



袋装砂围堤土工合成材料老化研究应用

黄东海

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 自20世纪90年代以来, 袋装砂围堤在水运工程中得到广泛应用, 其老化性能也得到很多学者关注和研究。综合现有研究成果对袋装砂围堤的老化性能及其使用寿命进行系统的总结分析, 给出影响袋装砂围堤老化性能的因素及可能的寿命。

关键词: 袋装砂围堤; 土工合成材料; 老化

中图分类号: TU 532

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0156-06

Aging of geosynthetics in bagged-sand dike

HUANG Dong-hai

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Since the 1990s, the bagged-sand dike has been widely used in port and waterway engineering and its aging performance has been studied by many scholars and engineers. This paper summarizes the aging properties and service life of the bagged-sand dike based on existing research systematically, and gives the aging impact factors and possible life of the bagged-sand dike.

Key words: bagged-sand dike; geosynthetics; aging

自20世纪90年代以来, 袋装砂围堤在水运、水利工程中得到广泛应用。袋装砂围堤采用的堤身砂袋、反滤层、护底软体排等土工合成材料结构, 发挥着反滤、保土、防护及加筋的作用, 因而在其使用期内能否保持一定的机械性能将对整个工程至关重要。目前袋装砂围堤常用的土工合成材料为聚丙烯(PP)、聚酯(PET)等高分子聚合物, 这些材料随着时间的增加将产生老化降解, 主要表现为物理机械性能的衰变(如强度的降低), 从而丧失或部分丧失使用功能。因此, 袋装砂围堤的老化性能是工程界普遍关心的一个问题, 需要对其使用寿命和长期使用安全性问题进行系统的研究。

1 土工合成材料老化影响因素

土工合成材料老化是一个复杂的过程, 是指

在光、热及应力等因素综合作用下发生复杂的物理化学变化过程。影响土工合成材料老化的因素有很多, 可按自身结构和外部环境条件区别为内因和外因^[1]。

内因包括材料的物理结构、聚合物种类和添加剂的种类等, 其中聚合物的种类最为重要, 材料的物理结构对材料性能的影响也很大。例如土工布由于其松散、比表面积大的特点使其非常容易受到光氧老化的作用, 在相同条件下土工布的老化速度比土工格栅、土工膜快得多。再例如由于材料的不同, 聚丙烯编织布的老化速度要比涤纶针刺无纺布快, 不添加抗老化剂的比添加抗老化剂快, 长丝比扁丝或裂膜丝快等。

外因包括紫外线、温度、氧气、受力、湿度、酸碱度、金属离子浓度和微生物的作用等。一般而言, 紫外线、热、氧是影响土工合成材料

收稿日期: 2012-10-10

作者简介: 黄东海(1974—), 男, 高级工程师, 从事水运工程和水利工程的设计研究。

老化的主要因素，其中紫外线是引起土工合成材料老化的决定性因素，热老化只有在温度较高时才比较明显，而氧浓度对老化的影响很小。另外，除聚酯纤维抗碱性较差外，土工合成材料均具有良好的抗水解、化学降解和生物降解的性能。

2 土工合成材料的老化机理

2.1 光氧老化机理

土工合成材料在太阳光中的紫外线部分的照射下将会强烈地诱发材料光氧反应，使土工合成材料发生老化，从而使土工合成材料的性能降低。

光氧老化的本质是聚合物由于紫外光的作用，在分子结构易断裂的双键处首先裂解成游离基，再迅速与氧结合形成氢过氧化物（ROOH），当ROOH浓度慢慢到达一定水平，ROOH便开始分解形成大量自由基，使聚合物高分子链加速断裂和发生交联反应，最终得到既存在降解又有交联的不活泼产物，使材料的性能大幅度下降。

一般来说，熔融指标低、取向度好、分子量大的纤维强度大。而紫外老化能使聚合物分子链断裂，使分子质量下降、取向度和熔点下降，因此强度也随之降低，纤维的表观也有较大的损伤。

