# 农林生物质直燃电厂灰渣资源化技术分析与展望

石炎，薛聪，邱宇平

（污染控制与资源化研究国家重点实验室，同济大学土壤及地下水风险管控与修复中心，同济大学环境科学与工程学院，上海200092）

摘要：近年来我国农林生物质直燃电厂发展迅速，日益增长的灰渣带来了越来越大的环境压力。生物质电厂灰渣是一类富有价值的可回收资源，亟待有效利用。有必要寻找一种合理的资源化手段整体处理灰渣。本研究综述了我国农林生物质直燃发电的发展现状、生物质灰渣的理化性质及其在基础设施建设、土壤修复改良、元素回收、吸附材料与复合材料制备等领域的应用，进而提出了依据灰渣粒径差异资源化处理电厂灰渣的一体化方案。不同粒径的生物质灰渣经过细分处理，可提高灰渣的资源利用率，有利于农林生物质直燃电厂的可持续发展。

## 1我国生物质电厂发展现状与农林生物质直燃发电技术

为应对日益严重的能源危机和环境污染，以生物质为原材料的生物质直燃电厂得以快速发展[1-2]。与传统的化石燃料发电相比，生物质燃料的利用更加清洁环保。截至2016年底，全球生物质发电总装机容量达到1.10亿kW，其中农林生物质直燃电厂装机容量为9240万kW左右[3]，约占全球生物质电厂装机总量的84%。

我国生物质发电产业的迅猛发展与国家政策的扶持密不可分。国家相继出台了生物质能源十二五、十三五专项规划，将生物质能发展作为新能源发展的重中之重；相继颁布了《中华人民共和国可再生能源法》、《可再生能源发电有关管理规定》等法律法规，并给予不加煤的农林生物质发电企业电价补贴和增值税即征即退等优惠政策，这在一定程度上解决了农村秸秆无组织燃烧的问题。截至2017年底，我国生物质发电装机容量达到1488万kW，与2016年相比增长22.6%[4]。目前，我国每年可用于能源生产的生物质约为6亿t[5]，以干基生物质平均6.8%的灰分产生量来计算[6]，灰渣年产生量约为4000多万t。

我国生物质直燃电厂采用的主要技术包括：吸收西方技术改进的水冷式炉排炉技术和具有自主知识产权的循环流化床技术[7]。水冷式炉排炉技术是典型的层燃技术，适合燃烧大颗粒、含水量高的非均质生物质，其结构简单，操作方便，建设和维护费用低[8]。但与流化床相比，炉排炉内燃烧状况不均一，需要较高的过剩空气比率，燃烧效率较低，$NO_x$排放较高[8-9]。

循环流化床技术则是燃烧生物质的理想技术，在世界范围内得到广泛的应用[10]。它通过粉碎设备使燃料在炉内呈现为流化态，物料在炉内与空气混合均匀，可为高水分、低热值的生物质提供极佳的燃烧条件，整体燃烧效率高，燃烧温度较低，且$NO_x$、$SO_x$等有害气体排放量低，经济效益和环境效益显著。但缺点是对入炉燃料颗粒尺寸要求较高，燃烧时烟气中灰尘负荷高，需要气体净化分离设备，而且存在内部腐蚀问题，床体材料损失率较高，造成运行费用相对较高[11]。

我国拥有自主知识产权的循环流化床技术，成本和污染物排放量能做到更低，并且可有效抑制结渣和腐蚀等问题，更加适宜秸秆等低质量燃料的燃烧[12]。

生物质经燃烧后，大部分物质以气体的形式释放到大气中，部分无机成分和矿物质则以固体颗粒的形式留存下来，形成灰渣。生物质灰渣按照收集方式可分为飞灰和底灰。飞灰颗粒细小，容易随烟气扩散，经过烟气除尘系统得到收集；底灰（包括炉灰和底渣）颗粒形状不一，呈多孔结构，由锅炉底部出渣系统排出[13]。生物质底灰和飞灰的质量比因燃烧锅炉类型、运行条件、燃料类型等不同而有所差异。通常而言，炉排炉产生的灰渣中底灰占比较大，可达灰渣总量的85%左右；而循环流化床的情况相反，飞灰占灰渣总量的80%~90%[14]。

## 2农林生物质灰渣特征

农林
生物质主
要分为木质类生物
质、草本农业类生物质、水生类生物
质、动物类生物质废弃物和工业类生物质等[15]
。我国直
燃型农林生物质电
厂所使用的生物质燃料主要有秸秆、
废旧木材、稻壳、竹子、树皮及其混合物等[16]
。所得
灰渣的物理性
质和化学组成与生物质的来
源和种类密切相关，也与季节差异、地域差异和燃烧条
件相关[15，17]
。总体而言，生物质灰分占生物质干质量的0.5%~20%[18]
。燃烧后获得的灰渣主要成分为Si、Ca、Mg、Al、K、P等，还包括多种微量/痕量元素（Fe、Mn、Cu、Co、As、Cr、Pb、Cd等）、少量未燃碳和有机物[19-20]。

2.1燃烧温度对生物质灰渣的影响

燃烧温度对生物质灰渣的产生量有较大影响。高温燃烧时，生物质燃烧充分，许多以有机物存在的无机元素更容易挥发，灰渣呈现灰色或浅灰色，产生
量较少；低温不完全燃烧时，灰渣颜色偏黑[21-22]。Thy等[19]
研究了针叶木、水稻秸秆、小麦秸秆525~1525°C燃烧时灰渣中的元素损失，发现当温度低于718°C时，升高温度对生物质灰渣灼热减量的影响为小麦秸秆>针叶木>水稻秸秆；而温度高于718°C时，针叶木的灰分产生量受影响最为显著，其次为小麦秸秆。

温度也会影响灰渣的物质组成和存在形式。例如秸秆生物质灰渣中的K从750°C开始减少，1000°C时，灰渣中的KCl则完全消失；在700°C时，灰渣中的$SiO_2$
以方石英的形式存在；而1000°C时，方石英转变为鳞石英[22]
。在700°C以下时，龙舌兰燃烧产生灰渣的主要成分为Ca
$CO_3$
，而高于700°C时，其主要成分为CaO，
这主要是因为高温下灰渣成分的裂解[23]。此外，Garzón等[24]
发现生物质灰渣中Na、Cl、K含量随着温度升高呈现降低的趋势，而Mg、Si、P等含量随着温度升高而升高。

2.2生物质种类对生物质灰渣成分的影响

农林生物质灰渣多呈碱性，碱金属元素含量
较高，主要成分包括$SiO_2$、$Al_2O_3$、$Fe_2O_3$、CaO、MgO、$K_2O$、$P_2O_5$、$SO_3$
，还含有少量MnO、$TiO_2$、$Na_2O$以及未燃碳和少量有机物[25]
。常见木本类和草本类生物质燃烧后产生的灰渣成分相似（表1），但前者Si、K含量低于后者，而Ca、Mg含量高于后者。木本类植物树皮、树叶等组织燃烧后产生的灰渣与草本类生物质灰渣物质成分含量相近。不同种类生物质燃烧产生的灰渣形态各异，粒径不一，有些颗粒密实，有
些质地疏松[26]。但总体而言，木本类灰渣产率低，而草本类灰渣产率高[27]。

