

数值仿真提升天然气管道的压扁阻断标准

为了降低天然气管道的日常维护难度，美国燃气技术研究院 (GTI) 采用以仿真为驱动的工程方法进行研究，并提出应对美国材料与实验协会 (ASTM) 压扁阻断标准的修正方案。

作者 BRIANNE COSTA

在对天然气输送进行日常维护时，一般都要挖开主干道，这使得司机只能通过导航找出周围的便道或乡间公路来绕行。天然气管道的修补和替换过程可以更高效、更微创吗？美国燃气技术研究院 (Gas Technology Institute, GTI) 是天然气研究、开发及培训等领域的领导者，他们正在分析天然气管道压扁阻断长度的行业标准，希望借此简化对管道的维护。

可以在多近的距离进行压扁阻断？

位于伊利诺斯州的 GTI 是一家致力于推动新能源及天然气技术发展的研发机构。他们的一个研究部门正在分析聚乙烯 (polyethylene, PE) 天然气管道的压扁阻断距离。压扁阻断看似很简单，它是指对管道进行挤压直到完全阻断气体流动（见图 1）。这种方法常用于各种日常维护任务，能在不关停整个系统的情况下对部分管道进行替换。

压扁阻断作业结束后，管道大体能恢复之前的形状，并继续输送天然气。使用聚乙烯作为管道材料有其固有优势：它较为柔软并能够经受较大变形；不会发生腐蚀；质地均匀且能够熔断；对恶劣环境的抵御能力较强。

为防止损坏与故障，必须遵守某

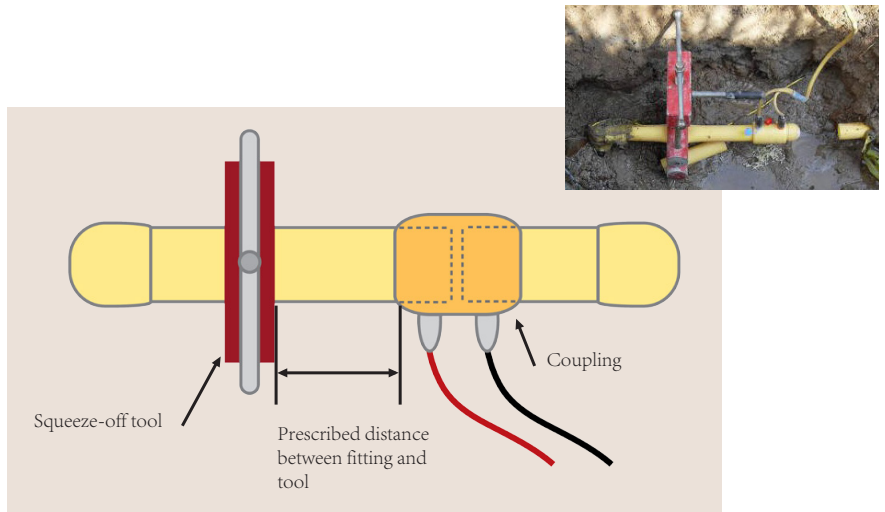


图 1. 正进行压扁阻断的聚乙烯天然气管道。图注：Squeeze-off tool - 挤压工具；Prescribed distance between fitting and tool - 装置与工具间的规定距离；Coupling - 连接处

些标准，例如在压扁阻断过程中就必须遵循美国材料与试验协会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 公布的有关标准。其中一个特别的标准包括压扁阻断相对于管道连接件的位

“[我们] 相信在 COMSOL 软件中执行有限元方法可以获得非常好的结果，这已被多次测试证明。”

— OREN LEVER, 美国天然气技术学会能源运输 & 使用部门首席工程师

置。标准规定压扁阻断位置距下一个管道连接之间的距离应为管道直径的三倍或 12 英寸，取二者中的较大值。

该规定旨在避免管道的应变及破

损。不过，大部分天然气公用事业公司都希望能尽量缩短最小要求距离。绝大部分住房和商业应用中所用管道的直径不超过 2.375 英寸，所以对大部分管道而言，12 英寸的距离要求非常高。

换言之，虽然三倍直径一般为 7 英寸，但仍需要在更远的距离（即 12 英寸）处进行压扁阻断作业。对小直径管道而言，较远的距离要求也意味着需要挖掘开更多路面、重新规划线路，还将付出更多的时间与费用。

