

PENGFENQUAN SHUZHI JIQI YINGYONG

# 硼酚醛树脂

## 及其应用

赵敏 孙均利 等编著



化学工业出版社

PENGFENQUAN SHUZHILIQI YINGYONG

# 硼酚醛树脂

# 及其应用

赵敏 孙均利 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书比较全面地阐述和总结了硼酚醛树脂结构、性能、特点、合成方法、固化方式、应用领域以及国内外研究情况等方面的内容。重点介绍了硼酚醛树脂的制备方法、固化方式和硼酚醛树脂的性能与应用，并对硼酚醛树脂的成型加工、硼酚醛使用中的安全环保与回收处理技术、国外硼酚醛树脂的合成和应用进行了介绍。

本书可供从事硼酚醛树脂和相关产品的科研、生产、应用领域的技术人员和研究人员阅读参考。



图书在版编目(CIP)数据  
硼酚醛树脂及树脂/赵敏, 孙均利等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2015.7  
ISBN 978-7-122-24096-5

I. ①硼… II. ①赵…②孙… III. ①酚醛树脂  
IV. ①TQ323.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 112637 号

责任编辑: 李 辉 丁尚林  
责任校对: 程晓彤

文字编辑: 李 玥  
装帧设计: 刘剑宁

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司  
装 订: 三河市瞰发装订厂  
850mm×1168mm 1/32 印张 9 字数 241 千字  
2015 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

酚醛树脂是世界上最早的一类合成树脂，从 1872 年，德国拜耳研究制造出酚醛树脂，到 1910 年成立了世界上第一家生产酚醛树脂的企业（美国贝克兰公司），再到后来第二次世界大战以后，酚醛树脂的研发和生产在美国、日本等国得到迅猛发展，酚醛树脂在一百多年的发展历程中，应用范围大大扩宽（从酚醛模塑料、涂料的应用，再到电绝缘制品、酚醛泡沫塑料、热防护材料、耐磨材料等的应用），生产总量大大增加（从 1950 年的 14 万吨，到 2003 年的 325 万吨）。我国于 1946 年由上海塑料厂开始小批量生产酚醛树脂，已经有近 70 年的历史，产量超过 50 万吨，但生产工艺及其应用领域，始终与美、日等发达国家具有一定的差距。据国家行业协会统计，我国目前从事酚醛树脂业务的企业超过 600 多家，酚醛树脂生产企业有 100 多家，生产能力近 70 万吨。平均单家生产企业的产能不足 0.7 万吨。据工业企业数据库统计，我国中等规模以上酚醛树脂生产企业不足 60 家。下游各类酚醛树脂应用产品的生产企业约有 40 多家。酚醛树脂生产企业主要分布在山东、江苏、辽宁和浙江四省，中等规模以上企业数量所占比重为 64.2%。另外，酚醛树脂产业规模较大的省市还有河南、上海和广东。这些中等规模以上酚醛树脂生产企业超过 60% 成立于 2000 年之后，2001~2006 年间是我国酚醛树脂产业迅速发展的时期。硼酚醛树脂因为具备了优于普通酚醛树脂的结构与性能，最近几十年成为各国研究人员研究的热点。硼酚醛树脂的研究工作最早起始于 20 世纪 50 年代的美国，而商品定型于 20 世纪 60 年代的联邦德国，至今申请硼酚醛树脂专利的国家主要有美国、英国、法国、德国、日本、俄罗斯等。我国对硼酚醛树脂的研究工作始于 20 世纪 60 年代后期，到 20 世纪 70 年代为军工的需要研制了硼酚醛树脂，并建成

工业试验装置。目前已有多家硼酚醛树脂生产厂，产品不仅应用于军工，还应用于民用产品中。

本书是笔者在长期技术积累的基础上，参考了国内外有关硼酚醛树脂的最新成果编写而成，比较全面地阐述和总结了硼酚醛树脂结构、性能、特点、合成方法、固化方式、应用领域等方面的内容，试图为从事硼酚醛树脂研究和生产领域工作的人提供参考与帮助。

