

树脂基复合材料 成型工艺读本

SHUZHJI FUHE CAILIAO
CHENGXING GONGYI DUBEN

汪泽霖 编著



化学工业出版社

树脂基复合材料 成型工艺读本

SHUZHJI FUHE CAILIAO
CHENGXING GONGYI DUBEN

• 汪泽霖 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在对预浸料的制备技术进行介绍的基础上,重点对喷射成型工艺、连续制板成型工艺、纤维缠绕成型工艺、拉挤成型工艺、手糊成型工艺、液体模塑成型工艺、热压成型工艺、注射、挤出、压注成型工艺进行了详细论述,最后对安全生产与环保进行了简略介绍。在每一工艺下都单独列出了该工艺适用的树脂和增强材料类型,而且在每章后面都附有相关制品的制备实例,同时还有质量问题和缺陷分析,实用性、参考性较强。适合于从事玻璃钢/复合材料行业的生产技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

树脂基复合材料成型工艺读本/汪泽霖编著. —北京:
化学工业出版社, 2017.9
ISBN 978-7-122-30198-7

I ①树… II. ①汪… III. ①复合材料-塑料成型-工艺
IV. ①TQ327.106.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 164570 号

责任编辑: 赵卫娟
责任校对: 王 静

装帧设计: 韩 飞

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: 三河市航远印刷有限公司
装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 16½ 字数 320 千字 2017 年 10 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: 78.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

树脂基复合材料成型是指将纤维均匀分布于连续相基体树脂中，除去复合材料内的气泡及挥发性气体，然后使树脂硬化（热固性树脂完全固化）制成纤维增强树脂成品的一种工艺过程。该过程也可以分两步进行，即先将基体树脂浸渍增强纤维，组合在一起构成预浸料，如短切纤维预浸料（模压料、模塑料和粒料等）、连续纤维预浸料（单向预浸料或称作无纬布）和纤维制品预浸料（预浸胶布或称作胶布）。制成的预浸料可销售或储存备用，供厂家再次采用热压成型（如模压、层压、焊接层压、冲压等）或采用注塑、挤出、压注等成型工艺制成纤维增强树脂成品。树脂基复合材料成型方法可按纤维形态分为短切纤维增强树脂成型（如喷射成型、连续波纹板成型）、连续纤维增强树脂成型（如缠绕成型、拉挤成型）和纤维制品增强树脂成型（如手糊成型、液体模塑成型）。

本书重点对喷射成型工艺，连续制板成型工艺，纤维缠绕成型工艺，拉挤成型工艺，手糊成型工艺，液体模塑成型工艺，热压成型工艺，注射、挤出、压注成型工艺的原材料、设备、工艺方法、制品实例和质量分析等进行了介绍。由于篇幅的限制，不能对每个成型工艺进行详尽地介绍，但每章的后面都尽量列出该成型工艺的有关参考资料，供有需要的读者查阅。

感谢我的同事，是他们的积极工作使本书中记录下我们的成果。写作过程中，也参阅了如黄家康、刘雄亚、陈博等国内外专家的论文及主编的许多书籍，并引用了他们的资料，在此表示真诚的谢意。另外也感谢为本书插图做工作的上海理工大学汪天智同学。笔者虽尽了最大努力，但由于水平所限，不当之处难免，敬请读者指正。

汪泽霖

2017年6月

第 1 章 预浸料制备

1

1.1 短切纤维预浸料制备	1
1.1.1 预混法	1
1.1.2 预浸法	7
1.1.3 层铺法 (SMC)	8
1.1.4 悬浮浸渍法	22
1.1.5 造粒	23
1.1.6 原位成纤复合材料制备	32
1.2 连续纤维预浸料 (无纬布) 制备	32
1.2.1 滚筒缠绕法	33
1.2.2 溶液浸渍法	34
1.2.3 热熔浸渍法	36
1.2.4 粉末熔融浸渍法	38
1.2.5 粉末悬浮浸渍法	41
1.2.6 混纤纱浸渍法	41
1.2.7 XMC(连续纤维 SMC)	42
1.3 纤维制品预浸料制备	42
1.3.1 溶液浸渍法	42
1.3.2 热熔膜浸渍法	54
1.3.3 粉末浸渍法	57
1.3.4 纤维混编或混纺	58
参考文献	59

