

输电线路大型铁塔膨胀土基础原型抗拔 试验土体破坏机理分析

史长莹^{1,2}, 李占斌¹, 张冬²

(1 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710048;

2 河北工程学院 水利系, 河北 邯郸 056021)

[摘要] 以邯郸至石家庄 500 kV 输电线路铁塔基础设计与施工为例, 通过现场抗拔模型和现场抗拔原型试验中出现的膨胀土破裂面和地表裂缝, 深入分析了膨胀土裂缝的产生机理, 并结合有限元计算方法, 准确揭示了膨胀土中大型抗拔基础的抗拔机理、填土及基础中的抗拔应力状态及破坏形态, 对目前的一些流行观点和现行规范“计算直线杆塔基础上拔稳定时, 对塑性指数大于 10 的亚粘土和粘土可取天然容重”提出了修订意见。

[关键词] 输电线路; 膨胀土; 地基应力; 抗拔试验

[中图分类号] TU443; TU41

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)11-0131-06

国内对膨胀土基础下压、上拔和浸水上拔的研究^[1,2]文献不多, 一些计算参数取值缺乏必要的经验和数据^[3], 规范规程也未做具体规定。为此, 从 1999-02~09 进行了邯郸至石家庄 500 kV 输电线路工程膨胀土地基浸水载荷试验。根据试验方案, 先后进行了现场抗拔模型试验、现场抗拔原型试验及膨胀土有限元应力分析, 测试了极限上拔荷载、基础上拔位移、土的破裂面形式、土中应力及基础埋深的影响等, 并对其进行了理论分析和计算, 提出了对工程实际应用有指导意义的参数, 为高压输电铁塔的基础设计以及膨胀土地基条件下的铁塔基础设计提供了理论依据。现将研究结果报道如下。

1 现场抗拔模型试验

1.1 试验方法及要点

现场抗拔模型试验虽然使整个试验的工作量增加、试验历时加长, 但提高了试验的精度, 同时基本解决了因模型尺寸过小而引起的尺寸效应及因环境条件和人为因素带来的误差。

本次试验采用简支梁结构、利用杠杆原理施加上拔力。采用边长为 707 和 1 000 mm 两种方形板, 707~3 000 mm 不等埋深进行系列试验。

试验分为浸水和不浸水上拔两种。当某级荷载作用下土体上拔位移量超过前一级荷载的 5 倍时, 认为土体已经破坏, 即终止试验^[4]。

1.2 土中破裂面及地表裂缝形式

土中破裂面的形成、开展和地表裂缝形状的观测与分析, 是研究上拔荷载作用下土体破坏机理的主要内容。

随着埋深的增加, 较深处土体抗剪强度的提高和土体通过较大的压缩变形使荷载产生的应力得以传递扩散, 从而提高了整个受拔土层的极限上拔荷载。

通过试验发现, 地表主要形成以基础为中心的放射状裂缝, 并且随着荷载的增加裂缝宽度加大, 条数增加; 当荷载接近极限荷载的 80%~90% 时, 开始出现少量的环状裂缝与放射状裂缝。当土体破坏后, 在卸荷过程中地表出现外环状裂缝; 当卸荷接近于零时, 地表放射状裂缝闭合, 而外环状裂缝宽度最大。

产生放射状裂缝的原因是接近基础的土体产生较大的压缩变形, 上拔位移量也最大; 随着深度的减小, 土体的自重应力减小, 压缩变形减小。由于土体的上拔位移量不同, 从而使土体表面断裂。

由以上地表裂缝情况判断, 上拔土体扩散范围较大, 土体破坏时, 土中破裂面未完全贯通至地表形成完整的滑动破裂土体。模型试验土体的破裂面形状不仅与回填土的性质有关, 还与基础的平面尺寸有关, 因此土体属整体剪切破坏。

[收稿日期] 2005-03-31

[作者简介] 史长莹(1964—), 男, 河北乐亭人, 副教授, 在读博士, 主要从事水利工程研究。

2 现场抗拔原型试验

2.1 试验目的

在现场抗拔模型试验的基础上,为了进一步深入研究和验证膨胀土地区原型的真实抗拔性能,本研究又进行了现场原型试验。由于膨胀土具有较高的抗压强度,因此基础设计是由抗拔性能控制