本书共分 8 章，赵敏执笔第 1 章、第 4 章，高维英执笔第 2 章、第 3 章，孙均利执笔第 6 章，贾惠敏执笔第 7 章，王鹏执笔第 8 章，第 5 章由赵敏和贾惠敏共同编写。全书由孙均利全面修改、补充、整理后完成，最后经赵敏统稿。

在编写过程中，参考并引用了国内外同行专家的文献资料，在此表示感谢，还要特别感谢蚌埠市天宇高温树脂材料有限公司总经理陈士年、副总经理陈树，在此书的编写过程中提供了关于硼酚醛树脂生产方面的技术资料。

硼酚醛树脂应用领域在不断扩宽和发展，合成方法技术日新月异，限于笔者水平和时间，书中可能有疏漏之处，敬请同行专家和广大读者给予补充和指正，不胜感谢。

**编著者**

2015 年 7 月于廊坊

# 目录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 硼酚醛树脂的发展 .....	1
1.2 硼酚醛树脂的特点 .....	3
1.3 酚醛树脂的合成、改性、固化 .....	4
1.4 硼酚醛树脂的应用领域与发展方向 .....	5
参考文献 .....	6
第 2 章 硼酚醛树脂的制备 .....	8
2.1 主要单体及其性质 .....	8
2.1.1 酚 .....	8
2.1.2 醛 .....	14
2.1.3 硼酸 .....	17
2.2 硼酚醛树脂制备原理与工艺 .....	19
2.2.1 热固性硼酚醛树脂 .....	19
2.2.2 热塑性硼酚醛树脂 .....	31
2.3 硼酚醛树脂配方设计原则 .....	31
2.3.1 酚/醛/硼比例 .....	31
2.3.2 酚的结构与选择 .....	32
2.4 硼酚醛树脂工业制备实例 .....	33
参考文献 .....	35
第 3 章 改性硼酚醛树脂的制备 .....	38
3.1 橡胶改性硼酚醛树脂 .....	38
3.2 有机硅改性硼酚醛树脂 .....	45
3.3 胺改性硼酚醛树脂 .....	48
3.3.1 己二胺、苯胺改性硼酚醛树脂 .....	48

3.3.2	六亚甲基四胺改性硼酚醛树脂 .....	50
3.3.3	双马来酰亚胺改性烯丙基硼酚醛树脂 .....	51
3.4	桐油改性硼酚醛树脂 .....	55
3.5	腰果油改性硼酚醛树脂 .....	60
3.6	纳米粒子改性硼酚醛树脂 .....	63
3.6.1	纳米 SiO <sub>2</sub> 改性硼酚醛树脂 .....	63
3.6.2	纳米 TiO <sub>2</sub> 改性硼酚醛树脂 .....	65
3.7	玄武岩纤维改性硼酚醛树脂 .....	69
3.8	炭布改性硼酚醛树脂 .....	70
	参考文献 .....	71
<b>第 4 章</b>	<b>硼酚醛树脂的固化 .....</b>	<b>74</b>
4.1	固化机理与结构分析 .....	74
4.1.1	苯酚型硼酚醛树脂 .....	75
4.1.2	双酚 A 型硼酚醛树脂 .....	81
4.1.3	双酚 F 型硼酚醛树脂 BBPFRR .....	83
4.1.4	硼氮配位型硼酚醛树脂 .....	87
4.2	硼酚醛树脂的热分析与固化性能 .....	89
4.2.1	硼酚醛树脂与普通酚醛树脂的固化性能差异 .....	90
4.2.2	升温速率对固化的影响 .....	91
4.2.3	其他类型硼酚醛树脂 .....	94
4.3	硼酚醛树脂固化工艺 .....	100
4.3.1	红外分析结果与固化温度和固化时间 .....	100
4.3.2	成型工艺 .....	101
4.4	硼酚醛树脂的固化改性 .....	103
	参考文献 .....	104
<b>第 5 章</b>	<b>硼酚醛树脂的成型加工 .....</b>	<b>106</b>
5.1	模压成型和层压成型 .....	106
5.1.1	模压成型 .....	106

