聚氨酯阻燃的研究进展

杨伟平 戴震 许戈文
安徽大学化学化工学院，安徽省绿色高分子材料重点实验室，合肥230039

摘要：聚氨酯作为一种性能稳定的材料，广泛应用于社会生产生活的各个领域。如改进聚氨酯的阻燃性能，则能进一步扩大应用范围。本文先介绍聚氨酯阻燃机理，综述了近几年来的研究进展，并对聚氨酯阻燃方面的发展提出了展望。

关键词：聚氨酯；阻燃；发泡材料；涂料；胶黏剂

引言

聚氨酯中含有重复的氨基甲酸酯链段，大分子主链是由玻璃化温度低于室温的柔性链段和玻璃化温度高于室温的刚性链段嵌段而成的，作为一类性能较为全面的材料，它具有良好的物理力学性能、优异的耐候性、弹性及软硬段随温度变化不太大等优点，可制成泡沫塑料、橡胶、涂料、粘合剂、纤维、合成皮革防水材料等一系列产品。

同时，聚氨酯作为一种有机高分子材料，在空气中是可燃的，其极限氧指数(LOI)仅为18左右[1]，所以，它具有一定的火灾隐患，在一些应用方面要求进行阻燃改性。本文首先简单阐述聚氨酯的阻燃机理，再从发泡材料、涂料、胶黏剂等几个方面介绍近几年来的研究进展，最后对其发展提出展望和设想。

1、聚氨酯阻燃机理

阻燃实际上是指达到某种规范或某种试验方法下的一个具体标准，提高阻燃性的途径主要有两点。一是添加含氯、溴、磷等元素的化合物，另外就是在多元醇或异氰酸酯键上引入氯、溴、磷、锑等原子，得到结构型阻燃材料。按照上面的方法经过改性的阻燃聚氨酯，我们也把它们分别称为共混复配型和反应型阻燃聚氨酯[2—3]。

在共混复配中，添加的阻燃剂主要分无机和有机两类[2, 4-7]：无机阻燃剂的阻燃机理主要以降低燃烧所产生的热量来达到阻燃的目的。氢氧化物、氧化锑、红磷等是常用的阻燃剂。它们在材料燃烧时，根据阻燃元素的不同，发生相应的复杂变化，起到阻燃的效果。如加入含卤阻燃剂的材料在受热后会分解出卤素离子，与氢自由基结合成卤化氢气体，卤化氢气体可以进一步稀释可燃性气体，形成一层保护膜，使材料与氧气隔绝，从而使材料自熄。磷系阻燃剂的阻燃机理主要是凝聚相阻燃，在燃烧时，能使聚合物炭化形成含磷的炭化保护层，从而起到阻燃作用。氮系阻燃剂受热分解后，易放出氨气、氮气、水蒸气等不燃性气体，不燃性气体的生成和阻燃剂分解带走大部分热量，起到降低聚合物的表面温度和稀释空气中的氧气和高聚物受热分解产生可燃性气体的浓度的作用，并隔绝材料和氧气的接触，同时氮能捕捉高能自由基，抑制聚合物的继续燃烧。无机阻燃剂分解温度高，除了有阻燃效果外，还有抑制发烟和毒性的作用；而有机阻燃剂的阻燃机理也随组分不同而不同，在有机磷系阻燃剂当中，最重要的阻燃剂是磷酸酯类阻燃剂。有机磷系阻燃剂的另一个发展方向是膨胀型阻燃剂。它是应用磷-氮协同、不燃气体发泡、多元醇和酯脱水炭化形成阻燃碳化层等多种阻燃机理共同作用而起到阻燃效果的磷化物的阻燃机理是能消耗聚合物燃烧时的分解气体，促进不易燃烧的炭化物生成，阻止氧化反应的进行，从而抑制燃烧的进行。而含卤素阻燃剂主要在气相中发挥作用，抑制聚合物燃烧的基本反应，稀释可燃气体，属气相阻燃技术。

