

热脱附对土壤工程性质影响的研究现状和发展趋势

□ 杜 静 淳野杨 徐丽丽

[摘 要] 热脱附是利用高温作用的一种土壤修复技术，虽能有效去除土中污染物，但是其造成的高温环境对土壤的物理性质产生重要影响。随着热脱附技术在城市推广，利用热脱附修复的场地面积越来越大，人们对热脱附后土壤的工程性质变化了解越来越迫切。总结高温作用对土壤的物理性质指标（颗粒级配、化合物成分与含量、液塑限、结合水）和力学性能（抗剪强度、压缩特性）影响的研究成果，并做相关论述，提出今后关于热脱附对土壤工程特性影响的研究方向，希望可以为学者们的研究提供帮助。

[关键词] 热脱附；高温作用；物理性能；力学特性

随着城市“中调”战略，产业结构优化等政策的实施以及城镇化进程的加快使大量达不到环保要求的油气、化工、皮革、造纸等工业企业迁离市区，遗留下大量的污染场地^[1-2]。这些场地内富含石油类、多环芳烃（PAHs）、有机氯农药、多氯联苯、二噁英，具有高溶度、易挥发、空间变异性大、污染深度大等特点^[3]，不仅破坏生态环境、危害人体健康，也影响场地的二次开发利用。因此，污染场地的修复治理已然成为社会环境关注的重大问题之一。

目前，关于土壤污染物修复方法众多，主要有化学修复、生物修复、综合修复和热脱附等。其中，热脱附是指通过直接或间接加热土壤，使有机污染物挥发、水解或热解，从固相或液相转变为气相，并对污染气体进行收集处理，从而达到净化污染土壤的目的^[4]。该方法简单，修复时间短、修复彻底、修复成本相对较低，而被广泛应用于国内外有机污染场地的修复工作中^[5]。如全球最大的原位热脱附修复场地苏州某退役溶剂厂，通过燃气和电阻热脱附原位修复后，对受苯、氯苯和石油类污染的土壤进行中试验分析，结果显示去除率达到99%^[6]。但在热脱附过程中，土壤温度需达到600℃~800℃，虽有效去除污染物，但土的内部结构、化合物成分和含量也发生了显著改变，其宏观工程特性也随之发生改变。通过总结不同温度作用下，土的物理性质和力学特性变化的研究现状，认为高温对土壤的工程特性有着重要影响，并对今后的研究方向进行展望。

1 研究现状

1.1 高温作用对土壤物理性质的影响

1.1.1 化合物成分的变化

高温热处理会导致土壤化合物的变化，尤其是有机质。当温度超过临界温度时，有机质会以挥发（蒸馏）、碳化及氧化的形式减少^[7]，其减少程度取决于热处理时的温度高低和时间长短。Yi^[8]的研究表明，200℃加热15min，可减少土中10%左右的有机质。而温度在300℃~400℃，处理时间为30min~60min时，有机质降解可到45%~80%^[9]；当温度超过600℃时，有机质的降解量大大提高，达到90%^[10]。有机质的降解程度还取决于有机质的成分及它们之间的相互作用^[11]。易挥发性的物质，木质素和半纤维素大多在100℃~200℃的范围发生降解；腐殖酸和富里酸的脱羧则在加热到300℃以上时发生降解^[12]；烷基芳烃、脂类和甾醇等在500℃以上碳化。由此可见，土壤在高温处理后，不仅有机质减少，其内部结构也会发生改变。

伴随有机质变化，土壤中其他黏土化合物也将发生变化。通常，黏土化合物在高温作用下会发生脱水（结合水，结晶水失去）和晶体结构崩解（结构水失去，化学键断裂等）。起初，高温下最开始发生反应的物质为有机质，有机质为非晶物质，在高温作用分解释放N、Fe、Al和Mg化合物，这些化合物通过简单融合、晶体化合键重接等方式改变土中颗粒的直径^[13]。而土壤中其他黏土矿物，如高岭石、蒙脱石、伊利石、针铁矿、三水铝石等，只有达到化学物理临界温度值之上才会发

