

前言

随着科技的飞速发展，材料科学正引领着一场前所未有的革命。复合材料，作为这场革命中的璀璨明星，正以其卓越的性能、轻质的特性以及设计的灵活性，逐渐改变着我们的世界。而拉挤成型技术，更是将复合材料的潜力不断释放，为各行各业带来了前所未有的创新可能。经过近半个世纪的发展，特别是 20 世纪 80 年代以来，拉挤技术不断突破，研发出了反应注射拉挤成型技术、曲面拉挤成型技术、变截面连续拉挤技术和在线编织拉挤成型技术、高性能预浸料拉挤技术等拉挤新技术；复合材料拉挤型材用原材料不断丰富，拉挤设备不断升级，产品种类也不断增多，复合材料拉挤型材已广泛应用于航空航天、汽车制造、建筑工程、风力发电等多个领域，在新能源、环保等新兴产业的推动下，复合材料拉挤型材的市场需求呈现出更加旺盛的趋势。

复合材料拉挤型材产业的快速发展，推动了相关产品标准和使用设计规范的制定和实施，但缺乏系统的公开数据供有需求的设计及工程人员使用，这在一定程度上制约了复合材料拉挤型材的进一步推广和应用。为此，作为我国复合材料行业最早成立的公益性学术社团组织——中国硅酸盐学会玻璃钢分会牵头编制了《复合材料拉挤型材技术手册》（简称手册），手册以“客观、准确、实用”为编写原则，以期将“专业的拉挤型材”向“通用复材”转变提供技术支持。

手册共有三个章节和一个附录。其中第一章为拉挤型材的介绍，第二章为拉挤型材用原材料，第三章为拉挤型材典型应用案例及性能数据，附录为拉挤型材相关的国内外标准汇总表。

希望通过这本手册为我国复合材料拉挤型材的发展贡献一份力量，然而技术的进步日新月异，资料收集不够全面，使得手册存在不足之处，欢迎各位读者批评指正，以便今后不断推陈出新。

编者

2024 年 9 月

目 录

第 1 章 拉挤型材介绍	1
1.1 拉挤型材分类.....	3
1.2 拉挤型材特点.....	8
1.3 拉挤型材应用.....	10
第 2 章 拉挤型材用原材料	16
2.1 拉挤型材用树脂.....	16
2.1.1 不饱和聚酯树脂及乙烯基酯树脂.....	16
2.1.2 环氧树脂.....	28
2.1.3 酚醛树脂.....	49
2.1.4 聚氨酯树脂.....	60
2.2 拉挤型材用纤维.....	68
2.2.1 玻璃纤维.....	68
2.2.2 碳纤维.....	73
2.2.3 玄武岩纤维.....	77
2.2.4 芳纶纤维.....	92
第 3 章 拉挤型材典型应用案例及性能数据	101
复合材料桁架桥.....	102
复合材料疏散平台.....	105
玻璃钢电力围栏.....	109
玻璃钢充电架（化成架）.....	112
FRP 空调百叶及支架、围墙护栏.....	115
FRP 停机坪、FRP 桥梁.....	119
碳纤维复合芯导线.....	122
冷却塔用拉挤型材.....	124
三轨防护系统用防护罩.....	126
附 录	128
拉挤型材相关的国内外标准汇总表.....	128

第 1 章 拉挤型材介绍

拉挤成型技术起源于美国，1951 年出现了首个利用液态聚合物浸渍纤维来生产钓鱼竿的专利。1956 年 MorrisonMoldedFiberGlass 公司开始用拉挤工艺生产建筑型材，1980 年代以后，拉挤技术快速发展，市场需求急剧增加，成为纤维增强树脂基复合材料成型方法中自动化程度高、低成本、高纤维体积含量、具有恒定截面的复合材料型材的先进制造工艺。目前，已发展出反应注射拉挤成型技术、曲面拉挤成型技术、变截面连续拉挤技术和在线编织拉挤成型技术、高性能预浸料拉挤技术等。根据 Global Market Insights Inc. 最新研究报告，2030 年全球拉挤产品市场价值将超过 40 亿美元。

