复合材料学报 第31卷 第5期 10月 2014年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 31 No. 5 October 2014

文章编号：1000-3851(2014)05-1167-06

$Mg(OH)_2$ 对苯并噁嗪-环氧树脂复合材料阻燃性的影响

于 杨[1]，刘立柱[*1,2]，翁 凌[1]，崔巍巍[1]，朱兴松[1]
(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院，哈尔滨 150040；
2. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室，哈尔滨 150080)

摘 要： 以 $Mg(OH)_2$ 为无机阻燃剂，以苯并噁嗪(BZ)-环氧树脂(EP)为基体，通过热压成型制得 $Mg(OH)_2$-玻纤布/BZ-EP 层压板。通过垂直燃烧和极限氧指数测试层压板的阻燃性，分析了 $Mg(OH)_2$ 粉体的用量、粒径及不同粒径粉体复合添加对复合材料阻燃性的影响，通过 SEM 对 $Mg(OH)_2$ 粉体在浸渍胶中的分散结构进行表征。研究发现：$Mg(OH)_2$ 粉体的粒径和用量对板材阻燃性有一定影响，不同粒径的粉体混合添加可以在复合材料中形成阻燃网络，达到最佳的阻燃效果，同时可以减小无机粒子对板材力学和电学性能的影响。当阻燃剂 $Mg(OH)_2$ 用量为 BZ-EP 总质量的 30wt%，粒径为 2 μm 的粉体(YX-105)和粒径为 4 μm(YX-110)的粉体以质量比 1∶2 复合添加时，所制层压板的极限氧指数为 34%，垂直燃烧单个试样自熄时间最短为 7.52 s，5 个试样总自熄时间为 49.81 s，达到 UL-94V-0 级标准。复合材料的弯曲强度为 399.84 MPa，相对介电常数为 3.848。

关键词： 层压板；$Mg(OH)_2$；氧指数；垂直燃烧；阻燃网络
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Effects of $Mg(OH)_2$ on flame retardant of benzoxazine-epoxy composites

YU Yang[1], LIU Lizhu[*1,2], WENG Ling[1], CUI Weiwei[1], ZHU Xingsong[1]
(1. College of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: $Mg(OH)_2$-glass fiber fabric/benzoxazine (BZ)-epoxy (EP) laminate was prepared by thermo-compression formation using $Mg(OH)_2$ as the flame retardant, BZ-EP as the matrix. The flame retardant of the laminate was tested by the vertical flame and the limited oxygen index method. The effects of $Mg(OH)_2$ powder amount, particle size and compound addition of powder with different sizes on flame retardant of composites were analyzed. SEM was used to characterize the dispersion structure of $Mg(OH)_2$ powder in impregnation resin. The results indicate that the flame retardant of the laminates is influenced by the particle size and the amount of $Mg(OH)_2$ powder. The compound addition of powders with different particle sizes makes a flame-retardant net in composites, leading to the best flame retardant effect. And the negative impact of inorganic particle on the mechanical and electrical properties of the laminates is reduced. When the content of $Mg(OH)_2$ is 30wt% of total mass of BZ-EP and the mass ratio of $Mg(OH)_2$ powder with 2 μm (YX-105) and 4 μm (YX-110) is 1∶2, the limited oxygen index of the laminates is 34%. The shortest self-extinguishing time of single sample in vertical burning test is 7.52 s, and the total self-extinguishing time of the five samples is 49.81 s, which reaches the ranking of UL-94V-0. The ben-

收稿日期： 2013-08-26；**录用日期：** 2013-10-29；**网络出版时间：** 2014-01-09 10:58
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20140109.1058.004.html
基金项目： 广东省教育部产学结合项目(2009B090300463).
通讯作者： 刘立柱，博士，教授，博士生导师，研究方向为新型绝缘材料的合成及聚合物基复合材料的结构表征。
E-mail：mrliulizhu@163.com.