第 2 章 喷射成型工艺

61

2.1 原材料	62
2.1.1 增强材料	62
2.1.2 基体树脂	62

2.2	喷射成型工艺	63
2.2.1	喷射成型机	63
2.2.2	喷射工艺参数	65
2.2.3	喷射成型工艺	65
2.3	喷射成型制品质量检测和控制	66
2.3.1	检测玻璃钢浴缸不同部位的性能	66
2.3.2	自组装的热电偶测温仪	67
2.4	喷射成型常见的缺陷、产生原因及解决措施	67
2.5	实用举例	68
2.5.1	喷射成型汽车方向盘	68
2.5.2	KLQ6129 客车玻璃钢覆盖件	69
	参考文献	70

第 3 章 连续制板成型工艺

71

3.1	原材料	71
3.1.1	增强材料	71
3.1.2	基体树脂	72
3.1.3	表面防护材料和防老剂	76
3.2	连续制板成型工艺过程及设备	77
3.2.1	树脂的配料与加料	78
3.2.2	切丝沉降	79
3.2.3	去除气泡	79
3.2.4	波形瓦成型及烘窑	80
3.2.5	切割	80
3.2.6	电器控制	80
	参考文献	82

第 4 章 纤维缠绕成型工艺

83

4.1	原材料	83
4.1.1	增强材料	83
4.1.2	树脂胶液	83
4.2	缠绕机	88
4.2.1	机械缠绕机类型	88

4.2.2	缠绕机控制系统	91
4.2.3	缠绕机辅助装置	92
4.3	缠绕成型工艺	94
4.3.1	缠绕成型工艺分类	94
4.3.2	工艺过程	95
4.3.3	缠绕规律	98
4.3.4	芯模	99
4.4	实用举例	101
4.4.1	纤维缠绕气瓶	101
4.4.2	纤维缠绕玻璃钢管	102
4.5	缠绕制品的缺陷产生原因及解决措施	103
	参考文献	104

第 5 章 拉挤成型工艺

105

5.1	原材料	105
5.1.1	增强材料	105
5.1.2	基体树脂	106
5.1.3	填料	114
5.1.4	阻燃剂	114
5.2	拉挤成型工艺过程及设备	115
5.2.1	送纱	115
5.2.2	浸胶	117
5.2.3	成型	119
5.2.4	牵引	122
5.2.5	切割	123
5.3	实用举例	124
5.3.1	不饱和聚酯树脂制品	124
5.3.2	乙烯基酯树脂制品	124
5.3.3	环氧树脂制品	125
5.4	拉挤成型制品质量控制及质量问题解决措施	126
5.4.1	拉挤成型过程监控	126
5.4.2	拉挤产品质量问题产生原因及解决措施	126
5.5	拉挤成型工艺的发展	127
5.5.1	曲面制品拉挤成型工艺	127

5.5.2	反应注射拉挤工艺 (RIP)	128
5.5.3	变截面部件的连续拉挤	129
5.5.4	在线编织拉挤成型	129
	参考文献	130

第 6 章 手糊成型工艺

131

6.1	原材料	131
6.1.1	增强材料	131
6.1.2	胶衣树脂	135
6.1.3	基体树脂	135
6.2	成型工艺	143
6.2.1	模具	144
6.2.2	涂脱模剂	147
6.2.3	喷涂胶衣	147
6.2.4	原材料准备	149
6.2.5	手糊成型	150
6.2.6	固化	150
6.2.7	脱模	151
6.2.8	修整	151
6.3	制品缺陷、产生原因及解决措施	151
	参考文献	152

第 7 章 液体模塑成型工艺

153

7.1	原材料	153
7.1.1	增强材料	153
7.1.2	树脂体系	157
7.2	辅助材料	160
7.3	主要设备	163
7.3.1	压力罐式注射机	163
7.3.2	计量混合式注射剂	164
7.3.3	真空模塑设备	164
7.4	成型工艺	165
7.4.1	树脂传递成型工艺 (RTM)	165

7.4.2	真空辅助树脂传递模塑 (VARTM)	169
7.4.3	Light - RTM 成型工艺	169
7.4.4	真空导入模塑成型 (vacuum infusion molding process, VIMP)	170
7.4.5	树脂膜渗透成型工艺 (RFI)	178
7.4.6	结构反应型注射成型 (S-RIM)	179
7.4.7	共注射树脂传递模塑 (CIRTM)	180
7.4.8	柔性树脂传递模塑 (FRTM)	181
7.4.9	树脂注射循环方法 (RIRM)	181
7.4.10	液体模塑成型空心制品方法	181
	参考文献	182