的 5×10^4 。

2.2 原型试验方案

2.2.1 抗拔基础和抗压基础 根据工程设计的需要,原型基础为方形 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$,埋深 3.5 m 。根据工程勘察资料,初步估计原型抗拔基础上拔力为 $1\,150\text{ kN}$,考虑到一定的安全余量,抗压基础设计为 $1.9\text{ m} \times 1.9\text{ m}$ (图 1,图 2)。

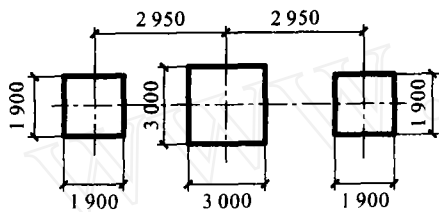


图 1 原型抗拔、承压基础平面布置图
Fig. 1 Plane lay chart of resisting draw & being press in expansive soil antetype foundation

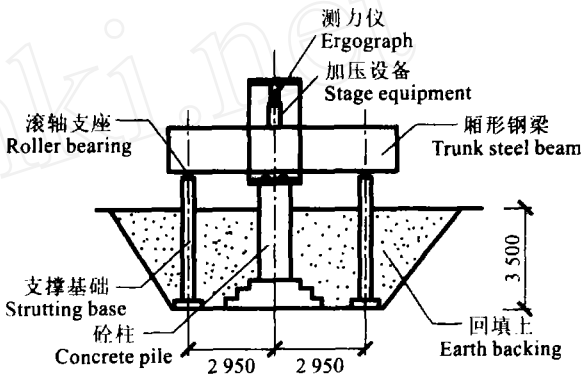


图 2 原型抗拔试验设备及安装图
Fig. 2 Fixing and testing equipment chart of resisting draw in expansive soil antetype foundation

2.2.2 原型试验场地的布置 现场原型试验布置在试验场地的中间部位。根据现场地形和对基础试验的总体要求,原型试验按南北布置。

现场原型基坑下口宽 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,上口宽 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$,南北承压基础分别向南北各扩挖 1 条宽 2.5 m ,长 3 m 的基坑,承压基础与原型基础底面高程相

同,以减少承压基础对抗拔基础的影响。

基础回填土用气夯砸实,每 30 cm 1 层,经现场取样试验,测定回填土及原状土的含水量 ω 、密度 ρ 、干密度 ρ_1 、剪力 C 、摩擦角 φ 等,其结果见表 1(压实系数取 $0.93^{[11,12]}$)。

表 1 原型基础抗拔试验回填土及原状土的物理力学性质

Table 1 Physical mechanics character of back fill and undisturbed soil in pull-out test of antetype foundation

取土深度/m Borrow depth	回填土 Back fill					原状土 Undisturbed soil					比重 Specific gravity
	$\omega/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\rho_1/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\omega/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\rho_1/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	
0.5	9.71	1.61	1.49	68.5	32.5	19.77	1.92	1.60	89.0	37.0	2.76
1.0	9.88	1.62	1.52	65.0	31.0	19.84	1.94	1.62	87.0	35.0	2.76
1.5	10.02	1.64	1.52	65.5	33.0	21.34	1.97	1.62	85.0	38.0	2.76
2.0	10.33	1.64	1.53	67.0	33.0	21.71	1.97	1.62	87.0	39.0	2.76
2.5	11.25	1.65	1.54	66.0	32.0	21.06	1.98	1.64	85.0	39.0	2.76
3.0	10.18	1.65	1.55	65.5	32.5	19.21	1.98	1.66	85.0	37.0	2.76
3.5	11.05	1.68	1.55	66.0	33.5	19.38	1.98	1.66	86.0	39.0	2.76

2.2.3 试验设备和仪器布置 采用中心加载方式进行加荷试验。按加载的布置要求确定承载大梁长度为 6.88 m ,主梁设计为箱形断面,设计承载力为 $3\,000\text{ kN}$ (超载下可达 $4\,000\text{ kN}$),自重 4.8 t 。