表1 不同生物质灰渣的化学组成

Table 1 Chemical composition of different biomass ash and slag

| 生物质 Biomass | | 灼热减量 LOI | 化学组成 Chemical composition/% | | | | | | | | | | | 温度 Temperature/℃ | 参考文献 Reference |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MnO | MgO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | $Cl^-$ | | |
| 木本类 Woody plants | 针叶木(白棕和黄松) White fir and ponderosa pine | 27.59 | 9.35 | 3.12 | 1.14 | 32.06 | 1.76 | 4.93 | 0.69[a] | 3.13 | 10.72 | 0.39 | 0.07 | 525 | [19] |
| | 针叶木(树皮和木屑) Conifer bark and wood dust | 15.62 | 48.6 | 5.94 | 3.26 | 18.1 | 0.051 | 3.2 | 0.14 | 0.52 | 1.85 | 0.92 | 0.06 | 1000 | [29] |
| | 松木屑 Pine sawdust | — | 11.84 | 1.96 | 2.94 | 35.88 | — | 1.60 | 39.43 | 0.70 | 1.32 | 0.44 | 0.16 | 600 | [22] |
| | 松木屑 Pine sawdust | — | 13.04 | 1.70 | 3.70 | 37.52 | — | 1.83 | 39.76 | 0.65 | 0.72 | 0.28 | 0.07 | 825 | [22] |
| | 梧桐树叶 Parasol tree's leaves | — | 24.95 | 1.88 | 1.79 | 28.37 | — | 5.93 | 16.83 | 3.65 | 11.58 | 1.12 | 3.97 | 600 | [22] |
| | 梧桐树叶 Parasol tree's leaves | — | 28.53 | 1.67 | 1.80 | 29.53 | — | 6.75 | 17.34 | 3.85 | 8.09 | 1.06 | 0.86 | 825 | [22] |
| | 橄榄树锯末 Olive cake | 22.47 | 12.13 | 2.64 | 1.49 | 11.94 | 0.03 | 3.38 | 4.17 | 4.12 | 41.50 | 0.18 | 3.47 | 450 | [30] |
| | 桉树 Eucalyptus | 5.12 | 25.34 | 6.05 | 4.15 | 36.72 | 0.42 | 3.61 | 3.84 | 4.70 | 5.84 | 0.95 | — | — | [31] |
| | 杨树 Poplar | 3.64 | 36.44 | 8.96 | 6.39 | 23.76 | 0.52 | 3.52 | 4.68 | 1.90 | 6.70 | 1.49 | 1.90 | 975 | [32] |
| | 冷杉木(飞灰) Fir chips(Fly ash) | 0.8 | 16.4 | 5.9 | 3.6 | 33.7 | 2.8 | 11.7 | 2.5 | 3.3 | 13.0 | 1.4 | 1.7 | 1000 | [28] |
| | 冷杉木(底灰) Fir chips(Bottom ash) | 2.4 | 14.8 | 3.2 | 3.3 | 48.4 | 0.4 | 9.9 | 0.1 | 1.0 | 11.1 | 1.0 | 0.1 | 1000 | [28] |
| | 杨树 Poplar | — | 6.5 | 0 | 1.5 | 43.0 | — | 17.5 | 3.1 | 15.3 | 6.6 | — | — | 850 | [33] |
| 草本类 Herbaceous plants | 水稻秸秆 Rice straw | 7.97 | 75.38 | 0.09 | 0.10 | 1.60 | 0.27 | 1.64 | 0.67[a] | 0.61 | 11.95 | 0.14 | 3.18 | 525 | [19] |
| | 小麦秸秆 Wheat straw | 14.91 | 57.47 | 0.77 | 0.39 | 2.80 | 0.07 | 1.82 | 1.66[a] | 1.05 | 16.55 | 0.80 | 3.58 | 525 | [19] |
| | 稻壳 Rice husk | 17.78 | 76.7 | 0.18 | 0.23 | 0.82 | — | 0.65 | — | 1.62 | 2.03 | — | — | 900 | [29] |
| | 向日葵壳 Sunflower husk | — | 62.67 | 3.71 | 3.12 | 6.77 | — | 3.93 | — | — | 0.86 | 18.94 | — | — | [34] |
| | 甘蔗渣 Sugarcane bagasse | 9.78 | 61.59 | 5.92 | 7.36 | 5.00 | 0.10 | 1.17 | 0.42 | 0.98 | 6.22 | — | — | 1000 | [35] |
| | 稻壳 Rice husk | 14.85 | 63.77 | 0.37 | 2.65 | 0.44 | 0.05 | 0.50 | 0.12 | 0.67 | 1.42 | 0.03 | 0.05 | 1000 | [36] |
| | 稻壳 Rice husk | — | 93.59 | 0.54 | 0.82 | 1.45 | 0.19 | 0.15 | 1.94 | — | 1.94 | 0.01 | — | — | [37] |
| | 花生壳 Groundnut shell | 3.90 | 43.13 | 10.71 | 3.96 | 10.81 | — | 6.10 | — | 4.19 | 9.61 | 5.60 | 1.44 | 450 | [38] |
| | 玉米秸秆 Corn stalk | — | 44.7 | 2.8 | 2.4 | 13.5 | — | 9.1 | 4.2 | 3.7 | 19.0 | — | — | 850 | [33] |
| | 棉花枝 Cotton branch | — | 12.5 | 4.0 | 2.8 | 32.6 | — | 14.3 | 5.1 | 11.4 | 14.3 | — | — | 850 | [33] |

同一生物质产生的飞灰和底灰物质组成相似，含量略有差异。对某省五个农林生物质直燃电厂的飞灰和底灰成分进行了分析（表2），结果与文献报道[28]基本一致。即生物质飞灰中Si、S、Na含量较高，而底灰中Ca含量较高。此外，飞灰和底灰的粒径分布也存在一定差异。

表2 生物质飞灰和底灰的化学组成比较(%)

Table 2 Comparison of chemical composition between biomass fly ash and bottom ash(%)

| 灰分 Ash | 电厂 Power plant | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MnO | MgO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | $K_2O$ | $Na_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 飞灰 Fly ash | a | 61.4 | 11.4 | 6.13 | 9.18 | 0.18 | 2.49 | 0.78 | 0.91 | 5.20 | 1.07 |
| | b | 57.8 | 10.8 | 3.51 | 12.5 | 0.17 | 3.96 | 2.47 | 1.87 | 4.08 | 1.70 |
| | c | 65.6 | 8.53 | 3.50 | 11.5 | 0.17 | 3.43 | 0.85 | 0.99 | 3.18 | 1.05 |
| | d | 46.4 | 10.5 | 3.81 | 19.3 | 0.17 | 5.74 | 3.59 | 2.08 | 4.96 | 1.87 |
| | e | 44.4 | 8.94 | 4.20 | 24.4 | 0.24 | 4.79 | 3.13 | 1.80 | 5.18 | 1.55 |
| 底灰 Bottom ash | a | 46.8 | 11.1 | 6.40 | 22.3 | 0.13 | 4.99 | 1.56 | 0.80 | 4.23 | 0.82 |
| | b | 45.3 | 9.48 | 9.75 | 19.5 | 0.35 | 3.71 | 1.25 | 1.68 | 6.11 | — |
| | c | 44.9 | 7.51 | 11.9 | 23.4 | 0.28 | 2.74 | — | — | 5.86 | — |
| | d | 38.4 | 8.52 | 11.6 | 22.9 | 0.43 | 4.70 | — | 1.84 | 8.09 | — |
| | e | 46.5 | 9.33 | 10.3 | 17.9 | 0.35 | 4.43 | — | 1.41 | 6.31 | — |

飞灰经除尘器收集，颗粒较细，大部分颗粒粒径集中在250μm以下[39-40]

。飞灰的粒径分布随着颗粒直径增加呈现为单调下降的趋势，而底渣可能含有石块、砂粒等杂质，粒径分布广泛，颗粒较大，底渣的粒径分布随着颗粒直径的增加呈现为先增加后降低，底渣和炉灰均在0.25~0.9mm粒径范围内分布最多（表3）[25]。

表3 灰渣的粒径分布(%)[25]

Table 3 The particle size distribution of biomass ash and slag(%)[25]

| 灰渣 Ash and slag | <0.2 mm | 0.2~0.25 mm | 0.25~0.9 mm | 0.9~2 mm | 2~4 mm | >4 mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 飞灰 Fly ash | 40.83 | 37.58 | 21.10 | 0.27 | 0.02 | 0.06 |
| 炉灰 Furnace ash | 22.61 | 17.21 | 39.14 | 13.99 | 4.03 | 2.55 |
| 底渣 Bottom slag | 6.41 | 9.66 | 39.27 | 25.17 | 9.14 | 9.95 |

生物质灰渣在元素组成上呈现出一定的相似性，均含有大量Si、Al、Ca以及P、K等营养元素，在粒径分布上也有一定的规律，因此对生物质灰渣的资源化处理可以从元素组成和粒径两方面来综合考虑。

## 3农林生物质灰渣资源化技术

生物质电厂灰渣的资源利用方式主要取决于灰渣的理化性质，元素组成、比表面积、未燃成分对其应用有着重要的影响。比如飞灰和底灰都具有高的火山灰活性、持久性且抗磨损，可以应用于水泥混凝土制备中；而底灰表面粗糙且疏松多孔，可用作为滤料、路基或屋面材料等[6]
。目前生物质灰渣的主要处理或利用方式为填埋、用作土壤修复（改良）剂与吸附剂、用于基础建设材料及复合材料制备等。在一些
发达国家，比如德国、日本、丹
麦等，生物质灰渣的资源化利用率在70%~90%之间[41]
，而我国的灰渣资源利用率还有待提升。生物质灰渣作为一种工业固体废弃物，在进行资源利用时，需要对其带来的环境风险进行合理评估。

### 3.1灰渣应用中的潜在环境风险

生物质燃烧后，生物质中的无机矿物成分以及重金属等难挥发性物质会以固态灰渣的形式保存下来。燃烧不充分时，灰渣中还可能含有一些有毒有害物质。因此，资源化处理生物质灰渣之前，可能需要对生物质灰渣进行适当的处理，对其有毒有害物质含量和浸出毒性进行分析，另外还需要对生物质灰渣资源化产品进行性能评价和安全评估。如果将生物质灰渣应用于生态环境中，还需要进行环境风险的整体评估，确保不会造成二次污染。在具体使用中，应通过对灰渣化学成分、物理性能的分析评价，结合灰渣资源化产品的性能和浸出毒性分析，合理地确定灰渣的使用方法和使用剂量，以达到生物质灰渣最佳的资源化效果。

