

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	超高分子量聚乙烯热-力耦合循环变形行为及其本构模型研究		
作者姓名	陈开卷	获得学位所在单位	西南交通大学
答辩日期	2019-07-03	获得学位日期	2019-09-25
二级学科	固体力学	论文涉及研究方向	循环本构关系
导师	康国政 H. Jerry Qi	导师研究方向	固体力学
作者手机		E-mail	
CSTAM会员	否	会员号	
推荐单位/理事 联系人	蒋晗	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.	Chen, K., Zhang, L., Kuang, X., Li, V., Lei, M., Kang, G., Wang, Z., Qi, H. J., <i>Advanced Functional Materials</i> , 2019, 29, 1903568.	5.	Chen, K., Kang, G., Lu, F., Chen, J., Jiang, H., <i>Polymer Testing</i> , 2016, 56, 19-28.
2.	Chen, K., Kang, G., Yu, C., Jiang, H., <i>Mechanics of Materials</i> , 2019, 133, 37-54.	6.	Chen, K., Kuang, X., Li, V., Kang, G., & Qi, H. J., <i>Soft Matter</i> , 2018, 14, 1879-1886.
3.	Chen, K., Kang, G., Yu, C., Jiang, H., Qi, H. J., <i>Mechanics of Materials</i> , 2017, 112, 76-87	7.	Chen, K., Kang, G., Lu, F., Xu, J., Jiang, H., <i>Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures</i> , 2016, 39, 839-849.
4.	Chen, K., Kang, G., Yu, C., Lu, F., & Jiang, H., <i>Journal of Applied Mechanics</i> , 2016, 83, 1-10	8.	Chen, K., Kang, G., Lu, F., & Jiang, H., <i>Journal of Polymer Research</i> , 2015, 22, 1-9.

论文的主要创新点及学术影响:

- 1、厘清了加载条件和结晶度对超高分子量聚乙烯的循环软/硬化特性以及棘轮行为的影响，并揭示了热耗散形成机制及温升与循环变形的耦合关系。
 - 2、提出了同时考虑粘弹性、蠕变塑性及循环粘塑性的本构模型，解决了现有模型无法合理预测复杂加载条件下超高分子量聚乙烯循环变形特性的局限性。
 - 3、建立了超高分子量聚乙烯热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型，该模型实现了对不同结晶度超高分子量聚乙烯的热-力耦合非比例多轴循环变形行为的准确描述。
- 研究成果已经得到了国内外学者的关注，以第一作者身份发表论文被SCI他引71次，共同作者SCI他引294次，包括 Ali Fatemi, Frank Walther, A. D. Drozdov, Jaan-Willem Simon, 陈旭教授等。



20200095090001006463

推荐意见: (不超过300字)

陈开卷同志的博士学位论文以实验结合理论,揭示了半晶态聚合物超高分子量聚乙烯的循环软硬化特性及棘轮行为,建立了考虑结晶度影响的热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型,具有很好的理论和应用价值。该博士论文提出并解决了现有半晶态热性聚合物本构理论的局限性,也为超高分子量聚乙烯器件的结构分析和安全评估提供了理论支持。在攻读博士学位期间发表了8篇SCI(一区4篇、二区2篇,中科院分区),产生了较好的国内外学术影响。此外,申请人获得西南交大学生个人最高荣誉“踔实扬华”奖章、西南交大优秀博士论文培育基金等。因此,本单位强烈推荐其参加“中国力学优秀博士学位论文”的评选。

(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: _____



博士学位论文综合介绍材料

推荐单位需针对与参评博士学位论文内容直接相关的情况进行介绍，可自由撰写对参评有益的内容，也可以参考以下几方面进行介绍。

一、选题意义：

1. 论文选题的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

二、成果创新性：

1. 论文在理论或方法上的创新性
2. 创造性成果及效益

三、综合能力：

1. 论文体现的理论基础与专门知识
2. 论文体现作者独立从事科学研究的能力



超高分子量聚乙烯热-力耦合循环变形行为及其本构模型研究

作者 陈开卷 导师 康国政 H. Jerry Qi

一、选题意义

1. 论文选题的理论意义及实用价值

超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 是一种半晶态热塑性聚合物材料, 由于其具有良好的力学性能 (如比强度高、摩擦系数低、韧性好等) 和生物相容性而广泛应用于航空航天、生物医用, 机械工程等领域。这些具有一定承载功能的结构构件和生物医用人體植入件在实际服役过程中大都要承受循环荷载的作用, 循环加载过程中非弹性变形的累积会导致结构构件尺寸超标而不能正常服役或疲劳寿命的减少, 这是在实际结构构件及医用植入件的设计中需要考虑的重要问题。例如, 超高分子量聚乙烯人工关节植入件会由于长期承受循环载荷而导致疲劳失效, 进而给患者带来更换人工关节手术的痛楚。为此, 开展 UHMWPE 的循环变形行为研究对于优化该类构件的设计以及提高其使用寿命和服役可靠性来说是至关重要的。