第 8 章 热压成型工艺

183

8.1	模压成型工艺	183
8.1.1	模压制品设计	183
8.1.2	模具	185
8.1.3	压机	189
8.1.4	压制工艺	192
8.1.5	实用举例	198
8.1.6	模压制品表面加工、品质监控及常见缺陷分析	199
8.1.7	模压工艺的发展	201
8.2	冲压成型工艺	202
8.2.1	冲压成型设备	202
8.2.2	冲压工艺过程及主要参数	203
8.3	层压板成型工艺	205
8.3.1	层压板预浸料	205
8.3.2	主要设备	207
8.3.3	层压工艺	208
8.3.4	层压板质量问题及解决办法	210
8.4	层压管成型工艺	211
8.4.1	层压管预浸料	211
8.4.2	主要设备	212
8.4.3	工艺流程	213
8.4.4	工艺参数	213

8.4.5 层压管成型工艺中常见缺陷及其解决办法	214
8.5 层压棒成型工艺	215
8.5.1 主要设备	215
8.5.2 成型工艺	215
8.6 热压罐成型工艺	215
8.6.1 热压罐系统的结构	216
8.6.2 成型模具	217
8.6.3 工艺辅助材料	218
8.6.4 成型工艺	219
8.6.5 热压罐成型工艺常见制件缺陷产生原因	220
8.7 袋压成型工艺	221
8.7.1 加压袋法	221
8.7.2 真空袋法	221
8.8 焊接层压法	222
参考文献	222

第 9 章 注射、挤出、压注成型工艺

224

9.1 注射成型	224
9.1.1 纤维增强热塑性塑料注射成型	224
9.1.2 纤维增强热固性塑料注射成型	231
9.2 挤出成型	233
9.2.1 挤出成型设备	234
9.2.2 挤出成型工艺	235
9.3 压注成型	237
9.3.1 基本原理	237
9.3.2 压注成型模具	238
9.3.3 BMC 的压注成型工艺	239
9.3.4 酚醛模塑料压注成型工艺	239
参考文献	239

第 10 章 安全生产与环保

241

10.1 废弃物再生和回收	241
10.1.1 热塑性树脂基复合材料的再生	241

10.1.2	热固性树脂基复合材料的回收	241
10.1.3	热塑性树脂基复合材料的回收	245
10.2	有机物气体污染物的治理方法	245
10.2.1	燃烧法	245
10.2.2	吸附法	246
10.2.3	吸收法	247
10.3	增强塑料中原材料的毒性及工作场所空气中容许 浓度	247
	参考文献	254

预浸料制备

1.1 短切纤维预浸料制备

短切纤维预浸料制备主要有预混法、预浸法、层铺法、悬浮浸渍法和造粒等方法。

1.1.1 预混法

预混法是将增强纤维短切，与一定量的树脂混合均匀，再撕松后烘干或用挤出机挤成条状或丸状（BMC）的工艺方法。

1.1.1.1 主要设备

(1) 纤维切割器 常用切割器类型有冲床式、砂轮片式、三辊式和单旋转刀辊式，其工作原理如图 1-1 所示。冲床式切割器广泛应用于切割非连续纤维（如开刀丝）；砂轮片式切割器用于宝塔纱团的整体切割，其工效较高，但所切割的纤维长度不均匀，而且砂轮片容易损坏；三辊式切割器所切割的纤维长短均一，可以连续工作，用于切割连续纤维效果良好，更换切割辊刀片间距可调变切割纤维长度；单旋转刀辊式切割器多用在高硅氧纤维的切割。

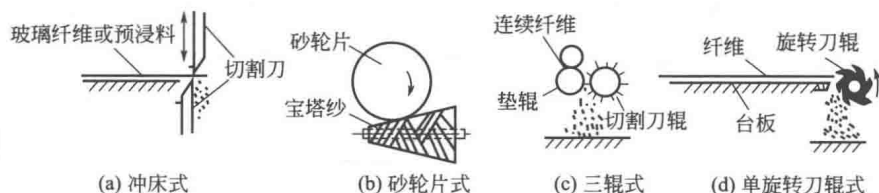


图 1-1 各种纤维切割器结构

(2) 高速分散机 为了使树脂糊分散均匀，需要使用剪切速率很高的搅拌机。高速分散机是对两种或者多种液体和固体粉末状物料进行搅拌、溶解和分散的高效设备。其主要技术参数见表 1-1。

