

木质电磁屏蔽材料的研究现状及发展趋势

张琪¹ 宁莉萍^{1,2*} 王彩云¹ 王敏¹ 沈赢洲¹ 宁紫薇¹

(1.四川农业大学林学院,成都 611130;

2.四川农业大学木材工业与家具工程四川省高校重点实验室,成都 611130)

摘要 木质电磁屏蔽材料是以木质原料为基体,通过不同加工方式引入导电单元后制得的一种具有电磁屏蔽效能的复合材料,可用于屏蔽电磁辐射、防止电磁信号泄露和外界电磁干扰。全面阐述了木质屏蔽材料的种类、屏蔽效能的影响因素及作用机理,并在此基础上展望了未来木质屏蔽材料的发展趋势和方向。

关键词 木质屏蔽材料,电磁辐射,电磁信号泄露,电磁干扰

Research status and future trends of wood electromagnetic shielding material

Zhang Qi¹ Ning Liping^{1,2} Wang Caiyun¹ Wang Min¹ Shen Yingzhou¹ Ning Ziwei¹

(1.College of Forestry,Sichuan Agricultural University,Chengdu 611130;2.Key Laboratory of Wood Industry and Furniture Engineering,Sichuan Agricultural University,Chengdu 611130)

Abstract The wooden electromagnetic shielding material is a kind of composite material with electromagnetic shielding effectiveness,which is made of wood raw material as matrix and introduced into conducting units through different processing methods.It can be used to shield electromagnetic radiation,prevent electromagnetic signal leakage and external electromagnetic interference.The types of wood shielding materials,the influencing factors of shielding effectiveness and the mechanism of action were comprehensively expounded,and on this basis,the future trends and directions of wood shielding materials were prospected.

Key words wooden shielding material, electromagnetic radiation, electromagnetic signal leakage, electromagnetic interference

在科技迅猛发展的今天,电子设备在当代人类的生活中扮演着不可或缺的角色,在给人们的生活带来了巨大便利的同时,其电磁辐射带来的危害也日益突显。研究表明,电磁辐射不仅会干扰电子设备的正常使用,还会危及通信设施的信息安全,此外,电磁辐射对人体健康也会产生很大的影响。因此,制备出绿色、高效型屏蔽材料成为当务之急。

木质材料具有易加工、可循环使用、可生物降解等特点,是制备绿色高效型屏蔽材料的理想基材。将木质原料作为基体,采用不同的加工方式使其与不同的导电单元复合制得木质电磁屏蔽材料,可通过吸收、反射和折射电磁波达到电磁屏蔽效果。木质屏蔽材料的研究与制备不仅可拓宽木质材料在电

磁屏蔽领域的应用,还可减少能耗污染,实现材料的持续供给,具有广阔的应用前景。

本文介绍了木质电磁屏蔽材料的研究现状,并展望了其未来发展趋势,旨在为木质屏蔽材料的应用与发展提供一定的理论依据。

1 木质屏蔽材料的研究现状

根据制备方法的不同,木质屏蔽材料可分为表面导电型、填充导电型、高温炭化型 3 个类别。

1.1 表面导电型

1.1.1 贴金属箔类

贴金属箔,即利用胶粘剂在木质材料表面粘附一层金属箔,再经层压成型的一种方法。该方法工艺简便,但不易加工复杂外形工件。决定金属箔木

基金项目:2017 年度四川省学术和技术带头人培养支持项目(CN2017D04)

作者简介:张琪(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为功能性木质复合材料。

联系人:宁莉萍,教授,主要研究方向为木塑复合材料与木材功能改良。

质屏蔽材料屏蔽效能(SE)的因素主要是木质材料的种类、含水率以及金属箔的种类和厚度等。不同种类的金属箔屏蔽性不同,同一种金属箔也会因为厚度的不同而差异显著,一般来说,金属箔越厚,材料屏蔽性越好。

在金属箔木质屏蔽材料的应用中,存在着金属箔在服役期间易脱落的问题,故其制备技术的关键在于提高金属箔与基体木材的结合强度。通常采用的方法是对胶粘剂进行改性,因此制备出一种胶粘强度好且绿色无污染的胶粘剂是发展金属箔木质屏蔽材料的重要议题。近年来,利用木质材料的液化产物制备胶粘剂成为研究热点,有报道指出^[1-2],以该方法制得的胶粘剂不仅拥有与石化类胶粘剂同等的胶粘强度,且具有更优的耐水性及环境协调性,因此该类胶粘剂对金属箔木质屏蔽材料的发展具有重要意义。