拉挤成型是将增强材料（如纤维纱线、纤维毡和编织物等）在牵引装置作用下与热固性或热塑性树脂进行浸渍，再经过具有特定截面形状的成型模具加热固化定型，从模具中拉出后形成具有特定截面形状、连续长度的复合材料型材的成型工艺。拉挤设备一般由树脂浸渍装置、预成型模、主成型模、牵引装置和切断装置等 5 部分组成。图 1 为连续传统单向纤维拉挤过程，将增强纤维（通常是玻璃纤维粗纱或丝束）通过纱架放卷后进入浸渍槽浸润树脂，纤维浸润树脂后再进入模具中加热固化（模具自带加热装置），再通过牵引装置将制品拉出模具，最后根据产品尺寸要求切割成所需尺寸。拉挤工艺的关键步骤是浸润、固化和牵引，随着截面复杂程度的增加还需进行预成型装置将纱线进行预定型后再进入模具。浸润方式一般有两种，一种是开放式的浸渍槽 [图 1 中 (2) 所示]，纤维等连续性增强材料通过含有树脂的浸渍槽充分浸润后进入模具；另一种是树脂通过注胶设备注入的模具中与增强材料浸润（也称闭模注胶）。

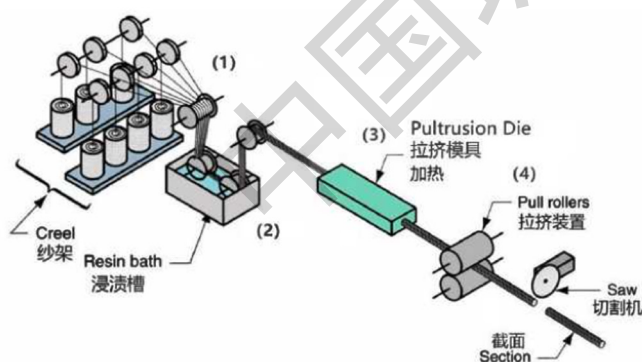


图 1 连续纤维增强树脂基复合材料拉挤工艺流程

第2章 拉挤型材用原材料

2.1 拉挤型材用树脂

2.1.1 不饱和聚酯树脂及乙烯基酯树脂

拉挤是一种连续生产具有恒定截面的纤维增强聚合物复合材料的工艺。这个词是“拉 pull”和“挤 extrusion”的合成词。挤压是推动材料，与挤压作用力相反，拉挤作用力是拉动材料。一个非常早期的拉挤型专利是由 J. H. Watson 在 1944 年申请的。紧接着是 M. J. Meek 在 1950 年的申请。第一个商业拉挤是在 1952 年由 Rodger B. White 申请了专利下由俄亥俄州克利夫兰的 Glastic 公司提供的，该公司在 1952 年由 Rodger B. White 申请了专利。1959 年颁发给 W. B. Goldsworthy 的专利有助于在行业内推广和知识传播。W. Brandt Goldsworthy 被广泛认为是拉挤的发明者。Goldsworthy 的工作主要集中在不饱和聚酯树脂上，与此同时，德国的 Ernst Kühne 在 1954 年以环氧树脂为基础开发了一种非常相似的工艺。直到今天，拉挤领域的专利发明、专利开发和专利的颁发仍在继续^[1]。

拉挤所用的不饱和聚酯树脂及乙烯基酯树脂的选择首先要考虑拉挤制品的最终使用性能，还要结合拉挤工艺的固化体系，制品的增强材料和填料的含量、化学特性与物理性能，拉挤速度，拉挤的环境温度与湿度，树脂混合料的稳定性等工艺因素。

为了便于工程实践中正确选用适用于拉挤制品终端应用的不饱和聚酯树脂及乙烯基酯树脂，本手册会从树脂化学成分与性能的关系入手，推荐按照其耐化学腐蚀性能、耐热性能、耐湿热性能、耐紫外光性能、阻燃性能、介电性能或其组合来选择合适的饱和聚酯树脂乙烯基酯树脂。并结合不饱和聚酯树脂及乙烯基酯树脂拉挤工艺和制品特点和需求，介绍适合其拉挤工艺的固化体系的选择，解决其制品工艺和性能问题的其它原辅材料的选择，如纤维的浸润剂类型、低收缩添加剂、填料、颜料以及其它功能材料和助剂。