2.2.4 测试仪器和布置 为了准确测定土体应力随基础上拔荷载和上拔位移的变化,本研究采用辽

宁省丹东市虬龙传感器制造有限公司(原丹东市电器仪表厂)生产的 JXY-2 型单膜土压力传感器和 SS-Ⅱ型数字式钢弦频率接收仪。共埋设 80 只土压力传感器,分 5 层按对称布置(图 3,按 1 层绘制),高程分别为 $-70,-140,-210,-280$ 和 -350 cm (地表高程为零)。高程用水准仪测定,基准点选在基

坑以外 20 m 处。

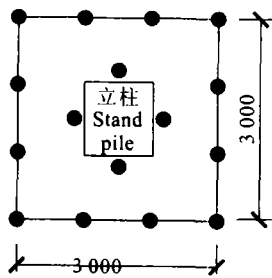


图 3 土压力传感器布置图

Fig. 3 Lay chart of soil stress sensor

为了测定原型基础的上拔位移,采用两只机械式百分表架在 9 m 长的小梁上进行观测,同时采用两只机械式百分表测定承压基础的沉降量。

2.3 现场原型基础的抗拔试验

本研究完成的工况有:①基础填土完成期抗拔试验;②基础填土浸水 5 d 后抗拔试验;③基础填土浸水后通气抗拔试验;④基础填土浸水后阶段通气抗拔试验。这 4 种试验工况包括了基础运行的各种不利荷载组合,第 3 种工况为本研究基础的设计工况,是关键的控制工况;第 2 种工况是基础的一种特殊受力状态;第 1 种工况相当于刚刚建成和长期干旱的情况。

2.4 试验现象和破坏形态描述

2.4.1 地表裂缝描述 地表裂缝情况与现场模型试验基本相同,各种工况均在地表出现以基础立柱为中心的放射状裂缝,并在周围出现少量的环向裂缝。当荷载达到极限上拔荷载的 90% 时,在立柱四周土体高高隆起的同时,立柱周围的土体与柱表面脱离,形成一条以立柱边界为走向的环向裂缝,最大缝宽达 50 mm,这是第一条环向裂缝,向外则以放射状裂缝为主,夹有少量不规则环向裂缝。在试验终了时,放射状裂缝延伸可达 2.5 m,但环向裂缝一般仅出现在以立柱为中心的 1.5 m 范围内,且与放射状裂缝相比宽度较小。

卸载过程中,隆起的地面随荷载的减少而逐渐下沉,同时径向的放射状裂缝和内部的环向裂缝逐渐闭合,在接近完全卸载时出现一个以立柱为中心,半径约为 3.0 m 的外环向裂缝,近似呈圆形。

2.4.2 裂缝产生机理 本试验测定了地表的隆起量和裂缝宽度及其走向,土中的位移场如图 4 所示,基础是钢筋混凝土结构,在垂直上拔力作用下,仅产生垂直向上的位移。从观察到的土体表层位移可见,立柱周边土体在产生上拔位移的同时产生了约 50

mm 的径向位移,在立柱周边较远处产生了少量的环向裂缝,这是由表层土体产生径向位移所致。假设以立柱为圆心,半径为 R 处的土体径向位移为 Δ ,则以 R 为半径的环周长将由 $2\pi R$ 变为 $2\pi(R+\Delta)$,增加了 $2\pi\Delta$,即为表层整个环向裂缝的总宽度。

由以上分析可以认为:地表的放射状裂缝是由地表土体产生的径向位移引起的。由于中心土体的径向位移大,因而此处裂缝最宽,向外则逐渐减小。而环向裂缝是由于上抬位移中间大,变位以后 OA 或 OB 变长而引起的拉应变形成的。