引用格式： *于 杨，刘立柱，翁 凌，等. $Mg(OH)_2$ 对苯并噁嗪-环氧树脂复合材料阻燃性的影响 [J]. 复合材料学报，2014，31(5)：1167-1172. Yu Yang, Liu Lizhu, Weng Ling, et al. Effects of $Mg(OH)_2$ on flame retardant of benzoxazine-epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1167-1172.*

ding strength and the relative dielectric constant of the composite is 399.84 MPa and 3.848, respectively.

Keywords: laminate; $Mg(OH)_2$; oxygen index; vertical burning; flame-retardant net

20 世纪 50 年代以来，聚合物材料由于其具有特殊的物理化学性能已被广泛应用于电力、交通、建筑和军工等领域。但是，绝大多数高聚物都是易燃品，聚合物的阻燃技术，除直接选用氧指数高和发热量小的聚合物材料外，目前常用的方法是添加阻燃剂。

Mauerer[1]通过磷酸三苯酯和 3-氨基苯酚的酯交换反应合成了 3-三氨基苯磷酸(TAPP)，并将其用于环氧树脂(EP)中，在满足阻燃要求的条件下提高了 EP 的玻璃化转变温度和加工性能。Gao 和 Yang[2]合成了一种新型大分子阻燃剂三聚氰胺-双氰胺-甲醛季戊四醇双磷酸盐，并将这种阻燃剂应用于 EP。研究表明，当阻燃剂含量为 25wt%时，EP 的阻燃性能达到 UL-94V-0 级，极限氧指数(LOI)值为 27.5%。任元林等[3]制备了含磷、氮和硫的新型阻燃剂 1,4-(O,O-二乙基硫代磷酰亚胺基)苯(DTBP)(DTBP)，对聚丙烯进行阻燃。研究表明，当阻燃剂添加量为 28%时，LOI 值可达到 37.8%。无卤无磷阻燃体系是目前研究的热点[4-5]。Frache 等[6]将自制的水镁石用于 EP 的阻燃，得到了分散性良好的阻燃 EP。徐建中等[7]用 $Mg(OH)_2$ 制备了阻燃 EP 的复合材料。结果表明，当 $Mg(OH)_2$ 的用量为 47.73%时，$Mg(OH)_2$/环氧树脂阻燃体系的 LOI 值达到27.5%。王鹤等[8]用锥形量热仪和极限氧指数法研究了不同含量 $Mg(OH)_2$ 对乙烯-醋酸乙烯酯橡胶(EVM)/腈橡胶(NBR)共混硫化胶阻燃性能的影响。结果表明，填充了 180wt% $Mg(OH)_2$ 的硫化胶火灾性能指数最高，综合阻燃效果最理想。杨丽等[9]对阻燃剂的阻燃机制进行了研究，研究结果表明，含卤素的阻燃剂在燃烧时会放出卤化氢气体，污染空气，对人体造成伤害；而含磷元素的阻燃剂，虽然避免了对环境的污染，但在燃烧时发烟量较大，并且对模具有一定的腐蚀作用。

$Mg(OH)_2$ 作为新型镁质无机阻燃剂，具有良好的阻燃和抑烟效果，热解生成的氧化产物与燃烧时树脂表面的炭化产物结合形成保护膜，同时产生的水蒸气稀释可燃性气体使之达不到可燃的浓度范围，从而阻止了聚合物的燃烧[10-11]。$Mg(OH)_2$ 阻燃剂具有安全无毒、性能稳定、颗粒细小均匀、与基体材料间的相容性较好及被填充的材料表面光洁明亮等优异性能[12-14]。

本文分析了 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂粒径和用量对苯并噁嗪(BZ)-EP 阻燃性的影响，并进一步研究了不同粒径粉体混合添加提高树脂阻燃性时，粉体颗粒在树脂中的分散状态和结构；通过对所制复合材料进行垂直燃烧测试、极限氧指数测试和浸渍胶固化物 SEM 表面断面扫描分析，最终确定 $Mg(OH)_2$ 的最佳用量以及粉体粒径混合最佳质量比，为其在阻燃型覆铜板基板材料中的应用做了基础研究。