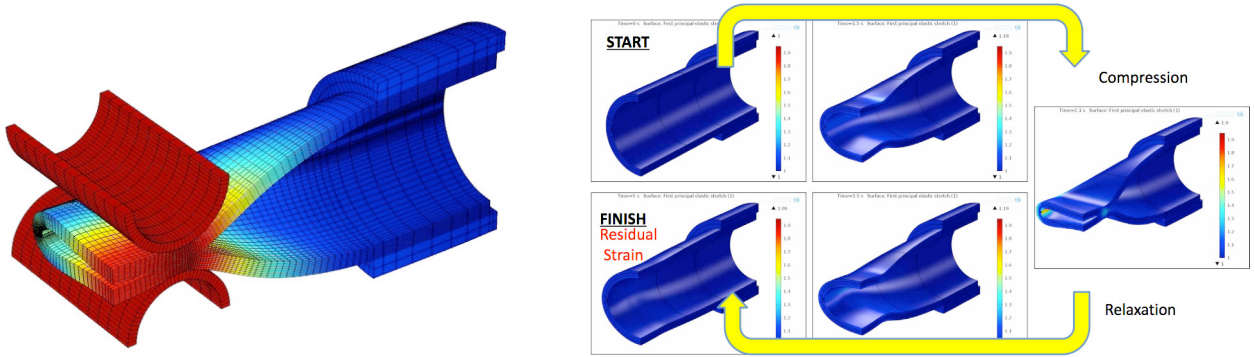


图2. 对压扁阻断管道中总位移的仿真（左）；对整个压扁阻断过程的仿真（右）。图注：Start - 开始；Compression - 压迫；Relaxation - 松弛；Finish (Residual strain) - 完成（残余应变）

OTD (Operations Technology Development) 是由多家天然气运输公司合作成立的一家技术研究中心，在他们的赞助下，GTI 的研究人员 Oren Lever 和 Ernest Lever 仔细分析了 12 英寸的距离要求对较小管道来说是否必要。他们的目标是找出在应变和应力集中增长超出行业标准之前，能在距离焊接点处进行压扁阻断作业的最短距离。为了得到答案，团队使用了 COMSOL Multiphysics® 软件的结构力学建模功能。

⇒ 聚乙烯管道的应力和应变分析

GTI 团队通过 COMSOL 中的结构力学模块和非线性结构材料模块设定了一个全参数化的瞬态模型。正如 GTI 的 Oren Lever 所说，他们的团队“相信在 COMSOL® 软件中执行有限元方法可以获得非常好的结果，这已被之前的测试证明”。他们定义了两组接触的力学和数值属性，分别用于模拟管道与管道间的内部结构接触和管道与压扁阻断装置的外部结构接触。

他们利用 COMSOL 软件中的网格剖分功能制作了由结构化与非结构化网格结合的混合网格。通过结合该方法与在软件中定制的本构模型，团队能够精

确分析管道中的大变形。如图 2 所示，分析了压扁阻断作业的各个阶段：管道增压、压扁阻断、保持、释放和松弛。

需要特别关注对挤压棒下方管道的网格剖分，以便模拟在完全压扁阻断时管道经历的大变形（见图 3）。借助 COMSOL 的网格剖分功能和参数化性质，我们可以轻松将该网格剖分缩放到不同的管道尺寸。该区域的应力和应变虽非此项目的焦点，但当涉及压扁阻断对管道寿命的一般影响时，它们却是关注重点。GTI 团队使用 COMSOL 模型能够对压扁阻断作进一步分析。

⇒ 高度非线性结构材料的合作研究

为了捕捉聚乙烯的独特行为，GTI 需要一个定制的粘弹性-塑性本构模型。为此，他们转向 COMSOL 的认证咨询机构 Veryst Engineering 寻求帮助，希望能在 COMSOL Multiphysics 中执行给定的材料模型。Veryst 的 Nagi Elabbasi 解释说，为了实现这一点，他们首先选定对实验材料进行测试，用于校准描述 PE 等热塑性塑料的材料定律，然后将材料参数拟合到 PE 的应力-应变响应中，最后在 COMSOL 中执行了定制材料模型

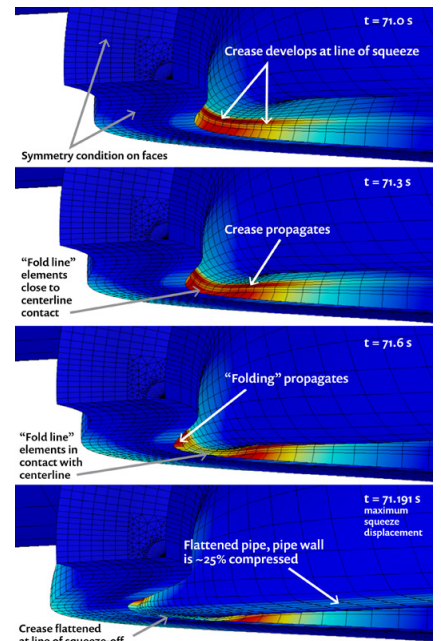


图3. 将达到和已达到最大压扁位移时，压扁阻断线处在不同时间步长下的变形。图注：Symmetry condition on faces - 面上的对称条件；Crease develops at line of squeeze - 在挤压线上的折痕延展；“Fold line” elements close to centerline contact - “折痕线”单元靠近中心线；Crease propagates - 折痕延展；“Fold line” elements in contact with centerline - “折痕线”单元与中心线接触；“Folding” propagates - “折叠”延展；Crease flattened at line of squeeze-off - 在挤压线上折痕变平整；Flattened pipe, pipe wall is ~25% compressed - 压扁的管，管壁被压缩25%；Maximum squeeze displacement - 最大挤压位移