建立合理描述 UHMWPE 循环变形行为的本构模型是结构疲劳和可靠性分析中一个极其重要的基础性研究工作。然而, 已有的实验研究表明聚合物材料的循环变形同时具有复杂的非线性粘弹性和粘塑性变形特征, 相应的本构模型构建是一个非常棘手的难题。目前, 聚合物材料 (包括 UHMWPE) 本构理论的研究主要局限于描述其简单加载下的变形行为 (如单调拉伸/压缩、蠕变及松弛等), 较少考虑循环变形行为, 特别是非比例多轴循环变形行为。因此, 开展 UHMWPE 的循环变形行为及其本构关系研究可以满足其工程应用领域的迫切需求。另一方面, 由于 UHMWPE 具有较强的粘性特性, 在加载幅值较大、加载速率较快的循环变形过程中会产生显著的热-力耦合行为; 此外, 已有的研究表明结晶度大小对其力学性能有着显著的影响, 势必会对其热-力耦合循环变形行为产生影响。因此, 研究 UHMWPE 循环变形热耗散形成机制、内部热效应与外部热对流之间的关系以及结晶度对循环变形行为的影响, 进而建立其热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型, 是对现有粘弹-粘塑性本构模型的拓展, 具有重要的学术价值和科学意义。

2. 对本学科及相关领域的综述与总结

自 20 世纪 90 年代开始, 国内外学者对聚合物材料开展了广泛的循环变形实验和理论研究。揭示了聚合物材料循环变形过程中的平均应力松弛效、循环软化特性、时间相关棘轮行为、以及环境温度、湿度、老化时间和循环变形温升对变形行为的影响。这些聚合物材料循环变形行为所取得的进展, 不仅提高了人们对聚合物材料循环变形行为的认识和理论描述



水平，也促进了该类材料的工程应用，但是，已有实验和理论研究仍然存在以下不足：

- 已有的聚合物材料循环变形行为的实验研究大都仅关注单轴加载情形，对非比例多轴循环变形行为研究鲜见报道；同时结晶度对单轴和非比例多轴棘轮行为影响的研究还未见报道。
- 聚合物材料热-力耦合循环变形行为的实验研究还不够系统，对于循环变形过程中的内部变形生热机制及内部热效应与循环变形之间的交互作用研究不够全面。此外，结晶度对循环变形生热的影响也未见相关文献报道。
- 已有的本构模型主要用于描述聚合物材料的蠕变、松弛或者屈服之后的大变形行为，描述聚合物材料循环变形行为的本构模型较少，且没有同时考虑粘弹性和粘塑性这两种变形机制。此外，考虑非比例多轴加载路径影响的本构模型极少，且未见考虑结晶度影响的粘弹-粘塑性本构模型的报道。
- 考虑外部热环境、内部热效应及其与循环变形耦合作用的热-力耦合本构理论框架还需进一步完善，考虑结晶度影响的热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型仍有待建立。

二、成果创新性

创新点一、对 UHMWPE 开展了系统的循环变形实验，讨论了加载条件和结晶度对 UHMWPE 的循环软/硬化特性以及棘轮行为的影响，揭示了循环变形热耗散形成机制及循环变形温升与变形之间的耦合关系。

主要创新成果为：

- 1) UHMWPE 在循环变形温升较低的情形下，表现出循环稳定特性；在变形温升较为显著时，表现出循环软化特性；结晶度的改变不影响材料的循环软/硬化特性，但是结晶度越高，循环软化效应越明显。
- 2) UHMWPE 在单轴非对称应力控制循环实验中产生明显的棘轮行为，且棘轮应变由可回复的粘弹性应变和不可回复的粘塑性应变两部分组成，但是棘轮变形过程中材料的温升很不明显。UHMWPE 的棘轮行为具有较强的时间相关特性，峰值保持时间越长、加载速率越低、谷值应力时间保持越短时棘轮行为越显著，且不可回复的粘塑性应变值也越大。
- 3) UHMWPE 的非比例多轴棘轮行为受加载路径的影响，非比例多轴棘轮应变均大于具有相同等效应力水平的单轴棘轮应变值。路径加载历史对 UHMWPE 的多轴棘轮行为影响不明显，但是应力加载历史对 UHMWPE 的多轴棘轮行为有显著的影响。
- 4) 结晶度对 UHMWPE 的棘轮行为有显著的影响，结晶度越高，棘轮应变及不可回复的粘塑性应变都越小。结晶度还会影响 UHMWPE 棘轮行为对应力水平和加载速率的依赖性，但是结晶度的改变不影响 UHMWPE 棘轮行为的加载路径依赖性。此外，在循环变形较小（应变小于 8%）情况下，循环变形过程中的结晶度演化可以忽略