生脱羟基、脱氢等反应。高岭石在400℃~600℃开始分解，形成Al和Si化合物，当温度升至700℃~800℃形成次高岭石^[14]；而蒙脱石晶格结构在700℃以上加热之前保持稳定^[15]；伊利石在550℃以上才发生脱羟基反应^[16]；针铁矿在180℃~300℃脱羟基形成赤铁矿^[17]，这是土壤经过高温处理后颜色发生变化的主要原因；石灰矿（CaCO₃）土壤在温度作用下，石灰矿（CaCO₃）会与有机质相互作用形成方解石^[18]。

综上所述，高温作用下，有机质和黏土矿物等土壤的组成成分均以不同的形式发生物理、化学反应而变化，而它们的变化终将会影响土壤各方面性质。

1.1.2 液塑限的变化

通常，土壤的液塑限会随温度的升高而减小。这是因为，随着温度升高，结合水的含量减少，黏滞性减弱，土壤中的化合物活性变强，从而使颗粒间的相互作用减弱，只需比以往少的水量就可以使土壤从某种状态变为另外一种状态^[19]。但也有不同的学者对由不同量有序晶体和无序高岭土组成的黏土进行试验时发现，液塑限不会随温度的变化而变化，而高岭土与膨润土混合土的液限随温度升高而变大，且随着膨润土比例增大效应更明显，但塑限基本无变化。

1.1.3 颗粒级配的变化

高温可导致土中有机质降解，黏土矿物分解，从而改变土的颗粒级配。有学者通过试验发现，400℃处理温度是一个关键点，400℃之前，颗粒级配不会发生明显改变；超过400℃，土中黏粒减少，粉粒和砂粒增加^[20]。Fujun Ma^[21]发现温度为400℃，烘烤时间为60min处理的土壤砂粒含量仅增加5%，黏粒和砂粒成分基本不变；温度为700℃，烘烤时间为40min时，黏粒含量减少11%，粉粒含量基本不变，砂粒含量增加13%。也有学者有不一样的结论，Giovannini^[22]通过实验，得出当温度为170℃时，土的颗粒级配发生变化；而Quirine M.发现温度超过500℃土中砂粒含量才会增加。

对于高温作用下，土壤的颗粒级配变化的原因，最早C.T.Dybness and G. T.Youngberg^[23]认为是由于黏土脱水，熔融而导致，但并未指出是哪类化合物。随着人们对土壤的研究及科技技术的发展，有学者表明在高温作用下，土壤颗粒级配的变化主要是高岭石高温溶解为形成Al和Si的化合物^[24]，而这些化合物的形成和团聚正是土壤颗粒级配变化的原因。

1.1.4 结合水的变化

高温可改变土壤中化合物的种类和含量，依据结合

水的形成机理可知，化合物种类和含量的变化将会导致结合水的改变^[25]。随着温度增高，土壤中的强结合水将会向弱结合水转换，弱结合水会向自由水转换，结合水含量降低^[26]，而结合水含量的改变，将直接导致工程特性的改变。

1.2 热脱附对土壤力学特性影响的研究

高温对土壤的颗粒级配，结合水含量和颗粒间的胶结作用等物理性质均有重要影响，而这些物理性质变化也会引起抗剪强度和压缩性能的变化。

1.2.1 抗剪强度指标的变化

衡量土的抗剪强度有两个指标——黏聚力c和内摩擦角 ψ ，内摩擦角可以用颗粒级配和颗粒形状等因素去研究表征，而黏聚力包含静电引力、范德华力、颗粒间的胶结力和表观黏聚力等，在这些力中，颗粒间的胶结力至关重要^[27]。有学者提出土壤中黏聚力主要为游离氧化铁形成的胶结作用和颗粒间特殊的连接形式造成^[28]，而土壤高温作用其化合物成分会发生变化。

