF 的减振刀具,如图 14 所示。实验结果表明,STF 的使用提高了刀具的阻尼比和刚度,并增加了切削加工中的稳定切削深度。

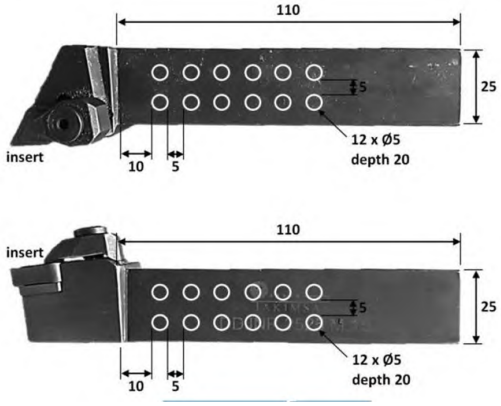

图 14 STF 减振刀具示意图[45]

Fig.14 STF damping tool diagram[45]

不同的减振场合需要性能不同的 STF 材料,但目前的研究中,研究者们大多数都没过多的研究材料的配比,没有配置不同浓度固体粒子的增稠体系,以达到最佳的缓冲吸能效果。

3 结论

近年来,随着计算机技术和实验科学仪器的发展,研究人员对 STF 的了解也越来越深入,在 STF 的制备研发、性能探究、机理探索、开发应用等各个领域上的研究有了飞跃式进展。然而,STF 的发展依然存在很多问题:

1)STF 的增稠机理存在多种解释机理,没有形成统一的定论。虽然“粒子簇”机理在当下的认同是最多的,但是其还不足以作为一个普遍适用的模型来描述微观结构变化和解释增稠的转化机理。

2)剪切增稠体系和种类的探究还有待进一步开展。开发新组分的剪切增稠液具有重要的实际意义,对推动 STF 的创新发展有着举足轻重的作用。

3)STF 在机理探索、材料制备和器件应用上的相关研究相对割裂。一方面是剪切增稠液的性能无法进行定向调控,导致材料制备与具体应用的衔接出现问题;另一方面则是机理的探究无法为性能的调控进行指导,导致理论研究与制备研发之间也无法无缝连接。

在今后的研究中,希望能给研究者们启发,发挥科研工作的最大价值。

参考文献:

[1] Barnes H A . Shear mil hickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids[J]. Journal of Rheology, 1989, 33(2): 329-366.

[2] Maranzano B J, Wagner N J . The effects ofinterparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions[J]. Journal of Rheology, 2001, 45(5):1205-1222.

[3] Liu X Q, Bao R Y, Wu X J, et al. Temperature induced gelation transition of a fumed silica/PEG shear thickening fluid[J]. Rsc Advances, 2015, 5(24): 18367-18374.

[4] Wei R, Dong B, Wang F, et al. Effects of silica morphology on the shear-thickening behavior of shear thickening fluids and stabbing resistance of fabric composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(24): 48809.

[5] WETZEL E D,LEE Y S,EGRES R G,et al. The Effect of Rheological Parameters on the Ballistic Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Kevlar Composites[J]. AIP Conference Proceedings,2004,712:288-293.

[6] Wu Y, Cao S, Xuan S, 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.

[7] Li T T, Dai W,Wu L, et al. Effects of STF and Fiber Characteristics on Quasi-Static Stab Resistant Properties of Shear Thickening Fluid (STF)-Impregnated UHMWPE/Kevlar Composite Fabrics[J]. Fibers & Polymers, 2019, 20(2): 328-336.

[8] Kalman D P, Merrill R L, Wagner N J, et al. Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle fluid suspensions[J]. ACS applied materials & interfaces, 2009, 1(11): 2602-2612.

[9] 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, 2012, 102(6):2825-5.

[10] Petel O E, Ouellet S, Loiseau J, et al. A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 85: 83-96.

[11] Miao Y, Xiuying Q, Xingjian D, et al. Effect of particle modification on the shear thickening behaviors of the suspensions of silica nanoparticles in PEG[J]. Colloid and Polymer Science, 2018, 296:1767-1776.

[12] Joselin R, Wilson W J . Investigation on Impact Strength Properties of Kevlar Fabric using Different Shear Thickening Fluid Composition[J]. Defence science journal, 2014, 64(3):236-243.

[13] Li S, Wang J, Cai W, et al. Effect of acid and temperature on the discontinuous shear thickening phenomenon of silica nanoparticle suspensions[J]. Chemical Physics Letters, 2016, 658:210-214.

[14] Jiang W, Sun Y, Xu Y, et al. Shear-thickening behavior of polymethylmethacrylate particles suspensions in glycerine-water mixtures[J]. Rheologica Acta, 2010, 49(11-12):1157-1163.

[15] Shenoy S S, Wagner N J . Influence of medium viscosity and adsorbed polymer on the reversible shear thickening transition in concentrated colloidal dispersions[J]. Rheologica Acta, 2004, 44(4):360-371.