1.1.2 表层镀金属类

表层镀金属,即通过在基材表面形成一层金属镀层,从而使基材导电,其制备方法包括化学镀、电镀、真空镀金、溅射镀金等。其中化学镀由于具有镀层均匀且成分易于控制,工艺设备简单,不受零件形状尺寸限制,成本较低,无外加电流,节能环保等特点^[3]应用最为广泛。

相关研究指出^[4-6],化学镀后材料的电阻率随基材含水率和密度的增加而降低。对于木板和单板,基材的纤维方向也是影响其电阻率的因素之一,一般顺木纤维方向电阻率<横木纤维方向,径向纤维方向<弦向纤维方向。不同金属的导电特性不同,故镀层金属的成分和含量对成材导电性影响较大,而决定镀层金属成分和含量的因素主要是主盐浓度、施镀时间及温度等。此外,镀后材料的导电性是通过镀层金属间的电子跃迁实现的,因此致密、连续的金属镀层对制备高效型化学镀木质屏蔽材料十分重要。

化学镀虽具有很多优点,但在实际应用中还存在着镀层易脱落、腐蚀等问题,故如何提高镀层与木材的结合力和耐蚀性是影响化学镀木质屏蔽材料发展的关键所在。

为了改善镀层的耐蚀性,提高其综合性能,很多学者将纳米颗粒引入化学镀,制备出金属-纳米粒子复合镀层。如石常洪^[7]以桦木为施镀基材,在镀液中分别加入纳米粒子 Al_2O_3 、 SiO_2 、 SiC ,制备出 3 种疏水性、耐蚀性优异的 Ni-P-纳米粒子复合镀层,研究表明 3 种化学镀单板 SE 均不低于 50dB(9kHz~

1.0GHz)。

为了避免金属镀层直接与外界接触,缓解表面镀层易脱落、腐蚀的问题,有学者对微尺寸木料进行化学镀,再将镀后木料作为填料来制备木质屏蔽材料。在相关研究中^[8-10],学者们成功地在木材刨花、纤维、纸浆纤维、纤维素微纳米纤丝上进行了化学镀,通过对镀后木料的进一步加工可制得兼具屏蔽性和防腐抗菌性的木质复合材料。这种方法在综合化学镀应用优势的同时可缓解镀层金属易脱落、腐蚀的问题,是表面金属化加工与填料填充优势互补的良好诠释,显示出良好的应用前景。

1.1.3 涂覆导电涂料类

导电涂料是一种可导电的流体材料,方便喷涂或刷涂于木质基材表面,形成导电涂层,具有价格低廉、使用方便的特点。

Lin^[11]研制出一种含有偶联剂和导电纳米材料的水性导电乳液,将其涂覆在经活化处理后的中密度纤维板(MDF)和低密度纤维板(LDF)上,可得到一层均匀、致密的导电薄膜,研究发现导电乳液的涂覆显著提高了 MDF 和 LDF 的导电性。Guo 等^[12]通过光子固化技术对铜纳米线(CuNWs)进行熔融焊接,在木材表面形成一层稳定、透明的 CuNWs 导电涂层。研究结果表明,基于木材主体及其表面的结构组织,经 CuNWs 涂覆后的木材可实现各向异性导电。

1.2 填充导电型

填充导电型屏蔽材料是将导电粒子作为填料,与基体高分子共混制得的一类复合材料。较之表面导电型屏蔽材料,填充导电型工艺简便,且无需考虑导电层易脱落的问题,自面世以来,大有后来居上之势。

导电物质填充木质材料,两者间往往存在着最佳配比关系。此外,填料的种类、分布、形状、尺寸及制备工艺等也都是影响材料导电性的关键因素。目前,用于制备木质屏蔽材料的导电填料主要有金属系、碳系、导电高分子以及三者的二元或三元混合体等。