1.2.2 抗剪强度的变化

张栋对经过高温梯烘烤后的重塑黏土进行无侧限抗压强度实验，结果表明：烘烤温度越高，时间越长，无侧限抗压强度越大，当温度达到600℃之后，强度增加缓慢。同时对烘烤土样进行SEM分析可知，烘烤导致土体内部团聚，孔隙数量变多，孔径变大^[29]。

目前，对于高温（>100℃）处理后土的力学性能变化的研究较少，大部分的研究集中在100℃以下温度作用后的力学性能变化规律。周东以南宁市河流冲积相黏性土为研究对象，研究不同初始状态黏性土抗剪强度的热效应规律，结果表明：温度升高时，黏聚力和内摩擦角有升有降，当温度从20℃上升到40℃时，若小于临界含水量，黏聚力降低，内摩擦角升高，反之黏聚力升高，内摩擦角降低；当温度从40℃上升到60℃时，若小于临界含水量，内摩擦角降低，反之内摩擦角升高，而土样黏聚力均升高^[30]。欧孝夺对不同温度作用下黏性土的物理、化学表现进行分析，发现随着温度升高，黏聚力c值不断增大，而内摩擦角有起伏变化^[31]。邵玉娴的研究表明不同矿物成分的黏性土在5℃~45℃温度作用下抗剪强度随温度升高而线性降低，摩擦角则变化不明显；同时发现，亲水矿物含量较高的黏性土抗剪强度对温度变化较敏感，强度随着温度的上升而下降得越快^[32]。高燕希等发现非饱和土的抗剪强度随温度的升高呈线性递减^[33]。谢云研究得出非饱和土的抗剪强度随温度的升高而增大，并根据试验结果建立了考虑温度影响的非饱和

土抗剪强度公式和切线杨氏模量公式^[34]。

综上所述，对温度作用下土的物理力学性能的研究结果来看，土的黏聚力受温度（<100℃）影响较大，且变化趋势不尽相同，而摩擦角比较“迟钝”，在不同温度作用下变化不明显。

1.2.3 土的压缩性变化

土的压缩特性主要受颗粒级配、结合水含量和有机质含量等因素影响，而高温（>100℃）时可以改变这些影响因素，所以，高温（>100℃）处理后土的压缩特性会发生改变。

一般情况下，温度作用可使土壤的压缩特性变小，如Sultan, N^[35]研究15℃~45℃土固结特性，发现固结系数与温度高低呈负相关，并认为水的黏滞性改变是土固结特性变化的原因。Ye, W. M^[36]利用自主研制的具有吸力和温度控制的转速计，对GMZ01膨润土进行20℃~80℃温度范围内土的压缩性能试验，提出温度升高可促进蒙脱石晶体结构重叠效应增强。Bai Bing^[37]通过梯度升温和降温的方式，研究温度变化对土壤压缩性能的影响，得出固结体积应变随温度阶段的升高而显著增大，冷却后吸收的体积应变随温度阶段的降低而减小的结论。

2 目前研究中存在的问题

通过上述文献综述可以看出，温度对土的颗粒级配、化合物成分、液塑限、强度和压缩等指标有着重要影响。虽然目前国内外对热脱附进行土壤污染物修复的研究较多，也有一定的成果，但对热脱附后高温作用下对土工程性质的影响和评价研究较少，存在空白领域，不能满足热脱附后土的二次利用，主要表现在以下几个方面。

（1）目前研究只表明高温对土壤颗粒级配有显著影响，甚至黏性土可转变为砂性土。但是，温度对土壤颗粒级配的影响到底怎样，以及其变化的实质是什么并没有一致结论。

（2）目前针对温度对土的各个物理性能的影响机制研究不够系统。从国内外关于温度对土壤的化合物成分和含量、液塑限、颗粒级配，结合水含量和颗粒间的胶结作用的文献综述可知，温度的影响不容忽视，且带来的影响是巨大的，有必要针对温度对土的各个物理性能影响机制进行深入系统研究，为以后理论研究和现场施工提供参考。