反应型的阻燃聚氨酯阻燃机理则是通过将一些阻燃元素或基团接入聚氨酯分子结构中，从而起到阻燃改性效果。其机理按接入的结构单元不同分为软段阻燃改性和硬段阻燃改性[3]：对于软段阻燃改性，由于软段分子量较大，阻燃化后的软段一般其阻燃元素含量较高，同时软段在整个聚氨酯原料中所占的比例也最大，因此用部分阻燃软段替代普通软段后，整个聚氨酯分子中便具有较多的阻燃成分，同时对胶膜的性能影响较小；而硬段阻燃改性主要是将反应型阻燃剂作为扩链剂或固化剂引入到聚氨酯分子结构中，即阻燃元素和基团直接以小分子的形式嵌段到聚氨酯结构中。

2、聚氨酯阻燃研究进展

随着社会的发展，聚氨酯阻燃材料更多的用于人

们生产和生活的各个领域和方面，根据聚氨酯阻燃材料的应用领域的不同，大致把其分为发泡材料，涂料，胶黏剂几个方面，下面就近几年这些方面的研究进展一一进行介绍。

2.1 聚氨酯阻燃发泡材料的研究进展

聚氨酯泡沫塑料具有优良的物理机械性能，如具有极佳的弹性、柔软性、伸长率、压缩强度，以及优良的化学稳定性和耐磨性，是聚氨酯合成材料的主要品种，总产量约占聚氨酯材料的60%[7]，它还有优良的加工性、绝热性、粘合性等性能，是一种性能优良的缓冲材料，被广泛应用于多个领域。但是同时因为其表观结构上具有多孔，且密度较低，使得它在空气中极易燃烧，且燃烧时产生大量的有毒气体和烟尘会严重威胁人体健康和环境。因此，对聚氨酯发泡材料的改性就显得尤为重要。聚氨酯发泡材料按其硬度分为软质和硬质两类，下面分别进行概述。

2.1.1聚氨酯软泡阻燃的研究进展

李秉海[8]等先以TDI、MDI和高回弹聚醚多元醇为主要原料，以水为发泡剂，再使用两种无卤阻燃剂——间苯二酚双（二苯基磷酸酯）齐聚物（RDP）和膨胀石墨来阻燃高回弹聚氨酯软泡，通过氧指数测试表明就单独使用而言，RDP阻燃高回弹聚氨酯软泡较有效，且与聚氨酯原料相容性较好，而石墨单独阻燃聚氨酯软泡的效果不佳，但与RDP复配后阻燃性有了较大提高。

高明[9]等合成了两种氨基树脂型膨胀阻燃剂，含羟甲基化磷酸脒基脲树脂（MDFP）和另一种新型高分子膨胀阻燃剂(IFR)，并采用一步法发泡工艺，将其应用于软质聚氨酯泡沫塑料。通过锥形量热表明，添加MDFP和IFR的聚氨酯软质泡沫塑料燃烧过程热释放、烟气、CO和CO_2排放大大降低，材料更难点燃，当添加量达到30%，可使材料氧指数达27左右，从而达到难燃物的标准。另外，阻燃软质泡沫塑料的热解活化能降低了约50KJ/mol，起到了较好的阻燃效果。

黄福林[10]等以羟基苯氧膦丙烯酸(CEPP)和三聚氰胺(MA)为原料合成了一种含磷、氮无卤阻燃剂(CMA)，并将其应用于软质聚氨酯泡沫塑料的阻燃。SEM测试表明阻燃剂被包裹在树脂基体中，证明了CMA在发泡过程中与原料具有较好的相容性。通过LOI和垂直燃烧(Cal. 117A)测试表明，CMA可以有效提高软质聚氨酯泡沫塑料的阻燃性，当CMA添加量为10%时，其LOI值从17.3提高到23.0，随阻燃剂添加量的增加，软质聚氨酯泡沫塑料的阻燃性逐渐提高。

张田林[11]等将纳米氢氧化镁浸润甲基膦酸二甲酯(DMMP)作为填料，共混入由含溴阻燃聚醚多元醇(HIROL)和甲苯二异氰酸酯(TDI)制得的阻燃聚氨酯预聚物中,制成高阻燃聚氨酯弹性体。SEM测试表明纳米氢氧化镁经浸润DMMP后，改善了其在PU原液中的分散性，另外12份纳米氢氧化镁和6份DMMP复合所制成的阻燃聚氨酯弹性体的，其LOI为43 ,拉伸强度提高75 %,烟雾密度降低77%。