Oburger等 [42]
对投加生物质灰渣后周边森林土壤的理化性质和浸出水成分进行长达两年的监测，认为适当比例的生物质灰渣应用于森林土壤是可行的，不会对环境造成危害。Cruz等[17]、张振等[40]
也进行了生物质电厂灰渣的物化特性和元素成分分析，并通过生物质灰渣毒性浸出实验、盆栽实验，验证了生物质灰渣应用于农林
土壤的可行性。生物质灰渣
在海水和淡水两种条件下的重金属浸出量和生态毒性基
本一致[43]
，虽然生物质灰渣中含有Zn、Cu、Mn、Cr、Ni等重金属，但是浸出实验显示这些重金属浸出量均在标准限值以内，而且生物质灰渣中As、Cd、Pb等有毒有害金属含量很低[44]
。投加适量的生物质灰渣，并不会显著增加土壤重金属有效态含量，反而会提升土壤pH，对土壤中重金属起到钝化作用，降低植物可利用态重金属含量[45-46]
。此外，大多数的生物质电厂飞灰和底灰中的苯系物、PAH和PCDD/F等持久性有机污染物低于土壤固体废物回用标准限值[47-48]。因此，将其应用于农林土壤领域是可行的。

### 3.2灰渣用于土壤改良与修复

生物质电厂灰渣多呈碱性，含有K、Si、Ca、Mg等多种营养元素和微量元素，将生物质电厂灰渣应用于土壤，既可以缓解土壤酸化，还可将营养元素引入土壤。通常，灰渣有一定比表面积，孔隙结构较发达，硅含量较高。灰渣表面大量的硅氧键与水作用后，能够提高灰渣的持水性能和土壤团聚体的水稳定性，可以起到调整土壤结构、提高土壤的

保水保肥性能、减弱土壤膨胀的效果[49-51]。此外，生物质灰渣中的有机碳不仅可以实现碳的固定，还能够改善土壤品质[40]。代文才等[52]发现，向土壤中投加一定量的生物质灰渣后，土壤团聚体的数量及有机碳含量均得到提升，土壤团聚体的稳定性也得到提高。但Moragues-Saitua等[53]也指出生物质木灰的加入会减弱土壤的持水能力。此外，灰渣还能够提升土壤pH，降低土壤交换性$H^+$、$Al^{3+}$含量，并且显著提升土壤中$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$、$Mg^{2+}$等盐基离子和速效养分含量[45,54-56]。当然，上述改良效果与灰渣类型、施加量、施用方式和土壤性质密切相关[57]。

通过与其他材料复配施用，可以提升生物质灰渣对土壤的改良效果。但是要达到最佳的复配效果，需要探索最优的复配比例[58]。目前，复配的材料主要有磷灰石、石灰、化肥和碱渣等。陈龙等[55]发现，肥料用量低时，随着灰渣施用量的增加，油菜全磷含量先减小后增加；肥料中等用量时，油菜吸收钾的能力得到增强；而在高用量时，生物质灰渣会改变油菜钾与钙镁之间拮抗作用的表现形式，进而影响油菜对钙镁的吸收。

生物质灰渣中营养元素的释放和利用，与土壤环境和灰渣种类密切相关。研究发现，酸性条件下，水稻生物质灰渣和玉米生物质灰渣的钾释放量最大，而锯末生物质灰渣和谷壳生物质灰渣在碱性条件下钾的释放量最大[59]。相比而言，磷的释放量较小，释放速率较慢，不同生物质灰渣中磷的释放速率差异也较小[60]。通常，生物质灰渣营养元素的释放需要得到合理控制，以避免营养元素对植物的冲击。Zhang等[61]将生物质灰渣造粒为片状，成功地减缓了灰渣中营养元素的释放速率，实现了营养物质的缓释。

生物质灰渣不仅可以改善土壤结构，提升土壤营养元素含量，而且还可用于修复污染土壤。碱性生物质灰渣施入土壤后，可改变土壤的重金属赋存形态，降低重金属的迁移能力，进而降低植物可利用态重金属含量，实现对重金属污染土壤的修复[39,62-63]。梁胜男等[62]以蔬菜为供试植物，模拟了生物质灰渣对镉污染红壤的修复效果。当生物质灰渣的投加量为10%时，土壤有效态镉含量明显降低，而且植物对镉的吸收量也得到明显降低。生物质灰渣对重金属污染土壤的修复效果还与土壤类型有关。添加1%木质生物质飞灰后，与砂质黏土相比，壤土种植小麦的重金属吸收量降幅更大，Cd、Zn、Pb的降幅在45%以上[39]。

Kim等[64]认为添加生物质底灰后，土壤中重金属植物有效态降低的主要原因是土壤pH升高以及土壤负电荷的增加。生物质飞灰中碱性氧化物含量高于底灰，具有更强的酸中和能力，更适合用于土壤改良和修复[47]。此外，生物质灰还可以代替部分水泥作为固化剂，对污染土壤中的类金属、重金属进行固化稳定化处理[65]。

3.3灰渣用于污染物吸附

3.3.1有机物吸附

生物质灰渣对有机物的吸附为化学吸附，是复杂的多反应过程。灰渣的比表面积、有机碳含量、氧化物含量及碱性大小对有机物的吸附都有一定影响。研究发现，微孔、中孔数量较多的生物质灰渣对敌草隆的吸附量较大[66]。生物质灰渣中的铁氧化物对有机物的吸附具有促进效果。灰渣中的铁氧化物在水中可能会形成复杂的水合物，促进

农药中的电负性元素氯、氧、氮与其形
成共价键，从而促进灰渣对农药的吸附[30]。Quirantes等[30]
发现生物质飞灰对敌草隆和二氯苯胺的吸附是不可逆的，去除率可达到85%以上。生物质灰渣也能有效去除溶液中的染料，其去除效果受pH所影响。Pengthamkeerati等[67]
发现在溶液环境pH为8时，生物质电厂飞灰对染料活性黑5和活性黄176的吸附容量达到最大，并且强于粉煤灰的吸附能力。' Curkovic ' 等[68]
发现木质生物质
飞灰对离子态染料刚果红也有一
定的吸附能力，吸附过程是自发吸热的。Noonpui等[69]
还提出生物质灰渣对染料的去除可能是沉淀和吸附共同作用的效果。

3.3.2重金属吸附

生物质电厂灰渣多呈碱性，含有$SiO_2$、$Al_2O_3$、$P_2O_5$
等无机成分以及少量未燃碳，对重金属离子
具有一定的固定能力。徐磊等[70]研究了生物质底灰对水溶液中$Cu^{2+}$的吸附特性，饱和单层吸附量为19.45mg · $g^{-1}$。

pH<4时，生物质底灰对$Cu^{2+}$的吸附能力很低，这是因为氢离子与$Cu^{2+}$
产生竞争吸附；随着pH的升高，生物质灰渣中$SiO_2$、$Al_2O_3$
的表面电荷发生变化，负电荷逐渐增多，增强了$Cu^{2+}$
与灰渣的静电吸附能力。生物
质灰渣的化学组成对重金属的吸附也有一定影响。王磊等[71]
研究了稻壳灰、
高粱秆灰和麦秸秆灰对烟气中汞
的吸附性能，发现与高粱秆灰和麦秸秆灰相比，$SiO_2$
含量更高的稻壳灰对汞的吸附能力最强。此外，生物质灰渣能用于酸性废水的中和，显著降低污废水中的重金属浓度，这
不仅与灰
渣中大量的碱性物
质有关，还与灰渣中P、Ca含量较高
有关，磷酸盐沉淀的形成能加速污染物去除[72]。Nakbanpote等[73]
研究发现300℃燃
烧时，稻壳灰渣中含有特定的硅烷
醇基团和碳氧官能团，表现出对$[Au(CS(NH_2)_2]^+$的吸附性能，而且吸附的金-
硫脲络合物可以轻易被硫代硫酸钠脱附，从
而实现对金的富集。Wang等[74]
也发现腐植酸存在时，会与重金属离子形成络合物，从而增强灰渣对重金属的吸附性能。

3.3.3污废水处理

生物质灰渣表面疏松多孔，孔隙结构发达，比表面积大，具有较强的吸附性能，是污水处理的一种理想材料。生物质灰渣粒径的大小、填充密度以及水力
负荷都会影响灰渣的净化能力。田冬等[75]、兰木羚等[76]、刘杉杉等[77]
采用室内土柱淋溶法，将生物质灰渣用作渗滤装置填料，发现污染物去除能力与粒径大小有关。具体表现：大粒径（0.25~0.5mm）生物质灰渣有利于对污水中COD和NH+4-N的去除；生物质灰渣粒径较小（<0.1mm）时，TN的去除效果较好；而采用中等粒径（0.1~0.25mm
）灰渣时，污水中TP的去除效果更好[75]
。但为达到对生活污水的最优处理效果，还需选择适宜的水力负荷和填充密度[76-77]。

