

中国力学学会优秀博士学位论文奖推荐表

(2020 年度)

填表日期：2021-07-02

论文题目	软材料的穿刺力学、增韧机理和应用		
作者姓名	刘俊杰	获得学位所在单位	浙江大学
答辩日期	2020-05-09	获得学位日期	2020-06-30
二级学科	固体力学	论文涉及研究方向	软物质力学
导师	曲绍兴	导师研究方向	软物质力学
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	朱燕君	联系人E-mail	
联系人手机		是否获校优秀博士 论文	否

攻读博士学位期间及获得博士学位后一年内获得与博士学位论文有关的成果（包括学术论文、专著、获奖项目和专利项目，限填8项）

1.	Liu, J.J., Chen, Z., Liang, X.Y., Huang, X.Q., Mao, G.Y., Hong, W., Yu, H.H., Qu, S.X.*, Puncture mechanics of soft elastomeric membrane with large deformation by rigid cylindrical indenter, J. Mech. Phys. Solids, 2018, 112: 458-471.	5.	Liu, J.J., Mao, G.Y., Huang, X.Q., Zou, Z.N., Qu, S.X.*, Enhanced compressive sensing of dielectric elastomer sensor using a novel structure, J. Appl. Mech.-ASME, 2015, 82(10): 101004.
2.	Liu, J.J., Yang, C.H., Yin, T.H., Wang, Z.J., Qu, S.X., Suo, Z.G.*, Polyacrylamide hydrogel II. Elastic dissipater, J. Mech. Phys. Solids, 2019, 133: 103737.	6.	Liu, J.J.#, Mao, J.#, Yin, T.H.#, Zhong, D.M., Liu, X.J.*, Luo, Y.W.*, Qu, S.X.*, Electrically tunable fast and reversible structural coloration of two-dimensional photonic crystals, Smart Mater. Struct., 2019, 28(11): 115019.
3.	Liu, J.J., Qu, S.X., Suo, Z.G., Yang, W.*, Natl. Sci. Review, 2021, In press.	7.	Zhong, D.M.#, Liu, J.J.#, Xiang, Y.H., Yin, T.H., Hong, W., Yu, H.H., Qu, S.X.*, Effect of partition on the mechanical behaviors of soft adhesive layers, J. Appl. Mech.-ASME, 2019, 86(6): 061003.
4.	Yao, X.#, Liu, J.J.#, Yang, C.H.#, Yang, X.X., Wei, J.C., Xia, Y., Gong, X.Y., Suo, Z.G.*, Hydrogel paint, Adv. Mater., 2019, 31(39): 1903062.	8.	曲绍兴, 刘俊杰, 毛国勇, 黄晓强, 邹皖南. 压入式介电高弹体压力传感器: 中国, 2014108038261. 2014-12-22.

论文的主要创新点及学术影响:

该论文围绕弹性体和水凝胶这两类典型的聚合物软材料，开展了针对其破坏失效和应用的相关研究。主要创新点和学术影响有：1、建立了软膜穿刺破坏的力学模型，揭示了摩擦对于软膜穿刺破坏的影响机制，实验和理论表明减小摩擦更容易使软膜发生穿刺破坏。这一研究成果对调控软膜结构的穿刺破坏具有指导意义；2、获得了软材料断裂韧性的尺度相关性，发现了基于弹性能贡献的断裂韧性新机理：弹性耗散体，定量描述了弹性能对软材料断裂韧性的贡献。弹性耗散体使得软材料兼具高韧性、低滞回、和抗疲劳特性。3、创造性地将水凝胶涂层制备过程中所涉及的聚合、交联和粘接反应相分离，实现了水凝胶涂层的可漆化：水凝胶漆，使得水凝胶涂层的形成更加简单、环保、安全、高效。这一工作对于水凝胶涂层的产业化推广和应用具有重要价值。利用介电高弹体的面内扩张和面外变形实现了对二维光子晶体结构色的快速、可逆调控。该工作在柔性伪装皮肤等领域具有一定的应用前景。



推荐意见: (不超过300字)