2.2 热氧老化机理

土工合成材料的热氧化过程是一系列的自由基链式反应，大多数聚合物的热氧老化要经历：链的引发、链的增加、链的支化、链的终止。

就埋地处理的土工合成材料而言，其热氧老化机理是大分子积蓄足够的能量引发链式反应，使得分子链断裂，破坏纤维的力学性能。链引发反应是整个老化过程较难进行的一步，加入稳定剂可提高链引发反应的活化能，能够起到抑制氧化降解反应的发生和进行，延缓分子链的断裂速率。加入抗氧化剂可使自由基变成稳定分子，或将不稳定的ROOH转化为更稳定的物质，延缓链式反应的产生，直至抗氧化剂耗尽为止。根据美国土工合成材料研究所（GRI）的研究数据表明，一般条件下添加抗老化剂的土工合成材料比纯的材料寿命要高1倍以上。

2.3 应力老化机理

应力作用有别于光、热辐射等因素引发的化学老化作用，应力老化可分为化学老化和物理老化。化学老化中，应力并不直接破坏分子键，而是起到活化和引发作用，它主要是通过改变聚合物的键长/键角降低键段的活化能，增加大分子键的活性，从而在光/热等引发环境下，只需很小的能量就能使反应发生。物理老化是指高分子材料在长期应力作用下，材料的化学组成和基本结构并没有发生变化，但材料的力学性能等却有明显的变化。在常温无光的环境中，应力对化学键的直接破坏作用很小，应力主要产生物理老化作用（即以蠕变为主）。

3 土工合成材料老化试验

3.1 老化试验方法

土工合成材料的老化性能和老化规律一般采用老化性能试验得到。老化性能试验主要有大气暴露老化、人工加速老化和实际应用老化3种方法。

1) 大气暴露老化。

大气暴露老化又称户外试验，是将土工合成材料暴露在大气环境中，直接承受各种大气因素的综合作用，定期取样进行测试的方法。由于可将试样设置在与工程相类似的自然环境中，或模拟不同覆盖条件进行试验，故所获成果较接近实际，可靠性较好，实用性也较强，缺点是所需时间较长，且需较大的试验面积。

2) 人工加速老化。

人工加速老化试验有多种，它是利用老化试验设备（烘箱）进行模拟、强化大气环境中的主要影响因素，加速材料的老化以获取材料的老化性能指标。其优点是能在短时间内（比大气老化快5~6倍，有的达10倍以上）获得材料的老化性能，得出相关性较好的试验成果；缺点是与实际应用时间仍有一定差距，难以用于预测长期的老化性能。

3) 实际应用老化。

实际应用老化试验是在实际应用工程现场定期取样试验，测定残余强度及相关指标，了解实

际应用中材料的老化程度,该试验成果最为真实可靠,只是所需时间较长,且取样也较麻烦。

3.2 人工加速老化试验的应用

1) 有关标准的要求。

目前研究土工合成材料的性能主要采用人工加速老化试验,人工老化试验的光源常用的有3种,分别为氙弧灯、碳弧灯和荧光紫外灯^[2]。根据GB/T 17641—1998《土工合成材料/裂膜丝机织土工布》的要求^[3],土工布的抗老化性能试验,要求在氙弧灯试验条件下暴露500h的拉伸强度保持率不小于70%。具体试验方法按国标GB 9344—1998和GB/T 16422.2—1997,在此不再展开。

2) 相关性与可靠性分析。

杨旭东等^[4]通过对聚丙烯光氧老化降解的羰基产物进行红外光谱技术分析后认为,相对较低的紫外辐射强度($<162.58 \text{ W/m}^2$)不会对聚丙烯光氧老化动力学过程产生影响,而过高的紫外辐射强度(325.24 W/m^2)会导致聚丙烯光氧老化降解反应进程的改变。因此,在合理选择紫外辐射强度的前提下,采用紫外辐射能量等值的原则,可以建立不同紫外辐射强度老化试验之间良好的相关性。也就是说在人工加速老化和大气自然老化试验中,当试样所受到的累积紫外线辐射能相等时,所得到的材料性能是一样的。

