

RRS®超低温水解碳化技术在深圳盐田污水处理厂污泥处理项目中的应用

深圳市环源科技发展有限公司 黄彤宇、杨飞

概要：本文简述了目前市政污泥碳化过程的三个阶段，提出了超低温水解碳化的新理念，阐述了 RRS 超低温水解碳化技术原理，描述了在处理市政污泥过程中是如何实现在不添加任何药剂情况下将含水率 80%的污泥脱水降至 30%的过程；展示了实际应用的案例。希望引起业内专家的关注及更深入的研发。

关键词： 污泥、含水率、水解、碳化

1. 市政污泥碳化技术的发展

1.1 污泥碳化技术的发展历程

世界上污泥碳化技术的发展主要分为以下三个阶段：

(1) 理论研究阶段（1980—1990 年）。

这个阶段的研究集中在污泥碳化机理的研究上，一个突出特点就是大量的专利申请。Fassbender, A. G 等人的 STORS 专利, Dickinson N. L 污泥碳化专利都是在这期间申请和批准的。

(2) 小规模生产试验阶段（1990—2000 年）。

随着污泥碳化理论研究的深入和实验室试验的成功，污泥碳化技术转变为商业化污泥处理装置的小规模生产性试验开始实施（Pilot Trial）。通过这些试验，污泥碳化技术逐步从实验室走向工厂。例如 1997 年日本三菱在宇部的规模为 20 吨/天的污泥碳化厂；1992 年，日本 ORGANO 公司在东京郊区建了一个污泥碳化试验厂；1997 年 Thermo Energy 在加利福尼亚州 Colton 市建立了一个规模为每天处理 5 吨干泥的污泥碳化实验厂。

(3) 大规模的商业推广阶段（2000—）。

在日本，80%的污泥的最终处置方法是焚烧。但由于近年来发现焚烧存在二恶英等污染的隐患，所以日本环保部门对焚烧排除的气体提出了更加严格的要求，使得本来就很高的焚烧工艺的成本更加高昂。为了取代焚烧工艺，在污泥碳化技术逐渐成熟的情况下，污泥碳化技术大规模商业化逐步得到推广。目前，日本已经有多家公司生产和销售污泥碳化装置。比较著名的有荏原公司的碳化炉，三菱公司横滨制作所的污泥碳化装置，巴工业公司每天处理 10 吨，30 吨的污泥碳化装置。2005 年日环特殊株式会社甚至推出了标准的污泥碳化减量车，该车可以随时到任何有污泥的场所对污泥进行碳化。这些发展表明，碳化技术已趋于成熟。

中国在 2000 年以前还没有一个真正的污泥热分解试验装置。在这之后，武汉工业大学和上海同济大学均在试验室中进行过污泥热分解的试验。试验结果与目前国外几个厂家所得出的结论基本相同。2012 年初，采用日本高温碳化技术，日处理能力为 10 吨脱水污泥的生产线在武汉正式投产运行。

中国第一座采用污泥低温碳化技术的污泥处置工厂，晋中市第二污水处理厂内一座日处理脱水污泥 100 吨的污泥低温碳化示范工程在 2011 年 8 月正式运行。2012 年 9 月，该项目通过了山西省科技厅组织的技术鉴定。

1.2 污泥碳化的分类

（1）高温碳化

碳化时不加压，温度为 649—982℃。先将污泥干化至含水率约 30%，然后进入炭化炉高温碳化造粒。碳化颗粒可以作为低级燃料使用，其热值约为 2000—3000 大卡/公斤（在日本或美国）。技术上较为成熟的公司包括日本的荏原，三菱重工，巴工业以及美国的 IES 等。该技术由于技术复杂，运行成本高，目前尚未有大规模的应用。最大规模的为 30 吨湿污泥/天。