1　实验材料及方法

1.1　主要原料

表 1 为实验所用原料，其中 YX-105、YX-110、YX-115 和 YX-125 为大连亚泰新材料公司生产的硬脂酸改性的 $Mg(OH)_2$ 粉体。

表 1　主要实验原料

Table 1　Main experimental materials

Material	Particle size/μm	Specific surface area
Benzoxazine		
Epoxy E51		
YX-105	≤2	23 500±500
YX-110	≤4	13 500±500
YX-115	≤6	10 000±500
YX-125	≤10	4 750±500
Glass cloth 7628		

1.2　实验过程

将 EP、BZ 和溶剂按一定配比在 70 ℃下熟化 3 h，加入 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂，高速分散 5 h，制得半无机浸渍胶液。用上述浸渍胶浸渍 7628 玻璃布制得半固化片，在温度为 160 ℃、压力为 10 MPa 的条件下压制 3 h，并在 120 ℃下后处理 2 h，制得层压板并进行测试。

为确定 $Mg(OH)_2$ 的最佳粒径，在阻燃剂质量分数为浸渍胶总质量 40%的条件下，选取不同粒径 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂(YX-105、YX-110、YX-115 和 YX-125)制备试样并对其阻燃性能进行测试。

为确定阻燃剂的最佳用量，以 YX-105 为阻燃剂，采用相同的分散方式，分别制备阻燃剂用量为浸渍胶液总量的 20wt%、25wt%、30wt%、35wt%和 40wt%的 5 组试样并对其阻燃性进行测试。

为提高复合材料的阻燃性，在30wt%的阻燃

表 2　3 种粒径的 $Mg(OH)_2$ 复合添加的质量分数

Table 2　Mass fractions of hybrid $Mg(OH)_2$ with three kinds of particle size

No.	Mass fraction of $Mg(OH)_2$/%		
	YX－105	YX－110	YX－115
1	30	0	0
2	20	10	0
3	20	0	10
4	10	10	10
5	0	15	15
6	15	15	0
7	10	20	0

剂用量下，选用 3 种粒径 $Mg(OH)_2$ 复合添加。表 2 为 3 种粒径的 $Mg(OH)_2$ 复合添加的质量分数。

1.3　测试表征方法

采用 FEI Sirion 200 型场发射扫描电子显微镜对复合材料表面和断面进行观察；采用美国 PE 公司的 Pyris 6 型热重分析仪，进行树脂固化物热稳定性能测试，测试条件为：氮气气氛，升温速率为 10 ℃/min；按照 GB/T 22472－2008[15]，使用 CZF－3 水平垂直燃烧测定仪测试材料燃烧性能；按标准 GB/T 8924－2005[16]，使用 HC－2 氧指数测定仪进行氧指数测试；按照 GB/T 4722－1992[17]，使用 AG－J10KN 型电子万能试验机进行弯曲强度测试；按照 GB/T 4722－1992[17]，使用 Qs－37 型高压电桥测定相对介电常数。

2　结果与讨论

2.1　$Mg(OH)_2$ 阻燃剂对层压板阻燃性的影响

图 1 为 $Mg(OH)_2$ 含量为 40wt%时，$Mg(OH)_2$ 粒径对 $Mg(OH)_2$－玻纤布/BZ－EP 层压板 LOI 值和自熄时间的影响。可知，随着 $Mg(OH)_2$ 粒径的增大，层压板的自熄时间逐渐增长，LOI 值逐渐减小。由于使用的是相同偶联剂改性的 $Mg(OH)_2$ 粉体，且粉体用量和制备工艺均相同，因此，造成阻燃性明显差异的原因是层压板单位体积内 $Mg(OH)_2$ 粉体颗粒的比表面积。由表 1 可知，YX－105比表面积最大，与浸渍胶液混合后，试样单位体积内的阻燃剂比表面积最大、阻燃效果最好。因为阻燃剂是以颗粒形式分布在树脂浸渍胶液中，当粉体的粒径较大时，试样单位体积内的阻燃剂比表面积减少，起到阻燃作用的粉体少。因此从阻燃性方面分析，阻燃剂应选择粒径最小的 YX－105。