生物质灰渣还可用于沼液脱氮除磷。通过引入$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$、$OH^-$等离子，降低沼液中$CO_2$
的含量，提升沼液pH，以满足“热-吹脱”氨氮脱除工艺对沼液pH的要求[78]。此外，生物质灰渣对沼液还具有较好的过滤净化能力，能够显著降低沼液的总固体含量和浊度[79]。Rui等[80]
将利用生物质灰渣制备的球形矿物聚合物应用于厌氧消化，实验发现，该物质具有高酸性中和能力，能够长时间稳定厌氧池的
pH，增加系统的

稳定性，并能促进甲烷产生，提高
厌氧池效率。生物质灰渣中的碱性氧化物对$CO_2$、$H_2$
S也具有一定的固定能力，可以用于沼气净化[81]或者$CO_2$封存[82]。

3.4灰渣用于基础设施建设

随着建筑砂石等原材料成本的提升，生物质灰渣的回收利用逐渐受到关注。通过对农林生物质电厂灰渣物化特性和机械性能的分析，依据建设材料技术规格，可以明确生物质灰渣能用作基础设施建设的填充材料，其中有机物含量更低的灰渣具有更广泛的应用[41,83]
。其主要应用在以下方面：用作路基填料，用于制备建筑砖块或陶瓷砖，部分用作砂石或水泥替代材料。不同的用途对生物质灰渣的组成和物化特性要求不一。比如将生物质灰渣作为路基填料时，对粒径要求不严格，而作为替代材料应用于水泥、混凝土制备或者制作砖块时，要求生物质粒径均一，且在毫米以下。

3.4.1用于水泥、混凝土材料

与生物质底灰相比，生物质飞灰粒径较小，而且
有机物含量较低[83]
，常作为填料或替代材料应用于水泥、混凝土制备中。利用生物质飞灰制备的自密实混凝土性能与传统自密实混凝土相当[29,84]
，并且通过优化生物质飞灰配比，可以提升自密
实混凝土的抗压强度[83]以及抗侵蚀、抗渗和抗碳化能力[85]。Cuenca等[83]
证实掺加生物质飞灰的混凝土自密实性能和
抗压性能更好。Hemalatha等[86]指出，材料抗压强度的提升主要是因为水化硅酸钙凝胶（C-S-
H）以及水化铝酸钙凝胶等水合物的形成。Rui等[43]
同时将生物质底灰和飞灰应用于混凝土制备，其中生物质飞灰的作用是替代部分水泥，底灰则作为凝结剂，在添加10%飞灰、18%底灰时，混凝土抗压强度接近或更优于对照组。

有关稻壳灰在混凝土方面应用的研
究最多。低温稻壳灰具有大量的高活性$SiO_2$和$Al_2O_3$
，在活性粉末混凝土（RPC）中可充分发挥火山灰效应，增强RPC强度，改善其脆性和抗压、抗折强度[87]。此外，高硅含量稻壳灰的掺加还有利于提高高强
、超高强混凝土与钢筋的粘结强度[88]。生物质灰渣还可以用于制备水泥材料[43,89-90]。Gonz á lez-
L ó pez等[23]
研究了低添加量生物质灰渣对水泥砂浆抗压强度的影响，在添加5%龙舌兰灰渣时，水泥砂浆早期抗压强度明显强于未添加灰渣的水泥砂浆。Ajiwe等[89]
利用稻壳灰制备白色硅酸盐水泥，添加24.5%稻壳灰制备的水泥性能与商用水泥性能相当。Carrasco等[90]进一步提高了生物质灰渣的添加比例，将生物质底灰与水泥等比例掺加用于建筑砌块中，生物质灰渣的加入提升了材料的孔隙度，并且降低了材料的传热性能。将生物质底灰作为凝结剂，替换砂粒应用于水泥砂浆制备时，即便完全用生物质灰渣替换砂粒，砂浆的性能也并未受到影响[91]。Beltr á n等[92]和Tosti等[93]
分别证实了生物质底灰、飞灰替代部
分水泥应用于砂浆制备的可行性。李清海等[94]
将生物质灰渣应用于水泥瓦的制备中，并在实际生产线上进行了试生产。在添加憎水剂的情况下，使用生物质灰渣代替30%水泥生产的水泥瓦各项性能均能达到JC/T746—2007《混凝土瓦》中规定的标准。

生物
质灰渣形
状不规则或粒径较
大，硫酸盐、氯化物含量过高，都会
影响水泥砂浆的性能，不利于砂浆强度发展[32,95]
。灰渣中的钾盐会促进石膏、牛角石沉淀的产生，改变砂浆早期流动性；而在后期随着钾的流失以及固化过程中碱-硅反应，会导致材料抗压强度的下降[28]
。因此生物质灰
渣替换水泥或砂粒应用于混凝土
制备时，需要适当的处理，筛分粒径、控制灰渣中$K_2$

O和MgO等碱性物质以及氯化物含量
，避免其对材料耐久性能和机械性能的影响[90-91,96]
，或通过研磨和焚烧生物质灰渣，减小灰渣粒径，降低灰渣中碳含量[97-98]。此外，通过改变混凝土各组分的掺加比例，调节混凝土的硅钙比例，也会增强混凝土的抗压强度和抗折强度[99]。

3.4.2用于制备黏土砖、陶瓷砖

黏土砖性能与生物质灰渣的类型、添加比例和烧结温度密切相关。Satus等[37]发现添加2%稻壳灰制备的砖块仍然具有合格的机械性能，且堆积密度和抗压
强度均有提升。Eliche-Quesada等[29]
通过添加10%的稻壳灰或者20%的木灰，并在1000°C烧结，制得的黏土砖具有低吸水率、高致密度和高抗压强度，并且黏土砖的热导性下降30%。随后，Eliche-Quesada等[100]
发现生物质灰渣中含有助融氧化物$K_2$
O和辅助助融氧化物CaO、MgO等
，有利于降低制备砖块时的烧结温度。灰渣中$SiO_2$、$Al_2O_3$
、MgO含量与玻璃化过程和陶瓷基体韧性密切相关。掺
加$SiO_2$含量较高的灰渣有利于改善砖体的塑性和硬度特性[101]。因此，$SiO_2$
含量高的生物质灰渣在黏土砖和陶瓷制品方面的应用得到了更广泛关注。

稻壳生物质灰渣中含有大量的$SiO_2$，而且$SiO_2$
在XRD图谱中无明显结晶特征，表明灰渣中的硅组分
具有活性[84]。甘蔗渣生物质灰渣同样富含$SiO_2$

[35]。但Khoo等[36]
发现烧结温度提升到1200°C时，稻壳生物质灰的添加比例可以提升到15%。此时制备的砖块的强度和吸水性满足建筑材料
的最低要
求。而按照西班牙
国家标准，生物质灰渣替代20%黏土
所烧制的陶瓷砖仍能满足建设材料性能要求[102]
。但需要注意的是，添加过量的生物质灰渣时，砖块的吸水能力会增加，抗压能力有所下降。

3.4.3用于路基建设

生物质灰渣在水泥、混凝土以及砖块制备方面的应用已有很多，但应用时对生物质灰渣的燃烧程度、组成成分、粒

[41]
研究了生物质灰渣的物化性质和机械性能，通过与道路建设技术规范相比对，提出生物质灰渣作为路基填充材料大量应用于道路建设的可能性。Oburger等[42]
将15%的流化床和炉排炉生物质灰渣用于森林道路建设，通过两年的环境监测和浸出溶液分析，证实生物质灰渣应用于道路建设，对环境的风险是可控的。Valle-Zermeñ o等[103]
通过将新鲜生物质底灰和风化后的生物质底灰结合使用，降低了生物质灰渣运用的环境风险。新鲜生物质底灰经自然风化时，会形成新的水泥相，从而增强道路的机械性能；而风化后的生物质底灰在底部作为屏障，通过改变pH以及吸附和表面络合作用，阻留新鲜生物质底灰浸出的金属离子和非金属成分。此外，经过适当处理后的生物质灰渣，可以作为无机沥青改性材料，用于增强沥青的高温性能和抗老化性能[104]。

3.5灰渣用于元素回收与复合材料制备

3.5.1元素回收

生物质电厂灰渣是多种有机物和无机矿物的复合体，含有大量的碳、硅、铝、钙、铁、钾、硫、磷等元素，经过溶解、分离、提纯等一序列物理和化学处理工序，这些元素可以重新回收利用。目前对生物质灰渣元素的回收利用主要

集中在碳、硅、钾等。生物质灰渣中的未燃碳成分一般约占灰分的1%~20%，最高可达79%[6]，这些碳组分可以经过湿法或干法处理工序进行回收，回收的碳可作为燃料、吸附剂、滤料或经过活化作为活性炭使用[105]。马晓宇[106]以稻壳灰为原料，成功地实现了灰渣中硅的提取和回收，制得无定型、高纯度且分布均匀的球状$SiO_2$。利用稻壳灰制备的微米硅胶颗粒含水率达65%以上，物化性质与商用硅胶Trisyl300相近[107]。