（2）中温碳化

碳化时不加压，温度为 426—537℃。先将污泥干化至含水率约 90%，

然后进入炭化炉分解。工艺中产生油，反应水（蒸汽冷凝水），沼气（未冷凝的空气）和固体碳化物。该技术的代表为澳大利亚 ESI 公司。该公司在澳州建设了一座 100 吨/日的处理厂。该技术是在干化后对污泥实行碳化，其经济效益不明显，除澳洲一家处理厂外，目前尚无其他潜在的用户。

（3）低温碳化

污泥低温碳化就是采用低温（250℃-350℃），中压（10MPa 以下），将污泥中的细胞裂解，裂解后的污泥成液态，经再次脱水，水分很容易脱出，使污泥含水率降至 50%以下。经干化造粒后可以作为低级燃料使用，其热值约为 3600—4900 大卡/公斤（在美国）。

（4）超低温水解碳化—RRS 超低温水解碳化技术新理念

将污水处理厂脱水的原污泥（含水率 80%左右）直接进入反应釜，在反应釜内通入约 200℃，2Mpa 内的饱和蒸汽，经短时间的水解碳化，污泥由原膏状固体裂解成液态流体，经降温后通过普通机械压滤，压滤出的干泥样似砂状，已转化为生物炭土，其含水率在 30%以下，热值在 2000Kcal 以上（深圳地区）。该技术由深圳市环源科技发展有限公司提出，在 2016 年 4 月应用于深圳市盐田污水厂，并取得巨大成功。

2. 污泥 RRS 热水解技术至水解碳化技术的演变

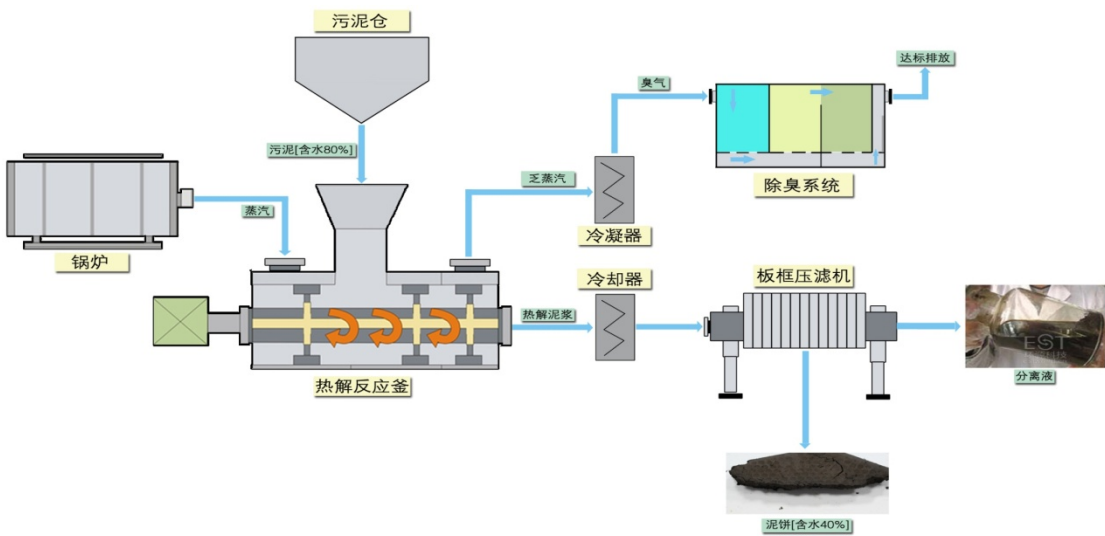
2.1 RRS 亚临界热水解技术介绍

市政污泥处理的难点在于脱水，正常情况下通过机械压滤仅能脱至 80%左右。剩余的水以有机体包内水、间隙水、等多种形式的结合水存在于污泥内，非常规手段能脱除的。脱水的难点在于如何破壁，而将结合水转为自由水。