不计。

- 5) UHMWPE 的棘轮行为依赖于环境温度的高低, 环境温度越高棘轮应变中可回复粘弹性应变比例越大, 不可回复粘塑性应变比例越小, 但是环境温度的改变不影响非比例多轴棘轮行为的加载路径依赖性。

该部分工作对应于该博士论文的第 2 章, 发表 SCI 论文 3 篇:

[1] **Chen Kaijuan**, Kang GuoZheng, Lu Fucong, Chen Jia, Jiang Han, **Polymer Testing**. 2016; 56: 19-28. (SCI 检索, SCI 他引 7 次)

[2] **Chen Kaijuan**, Kang GuoZheng, Lu Fucong, Xu Jianhang, Jiang Han, **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**. 2016; 39(7): 839-49. (SCI 检索, SCI 他引 3 次)

[3] **Chen Kaijuan**, Kang GuoZheng, Lu Fucong, Jiang Han, **Journal of Polymer Research**. 2015; 22(11): 1-9. (SCI 检索, SCI 他引 4 次)

上述成果被 SCI 严格他引 14 次 (包括美国孟菲斯大学 **Ali Fatemi** 教授、新加坡南洋理工大学周琨教授、德国多特蒙德工业大学 **Frank Walther** 教授、意大利博洛尼亚大学 **Giangiaco Minak** 教授), 得到了国际同行的正面肯定 (见附件中获得成果栏 SCI 检索证明及 SCI 他人引用证明, 以及第三方代表性评价 1-4)。

创新点二、构建了考虑粘弹性、循环粘塑性和蠕变塑性共同作用的粘弹-粘塑性本构模型, 并在该模型基础上引入与加载路径和与结晶度相关的演化方程, 这是对现有粘弹-粘塑性本构模型的重要完善。新发展的模型对不同结晶度的 UHMWPE 单轴及非比例多轴棘轮行为均给出了较为合理的描述和预测。

主要创新成果为:

- 1) 构建了适用于描述半晶态聚合物 UHMWPE 循环变形行为的粘弹-粘塑性本构模型。粘弹性部分采用改进的 Schapery 非线性粘弹性模型来表征; 而粘塑性部分则采用改进的 Armstrong-Frederick 随动硬化模型和幂律形式的蠕变模型来共同描述; 同时, 所提出的粘弹-粘塑性模型中还引入了与加载路径相关的非比例度及与结晶度相关的演化方程; 此外, 还给出了一套确定材料参数的方法。
- 2) 所发展的粘弹-粘塑性本构模型能对不同结晶度的 UHMWPE 的多级拉伸-卸载-回复、蠕变-回复、单轴和多轴棘轮及棘轮实验结束之后粘弹性变形回复过程进行较好的模拟和预测。

该部分工作对应于该博士论文第 3 章, 发表 SCI 论文 2 篇:

[1] **Chen Kaijuan**, Kang GuoZheng, Yu Chao, Jiang Han, Qi H.Jerry, **Mechanics of Materials**. 2017; 112: 76-87. (SCI 检索, SCI 他引 7 次)

[2] **Chen Kaijuan**, Kang GuoZheng, Yu Chao, Lu Fucong, Jiang Han, **Journal of Applied**



Mechanics. 2016; 83(10): 101003. (SCI 检索, SCI 他引 8 次)

上述成果已被 SCI 严格他引 15 次 (包括丹麦奥尔堡大学 A. D. Drozdov 教授、清华大学刘彬教授、天津大学陈旭教授、重庆大学胡宁教授等), 得到了国内外同行的广泛关注和认可(见附件中获得成果栏 SCI 检索证明及 SCI 他人引用证明, 以及第三方代表性评价 5-8)。

创新点三、考虑了循环变形热耗散形成机制, 温度相关性以及内部热效应与外部热对流之间的关系, 建立了 UHMWPE 的热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型。所构建的热-力耦合模型能对不同结晶度 UHMWPE 的热-力耦合循环变形行为及其温度演化进行合理的描述和预测。

主要创新成果为:

- 1) 推导了粘弹性和粘塑性这两种变形机制的热力学驱动力、循环变形过程中的内部热生成、温度场的平衡方程以及本构方程的限制条件; 构建了求解 UHMWPE 材料热-力耦合循环变形行为的封闭方程组; 并在上述粘弹-粘塑性本构模型的基础上, 进一步给定了温度相关的演化方程以及变形生热与外部热交换之间的关系, 构建了适用于不同结晶度 UHMWPE 的热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型。
- 2) 所提出的热-力耦合粘弹-粘塑性本构模型对不同温度下的棘轮行为及循环结束后粘弹性应变的回复进行了合理的预测; 同时也能合理地模拟不同结晶度下 UHMWPE 的单轴应变控制循环变形行为及其变形温升的演化。