(1) 不饱和聚酯树脂化学成分与性能的关系

本手册中所指的不饱和聚酯树脂是以不饱和二元羧酸（通常为丁-2-烯-1,4-二酸）、饱和二元酸（通常为邻-、或间-、或对-苯二甲酸）、二元醇（通常为乙二醇、二乙二醇、丙二醇、二丙二醇、新戊二醇）或双酚 A 化合物为原料，在催化剂作用下缩聚而成的一定分子量的树脂（常称为基体树脂）并溶解在交联单体（常为含烯键的苯乙烯单体）中形成的树脂溶液。

绝大多数的资料和书籍中也将乙烯基酯树脂列入不饱和聚酯树脂这个大类中，这是由于其树脂溶液的液体物理特征、化学反应特征、加工成型的工艺方法等物理及化学行为基本一致，由于化学组成、其制成品的耐化学腐蚀性能上的差别，本手册将此独立成章节，只是为了充分展现更多的工程应用实践，并不表示对这些已有知识和定义的异议。

1929年，William H. Carothers 首次制备了聚酯。他发明的制造技术至今仍在使用^[2]。直到1930年代后期，研究人员 Bradley, Kropa 和 Johnson 报告称，在（无交联单体的）基体树脂中因引入不饱和成分的聚酯在固化后是不溶解的和不可熔融的（被称为热固性的）。在同一时期，Carlton Ellis 发现，如果不饱和单体（如苯乙烯）引入会大幅提高固化速率30倍。凭借这些知识，虽然今天看来还有点粗糙，但这就是当时所知的关于不饱和聚酯树脂基本的技术资料。1941年不饱和聚酯树脂开始了其商业应用，基本上是浇铸产品。1942年美国 Rubber 公司发明了玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂，并首先工业化规模成功应用于军事上的雷达天线罩。在1945年第二次世界大战结束后，使得这些军工材料充分转向民用。1946年，船壳开始用玻璃纤维增强树脂制成。从1942年开始，不饱和聚酯树脂的产量不到500吨，十年后的1952年，聚酯的产量达到了8600吨，1962年达10.2万吨，1972年超过31.75万吨^[3]。通常的统计中，由于生产不饱和聚酯树脂的厂商也生产乙烯基酯树脂，所以上述统计中也包含了乙烯基酯树脂。表1介绍了典型的不饱和聚酯树脂合成所用原材料的化学组分对其性能的影响。

表1 典型的不饱和聚酯树脂合成所用原材料的化学组分及其性能

原料类型	化学名称	性能
饱和二元羧酸	邻苯二甲酸（酐）	酯化缩聚位阻小，耐化学性能弱，价格较低
	间苯二甲酸	酯化缩聚位阻中等，耐化学性能良好，热变形温度中高
	对苯二甲酸	酯化缩聚位阻高，耐化学性能优异，热变形温度高
	己二酸	柔韧性好，酯化缩聚位阻小，耐化学性能弱
	海特酸	阻燃，耐化学腐蚀，耐氧化性介质
不饱和二元羧酸	顺丁烯二酸（酐）	热变形温度中等，反应性高，价格低
	反丁烯二酸	热变形温度高，反应性更高
改性材料	双环戊二烯	收缩低，气干性好，价格低