3) 长期使用寿命的预测。

由于土工合成材料应用历史较短,现场长期的原始数据极少,而人工加速老化需要控制紫外辐射线强度或环境温度才能保证与自然老化之间良好的相关性,其加速系数最大约为8~10倍左右。因此要得到50~100 a自然老化的数据,人工加速老化试验周期长达5~10 a。因此采用人工加速老化预测土工合成材料长期使用寿命一般只能采用拟合曲线外推的方法。

4 土工合成材料老化规律及措施

4.1 土工合成材料的光氧老化规律

在大气自然老化的条件下,紫外线辐射是土工材料老化的决定性因素,温度和降雨量等其他环境因素影响不明显^[4]。根据大量的大气自然老化

和人工加速老化对比试验表明,在一定紫外辐射线强度内($<162.58 \text{ W/m}^2$ ^[5]),土工材料的光氧老化规律为:

$$Y=100K\exp(-aX) \quad (1)$$

式中:Y为强力保持率(%);K,a为拟合常数,聚丙烯的K=0.98, $a=0.006 \text{ s}^{-1}$ ^[5],聚酯的K=1.0, $a=0.002 \text{ s}^{-1}$;X为累积紫外线辐射能(MJ/m^2), $X=It$,即辐射强度与辐射时间的乘积。

紫外线波长范围为100~400 nm,其中UVA波长320~400 nm,UVB波长280~320 nm,UVC波长100~280 nm。由于UVC被臭氧层吸收而不能到达地面,因而地面上有效的紫外线辐射是指波长在280~400 nm之间的紫外光(特别是对UVB最敏感)。据文献[6]报道,我国大部分地区年平均日紫外线辐射量约为 1.0 MJ/m^2 (对应平均紫外辐射强度约为 12 W/m^2)。在此辐射强度下,暴露在阳光下9个月的聚丙烯编织布强度几乎损失殆尽(强力保持率约为17%),即使采用聚酯机织布,其暴露使用年限(以强力保持率达到50%的老化时间作为使用寿命,称之为半衰期)也只有1 a。因此必须对土工材料采取防老化措施。

4.2 防止土工合成材料光氧老化的措施

常用的防老化方法有添加防老化剂、表面防护或掩埋防护。

1) 添加防老化剂。

防老化剂一般包括紫外线屏蔽剂(如炭黑、钛白粉等)、紫外线吸收剂(如二笨甲酮类、笨并三唑类等)、能量淬灭剂(如镍的有机络合物)、自由基捕获剂(如受阻胺类、DPPH阻聚剂等)等光稳定剂,以及受阻酚和芳香胺类抗氧化剂(主要抗热氧降解反应)和金属钝化剂和防霉剂等。防老化剂以受阻胺类光稳定剂最佳,炭黑效果也较好,但炭黑仅能用于黑色纤维。

根据文献[7-8]对添加5%受阻胺类光稳定剂的聚丙烯土工布大气老化试验结果,1 a后断裂强力保持率约为65%,据此推测其暴露使用年限(或半衰期)约2 a。

2) 表面防护。

表面防护一般是在材料表面涂漆、抹水泥浆

或针刺聚酯无纺布等，使材料表面附上一层保护层，从而延缓老化的进程。根据长江口地区在聚丙烯底布表面针刺150 g/m²涤纶无纺布的大气老化试验结果^[7-8]，1 a后断裂强力保持率约为60%，据此推测其暴露使用年限（或半衰期）约2 a。

因此，不管是添加高效防老化剂还是表面针刺耐老化的聚酯无纺布，其暴露在阳光下的使用寿命均不超过2 a，只适用于使用年限只有1~2 a的临时工程，要用于永久工程中，必须采取覆盖掩埋的措施。

3) 掩埋防护。

据文献[9-10]，当土工材料置于一定厚度覆盖物下（清水1.25 m以上，浑水0.5 m以上，沙土0.15 m以上，砾石40 cm以上），紫外辐射基本衰减为零，可不再考虑光的影响；而且土工材料具有优越的抗水解、化学降解和生物降解的性能，不同水土中的水或湿度、含氧量、微生物和化学物质等对土工材料的老化无明显影响。因此，在完全覆盖条件下，土工材料的老化主要表现为工程环境温度下热氧老化反应导致的强度随时间衰减。