1.2.1 填充金属系填料

金属系填料主要包括金属网、纤维、粉末、纳米颗粒和金属氧化物等。其中金属网在木质屏蔽材料中的应用方式主要有两种,一种是贴覆于基材表面,另一种则是填充在木质材料内部。金属网做填充材料时,其种类、层数和目数是影响材料 SE 的主要因素。Su 等^[13]将不同目数、层数的不锈钢网与木纤

维复合制得电磁屏蔽纤维板。研究发现,金属网层数越多,材料 SE 越大;但相同频率下,并不是金属网目数越大,材料 SE 越大。这是因为屏蔽材料的 SE 由涡流损耗和反射损耗两部分组成,金属网目数增加虽有利于增加材料的涡流损耗,但同时因金属丝径减少,金属网电阻率增大,使得材料的反射损耗减小,因此推断金属网目数对材料 SE 的影响存在着一个临界值^[14]。

填充金属纤维时,其种类、添加量及长度对材料 SE 影响最为显著。侯俊峰等^[15]将不锈钢纤维铺设于涂有胶粘剂的装饰板表层纸上,经热压制成导电膜片,再将其与落叶松单板层压成型得到电磁屏蔽胶合板。研究发现,胶合板 SE 随着金属纤维填充量和长度的增大而增大,这是因为金属纤维含量越高,长度越长,相互之间搭接形成导电网络的可能性也就越大。但值得注意的是,纤维添加量存在着一个“阈值”,超过这个阈值后金属纤维施加量对材料 SE 的影响不再明显。另外,若金属纤维过长,在混料过程中易产生缠聚,使得混料不均,进而会影响到成材的性能,因此在实践中需以材料的综合性能为指导来选择最佳参数。

填充金属粉末时,其粒径、添加量和种类是影响材料 SE 的主要因素。较之金属纤维,金属粉末的长径比大大减小,故在填充量相等时,粉末材料的屏蔽性低于纤维材料。曾文杰等^[16]研究了金属粉末(Fe、Cr、Ni、W)的添加对棉花秸秆炭/高密度聚乙烯(HDPE)复合材料 SE 的影响。研究发现,金属粉末的添加可显著提高复合材料的 SE,其中添加 Fe 时复合材料的 SE 最佳。该报道还认为,填充金属粉末时,选用密度小、磁性大的金属,复合材料的吸波性能更优。

对于纳米金属填料,国内外学者都做了相关的研究, Park 等^[17]将辐射松、红橡木、白橡木等浸渍于 Bi-Sn 合金中,得到具有优异导电、导热性的纳米合金-木材复合材料。徐高祥等^[18]将成熟泡桐浸入含 $\text{Cu}(\text{Ac})_2$ 的溶液中,在泡桐内部使 $\text{Cu}(\text{Ac})_2$ 原位还原成纳米铜颗粒,得到的金属铜木质材料导电率可达 $27.78 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ 。

在金属氧化物类木质屏蔽材料的研究中,应用最为广泛的是具有优异导磁性的铁氧体材料。Wang 等^[19]将片状 MnFe_2O_4 通过氢氧键结合的方法沉积在木材表面,得到了在较宽频带中具有良好的屏蔽性的 MnFe_2O_4 /木材复合材料。Gan 等^[20]利用水热法在木板上沉积 CoFe_2O_4 纳米粒子制备

CoFe_2O_4 /木材复合材料。研究发现,复合材料的饱和磁化强度随着保温时间的增加而迅速增加。

1.2.2 填充碳系填料

碳系填料主要包括石墨、碳纤维(CF)、石墨烯和碳纳米管。Song 等^[21]将石墨添加到 HDPE/竹粉复合材料中,发现石墨的添加提高了复合材料的导电性,且当石墨含量为 40%(wt,质量分数,下同)时复合材料 SE 值可达 20dB(30M~3000MHz)。Karteri 等^[22]将石墨烯纳米片(GNP)添加到木质聚氯乙烯材料(WP)中制备复合材料(WP/GNP),结果表明,当 GNP 含量为 9%时复合材料 SE 值可达 26dB。Zhu 等^[23]以 CF 作为增强材料,将其与木纤维混合制备导电复合材料(CFR-WCs),发现当 CF 含量从 55%增加到 75%时,CFR-WCs 的介电常数和电容逐渐增大。

