

# 爆炸冲击波破解剩余污泥的实验研究

谢元华, 梅健, 王杰, 朱彤

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为研究爆炸冲击波对剩余污泥的破解效果,进行了两种炸药(RDX和TNT)在不同装药量(10 g和70 g)和不同污泥质量浓度(20~50 g·L<sup>-1</sup>)下的实验,以破解前后的化学需氧量、肽聚糖、蛋白质的质量浓度及污泥粒径分布(D50)为指标进行评价。结果表明:随着装药量从10 g增加到70 g,各浓度检测指标均呈增加趋势,RDX的效果优于TNT;破解后的D50受炸药种类影响不大,均从约36 μm降至约24 μm。在70 g装药量下,随着污泥质量浓度的增加,各浓度检测指标同样呈增加趋势,但对应的增长率主要呈先升后降的趋势;无论RDX还是TNT,爆炸破解后的D50均约24 μm,污泥质量浓度的变化对其影响不大。

**关 键 词:** 爆炸;剩余污泥;粒度分布;冲击波;破解;废物处理

中图分类号: X 703; X 705

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)03-0446-05

## Experimental Study on Disintegration of Excess Sludge by Explosive Shock Wave

XIE Yuan-hua, MEI Jian, WANG Jie, ZHU Tong

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHU Tong, E-mail: tongzhu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To investigate the effect of explosive shock wave on disintegrating excess sludge, two types of explosives (RDX and TNT) were employed under different dosages (10 g and 70 g) and different sludge concentrations (MLSS (mixed liquid suspended solids), 20~50 g·L<sup>-1</sup>) to carry out the experiments. Chemical oxygen demand (COD), peptidoglycan, protein and particle size distribution (D50) of sludge before & after disintegration were selected as evaluation indexes. The results show that all concentration indexes present an increasing trend with explosive dosage increasing from 10 g to 70 g, and the effect of RDX is better than that of TNT. D50 after disintegration is not distinctively affected by explosive type, dropping from about 36 μm to about 24 μm for both RDX and TNT. Under explosive dosage of 70 g, all concentration indexes show a rising trend with the increase of MLSS as well, but their corresponding increasing rates present mostly an upward trend followed by a downward trend. No matter for RDX or TNT, D50 after disintegration are both around 24 μm. The variation of MLSS has no much effect on D50.

**Key words:** explosion; excess sludge; particle size distribution; shock wave; disintegration; waste treatment

剩余污泥破解是污泥减量化和资源化的重要手段之一,可作为污泥厌氧消化的预处理手段,提高污泥厌氧消化处理的效率<sup>[1]</sup>。目前常见的剩余污泥破解方法有超声空化、搅拌球磨、喷射撞击、热解处理等<sup>[2-3]</sup>。

爆炸能够在短时间内产生强烈的冲击波、气泡脉动、部分空化等一系列物理化学效应<sup>[4]</sup>,冲击波对细菌有灭活作用<sup>[5]</sup>,高温和氧化剂对有机大分子有降解作用<sup>[6]</sup>;同时,高含水率(98%以上)的剩余污泥是流动态液体,所含的菌胶团是

收稿日期: 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178089); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130042110009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N150304001, N140306001)。

作者简介: 谢元华(1979-),男,湖南张家界人,东北大学副教授,博士; 朱彤(1963-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授,博士生导师。

大量细菌单体由细胞外聚合物粘连而成的松散状絮状物,在一定的作用力下即可被破坏<sup>[7]</sup>,因此爆炸可能是一种有效的剩余污泥破解方法.

Chen 等采用爆炸法处理剩余污泥,表明爆炸冲击波破解了菌胶团,并释放出其中的结晶水,从而提高了污泥的脱水效果<sup>[8]</sup>. 刘越等研究了蒸汽爆破对脱水污泥溶解性和厌氧消化性能的影响,表明 1MPa 条件下,汽爆污泥液相中,可溶性糖等指标的浓度较原污泥均有较大提高,厌氧消化产气产甲烷同样增幅明显,并且压强升高可进一步改善污泥的溶解性和厌氧消化性能<sup>[9]</sup>. 然而,对于多条件下爆炸破解剩余污泥的详细破解效果,却鲜见文献报道.

