**撕裂的模拟——《**AnisoMPM: Animating Anisotropic Damage Mechanics》

断裂伴随着我们的日常生活，但并不是所有的材料都以同样的方式断裂;这种各向异性的出现是由于底层纤维结构的存在，支配材料的失效方向的偏好。我们随处可见这种材料各向异性的例子:牛排中坚固、有弹性的纤维会影响肉的切割和撕裂的方向，而一块多汁的五花肉块则有一层一层地剥落成薄片。掰开奶酪条是玩弄食物的一个有趣的借口，但其潜在的纤维状结构同时也揭示了Mozzarella奶酪的独特之处；掰开一片橙子，当水晶般的果囊分离时，它展现出一个放射状的结构。

众所周知，断裂是一个难的臭名昭著的现象，而材料的各向异性进一步让这个问题变的更加复杂。在计算机图形学中，动态各向异性断裂动画需要大规模拓扑变形方法、跟踪分支和演化裂纹前沿的鲁棒方案，以及编码和包含材料各向异性的可推广方法。已经有许多方法在图形中动画各向同性断裂，每一个都有不同程度的成功，但该文只关注那些寻求模型的断裂的基础物理。这些基于物理的方法已经使用了许多离散化方法:有限元方法(fem)为各向同性脆性和韧性断裂铺平了道路，自1999年Hodgins等人以来已经有了许多探索；近年来，边界元方法在脆性断裂问题上取得了很大的成功；最后，无网格方法在材料效果(如断裂)方面越来越受欢迎。不幸的是，像FEM和BEM这样的网格划分方法需要复杂且计算密集的网格划分和节点管理程序来表示演化的裂纹前沿，其计算代价是巨大的。

此外，现有的各向异性断裂动画方法模拟能力极其有限:Pfaff等人[2014]使用有限元方法实现薄板的各向异性断裂效果，但依赖于密集的网格处理，并且缺乏一种方法用于体积材料；Hahn和Wojtan在2015年通过空间修改材料参数，提出了具有各向异性模式的脆性断裂，但边界元法缺乏韧性断裂，该方法还需要用户明确定义材料各向异性; 最近，Schrek等人[2020]提出了基于材料点法(MPM)的模拟各向异性材料由宏观晶粒组成，通过将各向异性问题映射到各向同性空间进行模拟，虽然这是一个令人兴奋的无网格断裂新方向，它更侧重于各向异性颗粒流动，而不是寻求模型损伤。然而，基于这一成功，文章认为材料点方法(MPM) [Sulsky等人，1995]为动画各向异性断裂提供了一种非常强大的方法，因为它对任意大的拓扑变形的自然支持，其内在的碰撞处理，以及不断增长的成功动画物理效果展示。

由于网格方法与断裂力学的自然匹配，目前大多数断裂图形研究方法都集中在断裂力学(FM)上，但这需要对裂纹拓扑进行显式建模，这将带来无数的计算挑战。相反，文章另辟蹊径，建议将重点放在连续损伤力学(CDM)上，其特点是采用涂抹裂纹方法来模拟裂。特别地，裂纹被表示为损伤变量演化的连续场，而材料在材料空间中仍被认为是完整的。在世界空间中，材料在损伤变量的基础上被削弱，以至于允许分离(一种称为弹性退化的方法)。近年来，CDM与MPM相结合的研究主要集中在一种非局部CDM技术上，该技术利用变分相场方法解决扩散裂纹问题，使各向同性断裂具有动画效果。尽管这种方法已经扩展到包含各向异性，但这需要引入高阶损伤演化项；文章认为这对于模拟各向异性断裂在图形学中过于复杂。相反，该文提出了一种非局部CDM几何方法来探索扩散裂纹问题，其根源是由裂纹引起的材料不连续的Γ-convergence正则化。这一基础理论导致了局部裂纹密度函数的推导，在力学模拟各向异性断裂方面取得了巨大的成功，因此，文章发现它是求解各向异性MPM断裂的关键工具。

在力学中，有许多方法可以用一种编码材料各向异性的方法来建模损伤，包括上述的高阶相场方法。然而，文章转而关注其提出的一种将各向异性添加到实验的几何损伤模型中的简单且高度可推广的方法:结构张量。结构张量与这种几何断裂方法相结合，在模拟准静态各向异性材料破坏方面取得了巨大的成功，因此，文章将这一力学理论用于AnisoMPM(这篇文章提出的方法)。此外，回想一下，在CDM中，文章将裂缝表示为材料空间中的损伤梯度，这表现为世界空间中的真实间断。然而，像CD-MPM这样的方法在表示这些世界空间裂缝时遇到了很大的困难，因为结果是基于粒子的。文章通过采用最近发展起来的MPM网格划分算法来精细地模拟由AnisoMPM产生的裂缝来缓解这种担忧。图形学中的许多工作都试图以各种方式建模各向异性弹性响应，但该文最受启发的是基于qr -分解的方法，因为它们的鲁棒性和速度。文章调整现有的本构模型，以确保模拟保持所有所需的品质，如反演安全性和鲁棒性，但另外添加了与各向异性相关的项，使实验能够成功地建模各向同性、横向各向同性和正交各向异性。这种方法也为弹性退化提供了一个独特的解法。特别地，文章的超弹性的附加分解成一个张力组件和一个压缩组件允许选择性的退化张力弹性，允许材料分离时，损坏。这种弹性损伤耦合是各向异性断裂的关键，它通过交错积分方案来实现，在该方案中，损伤演化，然后用于计算网格力以更新网格速度。该文还提出了一种正交和互斥的方法来建模各向异性弹性响应:方向不可拓性。对于需要极端刚度的材料，由于CFL条件需要非常小的时间步长，仅依靠本构模型来增强刚度是计算效率低下的。相反，文章引入了一个无锁硬约束的不可扩展求解器，作为硬约束网格速度求解器集成到AnisoMPM中，而不是通过本构模型。

文章的核心贡献一语言之就是开发了AnisoMPM，一个鲁棒且一般化的物质点法用于各种有向材料的模拟，以此来展现出各种各样的断裂现象。该文还使用了非局部CDM几何方法并辅之与结构张量来描述材料的各项异性。并将其整合入显式以及隐式的求解流水线中，应用起来灵活高效。不仅如此，文章还提供了一系列直观的接口与艺术家，大大的提高了算法的实用性，对视觉特效的开发展现出巨大的潜力。

作为AnisoMPM的一部分，文章还采用了基于QR-分解的超弹性模型，不仅达到了描述材料各向异性的效果，而且方便可逆，相比于SVD分解方法更加易于实现，并且保持了简单易实现的特质。然而，该模型缺乏了处理极端刚性纤维的能力，文章提出了一个新的Galerkin弱形式用于模拟材料的不可延展性，该方法不仅能够达到locking-free的效果，并且能够方便的耦合入断裂模拟中。