3.5.2复合材料制备

生物质电厂灰渣中含石灰、莫来石、石英、云母等多种矿物成分[105]，使其在建筑材料、工业复合材料生产中具有多种可能性。刘琼琼等[108]尝试将生物质电厂灰（<350 μm）应用于垫带胶的工业化生产中，使用生物质灰部分或完全替代炭黑后，胶料的加工性能得到改善，而且成本大为降低。微米级灰渣被广泛应用于复合材料制备，比如制备聚丙烯/生物质灰复合材料[109]、生物质灰/丁苯橡胶复合材料[110]、$Si_3N_4$/SiC复合粉体[111]等。此外，生物质灰渣在降噪材料、低导热材料、催化材料等方面也有一定的应用潜力。Wang等[112]在制作电容器的降噪材料时，加入一定比例的稻壳生物质灰渣，所制备的材料表现出良好的抗压强度和抗折强度，与同等厚度的常规墙壁相比，降噪效果更明显。Rui等[31]将$H_2O_2$作为成孔剂，利用生物质飞灰制备了一种多孔无机矿物聚合物，该物质表现出良好的阻热性能，可以用作轻质低导热材料。此外，Rui等[113]还利用生物质飞灰部分代替偏高岭土，制备得到多孔球形矿物聚合物，该物质具有缓慢且持久的碱性浸出能力。

**4灰渣资源利用目前存在的问题与处理方案**

目前，国内外对农林生物质电厂灰渣的资源化利用研究已有很多，主要集中在土壤改良与修复、污染物吸附、基础设施建设和复合材料制备等方面，有些技术已转化到实际生产中，为生物质灰渣的资源化提供了可靠的技术支持。然而，要将这些研究成果转化为规模化的工业生产技术，实现生物质灰渣的完全资源化利用，还需要正视目前存在的一些问题。

4.1灰渣资源利用目前存在的问题

农林生物质来源多样、种类多样，季节变化性大，而且生物质直燃电厂的燃烧工艺和燃烧条件也存在差异，这些原因造成了燃烧后形成的生物质灰渣成分存在差异、粒径大小不一。因此，单一的资源利用方式难以适用于所有灰渣类型。

此外，农林生物质在收购的过程中，会夹带金属杂质和石块等物质，这些物质进入灰渣后必须进行有效分离。还需指出的是，目前资源利用的灰渣主要是毫米及以下粒径的颗粒。大颗粒的灰渣进行资源化时，则需进行研磨粉碎等预处理，这无疑会增加灰渣资源化利用的成本。因此，根据灰渣的粒径组成，进行有效筛分，制定一体化的资源利用方案，显得尤为重要。

4.2灰渣一体化资源处理方案

农林生物质种类及来源的多样性和复杂性决定了生物质电厂灰渣组成和粒径不一。因此，在对生物质电厂灰渣资源化利用之前，首先要对生物质灰渣进行分类，依据各粒径组分特性的不同分别确定资源化利用方式。

首先，需去除生物质灰渣中大型石块、砖块和铁等金属杂质，铁质杂质可重回炼钢厂冶炼使用。然后，进一步对生物质灰渣进行细致筛分，按照粒径大小进行以下分类处理（图1）：

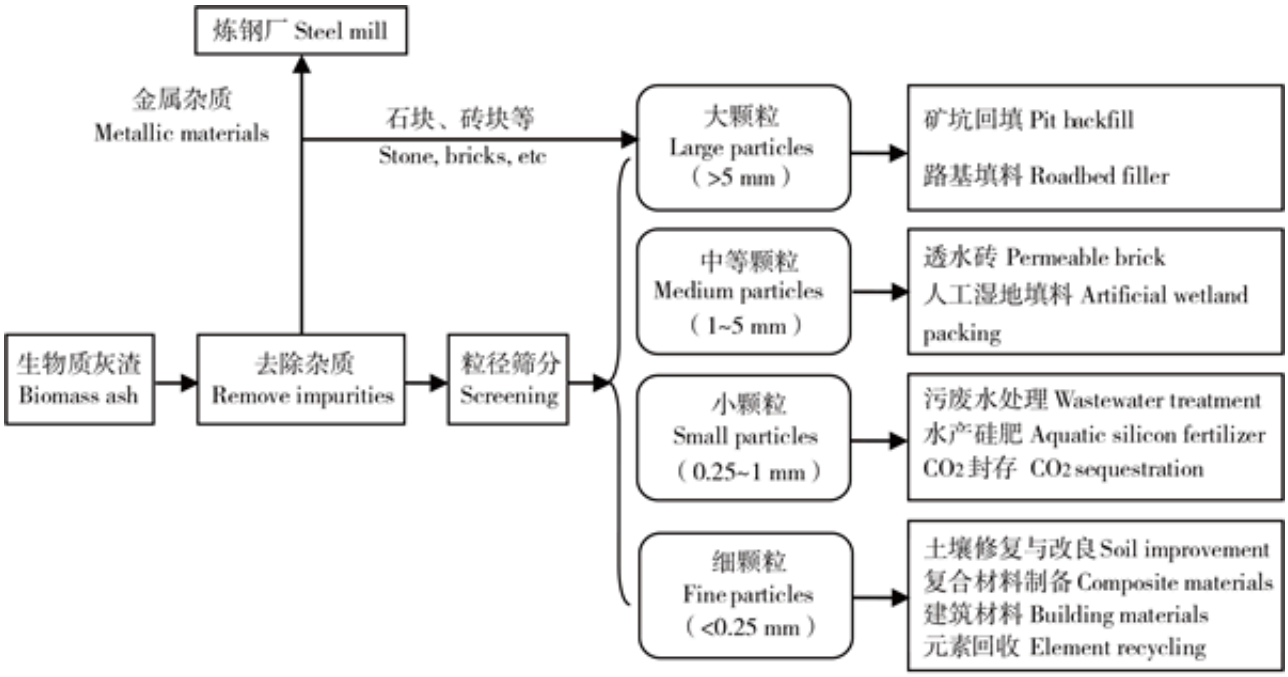


**图1 农林生物质电厂灰渣一体化资源利用方案**

Figure 1 Integrated utilization of ash and slag resources from agroforestry biomass-fired power plants

大颗粒（>5mm）灰渣用于矿坑回填或作为路基材料。此粒径范围的灰渣，组成复杂，含有小型石砾等杂质。灰渣应尽量减少处理步骤，降低成本，直接应用于对灰渣粒径及成分要求不高的用途。

中等颗粒（1~5mm）灰渣可作为混凝土和砂浆再生细骨料用于制备透水路面砖、透水路面板和湿地填料等透水材料，也可结合粘结剂等辅助原料，制备养护型透水砖。其中，含碳量较高的生物质灰渣则适宜制备烧结型透水砖，由于碳含量高，烧结过程中，材料烧失量大，易形成空隙，从而提升材料的透水性能。

此类粒径的生物质灰渣也可以作为人工湿地或土壤渗滤装置填料，用于去除COD、TN、TP、NH+4-N等污染物，而且不会因粒径过小而造成系统阻塞。

小颗粒（0.25~1mm）灰渣主要用于处理污废水和沼液、封存$CO_2$或作为补充硅肥。生物质灰渣疏松多孔，比表面积较大，碱性物质含量高，对酸性废水具有良好的中和效果，而且对水体中的重金属、染料等有机物具有较强的吸附能力。将生物质灰渣用于沼液处理，能同时起到调节沼液pH和脱氮除磷的效果。

此类灰渣还可以作为滤料，应用于水体和沼液净化。灰渣中含有的大量CaO等碱性物质，对$CO_2$有较强固定能力，可以用于沼气净化或封存$CO_2$。此外，生物质灰渣中含有大量的活性$SiO_2$，是生产渔业硅肥的优质原材料。将其应用于渔业水体，既可以调节水质、底质，抑制水体病原菌的繁殖，还可提供硅养分，促进喜硅藻类生长，达到提升藻类产量或为水产动物增加食物的效果，同时起到净化水体的作用。

细颗粒（<0.25mm）灰渣在经过处理后可以用作土壤改良剂和修复剂。用作改良剂时，可降低土壤酸性，提高土壤持水率，补充土壤营养物质。鉴于生物质灰渣中的营养元素含量通常达不到农业化肥中对氮磷钾含量的要求，因此在作为土壤改良剂时，可部分用作硅肥替代品，或与菌剂、化肥、有机肥复配使用，提升对土壤的改良效果。用作修复剂时，主要是通过提升土壤pH，并通过沉淀或静电作用，降低土壤中重金属植物可利用态含量。灰渣还常常与生物质炭等材料配合施用，增加对重金属污染土壤修复效果。此外，生物质灰渣密度较小，可用作无机沥青改性材料，以提升沥青的高温性能和耐老化性能。细颗粒生物质灰渣也可用作水泥混凝土制备时的添加材料，以改善混凝土和水泥基材料的机械性能，或用于制备陶瓷砖、黏土砖等，还可用于制备其他材料，如与炭黑、丁苯橡胶等联合使用制备新