1.2.3 填充导电高分子

导电高分子的填充主要是通过苯胺、吡咯、噻吩等高聚物单体在木质基材内部的原位聚合实现^[24-26]。王立娟等^[27]以 FeCl_3 为氧化剂和掺杂剂,通过化学氧化原位吸附聚合法制备了聚吡咯/木单板复合材料(PPy-Wood)。研究发现,PPy-Wood 具有良好的导电性,在最佳制备条件下,复合材料表面电阻率可达 $15.53 \Omega/\text{cm}^2$ 。填充导电高分子时,其含量和形态是影响材料屏蔽性的关键因素。Babayan 等^[28]以木屑为基体,将不同形态(球状和纳米状)的 PPy 沉积在锯末上制得导电材料,发现当 PPy 含量低于 18%时,较之木屑/纳米管状 PPy,木屑/球状 PPy 具有更高的电导率。

1.3 高温炭化型

木质材料经高温炭化后得到的固体炭化物具有质轻、价低、导电等特性,可用于制备屏蔽材料,其炭化工艺如炭化温度、速率、保温时间等对炭化材料 SE 影响显著^[29]。在炭化物的相关研究中,较常见的是将炭化材料与塑料、金属等复合以制备功能材料。如 Belaid 等^[30]将竹炭(BC)添加到乙烯-醋酸乙烯树脂(EVA)中,发现 BC 粒径大小和添加量对复合材料导电性影响显著,当 BC 含量为 35%时达到材料的电渗滤阈值。Lv 等^[31]制备了导电纳米 BC(NBC)/超高分子量聚乙烯复合材料,研究发现,当 NBC 添加量为 7%时复合材料电导率可达 $1.1 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 。在 BC 中引入金属可显著提高竹炭的导电、导热性,如 Hwang 等^[32]将不锈钢丝和 BC 粗纱混合制得导电纱线,再将导电纱线编织成织物,发现织物 SE 随不锈钢含量、层压和层数的增加而

增加。Chiang 等^[33]通过多元醇工艺将铜颗粒(Cu)沉积在 BC 上,得到 Cu/BC 复合材料,研究发现,当 Cu 含量为 12% 时,复合材料的热导率为 0.3602 W/mK。

2 未来发展趋势和方向

在电子工业日新月异的时代,木质屏蔽材料作为一种电磁辐射的防护材料具有广阔的应用前景。但当前该材料还存在着一些技术难点,例如对于表面屏蔽型,需进一步改善其导电层易脱落、腐蚀的问题;对于填充屏蔽型,虽然在一定程度上克服了表面型导电层易脱落、腐蚀的问题,但其界面相容性差是影响综合性能的关键问题。因此,未来可从分子、原子角度出发,着重提高各相单元在微纳米尺寸上的结合。另外,炭化材料虽质轻,无需引入外来导电物质,无需考虑导电层易脱落、腐蚀和多相材料中的界面相容性问题,但其屏蔽效果有限,另外高温处理不仅有一个耗能过程且对材料的力学性能影响显著。故总体上看,炭化材料未来在电磁屏蔽领域的发展空间较有限。基于上述问题,笔者认为未来木质屏蔽材料的研究应从以下方面着手:

2.1 无污染、质量轻、低成本

当前木质屏蔽材料还存在着工艺较复杂、成本偏高、密度较大等问题,这些问题限制了其应用推广和工业化生产。因此,优化屏蔽材料的加工工艺,构建新型高效导电网络,降低制材成本,使材料兼具屏蔽性及环境友好、轻量化等特性尤为重要。

2.2 木质材料液化产物及离子液体的引入

离子液体^[34]是一种由离子组成,在室温下呈液态的盐类,具有无污染、导电导热性优异、热稳定及化学稳定性好,可改善填料分散性等优点。因此,一方面,可将离子液体作为分散剂添加到木质屏蔽材料中,在改善填料分布不均的同时还可进一步提高材料的导电性。另一方面,可将离子液体作为传统导电填料的替代品,不仅解决了当前表面导电层易脱落、腐蚀,填充材料界面相容性差,填料易沉积、团聚等问题,而且可实现屏蔽材料的结构可控性,形成均匀的导电网络,从而得到绿色、高效型屏蔽材料。

木质材料经液化处理后得到的产物,是一种绿色无污染的液态材料,进一步加工后可用于制备植物型发泡材料^[35-36]。木质材料液化产物的发泡工艺可实现材料的轻质性,将其运用到木质屏蔽材料中,可制备出轻量化屏蔽材料。此外,还可将离子液体作为导电填料引入植物型发泡材料的制备中,这样