为探索爆炸冲击波对剩余污泥的破解效果,以化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、肽聚糖和蛋白质及污泥粒径分布 (中位粒径,  $D_{50}$ ) 为评价指标,研究不同炸药种类、装药量以及污泥质量浓度 (mixed liquid suspended solids, MLSS) 对破解效果的影响,其结论可为后续的剩余污泥爆炸破解研究提供参考.

## 1 实验材料与方法

研究所用的剩余污泥取自沈阳市沈水湾污水处理厂的污泥脱水车间,污泥中位粒径 ( $D_{50}$ ) 为  $71.34\text{ }\mu\text{m}$ . 本研究采用 MLSS 来表征污泥浓度. 实验时根据需要配置成不同质量浓度的混合液 ( $20, 30, 40, 50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 实验使用 RDX 和 TNT 两种炸药,通过专用压药机 (SHP33-30, 合肥海德数控液压设备有限公司) 将炸药粉末压制成  $10\text{ g}$  与  $70\text{ g}$  两种规格的药柱.

研究用爆炸装置由某大学爆炸试验场提供,其示意图如图 1 所示. 爆炸容器高为  $1\text{ m}$ ,直径为  $1.2\text{ m}$ . 容器中心悬挂体积为  $2\text{ L}$  的液态污泥,污泥袋中部放入炸药及引爆装置.

实验时首先在不同装药量 ( $10, 70\text{ g}$ ) 下,采用 TNT 和 RDX 对  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的污泥进行爆炸破解,考察不同炸药种类及装药量下污泥破解的效果;然后在同一装药量 ( $70\text{ g}$ ) 下,采用 TNT 和 RDX 对不同质量浓度的污泥 ( $20, 30, 40, 50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 进行爆炸破解,考察不同炸药种类及 MLSS 时污泥破解的效果. 爆炸破解之后,测量破解液中的 COD、肽聚糖、蛋白质及污泥粒径分布,用以综合评价破解效果. 为消除炸药本身爆炸对测量的影响,进行了不同装药量 ( $10, 70\text{ g}$ ) 的 TNT 和 RDX 爆炸空白实验.

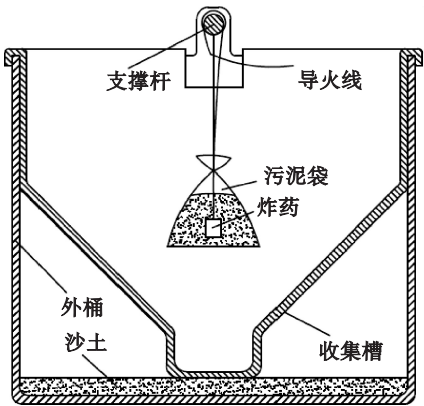


图 1 爆炸实验装置  
Fig. 1 Device of the explosion experiment

COD 的测定采用重铬酸钾法<sup>[10]</sup>、肽聚糖采用 D-葡萄糖胺测定法<sup>[11]</sup>、蛋白质采用福林酚试剂法<sup>[12]</sup>. 测定处理前后污泥中各浓度指标 (COD、肽聚糖、蛋白质) 的值之后,可以得到各指标处理后的值相对于其处理前的值的增长率. 对于破解前后的污泥粒径分布,采用激光粒度分析仪 (Bettersize 2000, 丹东百特科技有限公司) 测定.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同装药量的影响

针对  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的剩余污泥,在不同的 RDX 和 TNT 装药量下,进行对比实验, COD、肽聚糖和蛋白质的结果如表 1 所示.