图 2 为 $Mg(OH)_2$ 粒径为 2 μm 时，$Mg(OH)_2$

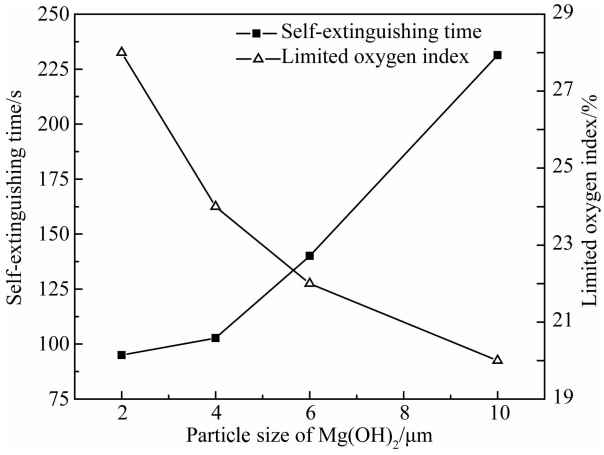


图 1　$Mg(OH)_2$ 含量为 40wt%时，$Mg(OH)_2$ 粒径对 $Mg(OH)_2$－玻纤布/苯并噁嗪(BZ)－环氧树脂(EP)层压板极限氧指数(LOI)和自熄时间的影响

Fig. 1　Effects of particle size of $Mg(OH)_2$ on limited oxygen index (LOI) and self-extinguishing time of $Mg(OH)_2$－glass cloth/benzoxazine (BZ)－epoxy (EP) laminate when the content of $Mg(OH)_2$ powder is 40wt%

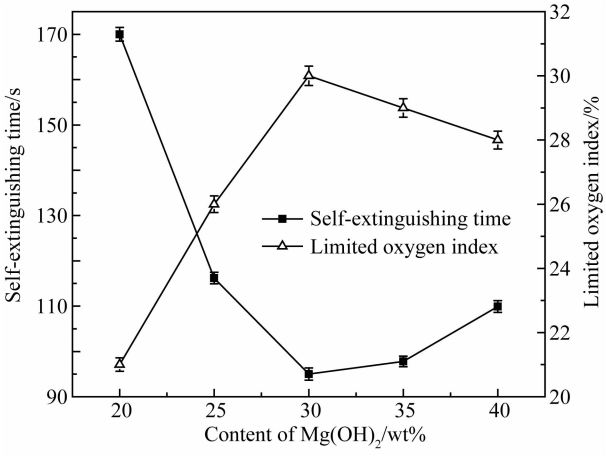
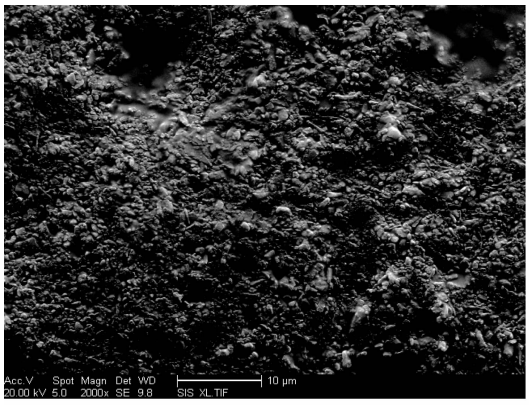


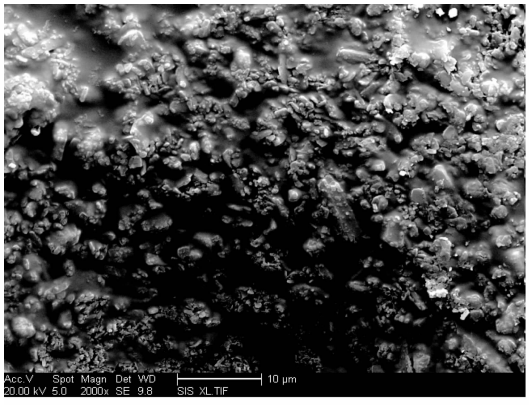
图 2　$Mg(OH)_2$ 粒径为 2 μm 时，$Mg(OH)_2$ 含量对 $Mg(OH)_2$－玻纤布/BZ－EP 层压板 LOI 和自熄时间的影响

