

# 无纺土工织物单向渗流反滤机理及淤堵特性分析

贾傲

同济大学 上海 200092

**【摘要】**：无纺土工织物因具有较好的透水性能、变形适应能力和施工便利性，已广泛应用于堤坝、路基、边坡防护及各类排水工程，并逐渐替代部分传统砂砾反滤层。在单向渗流条件下，土工织物反滤体系通常需要同时满足保土、透水和防堵三方面要求，其服役效果不仅与材料自身结构参数有关，也受到被保护土体性质、颗粒组成、水力梯度及长期环境条件等因素的共同影响。相关研究表明，反滤初期部分细颗粒会在渗流作用下进入甚至穿过织物孔隙，随后在土工织物与土体接触区逐步形成由颗粒架桥、沉积和重新排列共同构成的过渡结构，使体系的颗粒拦截能力和渗透性能逐渐趋于稳定；当织物孔径与土体级配不匹配，或细粒含量较高、水力梯度较大时，则可能在织物表面或内部形成明显淤堵，导致渗透系数降低、水头损失增大，并增加反滤失效风险。与颗粒土相比，黏性土过滤过程更为复杂，其梯度比通常表现为先增大、后减小并最终趋于稳定，在一定条件下仍可能出现黏粒穿透现象。总体来看，无纺土工织物的反滤性能是材料参数、土体特征与渗流环境耦合作用的结果，工程设计中应在满足保土条件的基础上兼顾透水与抗堵要求，并结合具体工况进行合理选型与验证。

**【关键词】**：无纺土工织物；单向渗流；反滤机理；天然滤层；淤堵

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.014

## 1 土工织物的反滤功能

土工合成材料是以聚合物为主要原料制成并应用于岩土工程中的功能材料，由于其具有隔离、排水、反滤、加筋、防渗和防护等多种功能<sup>[1]</sup>，随着工程规模不断增大以及对施工效率和长期服役性能要求的提高，土工合成材料尤其是土工织物在反滤和排水方面的应用尤为广泛<sup>[2]</sup>。

所谓反滤，是指在允许水流顺利通过的同时，对土颗粒起到阻截和稳定作用，从而防止被保护土体发生流失、冲刷或渗透破坏。对于一套有效的反滤体系而言，通常满足三个基本要求<sup>[1]</sup>：一是能够阻止骨架颗粒或关键细颗粒大量流失，即具备保土性；二是能够保证渗流水及时排出，避免过大水头损失，即具备透水性；三是在长期工作过程中不因颗粒沉积而迅速失去排水能力，即具备防堵性。上述三方面要求相互联系、彼此制约，也是评价反滤材料是否适用于工程的重要依据<sup>[2]</sup>。传统反滤层一般采用不同粒径范围的砂砾料分层铺设，通过逐级过渡的方式协调“保土”与“排水”之间的关系。这类反滤层在许多工程中曾长期使用，技术基础较成熟，但同时也存在材料用量大、施工工序繁琐、对填料质量和级配控制要求高、现场铺筑厚度较难保证等问题。相比之下，土工织物特别是无纺土工织物具有质量轻、整体连续性好、施工方便、运输和铺设效率高、对不均匀沉降和局部变形适应性较强等优点，因此逐渐成为替代传统粒料反滤层的重要选择<sup>[1][2]</sup>。

从材料结构上看，无纺土工织物通常由短纤维或长丝通过针刺、热粘或化学粘结等方式形成，其内部孔隙分布具有较强的随机性和空间连通性。尤其是针刺无纺土工织物，内部往往具有较为发育的三维立体孔道，水流垂直穿过材料时，孔隙既是渗流通道，也是颗粒迁移、滞留和再分布的空间基础。与结构相对规整的有纺织物相比，无纺土工织物厚度较大、变形能