型复合材料。对生物质灰渣的主要组成元素，如Si、Ca、Al等，可以通过适当途径回收利用或作为合成新材料的原料。

**5结论与展望**

（1）我国生物质资源产量巨大，其中大部分农林生物质未得到合理利用。作为一种清洁能源，我国的农林生物质直燃电厂在今后很长一段时间内将保持快速发展。因此，解决生物质灰渣资源化这一瓶颈问题，将有力地助推行业发展。

（2）因原料、季节、地域等存在差异，农林生物质直燃电厂的灰渣成分复杂、粒径不一。现有的灰渣资源化利用研究大多集中在中等以下粒径，规模较小，缺乏对灰渣的整体处理方案，大规模的工业应用仍需论证。

（3）为提高灰渣资源利用水平，需要对不同生物质和不同燃烧技术产生的灰渣进行深入研究，对灰渣进行合理的筛分和科学的研究。针对灰渣属性，因地制宜地制定一体化处理方案，以推进灰渣处理的规模化和工业化。未来研究人员应更关注毫米粒径以上大颗粒灰渣的资源化处理，减少其处理工序，降低资源化成本。此外，生物质灰渣的硅钙成分，在各种资源化处理中都起到重要作用，也应作为未来研究的重点之一。在此基础上，制定完善的技术准则和标准，以实现对灰渣的工业化处理。

（4）本文提出的生物质灰渣一体化处理方案，综合考虑了生物质灰渣的粒径和组成，对各粒径范围内灰渣进行分别资源化处理，尽可能减少各粒径范围灰渣资源化的处理工序，降低生物质灰渣资源化成本，有望实现对灰渣的完全资源化利用。

## 参考文献：

[1] Gross R, Leach M, Bauen A. Progress in renewable energy[J]. *Environment International*, 2003, 29(1): 105-122.

[2] 黄英超, 李文哲, 张　波. 生物质能发电技术现状与展望[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(2): 270-274.

HUANG Ying-chao, LI Wen-zhe, ZHANG Bo. Recent advances and prospects of the technic in electricity generation from biomass[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(2): 270-274.

[3] 国网能源研究所. 2017中国新能源发电分析报告[R]. 北京: 国网能源研究所, 2017.

State Grid Energy Research Institute. Annual report on new energy power generation(2017)[R]. Beijing: State Grid Energy Research Institute, 2017.

[4] 国家能源局. 我国可再生能源发电装机达6.5亿千瓦, 同比增14%[EB/OL]. (2018-01-24) [2018-05-22]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136920163.htm.

National Energy Administration. The renewable energy power generation capacity has reached 650 million kilowatts, 14% more than that last year[EB/OL]. (2018-01-24) [2018-05-22]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136920163.htm.

[5] 国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2007.

National Development and Reform Commission. Medium and long-term development for renewable energy[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2007.

[6] Vassilev S V, David B, Lars K A, et al. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification[J]. *Fuel*, 2013, 105(2): 40-76.

[7] 赵巧良. 生物质发电发展现状及前景[J]. 农村电气化, 2018(3):60-63.

ZHAO Qiao-liang. Analysis related to developed present situation and

prospect related to biomass energy generation[J]. *Rural Electrification*, 2018(3):60-63.

[8] Obernberger I. Decentralized biomass combustion: State of the art and future development[J]. *Biomass & Bioenergy*, 1998: 14(1): 33-56.

[9] 曲增杰. 我国生物质直燃发电产业发展的几点思考[J]. 科技创新导报, 2009(33): 52.
QU Zeng-jie. Some thoughts on the development of biomass direct-fired power generation industry in China[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009(33): 52.

[10] 秦建光, 余春江, 王勤辉, 等. 流化床秸秆燃烧技术研究与开发[J]. 水利电力机械, 2006, 28(12): 70-75.
QIN Jian-guang, YU Chun-jiang, WANG Qin-hui, et al. Development and research of the straw combustion technology for the fluidized bed boiler[J]. *Water Conservancy & Electric Power Machinery*, 2006, 28(12): 70-75.

[11] 盖东飞, 吕英胜, 王　磊, 等. 水冷振动炉排锅炉在生物质直燃发电厂中的应用[J]. 工业锅炉, 2011(6): 27-30.
GAI Dong-fei, LÜ Ying-sheng, WANG Lei, et al. The application of water-cooled vibrated stock boilers in biomass direct combustion power plant[J]. *Industrial Boiler*, 2011(6): 27-30.

[12] 林永明, 潘　峰, 王正锋. 生物质发电燃烧方式与炉型选择[J]. 广西电力, 2009, 32(1): 5-8.
LIN Yong-ming, PAN Feng, WANG Zheng-feng. Choice of combustion mode and boiler type for biomass electricity generation[J]. *Guangxi Electric Power*, 2009, 32(1): 5-8.

[13] Niu Y, Tan H, Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging(ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 52: 1-61.

[14] 孙　立, 张晓东. 生物质发电产业化技术[M]. 上海: 化学工业出版社, 2011:95-96.
SUN Li, ZHANG Xiao-dong. Industrialization technology of biomass power generation[M]. Shanghai: Chemical Industry Press, 2011:95-96.

[15] Vassilev S V, David B, Lars K A, et al. An overview of the chemical composition of biomass[J]. *Fuel*, 2010, 89(5): 913-933.

[16] 李廉明, 余春江, 柏继松. 中国秸秆直燃发电技术现状[J]. 化工进展, 2010, 29(增刊1):84-90.
LI Lian-ming, YU Chun-jiang, BAi Ji-song. Status of straw direct-fired power generation technology in China[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(Suppl 1):84-90.

[17] Cruz, N C, Rodrigues S M, Carvalho L, et al. Ashes from fluidized bed combustion of residual forest biomass: Recycling to soil as a viable management option[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2017, 24(2): 14770-14781.

[18] Nunes L J, Matias J C, Catalão J P. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53(15): 235-242.

[19] Thy P, Jenkins B M, Grundvig S, et al. High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes[J]. *Fuel*, 2006, 85(5/6): 783-795.

[20] Vamvuka D, Kakaras E. Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(3): 570-581.

[21] Romero E, Quirantes M, Nogales R. Characterization of biomass ashes produced at different temperatures from olive-oil-industry and greenhouse vegetable wastes[J]. *Fuel*, 2017, 208: 1-9.

[22] 肖瑞瑞, 陈雪莉, 王辅臣, 等. 不同生物质灰的理化特性[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 364-369.
XIAO Rui-rui, CHEN Xue-li, WANG Fu-chen, et al. Physical and chemical properties of different biomass ash[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2011, 32(3): 364-369.

[23] González-López J R, Ramos-Lara J F, Zaldivar-Cadena A, et al. Small addition effect of agave biomass ashes in cement mortars[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 133: 35-42.

[24] Garzón E, Morales L, Martínez-Blanes J M, et al. Characterization of ashes from greenhouse crops plant biomass residues using X-ray fluorescence analysis and X-ray diffraction[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2017, 46(6):569-578.

[25] 庄会永, 徐永进, 李　军, 等. 生物质电厂灰渣成分及利用前景分析[C]//中国国际发电技术会议论文集. 上海: 中国电力出版社, 2007: 522-529.
ZHUANG Hui-yong, XU Yong-jin, LI Jun, et al. Composition and prospects for the ash and slag of biomass-fired power plants[C]//Proceedings of international conference on power system technology. Shanghai: China Electric Power Press, 2007: 522-529.

[26] 张　军, 范志林, 林晓芬, 等. 灰化温度对生物质灰特征的影响[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(5): 547-551.
ZHANG Jun, FAN Zhi-lin, LIN Xiao-fen, et al. Influence of ash temperature on characteristics of biomass ash[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5): 547-551.

[27] James A K, Thring R W, Helle S, et al. Ash management review: Applications of biomass bottom ash[J]. *Energies*, 2012, 5(10): 3856-3873.

[28] Maschio S, Tonello G, Piani T, et al. Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(4): 666-671.

[29] Eliche-Quesada D, Felipe-Sesé M A, López-Pérez J A, et al. Characterization and evaluation of rice husk ash and wood ash in sustainable clay matrix bricks[J]. *Ceramics International*, 2016, 43(1): 463-475.

[30] Quirantes M, Nogales R, Romero E. Sorption potential of different biomass fly ashes for the removal of diuron and 3,4-dichloroaniline from water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 331:300-308.

[31] Rui M N, Buruberri L H, Ascensao G, et al. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 119: 99-107.

[32] Berra M, Mangialardi T, Paolini A E, et al. Reuse of woody biomass fly ash in cement-based materials[J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 76: 286-296.

[33] Wang W, Liu X, Zheng Y. Quantitative chemical composition determination and thermal analysis for typical biomass ashes in China[J]. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2015, 9(5): 751-758.

