

环氧树脂的合成、改性及应用研究进展

李泽宇, 王 勇, 王光硕, 宋耀伟*

河北工程大学材料科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2024年7月2日; 录用日期: 2024年8月2日; 发布日期: 2024年8月14日

摘 要

环氧树脂是一种典型的热固性树脂, 其主要特点是固化时不产生自由基, 因而具有较高的热稳定性、良好的耐热性和突出的力学性能, 广泛用于航空航天、汽车制造、电子电器和建筑行业等领域。本文综述了国内外对环氧树脂的合成方法及改性技术研究进展, 以提高其综合性能和应用范围, 同时还探讨了环氧树脂在航空航天、电子电气、建筑材料和涂料等领域的最新应用研究进展, 为未来环氧树脂的开发和应用提供参考。

关键词

环氧树脂, 合成, 改性, 应用研究

Research Progress on Synthesis, Modification and Application of Epoxy Resin

Zeyu Li, Yong Wang, Guangshuo Wang, Yaowei Song*

School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Jul. 2nd, 2024; accepted: Aug. 2nd, 2024; published: Aug. 14th, 2024

Abstract

Epoxy resin is a kind of typical thermosetting resin and its main feature is that it does not produce free radicals during curing, thus having high thermal stability, good heat resistance and prominent mechanical properties. It is widely used in many fields such as aerospace, automotive manufacturing, electronics, and construction. This article reviews the research progress on the synthesis methods and modification technologies of epoxy resin both domestically and internationally, in order to improve its comprehensive performance and application scope. Meanwhile, it also ex-

*通讯作者。

plores the latest application research progress of epoxy resin in aerospace, electronic appliances, building materials, and coatings, providing reference for the development and application of epoxy resin in the future.

Keywords

Epoxy Resin, Preparation, Modification, Application Study

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

热固性树脂是一类在使用辐射或某些固化剂固化过程中变得坚硬和坚固的聚合物。这是因为在固化过程中会形成共价固形键，使固化成为不可逆的过程。与热塑性塑料不同，热固性塑料在加热时会降解而不是软化，但只在非常高的温度下。热固性树脂有不同的种类，包括氨基树脂、酚醛树脂、硅树脂、环氧树脂等。

环氧树脂特征是环氧或氧环为主要官能团，最简单的环氧树脂是碳原子上没有取代的 1,2-环氧或 α -环氧树脂。环氧树脂的主链上挂有环氧基团，使其具有不同的性能，如耐水性和吸收机械和热应力，尽管环氧树脂具有较高的化学稳定性、耐高温性能、电绝缘性和低成本等优点，但存在着力学性能较低、憎水、憎油性能不佳，且多数环氧树脂材料具有脆性特点，使其在长期使用过程中容易受到各种条件的刺激而导致产生微裂纹，从而影响环氧树脂的长期使用。随着材料使用要求的不断提高，需要对环氧树脂进行改性，以获得综合性能更优异的材料[1]。本文综述了环氧树脂的主要合成方法和改性手段，同时对环氧树脂的应用研究进展进行分析。

2. 环氧树脂性能

环氧树脂是一种由环氧基和树脂基组成的聚合物，其化学结构中含有大量的环氧基和少量的双键和三键，这使得环氧树脂具有优异的物理性质，如高强度、高韧性、耐化学腐蚀和耐热性。环氧树脂的物理性质与其分子结构有关。环氧树脂的分子结构中，环氧基和树脂基之间的化学键[2]会导致其具有较高的分子量和分子量分布范围。此外，环氧树脂分子中的双键和三键也会影响其物理性质，使其具有较好的柔韧性和耐化学性能[3] [4]。表 1 为不同环氧树脂的性能和用途。

Table 1. Properties and uses of epoxy resins with different chemical structures

表 1. 不同化学结构环氧树脂的性能和用途

分类	性能特点	用途
双酚 A 型环氧树脂	机械强度高、耐化学性和电绝缘性好	涂料、粘合剂和电子封装
双酚 F 型环氧树脂	低的粘度和更好的耐化学性	高性能涂料和复合材料
缩水甘油醚环氧树脂	不同的多元醇与环氧氯丙烷反应制得，性能多样	涂料、粘合剂、电子封装等领域
环氧酚醛树脂	优异的耐热性和机械性能	耐高温和高强度封装
脂环族环氧树脂	耐黄变性和光学透明性	光学材料、高性能涂料

环氧树脂具体性能还表现在具有优异的强度和刚度,可提高材料的承载能力和抗冲击性能,且收缩率低,可减少材料的变形和开裂[5]。其良好的耐腐蚀性能使其能够在不同环境下长期运行而不发生腐蚀。此外,环氧树脂基复合材料具有良好的可塑性、柔韧性和耐磨性,便于加工和成型。同时,环氧树脂还具有高透光度,可用于制作光学元件和生物医学材料等。它的耐热性能也很出色,可承受高温达到 200℃ 以上的环境而不脆化、不熔化。环氧树脂的生物降解性好,可以在一定时间内分解为二氧化碳和水,无害于环境。此外,环氧树脂的原料简单易得,可降低生产成本,有利于环境保护。因此,环氧树脂在航空航天、汽车、建筑和医疗等领域的具有重要的应用。