董金路[12]等采用四溴醇合成了适合水发泡的阻燃聚醚多元醇，并通过可膨胀石墨与其它阻燃剂的复配使用，与聚氨酯树脂制得了阻燃聚氨酯泡沫塑料。研究表明，该阻燃聚醚多元醇与含有可膨胀石墨的复合阻燃剂复配使用可以起到协同作用，所得制品的氧指数可达33，压缩强度为280KPa左右，达到了国家建筑物阻燃B1级标准，且阻燃效果稳定。

2.1.2聚氨酯硬泡阻燃的研究进展

罗振扬[13]等采用全磷阻燃剂（DMMP、DEEP、V6）、卤代磷酸酯阻燃剂（TCEP、TCPP、TDCP）以及二者复配对硬质聚氨酯泡沫塑料进行阻燃改性，测试结果证明全磷阻燃剂的阻燃效果优于卤代磷酸酯类阻燃剂，而磷卤复配阻燃效果优于单一阻燃剂。另外硅烷匀泡剂A K8803可以提高硬质聚氨酯泡沫塑料的点燃时间以及降低硬质泡沫塑料燃烧释放热危害，硅烷匀泡剂L580在降低燃烧时的烟气量方面效果较优。

彭智[14]等采用多元醇、异氰酸酯、催化剂、发泡剂和阻燃剂等为原料，制备了全水发泡阻燃聚氨酯硬质泡沫塑料，测试结果表明，聚酯多元醇能够改善泡孔结构，但会降低压缩强度和尺寸稳定性；水发泡剂用量不宜过高；异氰酸酯指数在1.1～1.2时，泡沫的压缩强度、尺寸稳定性等较好；添加型阻燃剂三(2-氯异丙基)磷酸酯(TCPP)可赋予材料一定的阻燃性，但对泡体结构、压缩强度和尺寸稳定性有影响。

石磊[15]等制备出不同粒径的可膨胀石墨（EG），考察了不同粒径EG对硬质聚氨酯泡沫塑料微观形态和燃烧性能的影响，研究测试表明，EG与聚氨酯结构的相容性较差，作为阻燃剂，EG的粒子粒径越大，泡沫塑料的阻燃性越好，最高氧指数可达到39.5%。

K.Kulesza[16]等利用NaH_2PO_4/$NaHSO_4$阻燃体系对硬质聚氨酯泡沫塑料进行了改性研究。通过TG/DTA测试表明当NaH_2PO_4/$NaHSO_4$的质量比为5：3时，可以达到最好的阻燃效果，其原因是钠磷酸二氢盐和钠硫酸盐在燃烧时给予协同阻燃效应，在聚合物表明形成炭化层，从而起到保护的作用。

日本东洋橡胶工业公司[17]用水作发泡剂，研制出高阻燃型水发泡硬质聚氨酯泡沫塑料。该泡沫塑料是采用多元醇、多异氰酸酯、催化剂及阻燃剂(如氢氧化铝、三氧化锑、磷酸系阻燃剂等)，经加工制成。

其产品能达到JISA-1321阻燃二级标准，可用于节能住宅保温隔热材料、冷库等家电制品方面。据试验表明，其保温隔热特性要优于通用的玻璃棉。

2.2 聚氨酯阻燃涂料的研究进展

聚氨酯树脂分子结构具有硬链段和软链段组成的链段结构决定了其即坚硬又柔韧的独特性能，通过改变软硬链段的种类和组成比可以得到不同性能的聚氨酯产品，一般其具有良好的机械性能、较高的固体含量、各方面的性能都比较好，是目前很有发展前途的一类涂料品种。但是，这种涂料的阻燃性并不高，存在一定的安全隐患，所以，需要对其进行阻燃改性。目前，国内外对于聚氨酯阻燃涂料的改性研究较多，且大多是集中在水性部分。