5.1.2	层压成型 .....	110
5.2	树脂传递模塑成型和真空辅助 RTM 成型 .....	111
5.2.1	树脂传递模塑成型 .....	111
5.2.2	真空辅助 RTM 成型 .....	113
5.3	袋压法、热压釜法、液压釜法和热膨胀模塑法成型 .....	114
5.3.1	袋压法 .....	115
5.3.2	热压釜和液压釜法 .....	115
5.3.3	热膨胀模塑法 .....	116
5.4	喷射成型技术 .....	116
5.5	泡沫塑料夹层结构制造技术 .....	118
5.6	离心成型工艺 .....	119
5.7	注射成型和增强反应注射模塑技术 .....	120
5.7.1	注射成型 .....	120
5.7.2	增强反应注射模塑 .....	122
5.8	拉挤成型 .....	123
	参考文献 .....	124
<b>第 6 章</b>	<b>硼酚醛树脂的性能与应用 .....</b>	<b>126</b>
6.1	硼酚醛树脂性能 .....	126
6.1.1	硼酚醛树脂的耐高温性能 .....	126
6.1.2	硼酚醛树脂的耐烧蚀性能 .....	128
6.1.3	硼酚醛树脂的防火阻燃性能 .....	129
6.1.4	硼酚醛树脂的耐磨性能 .....	130
6.1.5	硼酚醛树脂的其他性能 .....	131
6.2	硼酚醛树脂的具体应用 .....	132
6.2.1	硼酚醛树脂胶黏剂 .....	132
6.2.2	硼酚醛树脂涂料 .....	139
6.2.3	硼酚醛树脂塑料 .....	177
6.2.4	硼酚醛树脂烧蚀材料 .....	180



6.2.5	耐高温材料 .....	183
6.2.6	硼酚醛树脂复合材料 .....	185
6.2.7	其他应用 .....	186
	参考文献 .....	192
<b>第7章</b>	<b>硼酚醛使用中的安全环保与回收处理技术</b> .....	<b>196</b>
7.1	毒性和火灾危险性基本知识 .....	197
7.2	毒性防护与应急处理 .....	199
7.3	火灾的预防 .....	201
7.3.1	工业企业消防安全设计 .....	201
7.3.2	点火源的控制 .....	201
7.3.3	消防安全管理 .....	203
7.4	硼酚醛树脂环境危害与回收处理技术 .....	208
7.4.1	掩埋或焚烧的环境危害 .....	208
7.4.2	废旧热固性塑料资源化研究现状 .....	209
7.4.3	热固性塑料的机械物理法再生 .....	211
	参考文献 .....	215
<b>第8章</b>	<b>其他国家和地区硼酚醛树脂的合成和应用</b> .....	<b>216</b>
8.1	硼酚醛树脂的合成方法 .....	216
8.1.1	美国专家的硼酚醛树脂合成方法 .....	216
8.1.2	巴西专家的硼酚醛树脂合成方法 .....	218
8.2	硼酚醛树脂分子结构的表征方法 .....	221
8.2.1	核磁共振 .....	221
8.2.2	红外光谱 .....	225
8.2.3	元素分析 .....	228
8.3	硼酚醛树脂性能的表征方法 .....	229
8.3.1	差示扫描量热分析 .....	230
8.3.2	热重分析 .....	231
8.3.3	热扩散率 .....	234