日本由于地少，人口密集，对污泥处理处置技术研究起步早，钻研深。其中，东京工业大学早在上世纪九十年代即开始对污泥高温水解破壁开始了研究，并在本世纪初在试验室小试成功。2006 年此技术被引入中国，并在深圳设立了专项从事污泥处理处置技术研发及应用的公司—深圳市环源科技发展有限公司，公司初期以东京工业大学为后盾，中国科学院广州能源所、哈工大等为支持单位，研发了市政污泥 RRS 亚临界热水解技术及工业化设备，并在深圳市蛇口污水处理厂建了中试工程。

通过多年的试验研究，RRS 亚临界热水解技术实现了污泥在液相下破壁，从而以低能量达到高脱水的目的。在一定温度压力下，通过蒸汽与污泥直接接触，破坏污泥胶状絮体、细胞壁（膜）等持水结构，将污泥内部的“结合水”转化为“自由水”，在不添加任何药剂的情况下，使无相变脱水变成可能，污泥中的大颗粒变成细微颗粒后，表面积大幅增加，脱水更快，干燥性能大幅提高。

RRS 热水解技术的工艺流程见下图：



2.2 污泥 RRS 亚临界热水解技术在蛇口污水厂的应用

蛇口污泥处理项目	
设计规模	50t/d
项目占地	400 m ²
项目建设周期	12 个月
原泥含水率	80%
泥饼含水率	35-45%
污泥减容（量）率	60-70%

2.3 污泥低温碳化原理

污泥低温碳化的原理非常简单，由于市政污水处理厂多数采用活性污泥法处理污水，剩余污泥脱水后，内部含有大量的生物细胞，机械方法很难将其中与细

胞有联系的“结合水”脱出。将市政生化污泥中的细胞破壁，强制脱出污泥中水分，使污泥中碳含量比例大幅度提高的过程叫做污泥碳化。碳化脱水后的污泥含水量极小，发热值相对较高，孔隙率大，松散，黑色，与煤炭外观极为相似，故也称之为生物炭土。由于热值高（2000Kcal以上），可以直接作为褐煤使用。

日本在最初研究时，将原始脱水污泥经碳化后得到的干化污泥这种处理过程称为“炭化”，处理后的生物质固体有如木炭。欧美等国在最初研究时，使用了“Carbonization”一词，译为“碳化”，后来日本的资料中也多采用“碳化”代替“炭化”。学术界将此技术归为“热分解”或“裂解”。

2.4 RRS 超低温水解碳化技术初探

污泥碳化的过程实际上就是一个“泥变水”的过程。通过对污泥施加一定的压力和温度，并延续一段时间，污泥中生物质的细胞壁破裂裂解，细胞液中的水被析出。通过常规的脱水装置，即可将污泥中原有的大部分（75%）水分去除，达到了污泥减量化和无害化的目标。由于污泥碳化过程中，生物质仅发生了裂解，其中的碳值不但没有破坏，反而由于水分的去除，使单位污泥中碳的含量得到了提高，为污泥进一步的资源利用奠定了基础。

水解碳化过程分为三个阶段：①前驱体水解成单体；②单体脱水并诱发聚合反应，大分子链被打断成低聚物，低聚物水解成不同单体，单体再通过脱水和碳架裂解反应生产可溶性产物；③同时聚合物发生芳构化反应，当溶液中的芳香族达到饱和临界值时，碳化形核便产生，并随着扩散过程的进行而不断成长为碳化材料。

水解碳化反应条件温和，耗能少，在液相下进行，其产物的形成是有机体直接脱水聚合的结果，水解碳化后，经普通板框压滤机压榨即可得到含水率在 30% 以下的生物炭土。

由于污泥水解碳化反应是在一定温度压力下的密闭空间进行的，反应过程复杂，副反应较多，目前难以实现全过程检测，反应机理尚有待深入研究。至今为止，世界上污泥低温碳化技术成功应用的企业凤毛麟角，其主要的原因是由于污泥中含有大量生物体，污泥的粘稠度极高，常用的泵、阀门、换热器等均无法正常工作。