殷锦捷[18]等以三聚氰胺、季戊四醇为阻燃剂，利用环氧树脂E-44改性，合成出水性聚氨酯阻燃涂料。通过燃烧测试表明，改性涂料涂膜的阻燃时间提高了近一倍，阻燃效果良好。热重分析表明，E-44环氧树脂改性和阻燃试样的热失重曲线明显高于环氧树脂E-44单独改性试样，终止温度越高，对阻燃越有利，两者ti-tf间的热失重率分别为55.6%和54.1%。阻燃时间可达10min以上，耐高温及阻燃性能明显提高。

王锦成[19]等合成了一种新型成炭剂，将其和聚磷酸铵（APP）复配所构成的膨胀阻燃体系，将其对聚氨酯涂料进行阻燃改性。实验证明，加入阻燃剂粒子后，聚氨酯体系的点燃时间缩短质量损失率下降了18.0%，热释放速率的平均值下降了59.19%，有效燃烧热的平均值下降了24.19%，比吸光面积的平均值下降了31.77%，CO释放量的平均值下降了35.71%，CO_2释放量的平均值下降了22.85%，加入阻燃剂的聚氨酯体系表现出明显的阻燃、抑烟和低毒。

许晓光[20]等以三聚氰胺/季戊四醇为协效阻燃剂，用丙烯酸（甲基丙烯酸甲酯、丙烯酸丁酯）改性水性聚氨酯预聚体，制备出一种改性阻燃水性聚氨酯涂料。测试结果表明，阻燃涂料的阻燃时间可达8min以上，有明显的炭层气泡，起到较好的隔热阻火效果。用TG分析得出热稳定性和阻燃性明显提升。加入阻燃剂三聚氰胺和季戊四醇可以明显提高涂料的阻燃性能，不会破坏涂料的耐水性能并且无毒无污染，工艺简单。

黄晓东[21]等研究了纳米SiO_2和发泡剂对聚氨酯防火涂料性能的影响。研究结果表明，当纳米颗粒SiO_2加入量为3%时，可以有效地使涂覆的胶合板燃烧失重和炭化体积明显降低，阻燃效果最佳。加入发泡剂可进一步提高涂料的阻燃效果和氧指数值。利用尿素-双氰胺按1/3的质量比复合发泡剂阻燃效果较好，涂覆的胶合板着火燃烧时间69s，达最高热释放率时间130s，热释放率峰53.45kw/m^2，氧指数值最高达55。

Funda Celebi[22]等通过将不同量的磷化物接入到聚氨酯主链中，采用三个步骤，分别使用甲醛、季戊四醇、苯基磷酰二氯和醋酸，生成含磷化合物（磷苯二羟基），将对磷苯二羟基接入聚氨酯主链中，NCO/OH=1.5，DMPA加入量为3.5%，合成了一种阻燃性水性聚氨酯涂料，实验测试表明，随着磷的含量增加，炭率也提高，阻燃率最高达到1.5%P，极限氧指数达到29。

Chih-Hao Shao[23]等通过三氯氧磷氮丙啶或苯基氯化取代反应，合成的水性聚氨酯固化剂（PDA和PHA），实验证明，这种固化体系具有较好的阻燃性，从TG可以看出，同样在350℃，纯PU残留量为41.6%，而PDA-PU和PHA-PU的残留量分别为58.0%和60.0%，从极限氧指数可以得出同样的结论，纯的PU极限氧指数为20，随着PHA和PDA的加入量增加，氧指数分别提升到26.5和25.2。

曾凡辉[24]等采用溴化环氧树脂对聚氨酯涂料进行阻燃改性。在采用协同阻燃助剂Sb_2O_3的同时，研究溴化环氧对聚氨酯涂料阻燃性能的影响。由于溴化环氧和三氧化二锑生成的卤氧化锑覆盖在燃烧物的表面，并没有跑到空气中，正好将丙烯酸聚氨酯的分解区间完全覆盖，所以表现出良好的阻燃效果。通过实验测试表明，在保证涂料性能的前提下，当溴化环氧树脂用量为10%，协同阻燃助剂Sb_2O_3的用量为3%时，可将聚氨酯涂料的极限氧指数(LOI)从18提高到30。