Fig. 2　Effects of $Mg(OH)_2$ content on LOI and self-extinguishing time of $Mg(OH)_2$－glass cloth/BZ－EP laminate when the particle size of $Mg(OH)_2$ is 2 μm

含量对 $Mg(OH)_2$－玻纤布/BZ－EP 层压板 LOI 和自熄时间的影响。图 3 为 $Mg(OH)_2$ 粒径为2 μm、含量为 30wt%和 40wt%时，浸渍胶试样表面 SEM 照片。由图 2 可知，当 $Mg(OH)_2$ 用量为 30wt%时，层压板的自熄时间最短，LOI 值最大，板材阻燃性最好。当 $Mg(OH)_2$ 用量过小，板材中可以起到阻燃作用的 $Mg(OH)_2$ 比表面积小，达不到良好的阻燃效果；由于粉体采用相同的分散方式，当 $Mg(OH)_2$ 用量大于30wt%时，过多的粉体用量会



(a) $Mg(OH)_2$ 30wt%



(b) $Mg(OH)_2$ 40wt%

图 3　$Mg(OH)_2$ 粒径为 2 μm、含量为 30wt%和 40wt%时，浸渍胶试样表面 SEM 照片

Fig. 3　SEM images of adhesive specimen surface with 30wt% and 40wt% content of $Mg(OH)_2$ whose particle size is 2 μm

导致其不能在板材中形成连续致密的阻燃层，颗粒之间不连续，有团聚或其他缺陷出现，如图 3(b)所示，起到阻燃作用的 $Mg(OH)_2$ 表面积减小，从而导致其阻燃能力降低。当粉体用量为 30wt%时，$Mg(OH)_2$ 在浸渍胶液中分布较为致密，如图 3(a)所示，起到阻燃作用的阻燃剂面积达到最大值，因此其 LOI 值最大，自熄时间最短，阻燃性最好。

由以上分析可知，粉体最佳用量为浸渍胶总量的 30wt%，此时粉体在浸渍胶中易形成致密的阻燃结构，层压板阻燃性最好。

2.2　复合添加不同粒径 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂对层压板阻燃性的影响

图 4 为不同粒径 $Mg(OH)_2$ 复合添加对 $Mg(OH)_2$-玻纤布/BZ－EP 层压板 LOI 和自熄时间的影响。可知，与 No. 1 试样相比，No. 2、No. 4 和 No. 7 试样自熄时间明显减少，LOI 值明显增大；No. 5 和 No. 6 试样 LOI 值和自熄时间都有所减少，但变化不大；No. 3 试样 LOI 值最小，自熄时间最长，层压板阻燃性最差。

图 5 为复合添加不同粒径 $Mg(OH)_2$ 的浸渍胶试样断口 SEM 形貌。由图 5(a)可以看出，有部分小粒径颗粒析出；由图 5(b)可见，在胶液断面中没有粉体颗粒的析出，不同粒径的粉体相互填充；由图 5(c)和图 5(d)可见，大粒径粉体和小粒径粉体独立分散于体系中。由于粉体复合添加时为物理混合，复配后粉体颗粒的比表面积值与单一粉体相比却有一定提高，因此不能用单位体积内的粉体颗粒

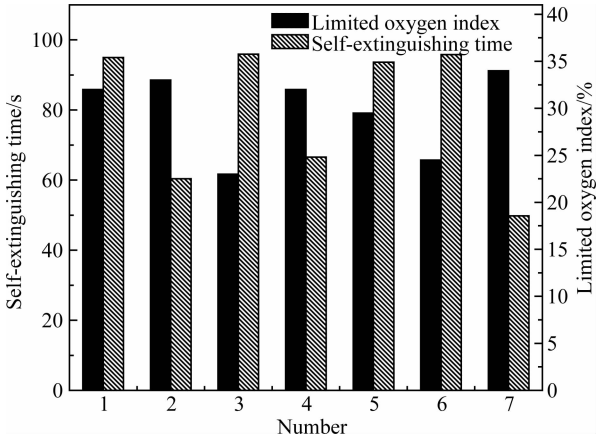
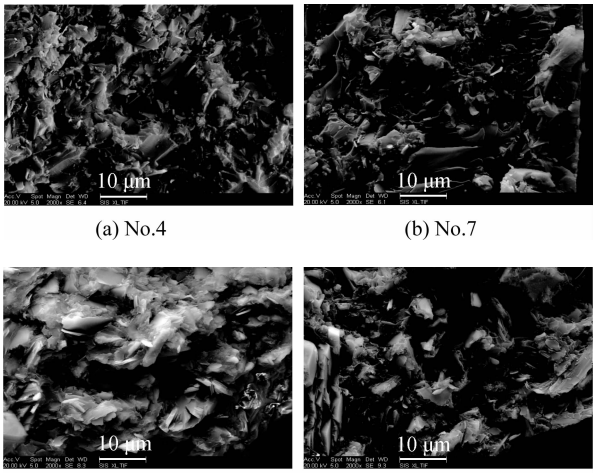