8.3.4	流变学特性 .....	235
8.3.5	层间剪切应力 .....	239
8.3.6	约西佩斯库剪切试验 .....	241
8.4	硼酚醛树脂的应用 .....	244
8.4.1	西班牙专家应用硼酚醛树脂研制阻燃材料 .....	244
8.4.2	我国台湾地区专家应用硼酚醛树脂研制 黏土纳米复合材料 .....	254
8.4.3	韩国专家应用硼酚醛树脂研制摩擦材料 .....	266
	参考文献 .....	277

# 第1章 绪论

## 1.1 硼酚醛树脂的发展

酚醛树脂是世界上最先发现并实现工业化的合成树脂，迄今已有一百多年的历史，现在已有许多品种，已发展成为世界上重要的一类工业树脂。它原料易得、合成方便，工艺性能、热性能及电绝缘性能优良，且树脂固化后能满足许多使用要求，因而在工业上得到广泛应用，如电子、电气、汽车、交通等高新技术领域。由于酚醛树脂有较好的烧蚀性能，因此作为耐烧蚀绝热材料是必不可少的，从20世纪60年代起，酚醛树脂就作为空间飞行器、导弹、火箭和超音速飞机的瞬时耐高温材料和烧蚀材料被广泛应用。此外，酚醛树脂也被广泛用于塑料、复合材料、胶黏剂、涂料、纤维等领域。

普通酚醛树脂在 $200^{\circ}\text{C}$ 以下能够稳定存在，若超过 $200^{\circ}\text{C}$ ，便明显发生氧化，从 $340\sim 360^{\circ}\text{C}$ 起就进入热分解阶段，且随着温度的升高，酚醛树脂将逐渐出现热解、碳化现象，基本结构变化剧烈，释放出大量小分子挥发物。例如，到 $600\sim 900^{\circ}\text{C}$ 时，树脂会释放出 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、苯酚等物质，在 $800^{\circ}\text{C}$ 时残炭率约为55%。为改善酚醛树脂的耐热性，通常采用化学方法对树脂进行改性，如将酚醛树脂的酚羟基醚化、酯化、重金属螯合以及严格后固化条件、加大固化剂用量等。然而，酚醛树脂结构上的酚羟基和亚甲基容易氧化，耐热性受到影响，并且固化后的酚醛树脂因苯环间仅由亚甲基相连显脆性而使产品应用受到一定的限制。因此，随着应用领域的扩展和对产品性能要求的不断发展，单纯酚醛树脂的性能已不能完全满足日益发展的需要，对酚醛树脂进行改性使其具有更好的性能已成为当前研究的一个热点。目前，人们已开发出多种

高残炭率酚醛树脂，如氨酚醛树脂、钼酚醛树脂、磷酚醛树脂、硼酚醛树脂以及酚三嗪树脂等。其中硼酚醛树脂 900℃ 残炭率是 71%，远高于氨酚醛树脂的 59% 和钼酚醛树脂的 56%，因此硼酚醛树脂是当前最成功的改性酚醛树脂品种之一。

硼酚醛树脂在酚醛树脂的分子结构中引入了硼元素，可通过自交联反应形成含有硼的三维交联网状结构，使其具有高氧指数、低毒、低烟和低发热量的高耐燃性的性能。此外还具有耐候性、耐化学稳定性、可黏合性及抗冲击性能等特点，另外硼酚醛树脂还具有优良的防中子辐射的能力和好的耐烧蚀性能，适合于制备层压复合材料、模压复合材料、绝缘材料、耐烧蚀和耐磨材料。因此，在航空、航天、火箭、导弹、空间飞行器、核电站、核潜艇和飞机、汽车摩擦材料等军工和民用方面都具有广阔的前景。

我国对硼酚醛树脂的研究工作起始于 20 世纪 60 年代后期，70 年代河北大学和北京玻璃钢院复合材料有限公司（北京二五一厂）为军工的需要研制了硼酚醛树脂，并建成工业试验装置，并且已用于其他行业中，该产品由于无法进行粉碎，只能作 50% 乙醇溶液产品，用于耐高温玻璃钢制品及湿法生产刹车片等。由于液体产品含有乙醇或其他溶剂，这些低分子物质对其制品的强度产生影响，因此应用受到一定限制。该产品仍是目前军工产品的主要原料来源。