美国高性能喷涂聚氨酯、聚脲和环氧聚合物生产商Chemline[25]推出了一款新的阻燃聚氨酯涂料，适用于泡沫、发泡聚苯乙烯、中密度纤维板以及其他轻量型铸模建筑材料。Chemline称这种新产品可以显著提高生产效率，Chemthane7001 FR双组分聚氨酯喷涂可以直接作用于轻质脆弱的基底，形成坚固的防火型外壳，并对化学品和潮气有显著的抵御能力。该种涂料的研发和生产过程严格遵照美国ASTM E284一级防火标准和英国关于低烟火势的相关规定,产品的抗冲击强度大于80，而拉伸强度更是高于1188MPa，另外其无需砂纸打磨便可拥有光滑的表面，在作用于基底后8～10s的时间内可以完全固化。

2.3 聚氨酯阻燃胶黏剂的研究进展

聚氨酯胶黏剂由于性能优越，在国民经济中得到广泛应用，是八大合成胶黏剂的重要品种之一。在胶黏剂中由于含有-NH基和-NCO基，提高了对各种材料的粘结性，并具有很高的反应性，能常温固化。胶膜坚韧，耐冲击，挠曲性好，剥离强度高，有很好的耐

超低温性，耐油和耐磨性等[26]，所以它可以作为汽车用胶黏剂，木材胶黏剂、服装织物整理剂、鞋用胶黏剂、复合包装胶黏剂、压敏胶、热熔胶等等。随着社会的发展，它已经逐步用于改性或替代环氧树脂等其它传统胶黏剂，同时，阻燃方面的改性研究也在不断展开。

姜仲苏[27]等以甲苯二异氰酸酯（TDI）和聚乙二醇（PEG2000）为主要原料，以N-甲基二乙醇胺(MDEA)制成阳离子水性聚氨酯乳液，再与阳离子磷系阻燃剂CJ-1和无机添加剂混配制成阻燃涂层胶。将其用于涤纶织物的阻燃整理，当上胶量达到160g/m^{2}时，织物可达较好的阻燃效果，燃烧时间＜5s，上胶量达200g/m^{2}时，织物无续燃、阴燃、熔滴。分析原因可能是无机纳米氧化硅的协同作用以及含磷阻燃剂在燃烧时分解成磷酸或多磷酸，并进一步生成含磷的酯类和含磷的炭层，从而起到较好的阻燃效果。另外烟密度与烟毒性也均达到法国NFF16-101-1988标准。

周向东[28]等以环氧氯丙烷、五氧化二磷和二乙烯三胺为原料，合成一种亲水阻燃剂，并以封端基水性聚氨酯为交联剂，使该阻燃剂在棉纤维上发生交联反应，使棉织物具有耐久阻燃性，不含游离甲醛。研究证明，整理剂工艺为：阻燃剂200～250g/L，交联剂50～60g/L，催化剂(氯化镁)20g/L，柔软剂30g/L，整理液pH值5～7，160～170℃焙烘2min。在此工艺下，织物无续燃、阴燃，损毁炭长较短。

殷锦捷[29]等通过聚氨酯增韧改性环氧树脂E-44，再以膨胀石墨（EG）/聚磷酸铵（APP）作为协同阻燃剂，制成一种建筑阻燃胶黏剂。由于受热膨胀后EG形成一个隔热、隔氧性能良好的膨胀炭层，而APP受热脱水后生成聚磷酸强脱水剂，促使有机物表面脱水，又因生成了磷的氧化物覆盖在基材表面，故起到阻燃作用。EG与APP协同作用形成了致密的炭层，能够阻隔燃烧过程所必须的热和氧气的传递，有效地减缓热氧化降解过程中可燃气体的产生与释放，实验证明氧指数达到了28%，产生较好的阻燃效果。

周安安[30]等用甲基三甲氧基硅烷(MS)作为前驱体，高聚合度聚磷酸铵(APPⅡ)为载体，采用溶胶-凝胶工艺，制备硅/磷协同阻燃剂。将这种阻燃剂与水性聚氨酯涂层剂复合，合成阻燃涂层胶，用于织物的阻燃整理。实验通过调节阻燃剂中的硅磷比，发现随着协同阻燃剂中的硅磷比提高，阻燃效果和静水压均有所增加，考虑成本，取1：2比较适宜，赋予织物高强度，且无“霜化”问题。

