

单眼井中的泵汲与注入

Düsenauginfiltration 的意思是“喷嘴-抽吸-渗透”，是一种能将水从原始位置抽离，同时又无需投入过多精力、成本，并能避免引发环境危害的脱水技术。本文通过仿真模拟来理解为什么要采用这项新技术，以及如何使用。

作者：JENNIFER HAND

合著作者：Martin Sauter 教授、Yulan Jin 博士在读、Ekkehard Holzbecher 副教授（博士）
（德国哥廷根乔治·奥格斯都大学）

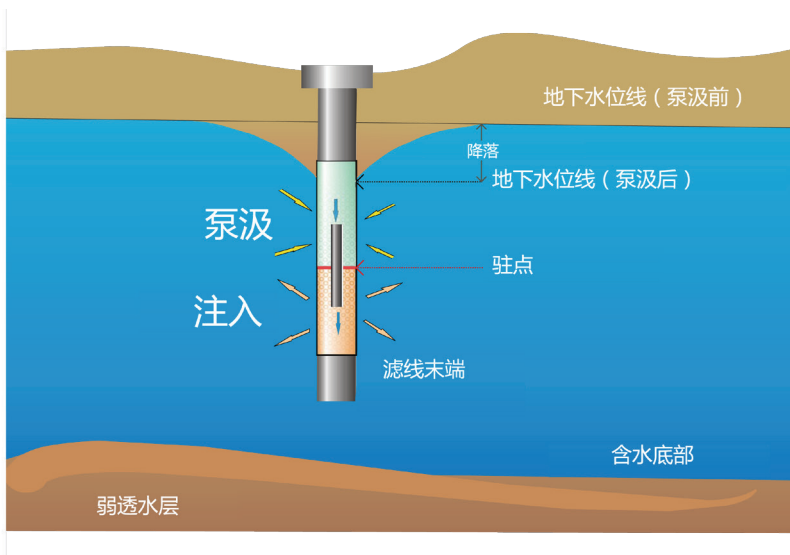


图1. 井眼的抽取（泵汲）和渗透（注入）概念示意图。

为了保持建筑或矿区的干燥，通常要降低地下水位，这被称作“水位降落”。传统的做法是进行抽水（用泵抽出），然后在远离矿区的地方重新注入地下，或者注入到地表水体。但这一方法会对环境造成负面影响，可能会破坏矿区的局部生态系统，出现地面下陷，污染地下水或地表水，甚至可能出现土壤退化。此外，水的传输和处理需要花费成本，如果还需要在水注入地下前对其进行处理，将会造成这一费用的进一步增加。

相比之下，Düsenauginfiltration (DSI) 方法提出在靠近地下水位线的地方抽取地下水，然后重新通过这个井眼注入更深的地下。因为水并没有被提出来，这不仅免去了将水运离的步骤，还可以减少沉降。实际上，井眼被分为两部分：上部是抽取

区，下部是重新注入区（见图 1）。这两部分通常由封隔器进行隔离。

从 2000 年开始，井水力学专家 Werner Wils 就成功地在他的公司中采用了这一方法，他们也把它叫做 Werner Wils 喷嘴渗透系统 (JSISWW)。这一做法在德国和荷兰受到了广泛的关注，有些公司已被授权使用该系统，越南和中国也在使用这一方法。实践经验显示这项技术非常成功，但人们尚未完全理解这一方法，不清楚这项技术在哪些条件下可以使用，哪些条件下不能使用。其中的挑战是，我们很难从科学的角度来分析这项技术。不过，目前德国哥廷根的乔治·奥格斯都大学（简称哥廷根大学）正在进行这一尝试。

在 Martin Sauter 教授（博士）的带领下，哥廷根大学应用地质学学院正专注

于水文地质学领域的研究。在 DSI 项目的框架内，他们正与脱水行业的一家领先公司 Hölischer Wasserbau 合作。项目资金由德国联邦环境基金会 (DBU) 提供。“我们的任务是解释为什么该方法能实现这样的结果，理解它的优势与局限，并找出最佳工作环境。”研究小组的负责人 Ekkehard Holzbecher 教授（博士）如是说道。

在读博士 Yulan Jin 正在使用 COMSOL Multiphysics® 建立二维和三维模型。她这样描述他们的目标：“我们正同步仿真德国的现场试验，所以能对比仿真结果与测量数据。我们希望能精确预测系统对边界条件改变的响应。”

→ 证明基本原理

他们建立了一个求解压力（水头）及含水层变形的二维模型，图 2 显示了一个典型结果。井眼上部的水头降低（蓝色区域），造成了上层边界（即地下水位线）的水位降落。这显示出，即使我们只是将水注入更深的地下，还是会出现含水层水位降落这一基本原理。

随后他们对同样的情景进行了三维模拟，加入了周围的地下水流动。井眼由一个圆柱代表，包含随深度变化的抽取或注入率，分别指定为数学模型中的源和汇。图 3 的测试案例中，出现了与二维模型相同的水位降落现象，结果非常明显。