图 4　不同粒径 $Mg(OH)_2$ 复合添加对 $Mg(OH)_2$-玻纤布/BZ－EP 层压板 LOI 和自熄时间的影响

Fig. 4　Effects of compound addition of $Mg(OH)_2$ with different particle sizes on LOI and self-extinguisheing time of $Mg(OH)_2$－glass cloth/BZ－EP laminates



(a) No.4　(b) No.7

(c) No.5　(d) No.3

图 5　复合添加不同粒径 $Mg(OH)_2$ 的浸渍胶试样断口 SEM 形貌

Fig. 5　Cross-sectional SEM morphologies of adhesive specimen with compound addition of $Mg(OH)_2$ with different particle sizes

比表面积来解释复配试样的阻燃性规律。假设粉体颗粒在浸渍胶液中形成连续的枝叶网络状结构，体系中相当于由较大粒径粉体形成连续的阻燃粉体骨架，而较小粒径的粉体进行填充形成系统的阻燃网络，与单一粉体相比，粉体颗粒在固化时更易形成的网络状结构会比单独分散粉体粒子起到更好的阻燃效果。No. 4 和 No. 5 试样中，体系中粒径大的粉体较多，造成阻燃网络结构的填充物减少，产生网络缺陷；在 No. 3 试样中，小粒径粉体增加以及起到骨架作用的大颗粒粉体减少，也会造成阻燃网络结构的不连续和不致密；而在 No. 7 试样中，粉体颗粒之间联系紧密，易形成较为连续的阻燃网络。

按照比表面积值推测，No. 3 与 No. 7 试样相比，No. 3 试样中含有更多粒径小的 $Mg(OH)_2$ 颗粒，比表面积也更小，但阻燃效果却相反。图 6 为 No. 1、No. 3 和 No. 7 试样的热失重曲线。可以看出，在低温区域，3 个试样均有少量失重，此时在干燥预热阶段，样品中自由水分子的蒸发产生部分失重。在高温区域(300～500 ℃)，No. 7 试样的热稳定性最好，质量损失较少，No. 3 试样的热稳定性优于 No. 1，No. 1 试样的质量损失最多，热稳定性最差。因为不同粒径粉体的复配添加，与单一粉体相比，在复合材料受热时，粉体颗粒在浸渍胶液中形成的网络状结构具有更好的热稳定性。

目前关于 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂的阻燃机制[18-19]已有文献报道，但只有当阻燃剂添加量达到一定值时，才有较好的阻燃效果，但在达到较好阻燃效果的同时，会严重劣化层压板的力学性能和电学性能。表 3 为添加 No. 1 和 No. 2 $Mg(OH)_2$ 试样制备得到的的层压板的性能对比。