唐勇[31]等通过将聚乙烯醇（PVA）氧化，再与亚磷酸二乙酯合成了含磷聚乙烯醇（P-PVA），多亚甲基多苯基异氰酸酯(PAPI)作为固化剂，与P-PVA构成双组份水性聚氨酯，在平板硫化机70℃预热10 min左右，然后热压，热压参数为温度50℃，压力10MPa，时间20min。实验表明，作为木材的胶黏剂，当施胶量为15%时，刨花板的极限氧指数（LOI）为27.9，且延长了木材的低温脱水炭化阶段，提高了高温下的炭残量。

3、聚氨酯阻燃发展前景

阻燃聚氨酯是聚氨酯功能化的一个重要的方向。综上我们不难看出，目前对于聚氨酯阻燃的研究主要还是集中在外部添加阻燃剂与聚氨酯树脂复配的这种形式，对于反应型，即合成聚氨酯时，通过使用含阻燃元素的原料，将阻燃元素接入聚氨酯分子结构中的研究，在国内，这方面无论从理论还是实际应用上研究的相对较少。共混型在操作工艺上比较简单，但也存在相容性及产品稳定性较差等其它缺点。另外，国内更加关注于阻燃的改性效果，在阻燃的机理方面，研究的也相对较少。

在阻燃剂选择方面，大多数研究选择的为磷系和卤系，氮系、硅系阻燃剂的研究较少，磷系阻燃剂在聚氨酯树脂阻燃中的应用较为成熟，但存在着挥发性大，耐热性相对不高的缺陷，而卤系阻燃剂虽然阻燃效果好，但发烟量较大，且有着较为严重的破坏环境的隐患，所以，需要进一步加强氮系硅系等其它种类的阻燃剂的开发与应用，另外，复合的阻燃体系也在进一步研究中，力求达到多种阻燃剂的协同作用，今后，阻燃剂的发展趋势将是无毒、无卤、低烟、对环境冲击最小且具有最佳阻燃性能的新型阻燃剂体系。

在聚氨酯树脂方面，由于水性聚氨酯已经成为聚氨酯行业中的研究热点，因此，更需要加快其阻燃性的理论和应用研究。同时，由于水性聚氨酯强调环保，也必须要求在阻燃剂的选择上的低毒性。另外，对于合成反应型阻燃聚氨酯材料，开发多种新型的含阻燃元素的多元醇或其它可以作为扩链剂的合成原料也是研究阻燃聚氨酯的一个重要方向。PU

参考文献:

【1】 王锦成,陈月辉.新型聚氨酯防火涂料的阻燃机理[J].高分子材料科学与工程,2004,20(4):168-172

【2】 袁开军,江治,李疏芬,周允基.聚氨酯的阻燃性机理研究进展[J].高分子材料科学与工程,2006,22(5):1-4

【3】 陈鹤,罗运军,柴春鹏,葛震.阻燃水性聚氨酯研究进展[J].高分子材料科学与工程,2009,25(6):171-174

【4】 赵哲,张鹏,夏祖西,苏正良.阻燃聚氨酯软泡的研究进展[J].应用化工,2008, 37(5):565-567,572

【5】 王升文,秋银香.阻燃剂的研究现状和进展[J].工程技

术,2008,5(1):41-43
【6】 肖凯.部分无机阻燃剂概述[J].大众商务,2009(1):102
【7】 孟现燕,唐建华,叶玲,李忠明.聚氨酯泡沫塑料阻燃研究现状[J].化学工程与装备,2008(5):63-67
【8】 李秉海,欧育湘,房晓敏,辛菲,赵毅.高回弹聚氨酯软泡的无卤阻燃研究[J].化工进展,2007,26(6):857-860
【9】 高明,王涛,吴发超,李桂芬,杨荣杰.氨基树脂型膨胀阻燃剂处理软质聚氨酯泡沫塑料的阻燃性能[J].高分子材料科学与工程,2009,25(1):45-47
【10】 黄福林,赵乘寿,王德义,王玉忠.软质聚氨酯泡沫塑料用无卤阻燃剂的研究[J].化学研究与应用,2008,20(7):840-843
【11】 张田林,李再峰.纳米氢氧化镁补强阻燃聚氨酯弹性体[J].弹性体,2004,14(5):16-19
【12】 董金路,曹宏斌,张懿.可膨胀石墨阻燃水发泡聚氨酯泡沫塑料的制备[J].高分子材料科学与工程,2009,25(6):128-131
【13】 罗振扬,史以俊,何明,顾晓利.匀泡剂对阻燃硬质聚氨酯泡沫塑料燃烧性能的影响[J].中国塑料,2009,23(1):87-90
【14】 彭智,郑震,王新灵.全水发泡阻燃聚氨酯硬质泡沫塑料的制备与性能[J].聚氨酯工业,2009,24(1):14-17
【15】 石磊,田春蓉,周秋明,芦艾,杨鸣波,李忠明.不同粒径可膨胀石墨无卤阻燃高密度硬质聚氨酯泡沫塑料研究[J].中国塑料,2006,20(4):25-30
【16】 K.Kulesza1,K.Pielichowski,Z.Kowalski.Thermal characteristics of novel NaH2PO4/NaHSO4 flame retardant system for polyurethane foams[J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2006,86(2):475-478
【17】 高阻燃型水发泡硬质聚氨酯泡沫塑料[J].塑料科技,2009,37(9):37
【18】 殷锦捷,孙家琛.环氧树脂改性水性聚氨酯阻燃涂料的研究[J].电镀与涂饰,2009,28(5):51-53
【19】 王锦成,陈月辉,温绍国,王继虎.新型聚氨酯防火涂料的阻燃抑烟性能研究[J].化工新型材料,2007,35(8):10-12
【20】 许晓光,殷锦捷.丙烯酸酯改性水性聚氨酯阻燃涂料的研究[J].现代涂料与涂装,2009,12(6):11-13
【21】 黄晓东,林巧佳.纳米SiO2和发泡剂对聚氨酯防火涂料阻燃性能的影响[J].安全与环境学报,2007,7(3):94-97
【22】 Funda Çelebi,Leyla Aras,Güngör Gündüz,Idris M. Akhmedov.Synthesis and characterization of waterborne and phosphorus-containing flame retardant polyurethane coatings[J]. Journal of Coatings Technology,2003,75(944):65-71
【23】 Chih-Hao Shao,Ta-Zen Wang,Guan-Nan Chen,Kwei-Ju Chen,Jen-Taut Yeh, Kan-Nan Chen.Aqueous-based polyurethane with dual-functional curing agent[J]. Journal of Polymer Research,2000,7(1):41-49
【24】 曾凡辉,姜其斌,王燕玉,蒋华,陈宪宏.溴化环氧对聚氨酯涂料的阻燃改性研究[J].中国涂料,2008,23(1):29-31
【25】 张骥红.Chemline新型阻燃级聚氨酯涂料新品问世[J].聚氨酯工业,2009(24):42
【26】 阎利民,朱长春,宋文生.聚氨酯胶黏剂[J].化学与黏合,2009,31(5):53-56
【27】 姜仲苏,葛凤燕,蔡再生,曾履平,陈国伟,陈国敏.车用涤纶座椅面料阻燃整理[J].印染,2008(22):6-9
【28】 周向东,胡官斌,王伟,王发展.无甲醛阻燃剂的合成及对棉的耐久阻燃整理[J].印染,2007(6):8-10
【29】 殷锦捷,李宁,王欢.阻燃建筑结构胶粘剂的研制[J].材料科学与工程学报,2008,26(4):606-608
【30】 周安安,郑水燕,张立庆,姜华昌.硅氧烷包覆聚磷酸铵协同阻燃剂的制备及在涂层剂中的应用[J].印染助剂,2007,24(12):21-23
【31】 唐勇,张翔,杨冰,王德义.阻燃型无甲醛双组分水性聚氨酯木材胶黏剂的研究[J].林产化学与工业,2008,28(3):35-38