[16] Ye F, Zhu W, Jiang W, et al. Influence of surfactants on shear-thickening behavior in concentrated polymer dispersions[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2013, 15(12):1-8.

[17] Selim Gürgen a b, C M C K, A W L . Shear thickening fluids in protective applications: A review[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 75:48-72.

[18] Ghosh A, Chauhan I, Majumdar A, et al. Influence of cellulose nanofibers on the rheological behavior of silica-basedshear-thickening fluid[J]. Cellulose, 2017, 24: 4163-4171.

[19] Shenoy S S, Wagner N J, Bender J W . E-FiRST: Electric field responsive shear thickening fluids[J]. Rheologica Acta, 2003, 42(4):287-294.

[20] Zhang X, Li W, Gong X L . Study on magnetorheological shear thickening fluid[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(1):15051-15056.

[21] Liu M, Jian W, Wang S, et al. Shear thickening fluid with tunable structural colors[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(9): 095012.

[22] Hoffman R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. I. Observation of a flow instability[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1972, 16(1): 155-173.

[23] Egres R G, Nettesheim F, Wagner N J . Rheo-SANS investigation of acicular-precipitated calcium carbonate col-

loidal suspensions through the shear thickening transition [J]. Journal of Rheology, 2006, 50(5):685-709.

[24] Brady J F, Bossis G. The rheology of concentrated suspensions of spheres in simple shear flow by numerical simulation[J]. Journal ofFluid Mechanics, 1985, 155: 105-129.

[25] Xiang C, 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.

[26] Heussinger C . Shear thickening in granular suspensions: Interparticle friction and dynamically correlated clusters [J]. Physical Review E, 2013, 88(5):1-4.

[27] 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.

[28] Brown E. Friction's role in shear thickening[J]. Physics, 2013, 6: 125.

[29] Wei R, Dong B, Zhai W, et al. Stab-Resistant Performance of the Well-Engineered Soft Body Armor Materials Using Shear Thickening Fluid[J]. Molecules, 2022, 27(20): 6799.

[30] 陆振乾,吴利伟,孙宝忠,等.经编间隔织物增强柔性复合材料冲击性能[J].复合材料学报.2014,(5):1306-1311.

[31] Fehrenbach J, Hall E, Gibbon L, et al. Impact Resistant Flax Fiber Fabrics Using Shear Thickening Fluid[J]. Journal of Composites Science, 2023, 7(1): 31.

[32] JeddiM, Yazdani M. Dynamic compressive response of 3D GFRP composites with shear thickening fluid (STF) matrix as cushioning materials[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(16): 2151-2164.

[33] 雷先华,何美生,旷水章,等.一种新型减振器的结构设计及实验分析[J].功能材料与器件学报.2019,(3):169-173.

[34] Sheikhi M R, Gürgen S, Altuntas O, et al. Anti-impact and vibration-damping design of cork-based sandwich structures for low-speed aerial vehicles[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2): 71.

[35] Sheikhi M R, Gürgen S, Kuşhan M C. Vibration Damping Systems with Shear Thickening Fluid[M]//Shear Thickening Fluid: Theory and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2023: 77-97.

[36] Freya R, Charly R J, Shanmugam A, et al. Investigation of Rheological Properties in Shear Thickening Fluid for Seismic Dampers [J]. Materials Today: Proceedings, 2023.

[37] Zhang X Z, Li W H, Gong X L . The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3):035027.

[38] Tian T, Nakano M . Design and testing of a rotational brake with shear thickening fluids[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(3):035038.

[39] Zhao Q, Yuan J, Jiang H, et al. Vibration control of a rotor system by shear thickening fluid dampers[J]. Journal ofSound and Vibration, 2021, 494: 115883.

[40] Zhou H, Yan L, Jiang W, et al. Shear thickening fluid-based energy-free damper: design and dynamic characteristics [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, 27(2): 208-220.

[41] Wei M, Hu G, Li L,et al. Development and theoretically evaluation of an STF-SF isolator for seismic protection of structures[J]. Meccanica, 2018, 53: 841-856.

[42] Zhao Q, He Y, Yao H, et al. Dynamic performance and mechanical model analysis of a shear thickening fluid damper[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(7): 075021.

[43] Zhang X Z, Li W H, Gong X L . The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3):035027.

[44] Urda P, Pérez J, Carabias E, et al. Design and testing of a steering damper for motorcycles based on a shear-thickening fluid[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(9): 095031.

[45] Laun, H. M . Rheology of extremely shear thickening polymer dispersionsa) (passively viscosity switching fluids) [J]. Journal of Rheology, 1991, 35(6):999-1034.

[46] Gürgen S, Sofuo lu M A. Integration of shear thickening fluid into cutting tools for improved turning operations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1146-1154.