表 1 炸药种类及装药量对破解的影响  
Table 1 Influence of explosive type and dosage on disintegration

装药量 g	$\rho(\text{COD})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 及其增长率/%			
	RDX		TNT	
0	2 218	—	2 218	—
10	5 932	167.4	2 885	30.1
70	9 536	329.9	4 520	103.8

装药量 g	$\rho(\text{肽聚糖})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 及其增长率/%			
	RDX		TNT	
0	11.7	—	11.7	—
10	25	113.7	19	62.4
70	32	173.5	28	139.3

装药量 g	$\rho(\text{蛋白质})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ 及其增长率/%			
	RDX		TNT	
0	557	—	557	—
10	782	40.4	638	14.5
70	1 071	92.3	856	53.7

由表 1 可以看出,经 RDX 破解后,COD 浓度的变化最为显著,而相同装药量的 TNT 破解后,COD 浓度只有 RDX 破解后的 50% 左右.这是因为,本研究中 RDX 和 TNT 的压药密度分别为  $1\,780, 1\,530\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,此时两者的爆热分别为  $6\,318, 4\,573\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,所以 RDX 爆炸时释放的能量比 TNT 更多,对污泥中的菌胶团和细菌的冲击力更强,溶出物的 COD 也就更高.两种炸药破解后,肽聚糖和蛋白质浓度的变化较为接近.

污泥粒径是反映破解效果的直观指标.图 2 给出了 RDX 和 TNT 分别在  $10\text{ g}$  和  $70\text{ g}$  装药量下,破解前后的污泥粒径分布情况.由图 2 可以看出, $10\text{ g}$  RDX 爆炸破解后, $D_{50}$  达到  $32.448\text{ }\mu\text{m}$ , $70\text{ g}$  破解后, $D_{50}$  为  $24.382\text{ }\mu\text{m}$ ;  $10\text{ g}$  TNT 破解后, $D_{50}$  达到  $39.693\text{ }\mu\text{m}$ ,而  $70\text{ g}$  破解后, $D_{50}$  为  $23.792\text{ }\mu\text{m}$ .相比较来说,装药量越大,则爆炸冲击波的能量越大,从而冲击力也就越大,破解污泥中的菌胶团的破解效果越明显;而在相同装药量下,RDX 与 TNT 破解后的中位粒径相差不大.

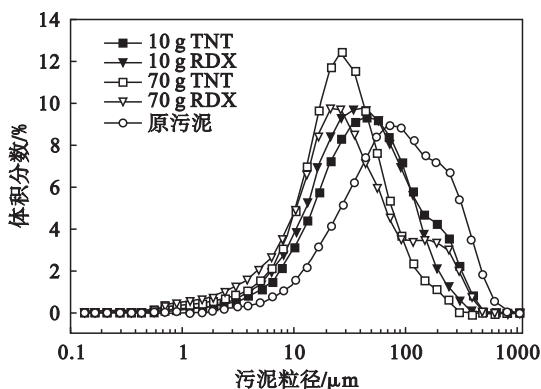


图 2 破解处理前后的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution before and after disintegration

一般球菌直径在  $0.5\sim1\text{ }\mu\text{m}$  之间,而杆菌一般长  $1\sim3\text{ }\mu\text{m}$ 、宽  $0.5\sim1\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>,污泥原样中粒径小于  $5\text{ }\mu\text{m}$  的体积分数不足  $0.5\%$ .  $10\text{ g}$  RDX 与  $10\text{ g}$  TNT 爆炸破解之后,破解液中粒径小于  $5\text{ }\mu\text{m}$  的体积分数分别达到  $2.94\%$  和  $1.06\%$ ,可以推测,破解单个菌体的效率 RDX 相对较高,而 TNT 的破解效率相对较差;  $70\text{ g}$  RDX 与  $70\text{ g}$  TNT 爆炸破解之后,破解液中粒径小于  $5\text{ }\mu\text{m}$  的体积分数分别达到  $8.64\%$  和  $7.15\%$ ,说明装药量的提高带来的冲击波能量加强,对于单个菌体破解效率的提高所起作用不大.