[34] Quaranta N, Unsen M, López H, et al. Ash from sunflower husk as raw material for ceramic products[J]. *Ceramics International*, 2011, 37(1): 377-385.

[35] Faria K C, Gurgel R F, Holanda J N. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks[J]. *Journal of Environmen-*

*tal Management*, 2012, 101: 7-12.

[36] Khoo Y C, Johari I, Ahmad Z A. Influence of rice husk ash on the engineering properties of fired-clay brick[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 795: 14-18.

[37] Sutas J, Mana A, Pitak L. Effect of rice husk and rice husk ash to properties of bricks[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 32: 1061-1067.

[38] Umamabeswaran K, Batra V S, Physico-chemical characterisation of Indian biomass ashes[J]. *Fuel*, 2008, 87(6): 628-638.

[39] Ochecova P, Tlustos P, Szakova J. Wheat and soil response to wood fly ash application in contaminated soils[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(3): 995-1002.

[40] 张　振, 韩宗娜, 盛昌栋. 生物质电厂飞灰用作肥料的可行性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 34(7): 200-205.
ZHANG Zhen, HAN Zong-na, SHENG Chang-dong. Feasibility evaluation of biomass fly ashes from power station using as fertilizer[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 34(7): 200-205.

[41] Cabrera M, Galvin A P, Agrela, et al. Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 58(4): 234-244.

[42] Oburger E, Jäger A, Pasch A, et al. Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance: A field study[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544(10): 711-721.

[43] Rui B, Lapa N, Dias D, et al. Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 48(19): 457-463.

[44] Maresca A, Hansen M, Ingerslev M, et al. Column leaching from a Danish forest soil amended with wood ashes: Fate of major and trace elements[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2018, 109: 91-99.

[45] 时仁勇, 李九玉, 徐仁扣, 等. 生物质灰对红壤酸度的改良效果[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1088-1095.
SHI Ren-yong, LI Jiu-yu, XU Ren-kou, et al. Effect of biomass ash on acidity of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(5): 1088-1095.

[46] Qin J, Hovmand M F, Ekelund F, et al. Wood ash application increases pH but does not harm the soil mesofauna[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 581-589.

[47] Freire M, Lopes H, Tarelho L A. Critical aspects of biomass ashes utilization in soils: Composition, leachability, PAH and PCDD/F[J]. *Waste Management*, 2015, 46: 304-315.

[48] Rey-salgueiro L, Omil B, Merino A, et al. Organic pollutants profiling of wood ashes from biomass power plants linked to the ash characteristics[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 535-543.

[49] 叶夏伊, 高　明, 黄　容, 等. 不同施用量水稻灰对作物及退化黄壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 219-224.
YE Xia-yi, GAO Ming, HUANG Rong, et al. The effect of different application amounts of rice biomass ash on crops and degraded yellow soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 219-224.

[50] 黄　容, 高　媛, 高　明, 等. 生物质灰渣物质特性和保水性的研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 130-133.
HUANG Rong, GAO Yuan, GAO Ming, et al. Study on material properties and water absorption capacity of biomass ash[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6): 130-133.

[51] Hasan H, Dang L, Khabbaz H, et al. Remediation of expansive soils using agricultural waste bagasse ash[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143:1368-1375.

[52] 代文才, 钱　盛, 高　明, 等. 施用生物质灰渣对柑橘园土壤团聚体及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 260-265.
DAI Wen-cai, QIAN Sheng, GAO Ming, et al. Effects of biomass ash application on soil aggregates and organic carbon distributions of citrus orchard soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 260-265.

[53] Moragues-Saitua L, Arias-González A, Gartzia-Bengoetxea N. Effects of biochar and wood ash on soil hydraulic properties: A field experiment involving contrasting temperate soils[J]. *Geoderma*, 2017, 305: 144-152.

[54] 陶志慧, 章力干, 崔　键, 等. 生物质电厂灰等材料对红壤酸度和养分的改良效应[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 899-904.
TAO Zhi-hui, ZHANG Li-gan, CUI Jian, et al. Effects of biomass power plant ashes and other materials on acidity and properties of red soils[J].*Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4): 899-904.

[55] 陈　龙, 王　敏, 王　硕, 等. 生物质灰渣与化肥配施对土壤性质及油菜生长的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(6): 727-733.
CHEN Long, WANG Min, WANG Shuo, et al. Effects of combined application of biomass ash and chemical fertilizers on soil properties and growth of rape[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2011, 30(6): 727-733.

[56] 谷健云, 崔　键, 周　静, 等. 生物质灰渣等对红壤性状的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2): 258-265.
GU Jian-yun, CUI Jian, ZHOU Jing, et al. Influence of biomass ash as a kind of soil amendment on acidity and fertility of red earth[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, 43(2): 258-265.

[57] Pugliese S, Jones T, Preston M D, et al. Wood ash as a forest soil amendment: The role of boiler and soil type on soil property response [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(5): 621-634.

[58] 黄兰芬, 李九玉, 陈中华, 等. 碱渣和生物质灰配施改良酸性土壤的效果初探[J]. 中国南方果树, 2014, 43(4): 65-67.
HUANG Lan-fen, LI Jiu-yu, CHEN Zhong-hua, et al. Preliminary study on the effect of applying soda residue and biomass ash on acid soil improving[J]. *South China Fruits*, 2014, 43(4): 65-67.

[59] 王　侃, 王子芳, 高　明, 等. 不同pH条件下生物质灰渣中$K^+$释放动力学研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 171-176.
WANG Kan, WANG Zi-fang, GAO Ming, et al. Analysis of $K^+$ release kinetics of biomass ash with different pH[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2): 171-176.

[60] 张雅蓉, 高　明, 王　侃, 等. 生物质灰渣中的磷、钾释放动力学特征研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 75-80.
ZHANG Ya-rong, GAO Ming, WANG Kan, et al. Study on the kinetics of phosphorus and potassium release in biomass ash[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(4): 75-80.

[61] Zhang Z, He F, Zhang Y, et al. Experiments and modelling of potassium release behavior from tablet biomass ash for better recycling of ash as eco-friendly fertilizer[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170:379-387.

[62] 梁胜男, 赵　玲, 董元华, 等. 生物质灰渣对红壤中Cd含量及其生物有效性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 451-453.

LIANG Sheng-nan, ZHAO Ling, DONG Yuan-hua, et al. Effect of biomass ash on conentration and bioavailability of Cd in red soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 45(5): 451-453.

[63] Pandey V C, Singh N. Impact of fly ash incorporation in soil systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136: 16-27.

[64] Kim S U, Owens V N, Sang Y K, et al. Effect of different way of bottom ash and compost application on phytoextractability of cadmium in contaminated arable soil[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2017, 60 (4): 353-362.

[65] Azhar A T, Azim M A, Aziman M, et al. Leachability of arsenic(As) contaminated landfill soil stabilised by cement and bagasse ash[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.

[66] 周岩梅, 张　琼, 孙素霞, 等. 敌草隆在市售草木灰及生物质电厂灰上的吸附特性[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1612-1619.
ZHOU Yan-mei, ZHANG Qiong, SUN Su-xia, et al. Sorption characteristics of diuron on merchant biomass ash and biomass power plant ashes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7): 1612-1619.

[67] Pengthamkeerati P, Satapanajaru T, Singchan O. Sorption of reactive dye from aqueous solution on biomass fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3): 1149-1156.

[68] Ćurković L, Jukić L, Šokčević Z, et al. Woody biomass fly ash as a low-cost sorbent for the removal of ionic dye from aqueous solution: Isotherm, kinetic modelling and thermodynamics[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2017, 89: 171-180.

[69] Noonpui S, Thiravetyan P, Nakbanpote W, et al. Color removal from water-based ink wastewater by bagasse fly ash, sawdust fly ash and activated carbon[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 162(2): 503-508.

[70] 徐　磊, 郑学博, 崔红标, 等. 生物质电厂底渣对水溶液中 $Cu^{2+}$ 的吸附特性[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1642-1648.
XU Lei, ZHENG Xue-bo, CUI Hong-biao, et al. Adsorption of $Cu^{2+}$ in water by biomass ash[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(8): 1642-1648.

[71] 王　磊, 楼　波, 陈树科, 等. 三种生物质灰对汞的吸附实验研究[J]. 工业炉, 2008, 30(2): 7-9.
WANG Lei, LOU Bo, CHEN Shu-ke, et al. Experimental study on adsorption of mercury with three biomass ashes[J]. *Industrial Furnace*, 2008, 30(2): 7-9.

[72] Bogush A, Dabu C, Tikhova V, et al. Application of biomass ashes for treatment of acid mine drainage[C]. Freiberg: IMWA, 2016.

[73] Nakbanpote W, Thiravetyan P, Kalambaheti C. Preconcentration of gold by rice husk ash[J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(4): 391-400.

[74] Wang S, Terdkiatburana T, Tadé M O. Single and co-adsorption of heavy metals and humic acid on fly ash[J]. *Separation & Purification Technology*, 2008, 58(3): 353-358.