针对这些污泥低温碳化系统的技术关键，深圳市环源科技发展有限公司经过近 10 年的努力，不断探索新工艺、新技术、新设备，研发出 RRS®超低温水解碳化技术，该技术是在吸收日本最新技术，并在蛇口污泥亚临界热水解中试项目的基础上针对污泥深度脱水及资源化利用开发的第二代污泥水解碳化技术，即超低温水解碳化技术。该技术从根本上解决了原污泥（含水率 80%左右）在高粘稠度情况下在设备中的流动运行状态。从而在超低温水解碳化领域开拓了新的疆域。

3. RRS 超低温水解碳化技术在市政污泥处理中的应用

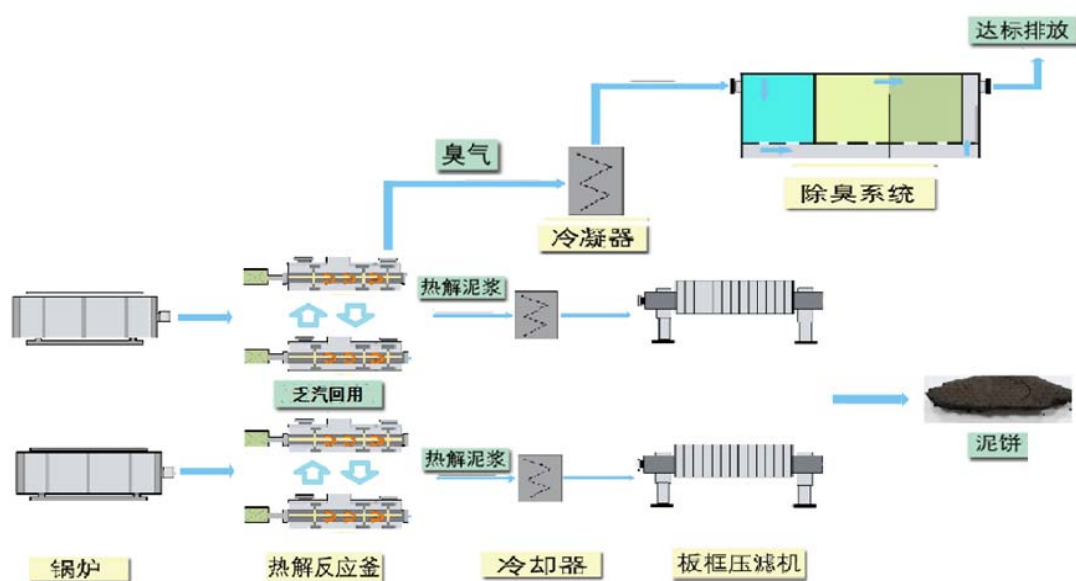
由深圳市环源科技发展有限公司研发的 RRS 超低温水解碳化技术获得深圳市水务集团的认可，并于 2015 年 8 月在深圳市盐田污水处理厂（规模为 12 万吨/日）开始建设污泥超低温水解碳化工程应用项目，于 2016 年 4 月正式投产运行，并获得巨大成功，至今已获得深圳市人居委颁发的环保验收证书和严控废物许可证，经检测人居委同意作为园林用泥。深圳市水务局经确认，同意在处理盐田污水厂自产污泥外，同时接收深圳市水务集团下属诸如罗芳厂、西丽厂、福田厂、上洋厂等污泥。处理后的生物炭土含水率在 30%以下，热值在 2000Kcal 以上。由于全过程没有添加任何药剂，可作为各种资源化利用的原料。

3.1 盐田污泥 RRS 超低温水解碳化项目规模

盐田污泥超低温水解碳化技术应用项目	
设计规模	150t/d
项目占地	1500 m²
项目建设周期	6 个月
原泥含水率	80%
生物炭土（泥饼）含水率	20-30%
污泥减容（量）率	70-80%