## 2.2 不同 MLSS 的影响

### 2.2.1 RDX 在不同 MLSS 下的实验

使用  $70\text{ g}$  的 RDX 药柱,对 MLSS 分别为  $20,$

$30, 40, 50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的剩余污泥进行破解,破解前后 COD、肽聚糖和蛋白质的浓度及增长率如图 3 所示.

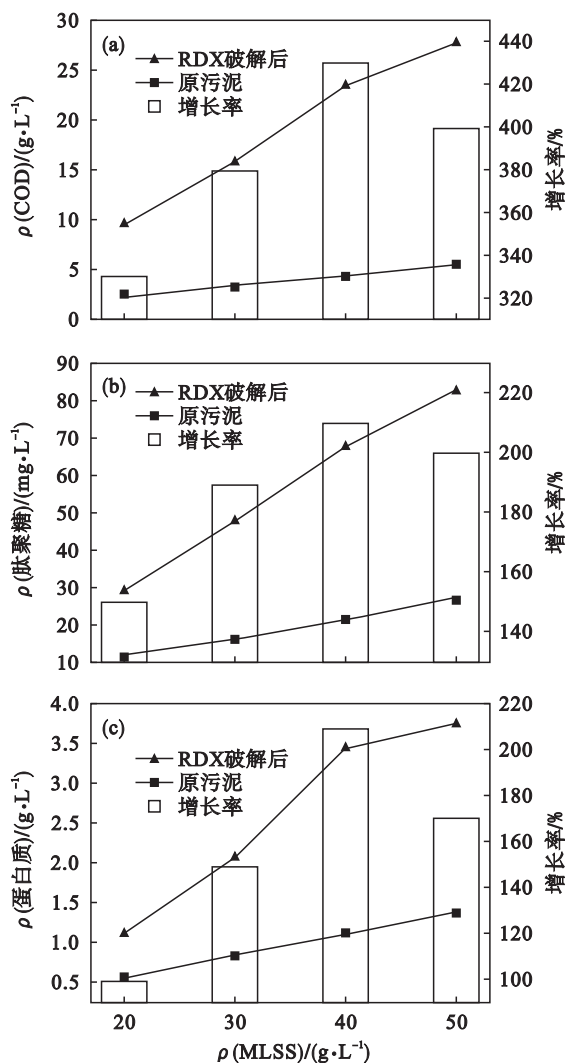


图 3 RDX ( $70\text{ g}$ ) 对不同 MLSS 污泥的破解效果

Fig. 3 Disintegration effect of RDX ( $70\text{ g}$ ) on sludge with different MLSS

(a)—COD; (b)—肽聚糖; (c)—蛋白质.

由图 3a 可以看出,破解后 COD 的浓度随 MLSS 的增加而增大. MLSS 质量浓度为  $20\sim50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的剩余污泥中,COD 质量浓度分别为  $2\,210, 3\,316, 4\,422, 5\,527\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,经  $70\text{ g}$  RDX 爆炸破解之后,破解液中 COD 质量浓度依次达到  $9\,410, 15\,917, 23\,437, 27\,635\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .但从增长率来看,MLSS 质量浓度为  $50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的剩余污泥破解后,COD 增长了  $400\%$ ,而  $40\text{ g/L}$  的破解液中可以达到  $430\%$ .图 3b 和图 3c 中肽聚糖和蛋白质展现出与 COD 类似的趋势.

浓度检测指标增长率呈现先升后降的趋势,其原因可能是,当 MLSS 较低时,污泥中菌胶团的尺度比较小、且比较分散,因此对爆炸冲击波能

量的吸收效率不高,细胞破碎和胞内物质的释放效率较低;而当 MLSS 较高时,较大尺度的菌胶团可能会被爆炸冲击波瞬间打散成微菌胶团和细菌单体,并且冲击的能量不足以继续促使细胞破碎和胞内物质释放,导致污泥破解效率的增加程度放缓.此外,爆炸能产生瞬时高温高压的爆轰气体,其冲击波不仅能破解污泥中的微生物,同时在污泥混合液中还能产生较强的空化气泡<sup>[14]</sup>,空化气泡的产生数目、破灭时释放的能量的传递与吸收情况,很可能会受到污泥中固液两相比例(与 MLSS 直接相关)的影响,如此,便可能存在一个合适的 MLSS 质量浓度范围,使得爆炸产生的空化气泡数量较多、且破灭释放的能量被菌胶团和细菌吸收较充分,从而表现出优于过高或过低 MLSS 质量浓度的破解效果.