[75] 田　冬, 高　明, 王　侃. 不同粒径生物质灰渣填料净化生活污水的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 218-222.
TIAN Dong, GAO Ming, WAN Kan. Experimental reasearch on the treatment of life sewage by biomass ash praticle size[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 218-222.

[76] 兰木羚, 王子芳, 高　明, 等. 不同水力负荷下生物质灰渣填料系统处理生活污水的研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 289-292.
LAN Mu-ling, WANG Zi-fang, GAO Ming, et al. Study on biomass ash filling system on sewage treatment under different hydraulic loading[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 289-292.

[77] 刘彬彬, 高　明, 王　侃, 等. 不同生物质灰渣填充密度下处理生活污水的效果研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 296-300.
LIU Bin-bin, GAO Ming, WANG Kan, et al. Study on the treatment effect of biomass ash on domestic wastewater under different filling density[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(6): 296-300.

[78] 贺清尧, 冉　毅, 刘　璐, 等. 生物质灰致沼液氮磷脱除研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 237-244.
HE Qing-yao, RAN Yi, LIU Lu, et al. Ammonia nitrogen and phosphorous removal from biogas slurry induced by biomass ash addition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 237-244.

[79] 李　刚, 崔燕平, 李　玲, 等. 生物质灰渣特性及其对沼液净化的试验研究[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(3): 331-335.
LI Gang, CUI Yan-ping, LI Ling, et al. Characteristics of biomass ash and its application in digested slurry purification[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016, 50(3): 331-335.

[80] Rui M N, Gameiro T, Carvalheiras J, et al. High pH buffer capacity biomass fly ash-based geopolymer spheres to boost methane yield in anaerobic digestion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 258-267.

[81] Fernández-Delgado M, Mostbauer P, Knapp A, et al. Biogas purification with biomass ash[J]. *Waste Management*, 2017, 71:224-232.

[82] López R, Díaz M J, González-Pérez J A. Extra $CO_2$ sequestration following reutilization of biomass ash[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:1013-1020.

[83] Cuenca J, Rodríguez J, Martín-Morales M, et al. Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 40: 702-709.

[84] 万惠文, 刘　离, 陈　伟. 利用稻壳灰配制自密实混凝土性能的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 32-34.
WANG Hui-wen, LIU Li, CHEN Wei. Study of self compacting concrete with rice husk ash[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(7): 32-34.

[85] 余其俊, 赵三银, 冯庆革, 等. 活性稻壳灰对混凝土强度和耐久性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(2): 15-19.
YU Qi-jun, ZHAO San-yin, FENG Qing-ge, et al. Effect of active rice hull ash on strength and durability of concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(2): 15-19.

[86] Hemalatha T, Mapa M, George N, et al. Physico-chemical and mechanical characterization of high volume fly ash incorporated and engineered cement system towards developing greener cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125: 268-281.

[87] 何凌侠, 尹　健, 田冬梅, 等. 稻壳灰对活性粉末混凝土强度的影响[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2016, 38(2): 23-28.
HE Ling-xia, YIN Jian, TIAN Dong-mei, et al. Effect of rice husk ash on the strength of reactive powder concrete[J]. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2016, 38(2): 23-28.

[88] 欧阳东. 稻壳灰对高强超高强混凝土钢筋粘结强度的影响[J]. 工业建筑, 2003, 33(11): 46-48.
OUYANG Dong. Effect of rice husk ash on bond strength between steel bar and HSC/UHSC[J]. *Industrial Construction*, 2003, 33(11):

46-48.

[89] Ajiwe V I E, Okeke C A, Akigwe F C. A preliminary study of manufacture of cement from rice husk ash[J]. *Bioresource Technology*, 2000, 73(1): 37-39.

[90] Carrasco B, Cruz N, Terrados J, et al. An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks[J]. *Fuel*, 2014, 118(2): 272-280.

[91] Modolo R C E, Ferreira V M, Tarelho L A, et al. Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 45(7): 275-281.

[92] Beltrán M G, Barbudo A, Agrela F, et al. Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 112: 699-707.

[93] Tosti L, Zomeren A V, Pels J R, et al. Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2018, 134:25-33.

[94] 李清海, 孙　蓓. 电厂生物质燃料余灰对水泥瓦性能的影响研究[J]. 中国建筑防水, 2012(11): 25-29.
LI Qing-hai, SUN Bei. Research on the influence of the wastes produced by biomass power plants on cement tile[J]. *China Building Waterproofing*, 2012(11): 25-29.

[95] 刘　勇, 冯竞竞, 于　雷, 等. 生物质灰对水泥硬化浆体抗压强度影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1718-1722.
LIU Yong, FENG Jing-jing, YU Lei, et al. Influence of biomass ash on the compressive strength of hardened cement paste[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(5): 1718-1722.

[96] Rajamma R, Ball R J, Tarelho L A C, et al. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2/3): 1049-1060.

[97] Rosales J, Cabrera M, Beltran M G, et al. Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154: 424-435.

[98] 袁继峰, 刘　彬, 董晓进. 不同细度稻壳灰对混凝土强度及自收缩的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(6): 143-147.
YUAN Ji-feng, LIU Bin, DONG Xiao-jin. Effect of fineness of rice-husk ash on strength and autogenous shrinkage of concrete[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2015, 41(6): 143-147.

[99] 蔡　星, 奚新国, 吕洪杰, 等. 钙硅比对生物质灰渣加气混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3):800-804.
CAI Xing, XI Xin-guo, LÜ Hong-jie, et al. Influence of calcium-silicon ratio on performance of biomass ash aerated concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(3):800-804.

[100] Eliche-Quesada D, Leite-Costa J. Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks[J]. *Waste Management*, 2016, 48(1): 323-333.

[101] Leiva C, Arenas C, Alonso-fariñas B, et al. Characteristics of fired bricks with co-combustion fly ashes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 5(4): 114-118.

[102] Pérez-Villarejo L, Eliche-Quesada D, Iglesias-Godino F J, et al. Recycling of ash from biomass incinerator in clay matrix to produce ceramic bricks[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95 (Suppl): S349-S354.

[103] Valle-Zermeño R D, Chimenos J M, Giró-Paloma J, et al. Use of weathered and fresh bottom ash mix layers as a subbase in road constructions: Environmental behavior enhancement by means of a retaining barrier[J]. *Chemosphere*, 2014, 117(1): 402-409.

[104] 王　楹. 生物质灰改性沥青的制备和基本性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2):309-313.
WANG Ying. Preparation and basic performance investigation of biomass-ash-modified-asphalt[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(2):309-313.

[105] Vassilev S V, Baxter D, Andersen L K, et al. An overview of the composition and application of biomass ash: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges[J]. *Fuel*, 2013, 105: 19-39.

[106] 马晓宇. 生物质基二氧化硅的提取及在聚酯中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
MA Xiao-yu. The extraction of silica in biomass and application in poly(ethylene terephthalate) [D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[107] Kamath S R, Proctor A. Silica gel from rice hull ash: Preparation and characterization[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(4): 484-487.

[108] 刘琼琼, 吴　宁, 徐冬梅, 等. 生物质灰在轮胎垫带胶中的应用[J]. 弹性体, 2011, 21(6): 48-50.
LIU Qiong-qiong, WU Ning, XU Dong-mei, et al. Application of biomass ash in tire flap compound[J]. *China Elastomerics*, 2011, 21(6): 48-50.

[109] 陈华堂, 刘琼琼, 徐冬梅, 等. PP/生物质灰复合材料的制备与力学性能研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(12): 32-34.
CHEN Hua-tang, LIU Qiong-qiong, XU Dong-mei, et al. Preparation and mechanical properties of PP/biomass ash composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2010, 38(12): 32-34.

[110] 刘琼琼, 胡　峰, 丛后罗, 等. 生物质灰填充丁苯橡胶的硫化特性与力学性能[J]. 橡塑技术与装备, 2011, 37(7): 30-32.
LIU Qiong-qiong, HU Feng, CONG Hou-luo, et al. Sulfurization characteristics and mechanical properties of biomass-ash filled SBR [J]. *China Rubber/Plastics Technology & Equipment*, 2011, 37(7): 30-32.

[111] 樊明宇, 员文杰, 李　君, 等. 稻壳灰制备$Si_3N_4$/SiC复合粉体的研究[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(7): 1445-1448.
FAN Ming-yu, YUAN Wen-jie, LI Jun, et al. Preparation of $Si_3N_4$/SiC composite powders using rice husk ash[J]. *Journal of Synthetic Cryststals*, 2013, 42(7): 1445-1448.

[112] Wang T, Geng J, Xin Z, et al. Development of noise reduction materials based on industry residue of power plant[C]. Guangzhou: International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology, 2015.

[113] Rui M N, Seabra M P, Labrincha J A. Porous geopolymer spheres as novel pH buffering materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 1114-1122.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/150558.html