4.3 土工合成材料热氧老化规律

环境温度对土工材料热氧老化的影响主要是通过影响土工合成材料氧化的速度，其次是土工合成材料的高温分解。但工程环境温度一般情况下都低于60℃，这与土工合成材料的分解温度相差还很远，故主要是前者^[11]。

土工合成材料热氧老化反应可利用化学反应动力学基本理论和化学反应Arrhenius定理（即 $k=A\exp(-E/RT)$ ）建立材料化学反应速度与反应环境温度的关系模型（可采用烘箱法加速老化，通过在不同温度下的热老化试验数据拟合得到公式 $\ln k=a/T+b$ ，得到任意温度下的反应速度常数 k ）。然后根据土工合成材料的力学性能衰减规律（聚烯烃材料为 $Y=100\exp(-kt)$ ，其中 Y 为长期强力保持率（%）， t 为时间（d）， k 为反应速度常数，聚烯烃材料的 $k(25^\circ\text{C})=8.4e^{-5}$ ）^[12]，便可对土工材料热氧老化的长期性能保持率进行科学的预测。

4.4 应力对土工合成材料老化的影响

土工合成材料在使用过程中，不可避免地受到各种应力作用，应力的存在会改变土工合成材料的物理化学结构，加快老化速度，降低材料性能，并缩短其使用寿命。一般来说，对材料老化影响比较明显的因素主要有3个：应力的作用大小、应力的作用时间及环境因素。

根据文献[13-15]，应力对高分子材料老化的影响存在临界现象，当所加荷载在临界应力以下时，应力对材料性能降低影响不明显，有时甚至还会对性能起到稳定或阻滞作用。但当所加荷载超过临界应力，应力对材料的老化会起明显加速作用，材料的使用寿命缩短。临界应力通常用断裂强度的百分比表示。临界应力会随材料的不同、趋向度不同及应用环境而变化，一般在10%~25%。当作用于材料上的应力为断裂强度的20%~50%时，应力对材料老化影响存在一个诱导期，在材料老化初期，在这期间材料的老化速度与无应力时相差不多，但当诱导期结束后，有应力情况下材料老化速度明显加快，应力值越大，这种加快的现场越明显。

4.5 其他因素对土工合成材料老化的影响

在一定温度下，埋地环境中的金属离子浓度、地下水、酸碱度、对土工合成材料的热氧老化有一定加快影响。文献[16]通过130℃的高温老化试验结果表明，土工布纤维的热老化耐用期受金属离子的影响最大（降低约50%），受水的影响次之（降低约20%），受酸、碱的影响较小（降低约10%）。

值得注意的是，目前袋装砂围堤常用的聚丙烯(PP)和聚酯(PET)两种材料化学特性有较大的不同：PET在碱性条件下易水解，根据纤科公司在黄海水域的海水碱性环境条件下进行耐久性实验，常用300 g/m²的PET土工布在海水浸泡12个月后，剩余强力降为60%~70%，因此PET材料不推荐用于海水碱性环境；而PP具有极强的化学稳定性，适用于绝大多数情况下的土壤环境，但耐高温和耐日晒方面不如PET，因此PP材料不建议暴露在室外环境下使用。

5 土工合成材料使用寿命预测

目前袋装砂围堤的设计预期寿命往往大于25 a, 但缺乏有力的试验证据, 因而如何准确地预测其使用寿命已显得越来越重要。而由于袋装砂围堤应用历史较短, 原始数据极少, 需要通过室内加速老化试验, 使土工合成材料内部结构和性能都产生衰变, 以取得科学数据。但目前常规的加温氧化降解试验的试验周期需要5 a以上, 短期内也难以得到材料老化数据来进行有效的寿命预测分析。因此本文建议采用以下两种方法进行预测:

1) 化学模型预测法。

考虑到长期使用的袋装砂围堤一般都采取掩埋防护, 处于埋藏条件较好的状态。据文献[8], 袋体在长期埋地的环境中自然老化速度较慢, 主要表现为工程环境温度下热氧老化反应导致的强度随时间衰减。因此, 可采用主要考虑环境温度对材料氧化降解影响的Arrhenius模型来预测袋装砂围堤的抗老化性能和使用寿命。以下以环境温度25 ℃时的聚丙烯编织布为例, 分别预测25 a和50 a后袋装砂围堤强力保持率。

$$k(25\text{ }^\circ\text{C})=8.4e^{-5111} \quad (2)$$

$$Y=100\exp(-kt)=100\exp(-8.4e^{-5}t) \quad (3)$$

当 t 分别为9 000 d, 18 000 d时, 材料的强力保持率分别为47%, 22%, 因此袋装砂围堤编织布的使用寿命估计为25 a左右(以强力保持率达到50%的老化时间为终止指标)。若考虑添加防老化剂, 则使用寿命可增加1倍, 达到50 a以上。

2) 拟合曲线外推法。

根据文献[16]提供的土工合成材料应用工程工后多年取样老化试验数据, 采用指数曲线拟合得到回归公式, 再进行外推预测。聚酯无纺布回归为 $y=0.9989\exp(-0.0072x)$, $R^2=0.996$, 相关性较好; 丙纶编织布回归为 $y=0.9827\exp(-0.0167x)$, $R^2=0.8235$, 相关性稍差。经计算, 长期埋地的环境中聚酯无纺布使用寿命达90 a以上, 丙纶编织布使用寿命达40 a以上。

6 土工合成材料长期使用强度取值

土工合成材料长期使用性能一般采用强度折

减系数进行评价。一般来说老化、蠕变和机械损伤等均引起土工合成材料的强度的降低, 本文仅讨论老化引起的强度折减。老化折减系数可依据以下公式表示:

$$F_D=T_u/T_D \quad (4)$$

式中: F_D 为材料老化折减系数; T_u 为土工合成材料的极限抗拉强度; T_D 为老化后保持的抗拉强度。

因此, 在长期埋地、常温、50 a使用寿命条件下, 聚酯土工布的老化折减系数可取1.5(非碱性环境), 防老化聚丙烯土工布的老化折减系数可取2.0。另外根据文献[17], 土工格栅长期使用的老化折减系数可取1.1。

7 结论

1) 影响袋装砂围堤老化性能的因素有很多, 但对于长期埋地环境中的袋装砂围堤土工合成材料, 主要表现为工程环境温度下热氧老化反应导致的强度随时间衰减, 老化速度是较慢的。

2) 防护完好时, 采用聚丙烯编织布的袋装砂围堤使用寿命可达25~50 a, 可满足一般工程设计年限末所保持的强度达到设计要求。对使用期无强度要求的袋装砂围堤使用寿命可更长。

3) 本文以土工合成材料强力保持率达到50%的老化时间来评价其使用寿命, 也就是化学界常用的半衰期定义, 因此老化折减系数取2.0也是合适的。但不同的土工合成材料、不同的使用环境其使用寿命相差较大。

参考文献:

- [1] 化学工业部合成材料老化研究所. 高分子材料老化与防老化[M]. 北京: 化学工业出版社, 1979.
- [2] 郑智能, 凌天清, 李东升. 土工合成材料的光氧老化试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2004(6):67-69.
- [3] GB/T 17641—1998 土工合成材料/裂膜丝机织土工布[S].
- [4] 杨旭东, 丁辛. 土工合成材料的老化性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2001(2):73-75,78.
- [5] 杨旭东, 邱文灿, 丁辛, 等. 紫外线辐射强度对聚丙烯长丝光氧老化的影响[J]. 纺织学报, 2009(8):8-12.
- [6] 廖永丰, 王五一, 张莉, 等. 到达中国陆面的生物有效紫