该博士论文研究了软膜的穿刺破坏,揭示了摩擦对软膜穿刺力和穿刺位移的影响规律;研究了丙烯酸水凝胶的剥离破坏,提出了弹性耗散体增韧的机理,讨论了弹性能对软材料断裂韧性的贡献;提出了一种水凝胶涂层新策略:水凝胶漆,降低了水凝胶涂层的工业化应用门槛;实现了利用介电弹性体对二维光子晶体结构色的快速、可逆调控。该博士论文既涉及到固体力学基本理论、软材料力学专门知识,又涉及到固体力学实验,同时还是力学与化学、光学的学科交叉前沿领域。论文格式规范,条理清晰,成果丰富,创新性强,表明作者已掌握本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具备了独立从事科研工作的能力。推荐其申报力学学会优秀博士学位论文。

(推荐单位填写此栏)

声明:本单位承诺,所提供的推荐材料真实有效,愿意承担相应责任。如产生争议,保证积极调查处理。

学位评定委员会主席: _____

单位公章:

推荐单位负责人签字:

年 月 日

(中国力学学会理事推荐填写此栏)

声明:本人承诺,所提供的推荐材料真实有效,愿意承担相应责任。如产生争议,保证积极调查处理。

推荐人(签名):

电话:

电子邮箱:



《软材料的穿刺力学、增韧机理和应用》综合介绍材料

一、选题意义

1. 论文选题的理论意义及实用价值

软材料是一类具有“小刺激，大响应”特征的材料体系，包括了聚合物、表面活性剂、液晶、胶体颗粒等。聚合物类软材料作为软材料的重要组成部分，主要包括弹性体和水凝胶，具有“柔、软”的特性，即能在“小”的外力作用下，发生“大”变形。弹性体由高分子网络所组成，而亲水的高分子网络跟水的结合则形成了水凝胶。交联的高分子网络的熵弹性赋予了弹性体的可拉伸性，同时也使得水凝胶在高达90%以上含水量的情况下仍然能够保持固定的形状。该博士论文的研究对象为弹性体和水凝胶类聚合物软材料。

软材料薄膜（软膜）具有大的比表面积，易于在面内被拉伸，以及在气压、液压等作用下发生大的体积膨胀。软膜结构常见于可穿戴设备、软体机器人，充气/液型柔性器件（如柔性抓手）等应用中。穿刺破坏是软膜在外界尖锐物体的刺入下，由于局部大变形而引起的材料穿孔破坏，是软膜面临的主要破坏形式之一。发生穿刺破坏的软膜一般没有肉眼可见的初始裂纹，而是在穿刺部位经历了材料的大变形、裂纹的萌生以及快速扩展。软材料的穿刺现象在生产生活中也很常见，如蚊虫叮咬、抗穿刺的防护设备、皮下给药、手术穿刺设备及技术等。对软材料穿刺破坏规律和机理的研究，有助于人们在实际应用中更有效地避免或利用穿刺。

软材料的断裂韧性描述了材料抵抗裂纹扩展的能力。传统的软材料，特别是水凝胶，往往具有较低的断裂韧性（如果冻 $\sim 1\text{J}/\text{m}^2$ ），是软材料应用中的一个短板。软材料的强韧化设计以及对软材料强韧化的力学机理研究是近年来软材料领域的研究热点问题之一。软材料增韧的一般原理为联合软材料的弹性大变形以及由大变形所激发的不可逆的能量耗散。弹性大变形避免了软材料的塑性变形，同时能够激发裂纹尖端材料的能量耗散，增强材料的断裂韧性。典型的提高材料弹性大变形的策略为在聚合物网络中穿插高分子长链网络、在网络中同时引入化学和物理交联点、采用单分散长链聚合物网络等。典型的能量耗散机制包括了分子链或交联点的断裂或转化、软材料基底中填充物或纤维的断裂、填充物或纤维在拔出过程中与软材料基底的摩擦耗能等。但是，不可逆的能量耗散使得软材料的断裂韧性在周期性的疲