该部分工作对应于该博士论文第 4 章, 发表 SCI 论文 1 篇:

[1] **Chen Kaijuan, Kang GuoZheng, Yu Chao, Jiang Han, Mechanics of Materials. 2019; 133: 37-54. (SCI 检索, SCI 他引 5 次)**

上述成果已被 SCI 严格他引 5 次 (包括德国亚琛工业大学 Jaan-Willem Simon 教授、意大利比萨大学 Lorenza Mattei 教授、芬兰坦佩雷大学 Sami Holopainen 研究员), 已逐渐引起了国际同行的关注 (见附件中获得成果栏 SCI 检索证明及 SCI 他人引用证明, 以及第三方代表性评价 9-11)。

三、综合能力

1. 论文体现的理论基础与专门知识

该博士论文研究内容为固体力学和材料科学交叉前沿问题, 同时对超高分子量聚乙烯人工关节的结构分析和安全评估提供了理论支持。该论文难度大, 工作量也很大, 创新性成果突出, 反映作者掌握了固体力学宽广坚实的理论基础和系统深入的专门知识。

2. 论文体现作者独立从事科学研究的能力

申请者在攻读博士学位期间以第一作者身份发表了 8 篇 SCI 期刊论文, 其中包括 4 篇 1 区和 2 篇 2 区论文 (SCI 中科院分区), 8 篇论文被 SCI 严格他引 71 次。这表明申请者已经具备很强的独立从事科学研究的能力。



同时，申请者不仅具有较强的动手能力还具有扎实的理论基础，在博士工作期间和课题组其他成员（甚至是校外研究人员）建立了良好的合作关系，合作发表 SCI 论文 14 篇（SCI 严格他引 294 次,高被引文章 1 篇）。这充分体现了申请者具备了良好的团队协作和对外合作精神。

此外，申请者于 2016.11-2018.05 在美国佐治亚理工大学进行联合培养期间还开展了 3D 打印功能性聚合物材料的研究，提出了一种新的简单的多材料打印方法，还将该打印方法与摩擦纳米发电机进行有机的结合，并应用于人体运动的步态检测，这为功能性可穿戴电子器件的繁荣发展开辟另一路径。该研究成果以第一作者身份发表在功能材料旗舰期刊 **Advanced Functional Materials (IF: 16.836)**。这充分体现了申请者具备了跨学科、跨领域研究的能力。

申请者在获得博士学位后，在新加坡南洋理工大学（2019 年 QS 世界排名第 12）做博士后，主要研究多射流熔融 3D 打印聚合物材料的过程模拟，研究领域不断延伸和拓展，具有非常良好的学术发展潜力。

中国力学学会优秀博士学位论文



中国力学优秀博士学位论文推荐表附件材料

1、博士学位论文（共2个附件）

（1）博士论文_part1.pdf

（2）博士论文_part2.pdf

2、学位证书（共1个附件）

（1）博士学位证书.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20个附件）

（1）AFM_2019.pdf

（2）MOM_2019.pdf

（3）MOM_2017.pdf

（4）JAM_2016.pdf

（5）PT_2016.pdf

（6）Soft Matter_2018.pdf

（7）FFEMS_2016.pdf

（8）JPR_2015.pdf

（9）第三方代表性评价1.pdf

（10）第三方代表性评价2.pdf

（11）第三方代表性评价3.pdf

（12）第三方代表性评价4.pdf

（13）第三方代表性评价5.pdf

（14）第三方代表性评价6.pdf

（15）第三方代表性评价7.pdf

（16）第三方代表性评价8.pdf

（17）第三方代表性评价9.pdf

（18）第三方代表性评价10.pdf

（19）第三方代表性评价11.pdf

（20）SCI检索证明及SCI他人引用证明.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9个附件）

（1）西南交大埃实扬华奖章.pdf

（2）唐立新奖学金.pdf

（3）孙翔奖学金.pdf

（4）西南交通大学拔尖创新人才培养资格.pdf

（5）研究生国家奖学金.pdf

（6）孙训方奖学金.pdf

（7）2019年全国力学博士生论坛_优秀报告奖.pdf

（8）西南交大优秀博士论文培育基金.pdf

（9）国家发明专利.pdf

7、其他有助于评选的材料（共4个附件）

（1）合作文章part1.pdf

（2）合作文章part2.pdf

（3）合作文章SCI检索证明及SCI他人引用证明.pdf

（4）新加坡南洋理工大学博士后工作证明.pdf