第 3 章 拉挤型材典型应用案例及性能数据

复合材料桁架桥

应用场景 1：淮河出海航道高良涧船闸扩容工程闸区工作桥



实施单位：北京玻璃钢院复合材料有限公司、东南大学

设计工况：人行荷载 3.5 kN/m^2 ，汽车荷载为 6 T ，跨度 36 m 。

拉挤型材规格：（1）主桁型材：方型材、工字梁

（2）桥面板：多腔型材

（3）栏杆：方型材、圆管

应用场景 2：重庆首座茅以升公益桥——“小桥工程”项目



实施单位：北京玻璃钢院复合材料有限公司、清华大学、中冶建筑研究总院

设计工况：人行荷载 5 kN/m^2 。

拉挤型材规格：（1）主桁型材：槽钢、方型材、工字型材、角钢

（2）桥面板：多腔型材

（3）栏杆：方型材、圆管

主要性能要求：

序号	项目	单位	指标
1	巴柯尔硬度	——	≥ 50
2	树脂不可溶分含量	%	≥ 90
3	吸水率	%	≤ 0.6
4	玻璃化温度	℃	≥ 80
5	纵向拉伸强度	MPa	≥ 500
6	横向拉伸强度	MPa	≥ 45
7	纵向拉伸弹性模量	GPa	≥ 30
8	横向拉伸弹性模量	GPa	≥ 7
9	纵向压缩强度	MPa	≥ 350
10	横向压缩强度	MPa	≥ 80
11	纵向压缩弹性模量	GPa	≥ 25
12	横向压缩弹性模量	GPa	≥ 7
13	纵向弯曲强度	MPa	≥ 500
14	横向弯曲强度	MPa	≥ 80
15	纵向弯曲弹性模量	GPa	≥ 25
16	纵横剪切强度	MPa	≥ 50
17	纵向拉伸强度保留率（紫外老化 30 天）	%	≥ 85
18	横向弯曲强度保留率（紫外老化 30 天）	%	≥ 85

拉挤型材性能参考标准：

1. GB/T 29552 《纤维增强复合材料桥板》
2. GB/T 31539 《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》

优势：拉挤型材中纤维主要沿轴向，且纤维含量高，有很好的受力性能，可直接作为受力构件，也可以与其它材料组合受力。拉挤成型复合材料制品主要有轻质高强、变形率低、热变形温度高、吸水率低、保温隔热系数低、耐腐蚀性强、环境影响小等诸多优点。

由拉挤型材组装的 FRP 桥梁与传统桥梁相比，具有以下几方面突出的优势：

（1）架设速度快，FRP 桥梁上部结构的自重可以大大减轻，为传统结构的 30~60%，从而减小了运输和施工的难度，大大提高了施工的机动性和架设速度。

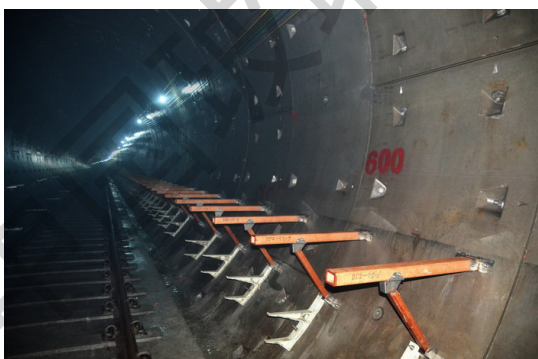
(2) 抗腐蚀能力强, FRP 桥梁具有的抗腐蚀性能能够保证其长期使用的可靠性, 一方面可提高结构的安全性能, 另一方面可降低了维护运营的投入。

(3) 抗超载和抗疲劳, 复合材料的力学性能表现为线弹性, 主要依靠承载力提供安全储备, 设计合理的 FRP 桥梁比传统材料桥梁的实际承载力要高; FRP 材料的抗疲劳性能远远优于传统结构材料, 非常适合在承受动载的桥梁结构中应用, 可提高交通系统的适应能力。

(4) 抗震性能好, 由于 FRP 的力学性能优越, 可以减小构件的尺寸, 减轻上部结构的自重, 从而减小了在地震中受到的惯性力, 因此对于抗震较为有利。

复合材料疏散平台

应用场景 1: 成都地铁 4 号线



实施单位: 南通美固复合材料有限公司、中铁五局集团

长 度: 15000 m

拉挤型材规格: (1) 支架型材: 矩形管
(2) 走道面板: 多腔型材
(3) 栏杆: 圆管

应用场景 2：贵阳地铁 1 号线



实施单位：南通美固复合材料有限公司、中铁十一局集团

长 度：246000 m

- 拉挤型材规格：
- （1）支架型材：矩形管
 - （2）走道面板：多腔型材
 - （3）栏杆：圆管

主要性能要求：

序号	名称	项目	单位	指标
1	耐久性能	使用年限	年	≥ 30
2	机械性能 (沿纤维方向)	弯曲强度	MPa	≥ 280
3		压缩强度	MPa	≤ 80
4		弯曲弹性模量	MPa	$\geq 2 \times 10^4$
5		耐水试验（45℃、8 h）后弯曲强度保留率	%	> 80
6		吸水性	%	≤ 5
7		冲击强度	KJ/ m ²	≥ 200