力较强，局部孔道受到堵塞后仍可能保留一定的通水能力<sup>[1]</sup>，因此在反滤工程中应用更为普遍。需要指出的是，土工织物的反滤作用并不是简单意义上的“筛孔拦截”。如果仅把土工物理解为一层刚性的筛网，就难以解释许多试验中观察到的细颗粒初期迁移、界面结构调整以及天然滤层形成等现象<sup>[1][2]</sup>。实际上，在单向渗流条件下，土工织物与被保护土体共同构成一个相互作用的过滤系统。水流通过时，土体中的细颗粒会发生迁移、重排和局部沉积，织物内部孔隙结构也会因颗粒进入和局部受压而发生一定变化，最终形成一种新的界面平衡状态<sup>[2][3]</sup>。因此，土工织物反滤本质上是渗流、颗粒迁移和界面演化共同作用下形成的动态过程。

此外，反滤体系的实际工作效果还与外部环境密切相关<sup>[4][5][6][7]</sup>。例如，在相同材料条件下，不同土体级配、不同细粒含量以及不同水力梯度都可能使反滤行为产生明显差异；在长期服役条件下，地下水化学环境、有机质含量及微生物活动也可能影响织物孔隙状态和排水能力。因此，对无纺土工织物反滤机理的认识不能停留在单一孔径指标或初始透水参数上，而应从材料、土体和渗流条件耦合的角度进行分析。

## 2 无纺织物过滤颗粒土的反滤机理与淤堵作用

无纺土工织物用于颗粒土反滤时，其主要目标是在保证土体骨架稳定的前提下，允许水流通过并控制细颗粒的迁移范围。已有研究表明，土工织物在过滤颗粒土时并非单纯依靠孔径将全部颗粒一次性截留<sup>[2][3]</sup>，而是在渗流作用下诱导土体内部颗粒重新分布，最终形成较为稳定的反滤结构。

在反滤初期，土工织物的渗透系数通常大于被保护土体，因此织物附近土层内部的水力梯度相对较大。受此影响，土中部分细颗粒会随渗流进入甚至穿过织物孔隙，而较大颗粒则更容易在织物表面或邻近区域被截留<sup>[3]</sup>。随着渗流持续，先被截

留的颗粒逐渐对后续颗粒形成阻挡作用,使颗粒在织物与土体接触区内重新排列,并逐步形成由粗到细过渡的稳定结构<sup>[2]</sup>。这一过程通常被概括为“天然滤层”的形成过程。其本质在于,土工织物不仅自身参与颗粒拦截,同时还对被保护土体内部颗粒的再分布起到“触媒”作用。随着天然滤层逐渐形成,界面附近的水力条件趋于平稳,细颗粒的大规模迁移得到抑制,反滤体系的保土和透水能力也逐步达到动态平衡。需要指出的是,天然滤层的形成并不意味着细颗粒完全停止迁移,而是表明体系经过初期调整后,颗粒流失规模明显减小并趋于稳定。若织物孔径与土体级配匹配合理,这一平衡状态通常能够较快建立;反之,若孔径过大,则可能导致细颗粒持续流失,若孔径过小,则容易在界面形成集中沉积并诱发堵塞问题。<sup>[1][3][6][7]</sup>

在长期渗流作用下,无纺土工织物可能发生不同程度的淤堵。所谓淤堵,是指土颗粒、化学沉淀物或生物附着体在织物表面或内部孔隙中逐渐积聚,导致有效通道减少、渗透能力下降的现象<sup>[1]</sup>。其中,在颗粒土反滤体系中最常见的是机械淤堵。机械淤堵通常发生于反滤初期及结构演化阶段。细颗粒在水流作用下进入无纺土工织物内部曲折连通的孔道后,一部分颗粒被滞留在孔隙中,另一部分则沉积于织物表面附近,导致体系渗透系数在初期快速下降,之后逐渐趋于稳定。相关试验还表明,颗粒在织物中的沉积分布通常并不均匀,靠近被保护土体一侧更容易出现颗粒富集现象。需要辩证看待淤堵现象。一定程度的界面沉积和孔隙内截留,有助于天然滤层和稳定过滤通道的形成;但当织物孔径偏小、细粒含量较高、内部孔隙过于细密,或水力梯度较大时,细颗粒可能大量集中于织物表面,逐渐形成较致密的“滤饼”,从而使水流通道的明显压缩,导致排水能力迅速衰减<sup>[1][6][7]</sup>。