3. 影响环氧树脂性能主要因素

3.1. 分子量和组成的影响

环氧树脂的性能受多种因素影响,一方面环氧树脂的分子量和分子量分布范围关系到环氧树脂的机械性能,分子量越大,环氧树脂的强度和硬度越高,但韧性和耐化学性能下降。因此,在设计环氧树脂时,需要控制其分子量和分子量分布范围,以满足不同应用的需求。环氧树脂的组成也是造成性能变化的主要因素,环氧树脂的环氧基团含量直接影响其交联密度,从而影响其机械强度、耐热性和耐化学性。环氧基团含量越高,固化后的交联密度越大,材料的强度和硬度越高,但韧性可能下降,王坤等人[6]试验了不同分子量的双酚 A 环氧树脂对漆膜性能的耐性影响,发现由高分子量的 E20 树脂制备的漆膜由于环氧值低和交联度小,在乙醇和乙酸溶液中浸泡时起泡速度最快。在耐乙酸测试中,几种树脂均出现起泡现象,但随着环氧值的增大,交联度逐渐提高,耐性也相应增强。

3.2. 固化剂类型的影响

不同类型的固化剂(如胺类、酸酐类、酚类等)决定了固化反应的机理、速率、温度、以及固化产物的性能。胺类固化剂通过与环氧基团发生开环反应来固化环氧树脂,通常提供较好的机械性能和耐化学性,而酸酐类固化剂它们与环氧树脂反应生成酯化物,形成三维网络结构能提升耐热性能。Thakur 等[7]将二氨基二苯醚与 MPA 的脱氢脱羧衍生物二丙胺酮反应合成生物基类咪唑胺固化剂。并且与合成的 DMPK 和商业 DDE 固化剂固化的树脂进行了比较。结果表明由于引入了松香,使固化的环氧热固性树脂获得了更高的玻璃化转变温度,机械强度和耐腐蚀性优异。

3.3. 制备方法的影响

环氧树脂的制备方法同样也能影响环氧树脂性能变化,环氧树脂的制备方法,如缩聚、交联、酯化等,会影响其分子结构和物理性质。不同的制备方法可能会导致环氧树脂的分子量分布范围和物理性质有所不同。

4. 环氧树脂的合成

1909 年 Prileschajew 首次报道了环氧化物的合成,Prileschajew 实验是环氧化物中的过氧酸与烯烃之间的成环反应。此反应中使用的最重要的过氧酸是间氯过氧苯甲酸,它能在大多数有机溶剂中具有稳定的稳定性和溶解度。因此,第一个发现的生成环氧化物的方法是使用过酸氧化双键。

4.1. 卤代醇环氧树脂

环氧氯丙烷和羟基化合物是合成各种环氧树脂的理想前体。在反应中利用环氧环对 OH 亲核试剂的高活性,然后进行脱氯化,碱的存在是反应发生的先决条件,它使醇去质子化,亲核试剂与环氧化物环的 α 碳反应,使环打开形成 α -环羟基化合物,然后形成环氧树脂。其机理如图 1 所示。

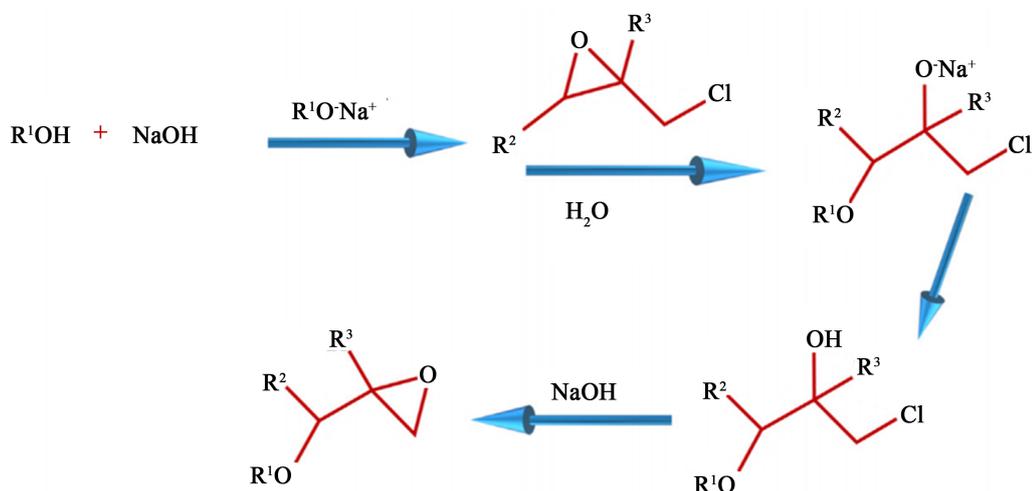


Figure 1. Mechanism of epichlorohydrin formation of epoxide [8]

图 1. 环氧氯丙烷生成环氧化物机理[8]