(3) 捏合机 捏合机的作用是将树脂与纤维混合均匀，其结构主要有可翻转

出料的捏合锅、双 Z 桨式捏合桨和动力传动装置等 (如图 1-2 所示)。

表 1-1 高速分散机的主要技术参数

名称	主电机 功率 /kW	搅拌桨叶 直径 /mm	搅拌轴 转速 /(r/min)	最大升降 行程 /mm	转动箱 回转角度 /(°)	油泵电机 功率 /kW	质量 /kg
GFJ-7A/B	6.5/8	200	1200/2400	920	360	0.75	1000
GFJ-11A/B	9/11	250	1000/2000	1000	360	0.75	1200

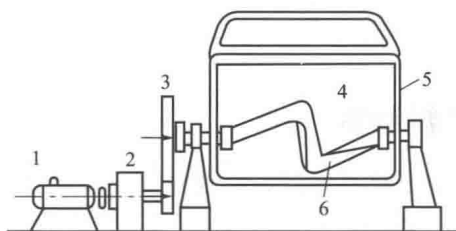


图 1-2 捏合机结构示意图

1—电动机；2—减速箱；3—齿轮；4—捏合锅；5—夹套；6—捏合翼

- ① 翻缸形式：手动翻缸、机械翻缸和液压翻缸；
 - ② 加热形式：夹套加热、半管加热、远红外加热和电加热；
 - ③ 捏合方式：相切型和相交型；
 - ④ 出料方式：底阀式、翻板式、蛟龙式（横式）、旋门式、抽拉式、吸料式和蛟龙式（纵式）；
 - ⑤ 搅拌轴形式： Σ 型搅拌桨、Z 型搅拌桨、切割型搅拌桨和鱼尾型搅拌桨。
- 表 1-2 列出了南通密炼捏合机械有限公司标准型捏合机系列。

表 1-2 标准型捏合机系列技术参数

型号	容积 /L	电机功率 /kW	加热形式		转速/(r/min)
			电/kW	汽/MPa	
NH-5L	5	0.75~1.5	0.15	0.3	$N_1=59, N_2=35$
NH-40L	40	2.2~5.5	3	0.3	$N_1=59, N_2=35$
NH-100L	100	4~11	4	0.3	$N_1=40, N_2=21$
NH-300L	300	11~22	8	0.3	$N_1=40, N_2=21$
NH-500L	500	15~30	16	0.3	$N_1=36, N_2=21$
NH-1000L	1000	18.5~55	24	0.3	$N_1=33, N_2=22$
NH-1500L	1500	22~55	36	0.3	$N_1=38, N_2=21$
NH-2000L	2000	37~75	48	0.3	$N_1=25, N_2=17$
NH-3000L	3000	45~90	60	0.3	$N_1=25, N_2=18$

续表

型号	容积 /L	电机功率 /kW	加热形式		转速/(r/min)
			电/kW	汽/MPa	
NH-4000L	4000	55~110	66	0.3	$N_1=33, N_2=20$
NH-5000L	5000	90~132		0.3	$N_1=36, N_2=21$
NH-6000L	6000	110~150		0.3	$N_1=36, N_2=21$

注：1. 转速可根据用户要求定做。

2. 下出料有球阀出料、快开门出料和螺杆出料。

(4) 撕松机 撕松机的作用是将捏合成团的物料进行蓬松。主要由进料辊和一对撕料辊组成。通过两个不同直径的撕料辊按相同方向旋转。物料在两个撕料辊间受撕扯而松散（如图 1-3 所示）。

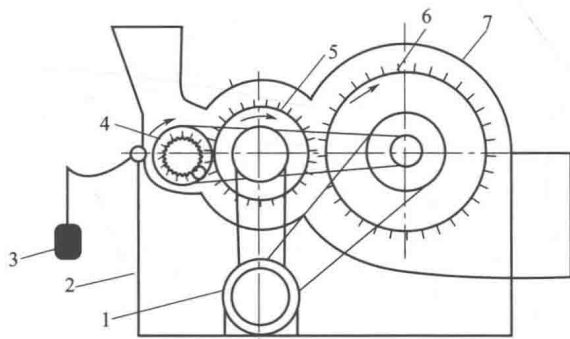


图 1-3 撕松机结构示意图

1—电动机；2—机体；3—配重；4—进料辊；5,6—撕料辊；7—机罩

(5) 挤出机 国外使用的挤出机是黏土型挤出机，具有一根直径很粗的螺杆。螺杆通常都要经过抛光和镀铬处理，以便清洁和延长使用寿命。表 1-3 列出了几种 Bonnot 公司黏土型 BMC 挤出机的基本参数。