- 外线辐射强度分布[J]. 地理研究, 2007(4):822-828.
- [7] 包伟国, 薛育龙, 杨旭东. 聚丙烯土工合成材料的老化与防老化[J]. 上海纺织科技, 2004(3):39-40.
- [8] 包伟国, 薛育龙, 杨旭东. 航道用聚丙烯土工织物的老化性能研究[J]. 产业用纺织品, 2004(8):22-25.
- [9] 杨旭东, 丁辛, 薛育龙, 等. 自然环境下聚丙烯土工织物的老化行为[J]. 东华大学学报, 2007(1):57-61.
- [10] 王殿武, 曹广祝, 仵彦卿. 土工织物老化性能试验研究[J]. 水利水电技术, 2003(7):85-86.
- [11] 郑智能, 凌天清, 董强. 土工合成材料的老化研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005(4):71-76.
- [12] 郑智能, 凌天清, 董强. 土工合成材料长期强度保持率的化学动力学预测[J]. 重庆交通学院学报, 2005(4):74-76.
- [13] 牛晓明, 杨旭东, 丁辛. 应力对土工合成材料老化的影响[C]//上海: 国际产业用纺织品和非织造布研讨会暨第二届高新技术在产业用纺织品领域推广应用研讨会会议论文集, 2003:45-48.
- [14] 牛晓明, 杨旭东, 丁辛. 应力对高聚物土工合成材料老化的影响[J]. 国际纺织导报, 2004(1):74-78.
- [15] 牛晓明, 杨旭东, 丁辛. 光氧化对聚丙烯长丝蠕变行为的影响[J]. 东华大学学报, 2004(6):50-53.
- [16] 朱庆松, 魏晓丽, 孙玉山, 等. 影响丙纶土工布老化的主要环境因素[J]. 纺织科学研究, 2003(4):38-43.
- [17] 蒋文凯, 王钊, 邓卫东. 土工合成材料老化指标的研究[J]. 人民长江, 2005(4):63-65.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 155 页)

参考文献:

- [1] 贾良文, 罗章仁, 杨清书, 等. 大量采砂对东江下游及东江三角洲河床地形和潮汐动力的影响[J]. 地理学报, 2006, 61(9): 985-994.
- [2] 毛野, 黄才安. 采砂对河床变形影响的试验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 64-69.
- [3] 陈甫源, 胡金春, 白咸勇, 等. 江道采砂对椒江河口的影响分析[J]. 泥沙研究, 2008(3): 46-53.
- [4] 乔飞, 孟伟, 张万顺, 等. 人工采砂对东江干流局部河段河床冲淤的影响研究[J]. 泥沙研究, 2010(2): 64-69.
- [5] 徐芳, 岳红艳. 河道采砂对航道和通航环境安全的影响[J]. 水运工程, 2010(8): 106-110.
- [6] 毛野. 初论采砂对河床的影响及控制[J]. 河海大学学报, 2000, 28(4): 92-96.
- [7] 毛尽乔. 河道复杂采砂坑附近流场的数值模拟[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 6-11.
- [8] 曾慧俊, 谈广鸣, 吕平. 采砂河道数值模拟研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(2): 80-83.
- [9] 张强, 张小峰, 采砂深度对分汊河道影响分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009, (3): 127-135.
- [10] 李孟国, 吴以喜, 蒋厚武. 瓯江口中沙采砂对温州港航道的影响研究[J]. 水道港口, 2005, 26(4): 195-200.
- [11] 吴祥华, 李玉中. 浦东机场跑道工程江砂开采及对河道的的影响[J]. 人民长江, 2005, 36(11): 3-5.
- [12] 穆锦斌, 杨芳丽, 谢作涛, 等. 采砂工程对河道影响分析研究[J]. 泥沙研究, 2008(2): 69-76.
- [13] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 台州东部新区临时航道疏浚工程岸滩稳定性影响论证[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2011.
- [14] 窦国仁. 潮汐水流中的悬沙运动及冲淤计算[J]. 水利学报, 1963(4): 13-24.
- [15] 肖洋, 张九鼎, 雷鸣, 等. 矩形采砂坑形态对明渠水位降低的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 702-707.

(本文编辑 武亚庆)