3.2 盐田污泥 RRS 超低温水解碳化项目工艺流程

盐田项目设计规模为日处理 150 吨原泥（含水率 80%），经 4 台反应釜轮流作业，由两台 2.5Mpa 锅炉，一用一备。每批次运行 70 分钟，原泥在反应釜内做水解碳化处理，固体转变为液体，经冷却后送入普通板框压滤机，压滤后的生物炭土含水率在 30%以下，外运用于制作园林用有机肥，或陶粒原料。压滤液作为碳源返回污水处理厂。反应釜出来的乏汽经冷却后进入 MDS 化学生物除臭系统。其工艺流程图如下：



3.3 盐田污泥水解碳化实景



盐田污泥 RRS 水解碳化处理工程现场



控制室



除臭车间



压滤车间



燃气锅炉



反应釜车间



粉碎后水解碳化污泥水解碳化污泥

3.3 盐田污泥水解碳化数据统计

下表为盐田污水处理厂污泥水解碳化后的生物炭土含水率检测表，表中可见在 2017 年 1 月份的含水率平均在 28.9%，均达到 30%以下的目标。

盐田污水厂污泥处理 2017 年 1 月份检测情况统计

日期	含水率%	处理量 T	日期	含水率%	处理量 T
1.1	27.5	84	1.17	30.5	63
1.2	28.3	84	1.18	29.2	77
1.3	28.5	84	1.19	28.7	115.5
1.4	28.3	112	1.20	28.8	129.5
1.5	28.4	98	1.21	28.9	122.5
1.6	27.6	35	1.22	28.9	105
1.7	28.5	77	1.23	28.5	115.5
1.8	28.6	94.5	1.24	28.8	115.5
1.9	29.5	133	1.25	28.4	122.5
1.10	30.7	70	1.26	28.6	115.5
1.11	29.4	66.5	1.27	28.8	91
1.12	28.4	122.5	1.28	28.6	112
1.13	28.6	101.5	1.29	28.9	115.5
1.14	29.2	119	1.30	28.8	59.5
1.15	29.2	126	1.31	28.7	70
1.16	30.8	108.5	月干污泥平均含水率%		28.9
备注					

3.5 MDS 除臭数据统计

盐田污水处理厂位于深圳市盐田区中心区域，周边环绕着周大福大厦、黄金珠宝大厦等商业和居民区，而水解碳化过程中产生的高温乏汽属高浓度臭气，一旦处理不好，则会造成巨大环境影响。为此，采用了先进的 MDS 多级化学生物除臭系统，经多级除臭，臭气排放浓度达到了国家环保一级标准（GB14554-93）。

MDS 除臭技术应用于工程项目的检测结果一览表

序号	控制项目	单位	进气浓度	排气浓度	厂界排放标准
1	氨	mg/m ³	40.7	0.806	1.0
2	三甲胺	mg/m ³	0.858	<0.0025	0.05
3	硫化氢	mg/m ³	15242	0.015	0.03
4	甲硫醇	mg/m ³	83.3	0.0029	0.004
5	甲硫醚	mg/m ³	16.9	0.0075	0.03
6	二甲二硫	mg/m ³	32.8	0.0046	0.03
7	二硫化碳	mg/m ³	16.1	0.12	2.0
8	苯乙烯	mg/m ³	6.49	<0.00050	3.0
9	臭气浓度	无量纲	732825	<10	10