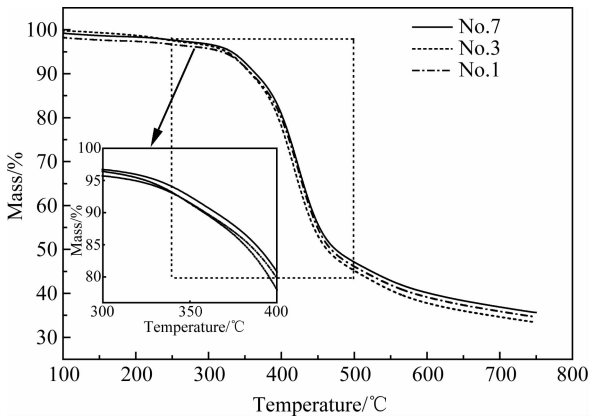


图 6　No. 1、No. 3 和 No. 7 试样的热失重曲线

Fig. 6　TGA curves of sample No. 1, No. 3 and No. 7

表 3　添加 No. 1 和 No. 2 $Mg(OH)_2$ 试样制备得到的层压板的性能对比

Table 3　Performance comparison of laminates prepared from No. 1, No. 2 $Mg(OH)_2$ sample

No.	Model of $Mg(OH)_2$	Bending strength/MPa	Dielectric constant
1	YX－105	385.783	5.830
2	YX－105＋YX－110	399.843	3.848

可知，复配添加 YX－105 和 YX－110 粉体的层压板具有更好的力学性能和介电性能。由于复配添加的粉体在复合材料中形成网络结构，所形成的有机-无机相更有利于消耗材料受力时的部分能量，也能有效地限制带电粒子的运动。通过不同粒径 $Mg(OH)_2$ 的复配添加，不仅使层压板具有较好的阻燃性，并且由于粉体颗粒在复合材料中形成了网络状结构，赋予了复合材料更好的力学性能和介电性能，解决了 $Mg(OH)_2$ 阻燃剂应用的难题。

3　结　论

(1) 采用不同粒径 $Mg(OH)_2$ 复配添加的方法，可以有效降低粉体添加量过大对层压板力学性能及介电性能的影响。

(2) $Mg(OH)_2$ 阻燃剂的最佳用量为苯并噁嗪(BZ)-环氧树脂(EP)总质量的 30wt%；当粒径为 2 μm和 4 μm 的 $Mg(OH)_2$ 粉体以质量比 1∶2 混合时，粉体颗粒在浸渍胶内易形成网络状结构；所制层压板单个试样最短自熄时间为 7.52 s，5 个试样总自熄时间为 49.81 s，极限氧指数(LOI)为 34%，弯曲强度为 399.84 MPa，相对介电常数为 3.848；垂直燃烧达到 UL－94V－0 级。

(3) 以 $Mg(OH)_2$ 为阻燃剂，以 BZ-EP 为基体的玻纤布层压板在阻燃型覆铜板基板材料领域有一定的应用前景。

参考文献：

[1] Mauerer O. New reactive, halogen-free flame retardant system for epoxy resins [J]. Polymer Degradation and Stability, 2005, 88(1): 70-73.

[2] Gao M, Yang S S. A novel intumescent flame-retardant epoxy resins system [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 115(4): 2346-2351.

[3] 任元林，程博闻，张金树. 新型膨胀型阻燃剂阻燃聚丙烯的应用研究 [J]. 高分子材料科学与工程，2008，24(1)：116-119.

Ren Yuanlin, Cheng Bowen, Zhang Jinshu. Studies on the fire retardant PP with novel intumescent fire retardant [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(1): 116-119.

[4] Rothon R N, Hornsby P R. Flame retardant effects of magnesium hydroxide [J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, 54(2-3): 383-385.

[5] Chen L, Wang Y Z. A review on flame retardant technology in China. Part I: development of flame retardants [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2010, 21(1): 1-26.

[6] Frache A, Monticelli O, Nocchetti M, et al. Thermal properties of epoxy resin nanocomposites based on hydrotalcites [J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(1): 164-169.

[7] 徐建中，尚俊敏，屈红强，等. 氢氧化镁阻燃环氧树脂热降解性能研究 [J]. 塑料科技，2013，41(2)：49-53.
Xu Jianzhong, Shang Junmin, Qu Hongqiang, et al. Study on thermal degradation of resins blended with magnesium hydroxide [J]. Plastics Science and Technology, 2013, 41(2): 49-53.