（3）目前对于高温作用下土的力学性能变化机制研究有缺陷。高温（>100℃）处理后的土壤，不仅仅是水的特征发生变化，其化合物成分和含量、颗粒级配及

颗粒间的胶结作用均发生改变，土的力学性能变化机制更加复杂。因此，需要进一步对高温处理后（高温历史效应）土壤的力学性能进行深入研究。

（4）从温度对土壤的力学特性和压缩特性的研究现状来看，温度的影响是明显且不容忽视的，在热脱附这一领域中，温度的作用（100℃~800℃）会更加显著，土的变化也会更加显著，那这种变化对土的物理力学特性和压缩特性有怎样的影响？目前尚未有相关文献报道，因此，对高温处理后土壤的力学性质和压缩特性的研究是有需要的，也是具有重要理论和实际意义。

3 研究方向

（1）研究高温对土壤工程特性的影响机制。高温作用下，土的微观结构、物质成分和含量等均会发生显著改变，而这些改变势必会影响土壤宏观物理性质。因此，需要了解高温作用造成的土壤微观层次的变化，找到微观与宏观之间的“桥梁”，利用“桥梁”分析高温作用是怎样导致土壤微观变化来影响土的宏观性质；同时，利用统计学理论，分析得到不同高温作用下的主要微观影响因素，并建立相应的函数关系。

（2）建立土壤热脱附后再利用的评价机制。热修复后土壤的工程特性发生显著改变，这种改变对今后二次开发具有怎样的影响，能够作为何种开发用处。需要从岩土工程的角度给出工程评价，建立土壤热脱附后再利用的评价机制。

4 结语

目前，热脱附作为有机污染土的修复方式被广泛运用，但处理后的土壤由于受高温作用，其物理性质和力学性能发生改变，工程性质也随之变化，由于相关理论的不完善和试验方法、设备的缺陷，高温作用后有关土工程性质的研究还很少。所以对高温作用下土壤工程特性变化的研究尤为重要。分析热脱附对土壤工程特性的影响机制，找出不同温度和时间作用下土壤的工程特性的变化规律是今后研究的一个方向，相关成果可减少土壤二次利用前的土壤质地论证过程，促进土壤热脱附后再利用的进程。

【参考文献】

[1]谢玉蓉.浅谈广州市污染场地环保监管对策[J].资源节约与环保,2013(6):109.
[2]魏鸿辉.广州市工业污染场地土壤修复进展及对策[J].广东化工,2016,43(12):154-155.
[3]廖晓勇,崇忠义,阎秀兰,等.城市工业污染场地：中国环境修复领域的新课题[J].环境学,2011,32(3):784-794.

[4]王澎,王峰,陈素云,等.土壤气相抽提技术在修复污染场地中的工程应用[J].环境工程,2011,29(S1):171-174.
[5]张学良,廖朋辉,李群,等.复杂有机物污染地块原位热脱附修复技术的研究[J].土壤通报,2018,49(4):993-1000.
[6]梅志华,刘志阳,王从利,等.燃气热脱附技术在某有机污染场地的中试应用[J].资源节约与环保,2015(1):34-35.
[7]CertiniG.Effects of fire on properties of forest soils: a review[J].Oecologia,2005,143(1):1-10.
[8]Yi Y M,Park S,Munster C,et al.Changes in ecological properties of petroleum oil-contaminated soil after low-temperature thermal desorption treatment[J].Water, Air, & Soil Pollution,2016,227(4):1-10.
[9]Ma F,Zhang Q,Xu D,et al.Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl3 at reduced temperature[J].Chemosphere,2014(117)388-393.
[10]Vidonish J E,Zygourakis K,Masiello C A,et al.Pyrolytic treatment and fertility enhancement of soils contaminated with heavy hydrocarbons[J].Environ Sci Technol,2016,50(5):2498-2506.
[11]Kiersch K,Kruse J,Regier T Z,et al.Temperature resolved alteration of soil organic matter composition during laboratory heating as revealed by C and N XANES spectroscopy and Py-FIMS[J].Thermochimica Acta,2012(537):36-43.
[12]Gonz á lez-P é rez J A,Gonz á lez-Vila F J,Almendros G,et al.The effect of fire on soil organic matter—a review[J].Environment International,2004,30(6):855-870.
[13]David Bad í a-Villas et al.Changes in water repellency,aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory:Soil depth affected by fire[J].Geoderma,2014,213:400-407.
[14]张实,张惠芬.高岭石的热稳定性和热处理产物的DTA，IR和EPR研究[J].矿物岩石,1992(2):28-33.
[15]Greene-Kelly,R.Dehydration of the montmorillonite minerals[J].Mineralogical Magazine and Journal of the Mineralogical Society,1995.30(228):604-615.
[16]Ara ú jo J H D,Silva N F D,Acchar W,et al.Thermal decomposition of illite[J].Materials Research,2004,7(2):359-361.
[17]Schwertmann U,Friedl J,Stanjek H.From Fe（III）Ions to ferrihydrite and then to hematite[J].Journal of Colloid and Interface Science,1999,209(1):215-223.
[18]Úbeda X,Pereira P,Outeiro L,et al. Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak（Quercus suber）[J]. Land Degradation & Development, 2009,20(6):589-608.
[19]王洪绪,裴成玉,付佳.印尼某地区黏性土含水率及液塑限相关性研究[J].中国港湾建设, 2017,37(8):53-56.