当反滤层发生严重堵塞时,渗流水不能及时排出,会使土体内孔隙水压力升高;在总应力基本不变的条件下,有效应力随之降低,进而削弱土体抗剪强度,增加结构变形和局部失效风险<sup>[1][4]</sup>。除机械淤堵外,长期服役条件下还可能存在化学淤堵和生物淤堵,因此工程中不能仅依据初始透水性能判断材料优劣,而应结合服役环境综合评价其长期抗堵能力。

### 3 无纺土工织物对黏性土的反滤作用

与颗粒土相比,黏性土过滤过程更为复杂。这主要是因为黏性土中颗粒粒径更小,颗粒之间存在明显的黏聚作用,且土体常具有聚粒结构或絮凝结构,使其过滤行为不仅受粒径分布影响,还与颗粒间相互作用、结构稳定性及微观孔隙演化密切相关<sup>[5][8]</sup>。正因如此,颗粒土反滤中的某些经验判断并不能直接照搬到黏性土条件下,无纺土工织物对黏性土的反滤机理也一直是相关研究中的重点和难点。

在黏性土反滤研究中,梯度比常被作为评价反滤体系淤堵程度的重要指标。梯度比越大,说明土工织物附近的附加水头损失越明显,体系透水能力越差,相应的淤堵程度也越严重。

与单纯使用渗透系数相比,梯度比更能反映界面附近局部阻力变化<sup>[5]</sup>,因此在黏性土过滤试验中具有较高的应用价值。已有研究表明<sup>[5][6][7][8]</sup>,土样黏粒含量、初始密实程度以及土工织物等效孔径等因素,都会显著影响无纺土工织物的渗透淤堵特性。一般情况下,黏粒含量越高,土体中可迁移的细小颗粒越多,越容易在织物表面形成集中沉积;当织物等效孔径较小时,颗粒更难进入织物深部,堵塞往往集中发生在表面或入口区域;而当孔径较大或黏粒含量相对较低时,细颗粒则更可能进入材料内部,从而使淤堵位置向织物内部发展。由此可以看出,黏性土过滤中的“堵塞位置”并不是固定不变的,而是会随材料参数和土样条件变化而发生转移。徐超等开展的梯度比试验表明<sup>[8]</sup>,无纺土工织物过滤黏土时,梯度比随时间的总体变化规律通常表现为先升高、后降低、最终趋于稳定。这一结果说明,黏性土过滤不是一个单向加剧堵塞的过程,而更像是一个不断演化和重新平衡的过程。在试验初期,渗流将大量黏粒及聚粒带至土工织物表面,局部孔隙被快速占据,导致附加阻力增大、梯度比上升;随着渗流持续和局部水力条件变化,部分颗粒又可能穿过或绕过堵塞区域,使原本高度集中的淤堵状态得到一定缓解,体系因此进入新的平衡阶段。

从机理上分析,黏性土过滤过程中可能同时发生两类现象:一类是表面沉积增强,即黏粒和聚粒在织物表面逐渐形成较致密的阻水层,使界面透水能力下降;另一类是局部穿透或内部迁移,即在较高水力梯度作用下,部分细小颗粒克服局部阻滞作用,进入织物内部甚至穿过滤层。正是由于这两种机制并存,黏性土过滤过程才表现出比颗粒土更强的复杂性和不确定性<sup>[8]</sup>。