劳载荷下逐渐下降,使得材料不能抵抗疲劳断裂。基于新材料、新结构或新力学机理的软材料抗疲劳设计是未来软材料研究的前沿方向之一。

软材料在国民经济、医疗健康、日常生活等各个方面都发挥着不可替代的作用。如弹性体为轮胎、弹性密封圈、弹性纤维布料等的主要原料。而生活中常见的食品(如豆腐、果冻)、纸尿裤中的吸水材料、退热贴、化妆品贴剂、生物组织(如大脑、肌肉)等都属于水凝胶材料。合成水凝胶则在1960年首次发明,用于制作隐形眼镜。近年来新兴的智能软材料是以电活性聚合物(介电高弹体、离子聚合物)和刺激响应型凝胶等为代表的活性软材料,该类材料的特点是在外界物理、化学等刺激作用下产生形变响应并带来相应功能,通常具有质量轻、价格低、响应快、变形大等优点。智能软材料在可穿戴设备、新能源、植/介入医疗器械、人类主动健康、软体机器人等领域有着极大的应用前景。

该博士论文以弹性体和水凝胶类聚合物软材料为研究对象,从软膜结构的穿刺破坏、软材料的增韧机理、以及软材料的应用三个方面进行了研究,具有理论意义及实用价值。

2. 对本学科及相关领域的综述与总结

2.1 软膜的穿刺

已有的对于软膜穿刺破坏的相关研究,常常集中于探究软膜在穿刺下的局部大变形,以及控制软膜穿刺破坏的准则。其中,在对软膜的穿刺大变形进行力学建模时,人们往往会引入穿刺物与软膜之间的无摩擦假设,从而使力学模型变得更加简单。软膜的穿刺准则主要有基于能量的全局失效准则(global failure criteria)和基于形变的最大局部变形准则(maximum local deformation criteria)。但这些穿刺准则多被用于软膜穿刺的力学模型中来预测软膜的穿刺破坏,而对这些穿刺准则在实验上的验证还并不充分。软膜在发生穿刺破坏时的局部大变形是由于穿刺物对软膜的局部挤压所造成的。而穿刺物与软膜之间不同的摩擦关系,会直接影响跟穿刺物直接接触的软膜的局部大变形,因而会导致不同的穿刺结果。但在已有的研究中,人们并没有考虑穿刺物和软膜之间的摩擦对于软膜穿刺破坏的影响。对于摩擦如何影响软膜穿刺破坏的相关研究仍是空白。

2.2 软材料的断裂韧性



早期, Rivlin 和 Thomas 等人以“橡胶的破裂”(“Rupture of rubber”)为题发表了一系列针对弹性体断裂的工作。他们采用了裂纹扩展的 Griffith 能量准则, 提出了裂纹在橡胶弹性体中的扩展由材料相关的撕裂能 (Tearing energy) 所控制 (区别于 Griffith 断裂准则中的表面能)。Lake 和 Thomas 提出了 Lake-Thomas 模型用于描述橡胶弹性体在周期载荷下的疲劳断裂韧性。他们认为疲劳断裂韧性起源于将穿过裂纹面的单层分子链拉断所需要的能量。2003 年, Gong 等通过在交联密度高的水凝胶网络中穿插交联密度低的第二层网络, 发明了双网络韧性水凝胶, 显著提高了水凝胶材料的断裂韧性。长链的网络具有较高的可拉伸性, 保证了材料在大变形下不至于被拉断, 并且当载荷撤去时使材料恢复到初始的未变形状态。而短链网络在大变形下的断裂会耗散大量的能量, 使材料具有高滞回 (High hysteresis) 和高的断裂韧性。但是, 短链网络断裂的不可逆性或有限的可恢复性会导致材料的断裂韧性随着周期加载而降低, 不能抵抗疲劳断裂破坏。

最近, 有研究者将两种软材料进行复合, 同时实现了材料的高韧性、低滞回以及抗疲劳破坏。这类软材料包含了两种组分: 模量较高的纤维以及模量较低的基底。当裂纹在该复合材料中传播到达纤维时, 基底会通过剪切变形, 将裂纹前端的集中应力分散在纤维中, 导致纤维中存储了大量的弹性能。当裂纹扩展导致纤维发生断裂时, 存储在其中的弹性能释放, 贡献材料的断裂韧性。基底和纤维的低滞回使得复合材料整体具有低滞回。基底和纤维的断裂韧性都约为 $100\text{J}/\text{m}^2$, 但复合材料的断裂韧性却高达 $10000\text{J}/\text{m}^2$ 。这一工作预示了一种新的软材料增韧机理, 即弹性能的释放也能贡献软材料断裂韧性。