不仅可弥补传统屏蔽材料的应用短板,还可综合木质液化产物和离子液体的应用优势,为制备绿色、高效、轻质型屏蔽材料提供一种新的研究思路。

2.3 多功能化

随着科技水平的快速发展和应用需求的多元化,功能多样性已成为新材料发展的重要趋势。因此,未来的木质屏蔽材料应成为既能屏蔽电磁波,又具有防水、阻燃、防腐防虫、高强度、抗静电、自清洁、可吸附转化有害气体、可记忆和屏蔽效能智能可控等特性的多功能材料。

3 结语

随着电子信息技术的飞速发展,电磁辐射的防护问题逐渐得到了世界各国的广泛关注。作为一种绿色防护材料,木质屏蔽材料不仅可有效克服木材在加工使用中易腐、易燃等天然缺陷,还可赋予其新的电磁屏蔽性,进一步实现对可再生资源的高值化利用,具有重要的社会和经济效益。目前,该材料主要用于制备具屏蔽性能的结构工程材料,运用于安全机构、应试考场、戏剧院等有特殊需求的场所。当前国内外对木质屏蔽材料的研究还处于初级阶段,针对其在制备和使用过程中存在的问题,还需在未来的研究中进一步的解决。

参考文献

- [1] Kobayashi M. Application of liquefied wood resin adhesives to wood composite panels[J]. Journal of The Adhesion Society of Japan, 2012, 48(11): 403-412.
- [2] Čuk N, Kunaver M, Poljanšek I, et al. Properties of liquefied wood modified melamine-formaldehyde (MF) resin adhesive and its application for bonding particleboards[J]. Journal of Adhesion Science & Technology, 2015, 29(15): 1553-1562.
- [3] Wei X. Tin Sensitization for electroless plating[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 161(5): 235-242.
- [4] Koo J K, Lee J H. Effects of complexing reagent on electroless nickel iron alloy plating for the diffusion barrier of UBM[J]. Forest Ecology & Management, 2017, 348(2): 31-45.
- [5] Lee J, Jung B M, Sang B L, et al. FeCoNi coated glass fibers in composite sheets for electromagnetic absorption and shielding behaviors[J]. Applied Surface Science, 2016, 415: 99-103.
- [6] Guo T, Wang Y, Huang J. Studies of electroless copper plating on poplar veneer[J]. Bioresources, 2016, 11(3): 6920-6931.
- [7] 石常洪. 木材表面化学镀镍-磷-纳米粒子复合镀层的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [8] 许士玉, 赵云强, 王立娟. 载银木纤维的制备与抗菌防霉腐性能研究[J]. 化工中间体, 2015, 6: 129-130.