表 1-3 几种 Bonnot 公司黏土型 BMC 挤出机的基本参数

项目	A	B	C	D
正常产量/(kg/h)	450	1350	405	675
螺杆尺寸/cm	15~20	20~25	10~15	15~20
逆转式喂入器	无	有	有	有
功率/kW	3.7	11	3.7	5.6
料斗尺寸/(mm×mm)	200×740	289×483	235×432	235×740
挤出尺寸/mm	25~100	38~150	13~100	25~100
共性	可变速驱动、带水夹套、气动切割器、镀铬的模具和螺杆			

1.1.1.2 预混模塑料制备

(1) 原材料

① 增强材料 短切纤维预浸料中常用的增强材料主要有玻璃纤维开刀丝、无捻粗纱、高硅氧纤维、碳纤维、芳纶纤维和尼龙纤维等。纤维长度一般为15~50mm,其中以30~50mm为多。

② 基体树脂

a. 酚醛树脂模塑料的典型配方 酚醛树脂模塑料的典型配方见表1-4。

表 1-4 酚醛树脂模塑料的典型配方

单位:质量份

原料名称	配方 1 ^①	配方 2 ^②	配方 3	SX-506	SX-580	FHX-301	FHX-304
E-44 环氧树脂				6.1	6.1		
环氧甲酚甲醛接枝共聚物						38(A)	38(B)
616 酚醛树脂	100						
镁酚醛树脂		100					
三聚氰胺-酚醛树脂			45				
苯酚苯胺甲醛树脂				30.8	30.8		
聚乙烯醇缩丁醛				3.1	3.1		
单硬脂酸甘油酯						1	1
羟甲基尼龙						4	2
苄基二甲胺						0.068	0.068
乙酸乙酯						适量	适量
油酸				1.0~1.2	1.0~1.2		
乙醇	100	100 ^③		25±3	25±3	适量	适量
苯				1	1		
油溶黑(颜料)		4~5					
酞菁绿				0.15~ 0.20			
KH-550	1						
滑石粉			15				
玻璃纤维	150	150	40	60	60	62	62

① KH-550 加入树脂中充分搅拌后待用。

② 先将油溶黑溶于乙醇,再倒入树脂中。

③ 用乙醇调节树脂的密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。

b. 环氧树脂胶液配制 环氧树脂加热到 130°C ,加入 NA 酸酐充分搅拌,当温度回升到 120°C 时滴加二甲苯胺,并在 $120\sim 130^\circ\text{C}$ 下反应 6min 后倒入丙酮,充分搅拌,冷却后待用。环氧树脂模塑料的典型配方见表 1-5。

表 1-5 环氧树脂模塑料的典型配方

原料名称	F-46 环氧树脂	NA 酸酐	N,N'-二甲基苯胺	丙酮	玻璃纤维
配比/质量份	100	80	1	180	270

c. 三聚氰胺树脂胶液及其组成 三聚氰胺树脂模塑料的典型配方见表 1-6。

表 1-6 三聚氰胺树脂模塑料的典型配方

原料名称	液体三聚氰胺树脂	硬脂酸锌	颜料	KH-550	玻璃纤维
配比/质量份	100	2	3~4	1	46

(2) 制备方法 预混模塑料制备是将树脂胶液经胶液配制釜配制并搅拌均匀后, 由齿轮输送泵送入自动计量槽内, 计量后再送入捏合器。连续玻璃纤维用切割机将纤维切成 15~50mm 长的短纤维, 然后进行蓬松, 使纤维分散, 再逐渐送入捏合器, 与树脂胶液在捏合器内混合均匀, 达到规定捏合时间后, 倾斜捏合器出料。捏合时间越长, 纤维强度损失越大; 时间过短, 树脂与纤维混合不均匀。再用撕松机将其蓬松后, 铺放于钢丝网上, 在 80℃ 左右烘干后, 包装入袋, 即为模塑料。