经过不断的技术攻关，20 世纪 90 年代贵州省化工研究院研制成 BF-206 硼酚醛树脂，并建成  $200\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  工业试验装置。该树脂具有显著的抗灼烧稳定性、良好的研磨性，在粉碎状态下具有较长时间储存稳定性，在芳香族溶剂中有较好的溶解性。该树脂可应用于高速切割砂轮及重负荷砂轮、轿车的刹车片、耐高温玻璃钢及耐高温的模压塑料等。但由于转制等原因，市场上已见不到该产品。

蚌埠市天宇高温树脂材料有限公司是硼酚醛行业的后起之秀，研制成功了固体块状硼酚醛树脂、耐高温阻燃热固性硼酚醛树脂和粉状热固性硼酚醛树脂，并建成了  $800\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$  硼酚醛树脂系列产品工业装置，最近又研制成功了热塑性硼酚醛树脂，并已形成生产能力，同时该公司还生产橡胶增韧改性硼酚醛树脂、腰果油改性硼酚

醛树脂、有机硅改性硼酚醛树脂、松香改性硼酚醛树脂和环保增韧硼酚醛树脂等，在硼酚醛树脂系列产品中，可以生产供应从20%~90%不同浓度的液体树脂、不同分子量的固态和粉末状的产品、不同固化速度增韧型的硼酚醛系列，可以满足不同行业用户的需求。蚌埠市天宇高温树脂材料有限公司是目前生产硼酚醛树脂的主要企业，为硼酚醛树脂工业化和推广应用做出了应有的贡献。硼酚醛树脂系列产品已经应用于航天、航空、军工等尖端领域和各种制动材料、石油化工、冶金、防腐、特种橡胶制品等民用工业领域。该树脂已经成为新型航天耐烧蚀材料、C/C材料、复合材料、绝热隔热材料、高性能摩擦材料、刹车片、离合器片、金刚石砂轮、绝缘材料、阻燃玻璃钢、耐火材料、酚醛泡沫、环氧树脂固化剂、耐高温胶黏剂和高温防腐涂料等领域的高性能基体树脂。

目前，我国硼酚醛树脂工业仍处于起步阶段，总产能不过1万吨，工艺也相对落后。但随着我国经济发展水平的提高，人们对高性能材料的需求在逐步增加，特别是鉴于硼酚醛树脂具有极为优良的耐热、耐烧蚀、防火、阻燃特性，一定会在材料领域显示出独特优势，进一步扩大民用产品应用范围。

## 1.2 硼酚醛树脂的特点

在酚醛树脂分子结构中引入硼元素即可得到硼酚醛树脂，硼酚醛树脂的初始分解温度在455.16℃左右，具有极高的残炭率。由此可见，硼酚醛树脂的耐高温性能明显优于普通酚醛树脂。由于酚醛树脂中部分酚羟基中的氢原子被硼原子所取代，减少了体系中的游离酚羟基，另外所引入硼氧键的键能远大于碳碳键的键能，故硼改性的酚醛树脂固化物（含有硼的三维交联网状结构）的耐热性和耐烧蚀性远高于普通酚醛树脂；又由于B—O键具有较好的柔顺性，故硼改性酚醛树脂（PF）的脆性降低、力学性能有所提高。硼酚醛树脂可通过自交联反应形成含有硼的三维交联网状结构，使其具有高氧指数、低毒、低烟和低发热量的高耐燃性的性能。此外