图 4 为 70 g RDX 爆炸破解不同 MLSS 质量浓度的剩余污泥后的粒径分布情况.由图 4 可以看出,20 ~ 50 g·L<sup>-1</sup>的破解液中,*D*<sub>50</sub> 分别达到 22.854,20.473,27.927,25.165 μm,相差不大均值约 24 μm,MLSS 的变化对其影响不大.

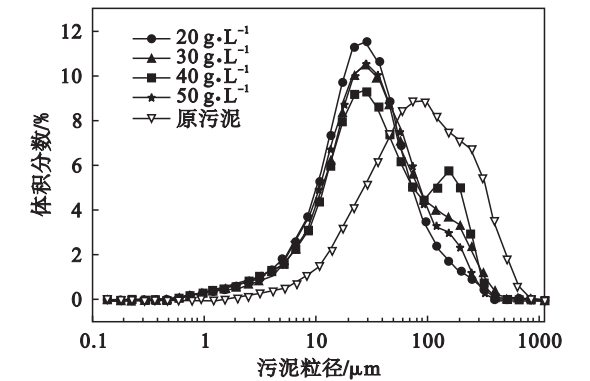


图 4 RDX(70 g) 破解不同 MLSS 污泥的粒径分布  
Fig. 4 Particle size distribution of different MLSS sludge disintegrated by RDX(70 g)

### 2.2.2 TNT 在不同污泥浓度下的实验

使用 70 g 的 TNT 药柱,对 MLSS 质量浓度分别为 20,30,40,50 g·L<sup>-1</sup>的剩余污泥进行破解,破解前后 COD、肽聚糖和蛋白质的质量浓度及增长率如图 5 所示.

由图 5a 可以看出,40 g·L<sup>-1</sup>之前,破解后 COD 的质量浓度随着 MLSS 质量浓度的增大而增加,在 40 g·L<sup>-1</sup>的破解液中,COD 的增长率为 230%,而 50 g·L<sup>-1</sup>中陡降至 150%,COD 的破解效率明显降低,可能是达到了 70 g TNT 炸药破解极限的缘故.由图 5b 可以看出,在不同 MLSS 质量浓度的破解液中,肽聚糖质量浓度分别为 17.6,28.5,50.4,66.5 mg·L<sup>-1</sup>,呈增长趋势;但肽

聚糖的增长率在 MLSS 质量浓度为 20 ~ 40 g·L<sup>-1</sup>时增长较快,而在 50 g·L<sup>-1</sup>时并没有下降,而是继续有小幅增长,说明 MLSS 质量浓度增加到 50 g·L<sup>-1</sup>时,被破解的细胞比率仍在上升.由图 5c 可以看出,随着 MLSS 质量浓度的升高,破解液中蛋白质质量浓度呈上升趋势,但增长率先升后降,与 COD 的变化趋势类似.