4. 污泥超低温水解碳化技术应用的优势及推广价值

4.1 技术单位概况

深圳市环源科技发展有限公司是目前拥有污泥超低温水解碳化技术的唯一单位,该单位成立于 2006 年,是从事市政污泥处理处置新技术开发、系统设计、工程总包和项目投资运营的综合性企业。以东京工业大学、中国科学院广州能源研究所等科研机构和株式会社资源循环技术研究所为技术支撑,自主创新开发出具有完全自主知识产权的 RRS® (Resource Recycle System) 超低温水解碳化污泥处理技术,为国内首创。同时,围绕着 RRS 污泥处理技术,目前公司已拥有 14 项发明专利和 4 项实用新型专利。2010 年 9 月,建设运营的蛇口污水厂产业化示范工程入选国家“2010 年度污泥处理处置特别关注案例”,同年底入选《深圳市循环经济试点实施方案(2010-2015)》的配套重点项目,2012 年 2 月,RRS 技术入选环保部“国家先进污染防治示范技术名录”。盐田污水处理厂污泥处理工程于 2016 年 4 月投入运行,同年 9 月获得深圳市人居委验收证书。2016 年 10 月获得深圳市人居委颁发的《严控废物许可证》。2016 年 11 月获得中国高新技术交流会技术发明特别奖。

4.2 RRS 超低温水解碳化技术优势

RRS®超低温水解碳化技术相比其他污泥处理处置技术的优势在于其成熟性、安全稳定、易操作、投资小、占地少、能耗低。具体表现在以下七点优势:

1) 克服含固率局限,处理效率高;

传统热水解技术只能处理含固率不高于 10%的污泥，而现有的污水处理厂的原污泥含水率在 80%左右，这就使得传统热水解技术必须将原污泥的含水率提高到 90%以上才能进行处理，在加水预处理的同时原污泥的量增加至少一倍，而 RRS 水解碳化污泥处理技术突破了传统热水解技术污泥含水率必须高于 90%的限制，将原泥直接进行水解碳化反应，高温高压下将污泥浆化，因此效率至少提高一倍以上。

2) 全过程不添加任何化学药剂，环保、安全；

RRS®超低温水解碳化技术采用的是物理方式，即将蒸汽与原污泥在反应釜内直接接触反应，整个过程无任何化学添加剂，从而杜绝二次污染，为后续的处置和资源化利用提供条件。

3) 无相变脱水，节能效果显著；

RRS®水解碳化技术的原理是通过蒸汽与原污泥直接接触反应，破坏污泥的胶状絮体、细胞壁（膜）等持水结构，在液相下将“结合水”转化为“自由水”。实现无相变脱水，大幅降低脱水能耗，较热干化技术节能 60%以上。

4) 占地少，实现源头治污；

RRS®水解碳化处理系统吨污泥处理占地只需 8 平方米，直接安装于污水厂内，免除征地选址烦恼，实现源头治污，彻底消除污泥转运的二次污染隐患，大幅节省运输成本超过 80%。

5) 真正实现污泥处理处置“四化”目标；

- i. 无害化：高温蒸汽将污泥中的病原体、害虫卵等全部杀灭；
- ii. 减量化：经 RRS 超低温水解碳化技术处理，污泥减量化超过 80%；
- iii. 稳定化：通过水解蛋白与重金属的络合反应和螯合反应固化了重金属，消除了重金属毒性；
- iv. 资源化：RRS 技术处理过程不添加任何化学药剂，全部产物均可资源化利用，安全、稳定。