还具有耐候性、耐化学稳定性、可黏合性及抗冲击性能等特点，另外硼酚醛树脂还具有优良的防中子辐射的能力和好的耐烧蚀性能。

硼酚醛树脂复合材料的特点简单总结为，硼酚醛树脂及其复合材料具有良好的热稳定性；硼酚醛树脂基复合材料与氨酚醛树脂基复合材料的热导率、平均比热容、热膨胀系数均处于同一水平；硼酚醛树脂基复合材料具有良好的力学性能，碳纤维/BPR 树脂力学性能更为突出；硼酚醛树脂具有良好的耐烧性能，其中高硅氧/BPR 的线烧蚀率为  $0.081\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，质量烧蚀率为  $0.0527\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ，而高硅氧/氨酚醛的线烧蚀率为  $0.1341\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ；硼酚醛树脂生产工艺简便，和一般酚醛树脂相同，可以用在小型固体火箭发动机上做隔热烧蚀材料。

### 1.3 酚醛树脂的合成、改性、固化

近几年来，为了更好地提高硼酚醛树脂的性能，开发了多种类型的硼酚醛树脂，以及研究了硼酚醛树脂的不同合成方法、改性方法和固化方式。苯酚型硼酚醛树脂为传统的树脂，其耐热性较酚醛树脂有很大提高，但由于硼原子核外电子层的不饱和性，使该类树脂的耐水性较差。近年来人们开始采用不同类型的酚来合成硼酚醛树脂或在合成硼酚醛树脂过程中加入各种胺类，引进硼氧、硼氮配位键以提高树脂的耐水性。例如，高羟甲基含量的硼改性酚醛树脂，其羟甲基含量可达 24.1%，并且相对分子质量较高，用  $\text{CO}_2$  固化可以得到一种耐高温、高强度和抗潮湿的硼改性酚醛树脂胶黏剂；双酚 A 型和邻甲酚型酚醛树脂在固化后的结构中形成了 B—O 配位键，改善了硼酚醛树脂耐水性差的缺点；双酚 S 型硼酚醛树脂具有较好的强度，但双酚 A 和双酚 S 型硼酚醛树脂的黏度很大，工业合成工艺难度大，而黏度较低的双酚 F 硼酚醛树脂合成、结构、固化及热降解过程也有了报道。另外在硼酚醛树脂的合成过程中加入胺类，生成硼氮酚醛树脂，固化后形成 B—N 配位键，也可

以改善硼酚醛树脂耐水性差的缺点,关于硼氮酚醛树脂的合成、结构、固化及热降解过程也有了报道。一些改性方面的研究也很活跃,如将纳米粒子引入硼改性酚醛树脂中,可以提高PF的综合性能;采用原位生成法将 $\text{TiO}_2$ 等加入硼酚醛树脂中,用量5%时,起始分解温度提高约 $150^\circ\text{C}$ ,冲击强度提高231%。另外,对硼酚醛树脂的耐热机理、成炭规律、成型加工方面的研究也有报道。对于硼酚醛树脂的结构、性能以及合成、改性、固化方法,本书的相关章节中有详细的介绍。

## 1.4 硼酚醛树脂的应用领域与发展方向

当硼酚醛树脂被用作火箭、导弹、飞行器等航空、航天领域中的耐烧蚀结构材料时,其耐烧蚀性能优异;当硼酚醛树脂用作汽车离合器面片等摩阻材料时,其使用温度高达 $300^\circ\text{C}$ 以上;高强度高耐磨砂轮中使用硼酚醛树脂,能够显著提高砂轮的高温切割能力;将硼酚醛树脂用作灯泡灯头的胶黏剂时,可在 $450^\circ\text{C}$ 条件下长期使用;而硼酚醛树脂的氧指数高达38%,比普通酚醛树脂提高近40%(一般认为氧指数大于27%时为难燃材料),因此常用作阻燃材料。