[8] 王　鹤，马明强，赵树高，等. 氢氧化镁对 EVM/NBR 共混硫化胶阻燃性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程，2012，28(9)：105-108.
Wang He, Ma Mingqiang, Zhao Shugao, et al. Effects of magnesium hydroxide on the flame retardancy of EVM/NBR vulcanizates [J]. Ploymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(9): 105-108.

[9] 杨　丽，周逸潇，韩新宇，等. 阻燃剂阻燃机理的探讨 [J]. 天津化工，2010，24(1)：1-4.
Yang Li, Zhou Yixiao, Han Xinyu, et al. Discussion on the mechanism of flame retardants [J]. Tianjin Chemical Industry, 2010, 24(1): 1-4.

[10] 马雅琳，王标兵，胡国胜. 阻燃剂及其阻燃机理的研究现状 [J]. 材料导报，2006，20(VI)：392-395.
Ma Yalin, Wang Biaobin, Hu Guosheng. The current study on flame retardant and their flame retardant mechanism [J]. Materials Review, 2006, 20(VI): 392-395.

[11] 冯　霞，刘有智，申红艳，等. 超细氢氧化镁阻燃剂的研究现状 [J]. 塑料工业，2013，41(2)：7-8
Feng Xia, Liu Youzhi, Shen Hongyan, et al. Research progress of superfine magnesium hydroxide flame retardant [J]. China Plastics Industry, 2013, 41(2): 7-8.

[12] 石志想，傅仁利，何兵兵，等. 无机填料对环氧模塑料导热和阻燃性能的影响 [J]. 复合材料学报，2011，28(6)：8-13.
Shi Zhixiang, Fu Renli, He Bingbing, et al. Effect of inorganic fillers on the thermal conductivity and flame retardancy of epoxy molding compounds [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(6): 8-13.

[13] 卢林刚，徐晓楠，王大为，等. 新型无卤膨胀阻燃聚丙烯的制备及阻燃性能 [J]. 复合材料学报，2013，30(1)：83-89.
Lu Lingang, Xu Xiaonan, Wang Dawei, et al. Praparation and flame retardancy of intumescent flame-retardant polypropylene [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1): 83-89.

[14] 刘继纯，常海波，李晴媛，等. $Mg(OH)_2$/聚苯乙烯复合材料的阻燃机制 [J]. 复合材料学报，2012，29(5)：32-40.
Liu Jichun, Chang Haibo, Li Qingyuan, et al. Flame retardant mechanism of $Mg(OH)_2$/polysyrene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 32-40.

[15] 全国绝缘材料标准化技术委员会. GB/T 22472－2008 仪表和设备部件用塑料的燃烧性测定 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.
National Technical Committee on Evaluation and Qualification of Electrical Insulating Materials of Standardization Administration of China. GB/T 22472－2008 Tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[16] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. GB/T 8924－2005 纤维增强塑料燃烧性能试验方法 [S]. 北京：中国标准出版社，2005.
National Technical Committee on Evaluation and Qualification of Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. GB/T 8924－2005 Test method for flammability characteristics of fiber reinforced plastics-oxygen index method [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[17] 全国印制电路标准化技术委员会. GB/T 4722－1992 印制电路用覆铜箔层压板试验方法 [S]. 北京：中国标准出版社，1993.
National Technical Committee on Evaluation and Qualification of Printed Circuits of Standardization Administration of China. GB/T 4722－1992 Test methods for copper-clad laminated sheets for printed circuits [S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.

[18] 刘玉桂，任元林. 阻燃协效剂与膨胀型阻燃剂在木粉/聚丙烯复合材料中的阻燃协效性 [J]. 复合材料学报，2012，29(2)：53-58.
Liu Yugui, Ren Yuanlin. Flame retardant synergistic effect of the fire retarded synergistic agent and the intumescent fire retardant in wood flour/polypropylene composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(2): 53-58.

[19] 向　兰，吴会军，金永成，等. 阻燃型氢氧化镁制备技术评述 [J]. 海湖盐与化工，2001，30(5)：1-4.
Xiang Lan, Wu Huijun, Jin Yongcheng, et al. Review of the preparation of magnesium hydroxide on flame retardant [J]. Lake Salt and Chemical Industry, 2001, 30(5): 1-4.