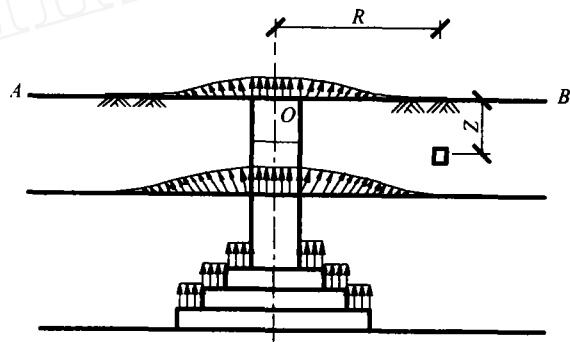


图 4 原型试验位移场示意图

Fig. 4 Sketch of displacement scene in antetype test

需要特别说明的是,浸水通气与不通气的抗拔试验曲线在接近其本身的极限承载力 P_u 时,曲线几乎成为水平线,二者相差约 400 kN,若按基础底面积 9 m^2 计算,则基础底面上每平方米有 44.4 kPa,相当于 0.45 个大气压。此负压值为平均值,在基础底部的土压力传感器也检测到了该值,此值约为 60 kPa,相当于 $2/3$ 个大气压。由此可见,负压的确在抗拔过程中产生了重要作用。而大型基础不浸水上拔底板下的真空负压是可以忽略不计的。

在本试验中,通气之后上拔承载力大大下降,试验后期在通气孔中灌入了少量水,但仍可使基础立刻出现明显上移。因此可以认为,若地表存在自由水,当通气孔与自由水相连时,水压会传至基础底部,基础底部的压力会大大上升而高于大气压力。从物理原理分析可知,极端情况是底部压力与自由水的压力相同,基础连同其以上的土体均应按浮容重计算。《送电线路基础设计技术规定(SDGJ62—84)》中的 1.13 条规定“计算直线杆塔基础上拔稳定时,对塑性指数大于 10 的亚粘土和粘土可取天然容重”,这一条只有保证地表水或地下含水层(承压)未与基底连通的通道时才是安全的。

3 土体应力分析

3.1 有限元应力分析

计算软件采用国际流行的 ALGOR 有限元软件,即美国 ALGOR 公司 SAP93,该软件经过数十年各级各类工程的考验,版本不断更新而日臻成熟,现已成为有限元分析软件的一个标准。

计算范围取铁塔基础水平方向四周延伸 4 m,基础埋深 3.5 m,深度取到基础以下 2~3 m。为了得到较为准确的结果且更好地模拟原型,应采用空间有限元模型,虽然会大大增加计算规模,耗费大量人力、机时,但是能得到较为准确的结果。本试验的单元类型为 8 节点三维实体元,共有 11 916 个节点,10 202 个单元。原型不浸水抗拔模型计算取极限上拔荷载 $P_u=1\ 000\text{ kN}$ 进行分析。

该有限元计算模型是将土体视为弹性体材料进行分析计算的,能够得出基础上拔时土体中的应力分布规律。当荷载较小时土体处于弹性状态,计算结果能准确反映土体中应力;当上拔荷载接近破坏荷载时,土体处于弹塑性状态,计算结果与实际应力将有一定误差,但可用于分析试验中的破坏现象。

本研究计算结果显示,随深度增加,基础周围土体的压应力越来越大,但在接近基础时,由于基础上抬,靠近基础侧边出现拉应力,拉应力范围很小。随着荷载的上升,剪切破坏面将沿垂直于最大主应力方向发展。在接近地表时,主拉应力靠近中间部位(即中心立柱)较大,离中心越远,拉应力越小,逐渐变为零应力或压应力。

对地表以下土体水平面的应力而言,越靠近基础中心压应力越大,各层的规律完全一致。主拉应力随深度增加,受拉区范围逐渐减小,地表拉应力区范围最大,主拉应力方向均为环向,与试验中出现的放射状地表裂缝现象是完全吻合的。

3.2 抗拔原型试验土体应力分析

在抗拔荷载作用下,土中应力状态和应力值的变化以及由于荷载增加而引起的土中应力变化过程的分析,是研究土体上拔承载力计算理论的主要途径之一。本研究对土体在上拔荷载作用下的土中应力分布及其与荷载的关系、破坏状态进行了研究。

在抗拔原型试验基础四周的一定范围内,按照不同深度埋设了土压力传感器(图 3),直接量测了测点垂直方向的应力值,以便对土的应力和破坏机理进行分析。土压力传感器的量测原理为振频量测。试验中发现,不同埋深靠近原型基础立柱的土压力传感器应力增量随荷载增加而增加,且在荷载初期压应力增长较快,接近极限荷载时应力增长为零或增长值很小,说明土体在一定深度范围内有土的压缩现象,而且主要发生在荷载初期,压缩范围基本在基础宽度范围内形成棱锥体,这说明板式基础受上拔荷载作用时,板上部确实存在“太沙基极限荷载理论”的弹性核。底板 4 个对角上部布设土压力传感器的应力增量,从趋势上看随荷载增加而增加。当荷载为 900 kN 时,许多土压力传感器所反映的土压力增量出现骤减,这一现象说明此时达到土压力增量峰值,是极限荷载也是破坏的开始点。正方形基础底板上部中线边缘布设的土压力传感器的应力增量随荷载增加而减小,说明底板上部土体受压产生横向推力,使土压力传感器靠基础一侧因水平力而导致应力松弛。土的破裂面上部为曲线段,下部为直线段。