2.3 介电高弹体

介电高弹体是一类可以实现力电转换的活性材料。在外界电场刺激下, 其可以发生电场方向上的收缩和垂直于电场方向上的扩张, 实现电驱动下的变形。反之, 它可以将受到的变形载荷转换为电能, 实现机械能向电能的转化。介电高弹体具有响应快速、驱动变形大、驱动无噪音等优点, 在软体机器人、软体驱动器、柔性传感器、发电器等领域中有重要的应用。

2.4 水凝胶



水凝胶为亲水的高分子网络和水分子的集合体，其含水量可以高达 90%以上，且其断裂韧性可以高达 10000 J/m^2 以上。水凝胶是一种生物相容性很好的材料，许多生物组织，如肌肉、大脑、软骨等，以及植物的木质部和韧皮部，都可以看成是水凝胶。水凝胶有着极其广泛的应用。比如生物相容性良好的水凝胶可用于组织工程、可植入医疗器械涂层材料、隐形眼镜、人工半月板、人体填充物等；刺激响应型水凝胶可以用于柔性驱动器、传感器、智能光学器件等；含有自由移动离子的水凝胶则具有离子导电性，与生物神经类似，可用于水凝胶离子器件，如人工神经、柔性触控板、柔性传感器等。

2.5 水凝胶涂层

水凝胶可以通过涂层的形式，跟其他材料或器件相结合，从而将水凝胶优异的性能，如低摩擦、良好的生物相容性、抗生物粘附、离子导电性、抗菌，载药等，集成到目标基底或器件上，从而发展新功能或新应用。如医用血管支架上的水凝胶涂层可以实现载药、医用镍钛导丝上的水凝胶涂层可以将裸丝的摩擦系数降低一个数量级、低模量的水凝胶涂层提高了植入医疗器械与生物组织在模量上的匹配性、刺激响应水凝胶涂层和硅片相结合实现了可对多种化学物质响应的光学传感系统、亲水的水凝胶涂层具有抵抗油污污染的能力、导电的水凝胶涂层在提高生物电极和组织的生物相容性的同时，还降低了电极和听觉神经之间电信号传递的阻抗。然而，传统的水凝胶涂层制备中，聚合、交联和表面粘接这三个过程同时发生且难以分离，从而引入了合成毒性大、易产生环境污染和反应条件苛刻等不利因素，限制了水凝胶涂层的大规模、工业化应用。

二、成果创新性

1. 论文在理论和方法上的创新性

该博士论文围绕弹性体和水凝胶这两类典型的聚合物软材料，开展了针对其破坏失效和应用的相关研究，主要创新性成果如下：

1. 建立了软膜穿刺破坏的力学模型，揭示了摩擦对软膜穿刺破坏的影响机制，实验和理论都表明减小摩擦更容易使软膜发生穿刺破坏。实验中观察到摩擦会显著地影响软膜的穿刺力、位移和穿刺破坏形貌，建立了基于连续介质力学的穿刺模型来描述软膜在钢针穿刺下的



大变形，并通过右柯西-格林变形张量的第一不变量来预测软膜的穿刺破坏。发现摩擦会显著地改变跟钢针接触的软膜的变形状态，从而导致了不同的穿刺力、位移、以及软膜的破坏形貌。该研究成果发表在固体力学旗舰期刊 *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 上 (<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.01.002>)。

2. 提出了弹性耗散体的概念，获得了弹性能对软材料断裂韧性的贡献。通过实验剥离不同厚度的丙烯酰胺水凝胶，得到了剥离过程中的能量释放率 G 和水凝胶厚度 h 之间的关系，并基于此关系发展了推广 Lake-Thomas 模型。在经典的 Lake-Thomas 模型中，穿过裂纹面的单层分子链为弹性耗散体，其弹性能的释放贡献了材料的断裂韧性。在丙烯酰胺水凝胶的剥离过程中，裂纹扩展区中的材料为弹性耗散体，裂纹扩展所导致的弹性耗散体中的能量释放贡献了丙烯酰胺水凝胶的断裂韧性。利用弹性耗散体增韧机理可以设计具有高韧性、高疲劳断裂阈值和低滞回的软材料。该研究成果发表在固体力学旗舰期刊 *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 上 (<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2019.103737>)。