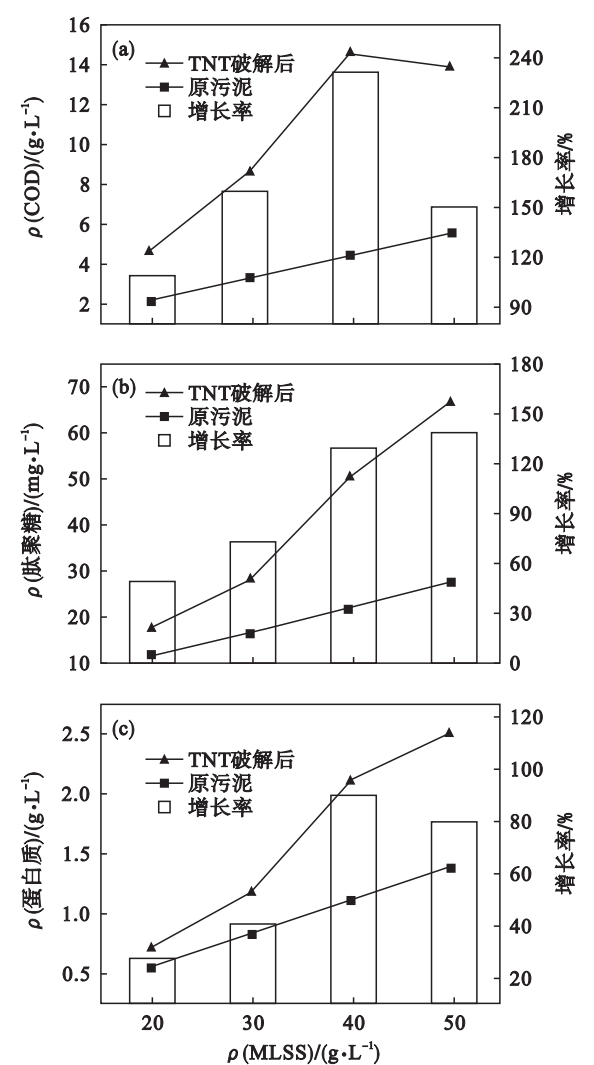


图 5 TNT(70 g) 对不同 MLSS 污泥的破解效果  
Fig. 5 Disintegration effect of TNT(70g) on different MLSS sludge  
(a)—COD;(b)—肽聚糖;(c)—蛋白质.

图 6 为 70 g TNT 爆炸破解不同 MLSS 质量浓度的污泥后的粒径分布情况,20 ~ 50 g·L<sup>-1</sup>的破解液中,*D*<sub>50</sub> 分别达到 20.473,24.054,23.161,27.041 μm,相差不大,均值约 24 μm.70 g TNT 爆炸破解 20 ~ 50 g·L<sup>-1</sup>的污泥之后,污泥破解液中污泥颗粒小于 5 μm 的体积分数分别达到 7.15%,6.39%,6.35%,5.28%.从粒径分析可以看出,TNT 和 RDX 对不同浓度的剩余污泥液破解效果比较接近.



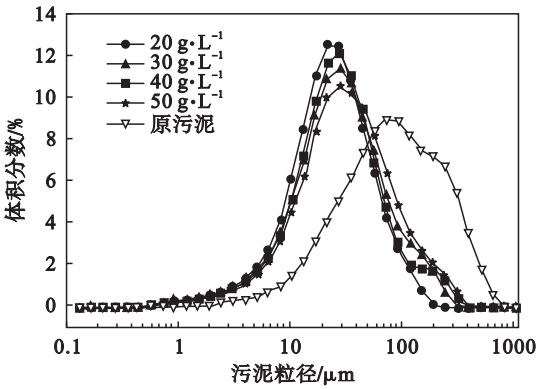


图 6 TNT (70 g) 破解不同 MLSS 污泥的粒径分布  
Fig. 6 Particle size distribution of different MLSS sludge disintegrated by TNT (70 g)

3 结 论

1) 无论是 TNT 还是 RDX,其爆炸冲击波对剩余污泥均具有明显破解效果. 在同一 MLSS 质量浓度下,装药量越大,破解效果越好,破解液中 COD、蛋白质、肽聚糖质量浓度均明显增长,污泥中位粒径明显下降. 就 COD 和蛋白质的结果来看,10 g RDX 的破解效果与 70 g TNT 的破解效果相近.