6) 技术适用性广，建设周期短；

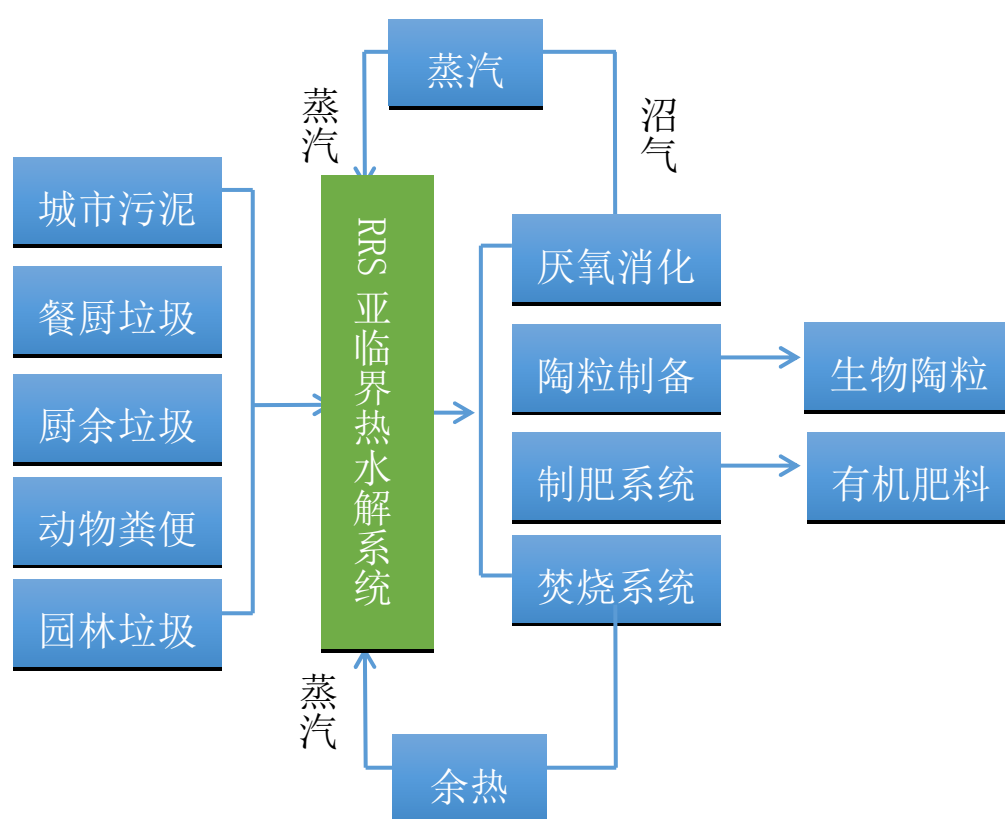
除市政污泥外，RRS®水解碳化技术还适用于厨余及餐厨垃圾、食品废弃物、园林废弃物等各种有机废弃物的资源化处理，而建设周期只需要 6 个月。

7) 模块化设计，工艺方案可自由组合。

RRS®超低温水解碳化技术除上述优势外，还能通过对该技术工艺参数的调整，将脱水后的泥饼含水率维持在在 20%到 40%间，可控浮动，为泥饼的资源化处置提供最佳工艺参数。

4.3 RRS 超低温水解碳化技术在中国的应用发展前景

RRS®水解碳化技术可根据各地污泥性质和处理、处置要求的不同，与厌氧消化技术、浓缩调配技术、制肥技术或焚烧技术等结合，变废为宝，实现污泥的资源化利用；



RRS 污泥处理技术与其它污泥处置技术相结合

RRS®水解碳化技术可以根据不同客户的业务需求，为客户提供量身定制的解决方案。不同的废弃物通过 RRS®水解碳化技术处理后，与其他工艺方案可自由组合，最终可将含水率小于 30%的产物变废为宝，实现资源化利用。

通过 RRS®水解碳化技术，污泥处理问题不仅可以迎刃而解，还实现了污泥的资源化利用，处理后的泥饼可以直接作为植物栽培基质土、制作有机肥料、生

物陶粒和生物质燃料。污泥压滤所得的压滤液可以制取沼气，也可制成发泡剂、高效植物营养液等，真正做到化腐朽为神奇。

市政污泥碳化技术在理论上得到较深的研究，但是基于成本原因，在国内罕有应用。超低温水解碳化技术至今尚未见报道，本文初次提出了此概念，是基于在我公司处理污泥过程中，超低温（200° C）水解碳化已事实存在。污泥转变后的炭土已实现了资源化利用；然而，转变的机理及深入化的理论研究尚待深入与完善。欢迎业内的科研机构和大专院校能和我们携手将污泥超低温水解碳化技术理论及应用提升到新的高度。