需要的一组常微分方程组 (ODE)。

GTI 针对中密度聚乙烯 (MDPE) 管道材料执行了材料测试，并加入了在不同温度、应变率、应变，特别是高应

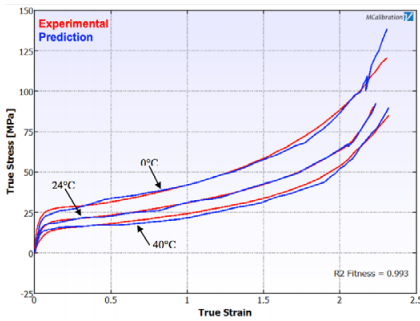
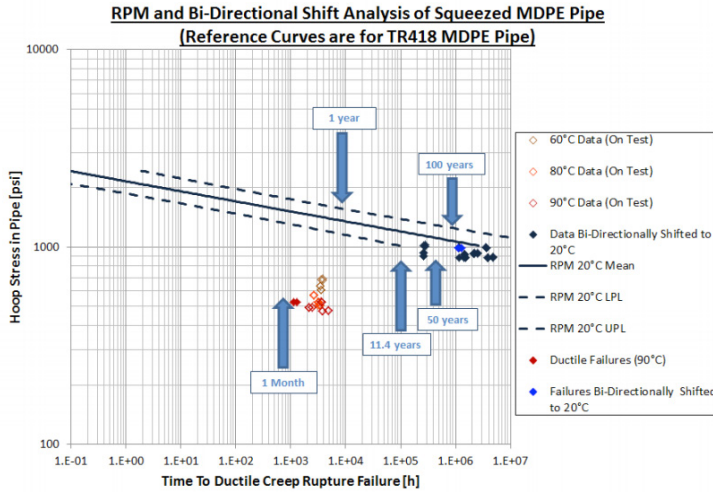


图 4. 美国天然气技术学会针对 PE 管的压扁阻断执行的加速寿命测试(上); PE 的拉伸响应示例及由 Veryst Engineering 做出的模型拟合(下)。

变下进行的拉伸和压缩测试，以及加载和卸载测试（见图 4）。Veryst 的团队通过拟合实验数据得到了实际材料的参数值。Veryst 使用 MCalibration 进行了校准，这是他们开发的一种优化工具，通过不断调整参数值，直到找出能与实验数据匹配的材料参数。为了在 COMSOL Multiphysics 中执行并验证已校准的材料定律，Veryst 充分利用了软件的灵活性，他们增加了一个 ODE 系统来表征其他用于描述定制本构模型的各种状态。

对于无法通过方程组描述的材料模型，另一种有效的处理方法是“外部材料”功能访问由 FORTRAN 或 C 代码编写的函数，或将它们编译到共享库

中。此时，可以通过应力-应变关系定义外部材料，仅返回非弹性应变对所用材料模型的贡献，或直接链接到类似 Veryst Engineering 公司的 PolyUMod® 库等商用外部材料库。

GIT 根据仿真确定对小直径管（小于 3.5 英寸）而言，当在较小的压扁阻断距离（三倍管直径）进行作业时，造成的应变并未超过行业接受的应变限值。

此外，他们还进行了加速寿命试验（见图 4）来验证结果。在足够高的温度下聚乙烯的蠕变率会加快，他们在这类高于正常工作温度的高温下对距连接点 2 英寸和 4 英寸处的压扁阻断分别进行了测试。通过该附加测试，GTI 团队发现管道在平均温度为 20°C 时的使用寿命是 80 年，符合业界对 MDPE 燃气管道 80 年寿命标准的规定。

⇒效率是 GTI 未来规划的关键

GTI 从他们的仿真工作中发现，当对小直径管进行压扁阻断时，作业位置与管件的距离可以小于 ASTM 标准中规定的最小距离。这也证明，对于住宅和商业天然气输送中较常使用的小直径管道，我们可以对现行 12 英寸的最



研发部门主管 Ernest Lever (左) 与首席工程师 Oren Lever (右), GTI。

小规定距离进行重新评估。基于他们的研究工作，GTI 正帮助制定新的指导标准，希望能降低天然气管道维护的成本，使之更高效，更微创。

对于未来的研究计划，Lever 说他们的团队计划进一步拓展这一模型，加入温度和蠕变，以便更准确地描述松弛效应。他们希望能分析损伤的扩展和失效，预测管道在不同载荷场景下的行为，例如安装附加的卡箍。

GTI 还希望将他们的发现向并不精通数值仿真的工程师推广。作为 COMSOL 用户，他们还可以使用软件中的 App 开发器功能，像 Lever 那样的仿真专家通过 App 开发器将他们的 COMSOL 模型封装在一个友好的定制用户界面内。这意味着，不了解数值仿真的现场工程师和维护人员也有足够的信心不必再于事后怀疑他们的选择，特别是在应对异常的工作场景时。同时，仿真专家也能节省大量的时间，将精力放在新项目上。GTI 还将继续致力于天然气和能源革新方面的研究与探索。❖