试验后显微结构观察表明,在一定条件下确实存在黏土颗粒穿过土工织物逃逸的现象。这说明即使梯度比在某一阶段回落,也不意味着体系完全恢复到初始状态,更不意味着所有细颗粒都被有效拦截。相反,这往往表明黏土-织物复合体系经过一段时间的沉积、穿透和结构重组后,重新建立了新的通水与拦截平衡。因此,在评价黏性土反滤效果时,不能只看某一时刻的渗透指标,还需要结合颗粒流失、界面结构变化及长期稳定性综合判断。

此外,高水力梯度条件对黏性土过滤行为的影响更为敏感<sup>[7][8][9]</sup>。在较大渗流驱动力作用下,即使土样中黏粒含量较高,部分细颗粒仍可能进入织物深部并诱发内部淤堵;而当梯度较小、孔径较小时,则更容易在表面形成集中沉积层。这意味着黏性土反滤设计必须充分考虑实际工程中的渗流强度和变化范围,单纯依据静态材料指标进行选型往往难以全面反映其长期工作表现。

总体来说,无纺土工织物对黏性土的反滤作用表现出更强的条件敏感性和时变性。与颗粒土相比,黏性土体系中既要考虑保土与透水之间的矛盾,也要关注长期堵塞与颗粒穿透可能

同时存在的问题<sup>[8][9]</sup>。因此，在黏性土工程应用中，土工织物选型和反滤设计应更加慎重，必要时应结合针对性试验结果进行校核，以提高工程适用性和长期可靠性。

#### 4 结论

无纺土工织物在单向渗流作用下有如下特点：

(1) 无纺土工织物在单向渗流条件下的反滤作用，本质上是颗粒迁移、界面沉积与孔隙结构调整共同作用的结果，其工作效果需同时满足保土、透水和防堵三方面要求。

(2) 对于颗粒土，反滤初期部分细颗粒会进入或穿过织物孔隙，随后在织物与土体接触区逐步形成天然滤层，使颗粒流失规模减小，体系逐渐达到稳定过滤状态。

(3) 无纺土工织物在长期服役过程中可能发生机械、化学和生物淤堵，其中机械淤堵最为常见。适度沉积有助于稳定反滤结构，但若孔径选择不当、细粒含量过高或水力梯度过大，则易形成严重堵塞并增加反滤失效风险。

(4) 与颗粒土相比，黏性土过滤过程更复杂，其梯度比通常表现为先升高、后降低并最终稳定，在一定条件下仍可能出现黏粒穿透现象。

(5) 工程应用中，无纺土工织物的选型不宜仅依据单一孔径指标，而应综合考虑织物厚度、结构特征、土体级配、细粒含量、密实度及水力梯度等因素，并结合具体工况开展针对性验证。

#### 参考文献：

- [1] 周蓉.土工织物反滤机理研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2000(04):41-43.
- [2] 杜春雪,徐超,彭善涛.土工织物反滤作用研究进展[J].长江科学院院报,2022,39(2):108-114.
- [3] Lafleur J,Mlynarek J,Rollin A L.Filtration of broadly graded cohesionless soils[J].Journal of Geotechnical Engineering, 1989,115(12):1747-1768.
- [4] Koerner M R,Koerner R G.Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions[J].Geotextiles and Geomembranes, 2015,43(3):272-281.
- [5] 魏松,龚明.无纺土工织物渗透淤堵试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(03):383-388.
- [6] 徐俊.土工织物-非稳定土体反滤系统中滤饼的研究[J].岩土工程技术,2005(05):233-236.
- [7] 卢星宇,储兆微,徐浩伦,等.高水力梯度下土工织物滤层淤堵的室内模拟研究[J].科技通报,2023,39(05):108-113.
- [8] 徐超,柴菲,刘若彤,等.无纺织物过滤黏土的梯度比试验及机理研究[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(03):227-233.
- [9] Fischer G R,MaréA D,Holtz R D.Influence of procedural variables on the gradient ratio test[J].Geotechnical Testing Journal, 1999,22(1):22-31.