例如短切玻璃纤维增强镁酚醛树脂, 其连续生产工艺流程如图 1-4 所示。

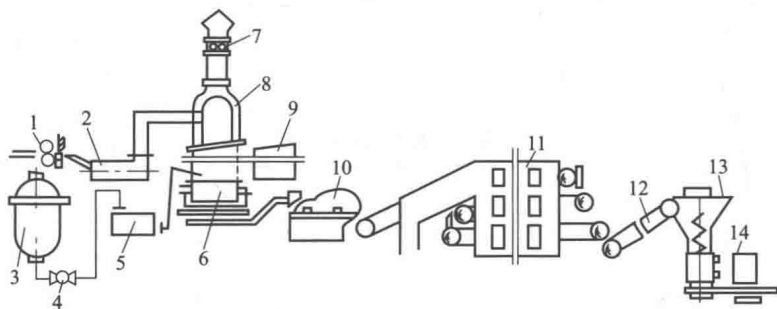


图 1-4 镁酚醛型短切玻璃纤维模压料连续生产工艺流程

- 1—冲床式切丝机; 2—蓬松机; 3—胶液釜; 4—齿轮输送泵; 5—自动计量系统;
- 6—捏合机; 7—排风器; 8—风丝分离器; 9—移动式风罩; 10—撕松机;
- 11—履带式烘干炉; 12—皮带输送机; 13—旋转式出料器; 14—装料桶

- ① 将玻璃纤维切成 30~50mm 长的短切纤维。
- ② 用乙醇调整树脂黏度, 控制胶液相对密度在 1.0 左右。
- ③ 按纤维: 树脂=55:45 (质量比), 将树脂溶液和短切纤维加入捏合器中充分捏合, 注意控制捏合时间。时间过短, 树脂与纤维混合不均匀; 时间过长, 纤维强度损失太大。捏合时, 树脂黏度的控制也是很重要的, 树脂黏度控制不当, 树脂不易浸透纤维, 也会增加纤维的损伤, 影响纤维的强度。

- ④ 捏合后，预混料逐渐加入撕松机中撕松。
- ⑤ 将撕松后的预混料均匀铺放在网屏上。
- ⑥ 预混料经晾置后在 80℃烘房中烘 20~30min。
- ⑦ 将烘干的预混料在塑料袋中封闭待用。

1.1.1.3 BMC

(1) 增强材料 巨石集团有限公司生产的 BMC 用无碱玻璃纤维短切原丝的品种有 562E、552B、558 和 588 等。玻璃纤维长度有 3mm、6mm、9mm、12mm、18mm 和 24mm。

(2) BMC 基体树脂及助剂 BMC 是在不饱和聚酯树脂中加入增稠剂、低收缩添加剂、填料、脱模剂、着色剂等组分，经混合形成树脂糊，将这种树脂糊与短切玻璃纤维在捏合设备中进行捏合混炼，使其充分混合而成。BMC 用不饱和聚酯树脂与 SMC 用不饱和聚酯树脂是相同的，也就是说，可以用作 SMC 的不饱和聚酯树脂，同样也可以用作 BMC 的基体树脂，具体树脂的牌号见 1.1.3 节。天和有 BMC 专用树脂，其牌号为 DS801N、DS802N、DS822N、DS823N 和 DS825N 等。

BMC 与 SMC 的组成极为相似，是一种改良了的预混块状成型材料，可用于模压、注射和传递等成型工艺。两者的区别仅在于材料形态和制作方法上。BMC 中纤维含量较低（15%~20%），纤维长度较短（6~12mm），填料含量较大，因而 BMC 的强度较 SMC 低。BMC 适用于制造小型制品，SMC 则用于生产大型薄壁制品。BMC 参考配方见表 1-7。

表 1-7 BMC 参考配方

单位：质量份

原料名称	配比	原料名称	配比
P17-902	100	氢氧化铝 F-2	12.5
SW978	25	氢氧化铝 F-8	127.5
聚苯乙烯溶液 ^①	41.25	氢氧化铝 F-10	85
苯乙烯	11.25	活性氧化镁	1.625
过氧化苯甲酸叔丁酯	1.625	合计	419
2,6-二叔丁基对甲酚	0.5	玻璃纤维(长 6mm)	93.75
灰色浆	6.25	总计	512.75
硬脂酸锌	6.5		

① 聚苯乙烯溶液指 40% 的聚苯乙烯、苯乙烯溶液。即聚苯乙烯：苯乙烯=40：60。

低密度聚乙烯粉末用于 BMC，对 BMC 的收缩率和光泽度有所改善（见表 1-8）。

注射模塑工艺用模塑料的配方范围见表 1-9。