对于硼酚醛树脂的应用研究也已经进入快速发展的时期,应用领域也进一步扩宽,比如,将硼酚醛树脂用作饰面型防火涂料和膨胀钢结构防火涂料,可以有效降低防火涂料的烧蚀率,减少有毒气体的排放,且改善了防火涂料耐燃时间和耐火极限;玻璃纤维硼酚醛树脂复合材料具有较低的介电常数和介质损耗,可以作雷达罩等材料;将硼酚醛树脂用作防腐材料时,常温干燥后能满足一般的防腐要求,而经过进一步加温固化后,涂料的防腐耐热性能比常温固化的涂料有很大的提高;硼酚醛树脂作为锂离子电池热解碳负极材料前驱体的研究取得了进展,已经到了应用中试阶段,这种硬碳材料可以明显提高锂电池的嵌锂容量,同时,充放特性也得到了改善;硼酚醛树脂还具有分子量分布较窄,溶液黏度小,固化温度低

于 200℃，工艺条件容易确定等优点，将其用作浸渍剂或者前驱体，均可以制得烧蚀性能和力学性能优良的 C/C 复合材料；硼酚醛树脂与环氧树脂复合，可以作为防火保温板的耐高温、耐烧蚀胶黏剂；硼酚醛树脂还具有中子吸收能力，可以制作防辐射耐高温酚醛塑料和玻璃制品。

硼酚醛树脂由于具有优异的抗氧化性、高温稳定性、力学性能和高残炭率等特点，并且在热解时不会释放出有毒气体等优点，已在航空、航天、民用工业的碳化功能材料中获得广泛的应用。随着应用研究的深入，这种性能优异的改性酚醛树脂将满足日趋发展的尖端领域和广大的民用工业领域对先进复合材料、功能材料的发展要求，硼酚醛树脂应用领域也必将进一步扩宽。

### 参考文献

- [1] 杨莹, 王汝敏, 王德君. 硼酚醛树脂及其塑料的合成制备研究进展. 工程塑料应用, 2012, 40 (9): 87-92.
- [2] 朱苗森, 王汝敏, 魏晓莹. 硼酚醛树脂的合成及改性研究进展. 中国胶粘剂, 2011, 20 (6): 60-64.
- [3] 何金桂, 薛向欣, 李勇. 硼酚醛树脂的合成及应用研究进展. 辽宁化工, 2010, 39 (1): 48-52.
- [4] 河北大学化学系高分子教研室. 国外硼酚醛的发展概况. 河北大学学报: 自然科学版, 1976, (00): 140-150.
- [5] 夏立娅. 双酚 F 硼酚醛树脂的结构、固化机理和热性能研究 [D]. 保定: 河北大学, 2004, 6: 6-8.
- [6] Wangduan Chih, Changgeng Wen, Chen Yun. Preparation and thermal stability of boron-containing phenolic resin/clay nanocomposites. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93 (1): 124-133.
- [7] 闫联生. 高性能酚醛树脂研究进展. 玻璃钢/复合材料, 2000, (6): 47-50, 54.
- [8] 康路林, 李乃宁, 吴培熙. 高性能酚醛树脂及其应用技术. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [9] 李崇俊, 马伯信, 金志浩. 酚醛树脂前驱体 C/C 复合材料研究. 新型炭材料, 2001, 16 (1): 19-24.
- [10] 周瑞涛, 郑元锁, 孙黎黎, 等. 硼酚醛树脂/丁腈橡胶烧蚀材料性能研究. 固体火箭技术, 2007, 3: 159-162.



- [11] 顾澄中. 耐高温刹车片基体树脂双酚 F 硼酚醛的研究. 复合材料学报, 1991, 8 (4): 37-43.
- [12] 刘学彬, 毕文军, 蒋洪敏, 等. 硼酚醛 F 环氧树脂涂料的研制. 沈阳化工大学学报, 2014, 28 (1): 57-64.
- [13] 李崇俊, 闫联生, 苏红, 等. 炭布铺层 2D 炭/炭复合材料研究. 材料工程, 1999, (10): 7-10.