8	热性能	热变形温度	℃	≥ 200
9		250 ℃、1 h，弯曲强度保留率	%	≥ 90
10	纤维含量		%	≥ 60
11	防火性能	热值	MJ/KG	≤ 3
12		燃烧增长率指数 FIGRA	W/s	≤ 120
13		火焰横向蔓延长度 LFS	m	< 试样边缘
14		600 s 时的总放热量	MJ	≤ 7.5
15		产烟量		S1
16		烟气生成速率指数 SMOGRA	m ² /S ²	≤ 30
17		600 s 内总产烟量	m ²	≤ 50
18		600 s 内无燃烧滴落物 / 微粒		GB/T20284 d0
19		产烟毒性		t0 GB/T20285 达到 ZA1 级

拉挤型材性能参考标准：

- 1. T/CECS 10180-2022 《地铁隧道疏散平台》
- 2. GB/T 31539 《结构用纤维增强复合材料拉挤型材》

优势：复合材料疏散平台，是以酚醛树脂为基体材料，玻璃纤维玻璃纤维无捻粗纱为增强材料，经特殊拉挤工艺制成。主要由平台面板、横梁、斜梁、扶手、专用连接件组成，平台面板通过支架支撑并固定在隧道壁、或高架线路，高度与列车车厢地板持平，一旦发生事故可以立即开启车门，组织乘客一步踏上疏散平台撤离。

复合材料疏散平台具有高强度、高阻燃、低烟密度、低毒性、耐腐蚀、抗老化、重量轻、表面防滑，还有导热系数低、绝缘性能好、抗紫外线、抗冲击等特性。该产品除用于地铁隧道的逃生平台外，还广泛应用于海洋石油平台、船甲板、煤矿等紧急逃生通道或救生场所。

树脂基复合材料疏散平台梁与传统材料相比，具有以下几方面突出的优势：

项目	材质 指标	水泥基混凝土盖板	RPC 活性粉末混凝土盖板	树脂基复合材料疏散平台
	制作工艺	仅在传统钢筋混凝土板的基础上，添加了部分改性材料	由水泥、砂、硅微粉、钢纤维等原材料，经高温蒸养制备而成，减少了钢筋的用量	以酚醛树脂为基体，以玻璃纤维无捻粗纱为增强材料，经自动化拉挤设备制成

性能参数	设计荷载 (5Kpa)	满 足	满 足	满 足
	耐久性 (30 年)	满 足	满 足	满 足
	燃烧等级 (A 级)	A1 级, 满足	A1 级, 满足	A2 级, 满足
	材质重量	重 (105 kg/m ²)	重 (80 kg/m ²)	轻 (20 kg/m ²)
	耐腐蚀性	耐腐蚀性一般, 内部 钢筋易腐蚀	耐腐蚀性一般, 内 部钢筋易腐蚀	耐腐蚀性能极好
	电绝缘性能	相对差	相对差	绝缘性能好
安装施工	生产周期	需制作模具、浇筑成 型、养护及生产周期 较长, 冬天周期更长	需制作模具、浇筑 成型、养护及生产 周期较长, 冬天周 期更长	拉挤成型, 生产稳 定。养护周期短, 生 产周期短
	现场安装	笨重, 运输边角易破 损, 安装需借助机械, 现场难切割	笨重, 安装相对困 难, 现场难切割	轻质, 现场调节方 便, 安装简单, 现场 易切割
	安装时间	较长	较长	较短
	施工方便性	较难, 切割不方便	一般, 切割不方便	方便, 切割方便
成本	生产成本	相对便宜	价格适中	比 RPC 略高
	运输成本	笨重, 运输成本高	笨重, 运输成本高	轻质, 运输成本低
	现场安装成本	高	高	低
	安装施工损耗	大	大	低

附录 拉挤型材相关的国内外标准汇总表：

GB/T 31539 结构用纤维增强复合材料拉挤型材

GB/T 29552 纤维增强复合材料桥板

GB/T 35156 结构用纤维增强复合材料拉索

GB/T 26743-2011 结构工程用纤维增强复合材料筋

JC/T 941 门窗用玻璃纤维增强塑料拉挤型材

T/CECS 10019 聚氨酯拉挤复合材料支架系统

GB 50608 纤维增强复合材料工程应用技术标准

T/CECS 692 复合材料拉挤型材结构技术规程

GB/T 7190.1-3 机械通风冷却塔系列标准

ISO 23930:2023 纤维增强复合材料：拉挤型材全截面压缩试验方法

GB/T 30022-2013 纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法