当荷载频率与初始频率(土压力为零)相等时,原型抗拔基础底板下埋设的土压力传感器所对应的荷载值,基本与基础自重和基础底面积以上土重的和相当,据此对原型抗拔基础不浸水与浸水不排气两种工况进行整理,结果如表 2、3 所示。

表 2 原型抗拔不浸水试验基础底部应力为零时的荷载值

Table 2 Load at foundation bottom stress being zero in antetype resisting draw soil body not inundating test

初始频率/Hz Initial frequency	荷载频率/Hz Load frequency	荷载/kN Load	土压力/MPa Soil pressure	荷载平均值/kN Load average value
1 499	1 490	448	0.004 1	476
1 652	1 540	560	0.001 3	
1 533	1 528	336	0.006 8	
1 677	1 630	560	0.004 2	

注:1. 初始频率指土压力传感器已埋入土体内但未加荷时的频率值。2. 荷载频率指土压力传感器已埋入土体内并已受荷时的频率值。下表同。

Note:1. Initial frequency is frequency value when soil stress sensor being embedded in soil body and not being stressed;2. Load frequency is frequency value when soil stress sensor being embedded in soil body and being stressed. The same as follow.

表 3 原型抗拔浸水不排气试验基础底部应力为零时的荷载值
Table 3 Load at foundation bottom stress being zero in antetype resisting
draw soil body inundating and not exhaust test

初始频率/Hz Initial frequency	荷载频率/Hz Load frequency	荷载/kN Load	土压力/MPa Soil pressure	荷载平均值/kN Load average value
1 510	1 489	735	0.000 1	750
1 672	1 539	715	0.000 2	
1 630	1 523	800	0.000 1	

由表 2,3 可以看出,当原型抗拔基础底板下埋设的土压力传感器的荷载频率与初始频率(土压力为零)相等,即底部应力为零时,其荷载值大于原型抗拔基础不浸水试验时的荷载值。这是由于浸水后,原型基础底板以上的土体自重增加,导致基础底部压强增加。另外,由于浸水后的土体不透气,基础底部产生的负压可使抗拔承载力上升,这也是出现上述现象的一个原因。

从土压力以及破坏现象看,认为土体破坏仅在破裂面上产生的观点是不全面的。实际上除了基础顶面以上的“弹性核”范围内土体不产生破坏外,其他在上拔角以内的土体均产生了破坏。

4 结 语

(1)通过膨胀土地基中原位不同埋深、不同抗拔钢板面积小型基础现场上拔仿真型浸水和不浸水试验,找出了膨胀土地基适用于“土重法”的基本参数:计算容重、计算上拔角、基础临界埋深。

(2)通过膨胀土地基中钢筋混凝土铁塔基础的原型抗拔浸水和不浸水试验,揭示了膨胀土中抗拔基础的抗拔机理、填土及基础中的抗拔应力状态与

破坏形态,为原型设计提供了参考。

(3)经过对国内 50 余次类似基础上拔试验数据的统计分析,对《送电线路基础设计技术规定》(SDGJ62-84)中“土重法”的计算公式提出了修正意见,供今后 SDGJ62-84 规范的修订参考。也就是说,土体在上拔荷载作用下,部分土体的压缩和由于土体压缩引起的横向推力及应力重分布是明显的。土中剪应力的变化引起剪切变形,而剪切破裂处的剪切变形导致土压力传感器测得的压应力松弛。土的破坏机理为压缩-塑性区出现和开展-整体剪切的渐进性破坏。土的上拔承载力主要由基础自重、基础以上土体重量、土的抗剪强度、土的压缩引起应力重分布产生的地基承载力构成。而“计算直线杆塔基础上拔稳定时,对塑性指数大于 10 的亚粘土和粘土可取天然容重”,也只有在保证地表水或地下含水层(承压)未与基底连通的通道时才是安全的。