3. 发展了一种新的水凝胶涂层方法：水凝胶漆。这一方法将水凝胶涂层制备过程中所涉及到的聚合、交联和粘接反应相分离，实现了水凝胶涂层的可漆化，从而使得水凝胶涂层可以更加方便、快捷、安全、高效地在具有任意形状，以及多种材质的目标基底上形成。该研究成果发表在材料学领域旗舰期刊 *Advanced Materials* 上 (<https://doi.org/10.1002/adma.201903062>)，并应邀在综合类期刊 *National Science Review* 上发表综述 (<https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa254>)

4. 利用介电高弹体驱动器的两种电驱动变形模式：面内扩张和面外变形，实现了对二维光子晶体结构色快速、可逆的调控。面内扩张改变了二维光子晶体的晶格距离，而面外变形改变了光线在光子晶体中的衍射角度。这种电场响应型二维光子晶体在柔性伪装皮肤、智能光学器件等领域具有一定的应用前景。该研究成果发表在智能材料和结构领域知名期刊 *Smart Materials and Structures* 上 (<https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab41cd>)。

2. 创造性成果及效益

1. 揭示了摩擦对软膜结构穿刺破坏的影响规律。这一研究成果对调控软膜结构的穿刺破坏具有指导意义。



2. 提出了弹性耗散体增韧的机理。利用弹性耗散体增韧的软材料兼具高韧性、低滞回和抗疲劳特性。

3. 实现了水凝胶涂层的“可漆化”，这一研究成果积极推动了水凝胶涂层的产业化应用。基于水凝胶漆的水凝胶涂层技术目前已被苏州“凝智新材料科技发展公司”采用，用于开发在医用导丝上的润滑涂层。利用水凝胶漆方法所发展的可水下粘接水凝胶涂层实现了不可溶胀的柔性电子器件与处于溶胀平衡的水凝胶透镜的水下原位粘接，从而避免了水凝胶透镜的二次溶胀对透镜整体构型的破坏。

4. 利用介电高弹体驱动的二维光子晶体结构色的快速可逆调控在柔性伪装皮肤、智能光学器件等领域具有一定的应用前景。

三、综合能力

该博士学位论文围绕着弹性体和水凝胶这两类典型的聚合物软材料，开展了针对其破坏失效和应用的相关研究。具体研究了软膜的穿刺破坏，揭示了摩擦对软膜临界穿刺力和穿刺位移的影响规律；研究了丙烯酰胺水凝胶的剥离破坏，提出了弹性耗散体增韧的机理，讨论了弹性能对软材料断裂韧性的贡献；提出了一种水凝胶涂层新策略：水凝胶漆，降低了水凝胶涂层的工业化应用门槛；实现了利用介电弹性体对二维光子晶体结构色的快速、可逆调控。基于该博士学位论文的工作已经以第一作者发表 Jmps 文章 2 篇、NSR 1 篇、JAM 1 篇，以共同第一作者发表 AM 1 篇、JAM 1 篇、SMS 1 篇。该博士学位论文既涉及到固体力学基本理论、软材料力学专门知识，又涉及到固体力学实验，同时还是力学与化学、光学的学科交叉前沿领域。该论文格式规范，条理清晰，成果丰富，创新性强，表明作者已掌握本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识，具备了独立从事科研工作的能力。推荐其申报力学学会优秀博士学位论文。



中国力学优秀博士论文奖推荐表附件材料

- 1、博士学位论文（共1个附件）
 - (1) 博士学位论文.pdf
- 2、学位证书（共1个附件）
 - (1) 学位证书.jpg
- 3、CSTAM会员证（共0个附件）
- 4、获得成果栏中学术论文的刊物封面、目录及论文首页（共7个附件）
 - (1) 发表论文.pdf
 - (2) 发表论文.pdf
 - (3) 发表论文.pdf
 - (4) 发表论文.pdf
 - (5) 发表论文.pdf
 - (6) 发表论文.pdf
 - (7) 发表论文.pdf
- 5、专著封面和版权页（共0个附件）
- 6、获奖证书及专利证书（共1个附件）
 - (1) 发明专利证书.pdf
- 7、其他有助于评选的材料（共0个附件）



中国力学学会优秀博士学位论文



20200098090001021954