- [9] Ueno T, Takemura S, Shimada M, et al. Conductive pulp fiber sheet-prepared waste newspaper pulp fibers treated by electroless nickel plating and its electric field shielding effect[J]. *Journal of Material Cycles & Waste Management*, 2015, 17(3): 490-495.
- [10] Sittisart P, Hyland M M, Hodgson M A, et al. Preparation and characterization of electroless nickel-coated cellulose fibres[J]. *Wood Science & Technology*, 2014, 48(4): 841-853.
- [11] Lin C T. Activated conductive layer for powder coating on wood[J]. *Jct Coatingtech*, 2008, 5(3): 48-55.
- [12] Guo H, Büchel M, Li X, et al. Dictating anisotropic electric conductivity of a transparent copper nanowire coating by the surface structure of wood[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2018, 15(142): 20170864.
- [13] Su C W, Yuan Q P, Gan W X, et al. The research on wood fiber/stainless steel net electromagnetic shielding composite board[J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 525-526: 437-440.
- [14] 杨玉山, 董发勤, 郑凯. 膨胀石墨/金属网/ABS 复合材料电磁屏蔽性能的研究[J]. *功能材料*, 2013, 44(7): 966-969.
- [15] 侯俊峰, 俞友明, 卢克阳, 等. 不锈钢纤维填充导电膜片的性能研究[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(9): 78-84.
- [16] 曾文杰, 肖刚, 郑光华, 等. 金属粉末的添加对生物质炭电磁屏蔽材料特性的影响[J]. *能源工程*, 2016(1): 24-29.
- [17] Park K S, Lee H H, Kang S G. Physico-mechanical properties and optimum manufacturing conditions of Bi-Sn metal alloy impregnated wood composites[J]. *Journal of the Korean Wood Science & Technology*, 2014, 42(6): 691-699.
- [18] 徐高祥, 姚晓林, 刘盛全. 低温水热法制备金属 Cu/木材复合材料及其性能研究[J]. *化工新型材料*, 2014, 42(1): 124-126.
- [19] Wang H, Yao Q, Wang C, et al. A simple, one-step hydrothermal approach to durable and robust superparamagnetic, superhydrophobic and electromagnetic wave-absorbing wood[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-10.
- [20] Gan W, Liu Y, Gao L, et al. Growth of CoFe_2O_4 particles on wood template using controlled hydrothermal method at low temperature[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(10): 14876-14885.
- [21] Song J, Yang W, Fu F, et al. The effect of graphite on the water uptake, mechanical properties, morphology, and EMI shielding effectiveness of HDPE/bamboo flour composites[J]. *Bioresources*, 2014, 9(3): 345-352.
- [22] Karteri I, Altun M, Gunes M. Electromagnetic interference shielding performance and electromagnetic properties of wood-plastic nanocomposite with graphene nanoplatelets[J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2017, 28(9): 6704-6711.
- [23] Zhu X, Sun L. Multiscale analysis on electrical properties of carbon fiber-reinforced wood composites[J]. *Bioresources*, 2015, 10(2): 2392-2405.
- [24] He W, Li J, Tian J, et al. Characteristics and properties of wood/polyaniline electromagnetic shielding composites synthesized via in situ polymerization[J]. *Polymer Composites*, 2016: 1-7.
- [25] Hassel B I, Trey S M, Leijonmarck S, et al. A study on the morphology, mechanical, and electrical performance of polyaniline-modified wood-A semiconducting composite material[J]. *Bioresources*, 2014, 9(3): 5007-5023.
- [26] Lv S, Fu F, Wang S, et al. Novel wood-based all-solid-state flexible supercapacitors fabricated with a natural porous wood slice and polypyrrole[J]. *Rsc Advances*, 2014, 5(4): 2813-2818.
- [27] 王立娟, 李坚, 谷静. 聚吡咯/单板导电复合材料的制备与表征[J]. *功能材料*, 2007(A08): 3067-3070.
- [28] Babayan V, Kazantseva N E, Robert Moučka, et al. Electromagnetic shielding of polypyrrole-sawdust composites: polypyrrole globules and nanotubes[J]. *Cellulose*, 2017, 24(8): 3445-3451.
- [29] Wu R B, Xiao G, Chen D, et al. Characteristics of electrically conductive charcoal prepared by high temperature carbonization of lignin[J]. *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2014, 48(10): 1752-1757.
- [30] Belaïd S, Boiteux G, Cassagnau P. Rheological and electrical properties of EVA copolymer filled with bamboo charcoal[J]. *Rheologica Acta*, 2013, 52(1): 75-84.
- [31] Lv S, Fu F, Wang S, et al. Novel wood-based all-solid-state flexible supercapacitors fabricated with a natural porous wood slice and polypyrrole[J]. *The Royal Society of Chemistry*, 2014, 5(4): 2813-2818.
- [32] Hwang P W, Chen A P, Lou C W, et al. Electromagnetic shielding effectiveness and functions of stainless steel/bamboo charcoal conductive fabrics[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2013, 44(3): 477-494.
- [33] Chiang T H, Min H T, Syu J Y. Polyol process synthesis of copper particles onto bamboo charcoal and the composite's thermal conductivity characteristics[J]. *Journal of Inorganic & Organometallic Polymers & Materials*, 2013, 23(3): 712-718.
- [34] Aparicio S, Atilhan M, Karadas F. Thermophysical properties of pure ionic liquids: review of present situation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 49(20): 9580-9595.
- [35] Jindal M K, Jha M K. Hydrothermal liquefaction of wood: a critical review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2016, 32(4).
- [36] Zhang J P, Du M H, Hu L S. Bamboo liquefaction with polyhydric alcohols and its application in flexible polyurethane foam[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 524-527: 2113-2117.