2) 在相同装药量(70 g)的条件下,随着污泥 MLSS 质量浓度的增加,破解液中的 COD,肽聚糖和蛋白质都随之增多,但是从增长率来看,爆炸冲击波的破解效果不会随着 MLSS 的增加而线性增加,多数情况下,在 40 g·L<sup>-1</sup>时达到最高点后呈下降趋势. 根据中位粒径的数据可以看出,在同一装药量(70 g)下,无论是 RDX 还是 TNT,爆炸冲击波只能把中位粒径从 71 μm 左右减小到 24 μm左右. 所以装药量对粒径存在一定影响,而 MLSS 对粒径的影响不大.

参考文献:

[ 1 ] Kavitha S,Kannah R Y,Yeom I T,et al. Combined thermo-chemo-sonic disintegration of waste activated sludge for biogas production [ J ]. *Bioresource Technology*, 2015, 197: 383 – 392.  
[ 2 ] Muzammil A,Naief H A M,Barakat M A. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods [ J ]. *Process Safety & Environmental Protection*, 2016, 102:615 – 632.

[ 3 ] Braguglia C M,Gianico A,Mininni G. Comparison between ozone and ultrasound disintegration on sludge anaerobic digestion [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95 ( sup ) : 139 – 143.  
[ 4 ] 黄晓明,朱锡,牟金磊,等. 近距水下爆炸作用下箱形梁模型中垂破坏试验研究 [ J ]. *振动与冲击*, 2011, 30 ( 2 ) : 19 – 23.  
(Huang Xiao-ming, Zhu Xi, Mou Jin-lei, et al. Sagging damage test of box-beam models subjected to close range underwater explosion [ J ]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30 ( 2 ) : 19 – 23. )  
[ 5 ] Gerdesmeyer L,Eiff C V,Horn C,et al. Antibacterial effects of extracorporeal shock waves [ J ]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2005, 31 ( 1 ) : 115 – 119.  
[ 6 ] Yasui K. Alternative model of single-bubble sonoluminescence [ J ]. *Physical Review E*, 1997, 56 ( 6 ) : 6750 – 6760.  
[ 7 ] Ruan X D,Liu J X. Analysis of the fractal structure of activated sludge flocs [ J ]. *Environmental Science*, 2013, 34 ( 4 ) : 1457 – 1463.  
[ 8 ] Yang J,Chen D Y. Study on improving sludge modification using explosion shock wave [ J ]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10 ( 6 ) : 33 – 35.  
[ 9 ] 刘越,尹小波,李强,等. 蒸汽爆破对脱水污泥溶解性和厌氧消化性能的影响 [ J ]. *环境工程学报*, 2014, 8 ( 12 ) : 5469 – 5474.  
(Liu Yue, Yin Xiao-bo, Li Qiang, et al. Impacts of steam explosion pretreatment on dissolution and anaerobic digestion of dewatered sludge [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8 ( 12 ) : 5469 – 5474. )  
[ 10 ] Eaton A D,Clesceri L S,Greenberg A E. Standard methods for the examination of water and wastewater [ S ]. 19th ed. Washington D C:APHA, 1995.  
[ 11 ] Sekine K,Tolda T,Saito M, et al. A new morphologically characterized cell wall preparation ( whole peptidoglycan ) from bifidobacterium infantis with a higher efficacy on the regression of an established tumor in mice [ J ]. *Cancer Research*, 1985, 45 ( 3 ) : 1300 – 1307.  
[ 12 ] Lowry O H,Rosebrough N J,Farr A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent [ J ]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193 ( 1 ) : 265.  
[ 13 ] 任何军,张婷婷. 环境微生物学 [ M ]. 北京:清华大学出版社, 2015:27 – 29.  
(Ren He-jun, Zhang Ting-di. Environmental microbiology [ M ]. Beijing:Tsinghua University Press, 2015:27 – 29. )  
[ 14 ] 陈大勇,杨军. 炸药冲击波预处理促进污泥改性试验研究 [ M ]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2015:33 – 35.  
(Chen Da-yong, Yang Jun. Experimental study on improving sludge modification using explosive explosion shock wave [ M ]. Xuzhou:China University of Mining and Technology Press, 2015:33 – 35. )