(4)散体中的基础在上拔力作用下,其受力过程是一个十分复杂的问题,目前尚无一个十分成熟的理论能完全给予表达。本文依托大量的试验资料,总结出了一些规律,但尚有很多问题需进一步研究、解决。

[参考文献]

[1] 姜新佩,邓子辰. 开挖回填式基础抗拔承载力的理论研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(11): 40-42.
[2] 宿 辉. 膨胀土地基抗拔试验研究[J]. 水利水电技术, 2002, 33(5): 47-49.
[3] 河北工程学院,河北省电力勘测设计研究院. 邯石 500 kV 输电线路工程膨胀土地基浸水载荷试验研究报告[R]. 河北邯郸:河北工程学院;河北石家庄:河北省电力勘测设计研究院, 1999.
[4] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
[5] 吴永红. 抗拔桩在北塘大厦工程中的应用[J]. 岩土工程界, 2004, 7(7): 46-47.
[6] 张廷柱,杨国林. 加筋膨胀土地基极限承载力公式的确定[J]. 山西建筑, 2005, 31(7): 45-46.
[7] 朱建平. 膨胀土地基基础设计分析[J]. 江苏建筑, 2004, 95(2): 47-48, 50.
[8] 朱彦朝. 膨胀土软基地段填土路堤的施工技术[J]. 铁道标准设计, 2004, (10): 58-61.
[9] 姚海林,程 平,吴方平. 基于收缩试验的膨胀土地基变形预测方法[J]. 岩土力学, 2004, (11): 1688-1692.
[10] 刘 浩,谭 征,贾大力. 膨胀土地基处理措施的探讨[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2003, 21(3): 88, 91.
[11] SDGJ62-84, 送电线路基础设计技术规定[S].
[12] SDGJ112-87, 膨胀土地区建筑技术规范[S].

A breakage mechanism analysis of soil body in antetype resisting draw tests of large-scale iron tower groundwork for transmitting electricity line

SHI Chang-ying^{1,2}, LI Zhan-bin¹, ZHANG Dong²

(1 College of Water Resources and Hydro electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Department of Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056021, China)

Abstract: With the design and construction of 500 kV transmit electricity iron tower foundation from Handan to Shijiazhuang as a case, by analyzing the expansive soil cracking surface and surface crack shape in model and live antetype resisting draw tests, the paper reviewed the theory of expansive soil crack thoroughly. Combining the finite element computing method, the paper also revealed the resisting theory, filling soil and resisting draw stress state & destroying form of expansive soil in large-scale resisting draw foundation, and put forward revised ideas against actual prevail views and present criterion, that is, when calculating stabilization of straight line bacilliform tower foundation being drawn, the natural unit weight of dauk and clay of plasticity index over 10 can be adopted.

Key words: transmitting electricity line; expansive soil; groundwork stress; resisting draw test

(上接第 130 页)

Abstract ID:1671-9387(2005)11-0128-EA

Study on the oxidation of unsymmetrical dimethylhydrazine in supercritical water

LI Xing-cai, GE Hong-guang, GUO Xiao-hua, ZHEN Bao-qin

(Department of Chemistry, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

Abstract: The catalytic oxidation of unsymmetrical dimethylhydrazine in supercritical water was investigated over a catalyst Cu^{2+} and oxidant H_2O_2 in a tubular continuous flow reactor at 24—30 MPa, 400—500 °C. The effects of temperature, pressure, residence time and mass concentration of oxidant Cu^{2+} on the destruction of unsymmetrical dimethylhydrazine were also studied. Results indicated that unsymmetrical dimethylhydrazine could be decomposed effectively by catalytic supercritical water oxidation. The elimination efficiency of unsymmetrical dimethylhydrazine was significantly improved as reaction temperature, pressure, residence time and mass concentration of oxidant Cu^{2+} increased. The 97.8% COD removal was achieved at 30 MPa, 450 °C and 15 mg/L Cu^{2+} in 3.9 s.

Key words: supercritical water oxidation; unsymmetrical dimethylhydrazine; Cu^{2+} ; catalysts