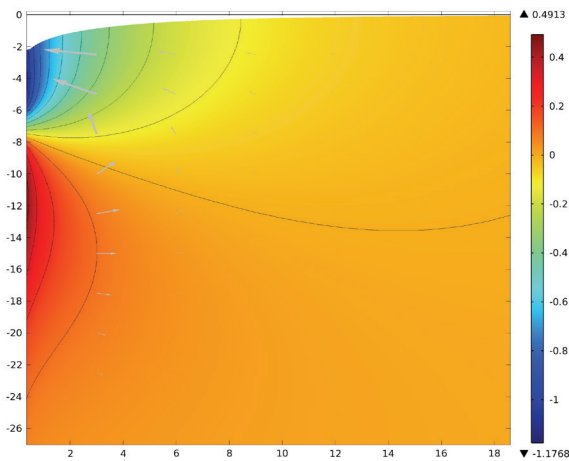


图 2. 二维垂直剖面模型上的输出示意图。结果显示了含水层内的水头（颜色图）、变形和速度场（箭头图）。

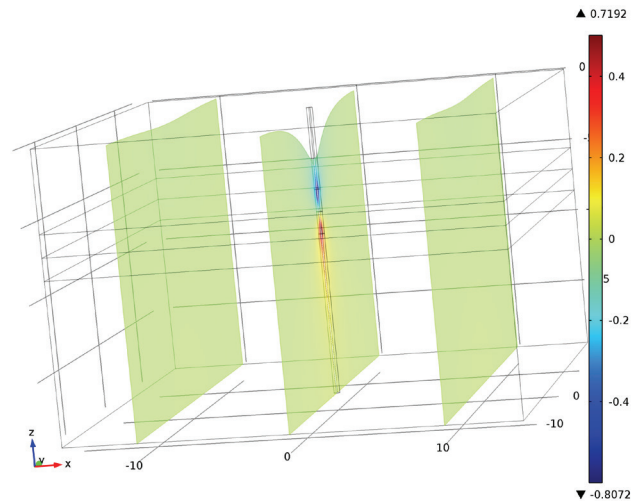


图 3. 三维模型输出切片图，显示了水头剖面（颜色图）和井眼的变形。

“我们用到了 COMSOL Multiphysics 的参数化扫描特征，以深入研究恒定抽取速率下不同的渗透率。” Jin 解释说：“这使我们能够将它与把水泵离或仅抽取但没有渗透的经典方法进行对比。我们发现当抽取和渗透率相同时，DSI 技术产生的水位降落率仅是传统抽吸技术的一半。虽然也会出现水位降落，但还是比从矿区运离水的方法更容易管理。”图 4 显示了不同渗透率下沿远离井的地下水位线产生的水头变化。

到目前为止，数值仿真结果显示了与实地测量数据相同的趋势。“仿真帮助我们深入理解了 DSI 技术为何有效，如何运作，以及何时有效。” Jin 说道：“例如，我们了解到它仅适用于主要由沙和砾石构成的可渗透含水层。我们也发现要有足够的局部地下水，这一点很关键，因为它将对渗透率产生正面影响。此外，含水层中导水率的各向异性也非常重要。还有一点必须考虑，即地下水流会随季节变化，也会根据含水层中不同层的相对导水率发生改变。将水注入井眼较低部分的一个问题是，过程中可能造成局部旁路或‘短路’。我们通过仿真模拟的方法分析了所有这些情况。”

➔ 获得具体指导

DSI 技术应用地之一是废弃矿区的紧邻地区。“我们是在解决一个真实的问题，由于老矿区的关闭，周围房子的地下室被水淹没。” Jin 解释说：“由于这是一个开放的含水层，需要不间断地抽吸，所以不适合使用传统的脱水方法。” Jin 根据收到的现场实验数据向三维模型中加入了新的参数，扩展了模型的功能，现在该模型可以反映所有可能适用的现实生活中的变量。“很显然，应综合考虑注入位置、喷嘴尺寸、流速，以及对应的压力。因此，我们转向了更复杂的多相条件。我们还分析了一个矿区中存在多个井眼的情况。”

证明了 DSI 方法可以在某些限制条件下使

用之后，大学团队目前正致力于优化这一技术。Jin 总结说：“DSI 有诸多优势。不过我们也知道即使对有 DSI 使用经验的专家而言，也需要几天时间进行试错以找出井眼位置和所需的井眼数量。通过仿真，我们能够制定出具体的指导方针，这不仅能节省现场的时间和精力，也使我们能更加高效地传授这一方法，并能复制它的成功案例。” ❖

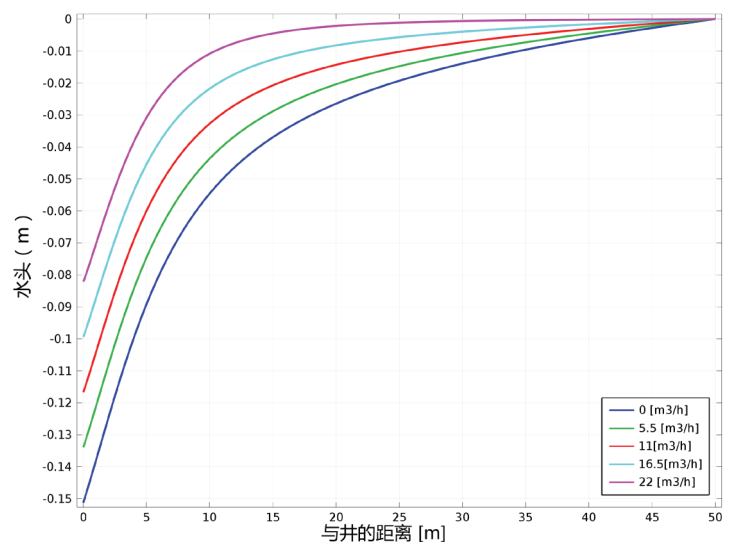


图 4. 随渗透率增加而下降的水位降落。