[20]Graham A L U A.Forest fire effects on soil color and texture[J].Soil Sci,1993(57):135-140.
[21]Ma F,Zhang Q, Xu D,et al.Mercury removal from contaminated soil by thermal treatment with FeCl3 at reduced temperature[J].Chemosphere,2014(117):388-393.
[22]Giovannini G,Lucchesi S,Giachetti M.Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility[J].Soil Science,1988,146(4):255-261.
[23]CTDyrness,C.T.Youngberg.The effect of logging and slash burning on soil structure[J].Soil Science Society of America Journal,1957,21(4):444-447.
[24]Dixon,J.B.Kaolin and serpentine group minerals[J].Soil Science Society of America,1989(1):462-525.
[25]陈琼.黏土吸附结合水水动力学模型及机理研究[D].武汉:中国地质大学,2013.
[26]邵玉娴,施斌,刘春,等.黏性土水理性质温度效应研究[J].岩土工程学报,2011,33(10):1576-1582.
[27]孔令伟,罗鸿禧,袁建新.红黏土有效胶结特征的初步研究[J].岩土工程学报,1995(5):42-47.
[28]高国瑞.中国红土的微结构和工程性质[J].岩土工程学报,1985(5):10-21.
[29]张栋.大连东港地区淤泥质土高温烧结处理研究[D].大连:大连海事大学,2016.
[30]周东,乐观永,刘晨晖,等.南宁市河流冲积相黏性土抗剪强度热效应研究[J].土木工程学报,2012,45(2):111-117.
[31]欧孝奎.城市环境下粘性土细观结构的热力学行为研究[D].南宁:广西大学,2004.
[32]邵玉娴,施斌,顾凯,等.非饱和黏性土抗剪强度的温度效应试验研究[J].工程地质学报,2011,19(1):137-142.
[33]高燕希,冯战,郑健龙.非饱和土抗剪强度的温度性质[J].长沙交通学院学报,2002(4):68-71.
[34]谢云,陈正汉,李刚.温度对非饱和膨胀土抗剪强度和变形特性的影响[J].岩土工程学报,2005(9):1082-1085.
[35]Sultan N,Delage P,Cui Y J.Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay[J].Engineering Geology, 2002,64(2):135-145.
[36]Ye W M,Zhang Y W,Chen B,et al.Investigation on compression behaviour of highly compacted GMZ01 bentonite with suction and temperature control[J].Nuclear Engineering and Design,2012(252): 11-18.
[37]Bai B,Guo L,Han S.Pore pressure and consolidation of saturated silty clay induced by progressively heating/cooling[J].Mechanics of Materials,2014(75):84-94.