许多多功能酚类化合物已被报道用作合成环氧树脂的潜在前驱体。其中，研究最多的双官能团羟基化合物是双酚 A，而所谓的树脂就是双酚 A 环氧树脂。单功能酚也被报道用于树脂改性剂的制备[9]。其他可能包括双酚-f、四苯乙烷、间苯二酚、甲基化苯酚、卤素取代苯酚、醇(多功能和单功能)、酚类树脂(苯酚：新甲醛或甲酚：新甲醛)、羧酸和脂肪酸、氨基等氮化合物。

4.2. 双酚 A 型环氧树脂

双酚-A，又称 2,20-双(对羟基苯基)丙烷，可由苯酚和乙酸在酸性催化剂(如 75% H₂SO₄ 或 HCl)下反应制备，当双酚-A 在化学计量的碱存在下用过量的环氧氯丙烷处理时，产生 50% 双酚 A 二缩水甘油醚。其机理如图 2 所示。

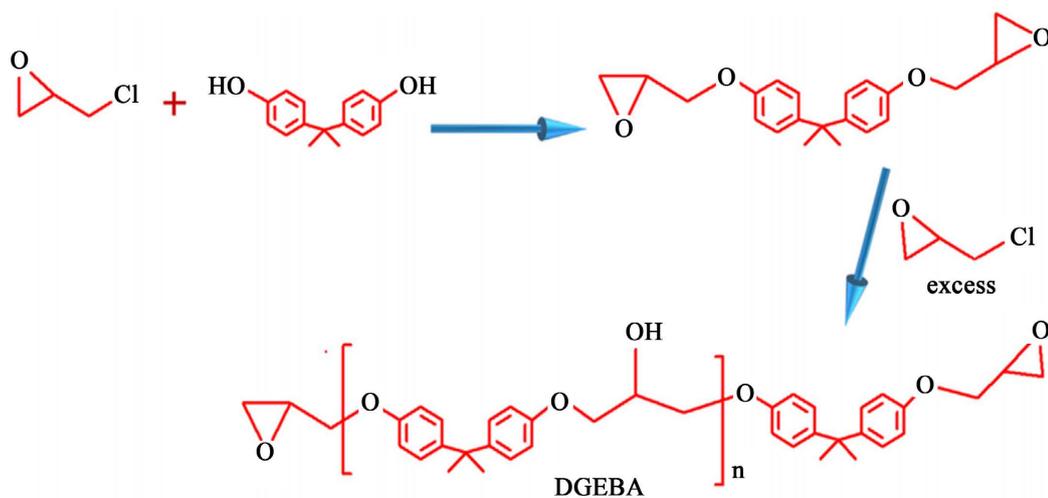


Figure 2. Diagram of the synthesis mechanism of bisphenol A diglycidyl ether [8]

图 2. 双酚 A 二缩水甘油醚合成机理图[8]

树脂的物理特性，如粘度、软化点、熔点和机械性能，都与其分子结构和分子量密切相关。因此，双酚 A 二缩水甘油醚(DGEBA)的分子量影响其物理状态。高分子量的 DGEBA 更粘稠，可能呈固态或较

粘的液态；而低分子量的 DGEBA 则更倾向于液态。一种阻燃型环氧树脂以六氯三磷腈、双酚-A、苯酚和过量的环氧氯丙烷为原料，在 K_2CO_3 和氢氧化物存在下合成了磷腈环氧低聚物。所得环氧树脂是环氧环磷烯和双酚 A 二缩水甘油醚的混合物，其组成可以通过改变单酚和二酚的比例而改变。固化后得到的低聚物具有阻燃性和降低的粘度，使其适合用作粘合剂、油漆和复合材料的粘合剂。目前通用的双酚 A 型环氧树脂的产量及销售仍居首位，用途十分广泛，因此深入研究环氧树脂的固化技术及其固化剂的开发具有重要意义[10]。

4.3. 生物基环氧树脂

生物基环氧树脂是一种利用可再生生物质资源作为原料合成的环氧树脂，来源于生物质，如植物油、植物多酚、糖类和有机酸等，这些原料是可再生的，有助于减少对石油资源的依赖。低成本和可生物降解性为这些生物基环氧树脂增加了更多的吸引力[11]。植物油是脂肪酸或甘油的酯，含有不饱和双键，可以通过环氧化反应引入环氧基团。这个过程通常使用催化剂，如有机过氧化物或氢过氧化物，在一定温度下进行。目前，生物基环氧树脂的研究正在不断取得进展，衣康酸、松香、没食子酸等生物基原料在合成环氧树脂方面都具有很大的潜力，合成的环氧树脂的性能基本上与双酚 A 环氧树脂不相上下[12]，再通过在这些生物基环氧树脂中引入功能性结构如含磷结构，以进一步提高阻燃性等性能。

5. 环氧树脂改性

环氧树脂的优良品质包括高强度、对基材的高附着力、高电绝缘性、低毒、低收缩率、低成本以及高工艺和应用适应性。它可以在高达 175°C 的温度下使用，并与所有标准增强材料一起使用。其疲劳强度高于铝合金。然而，由于其固有的脆性、分层性和低断裂韧性，限制了其在众多应用中的广泛应用。许多技术已被用于改善环氧树脂的性能，包括化学改性、增加分子量、降低交联密度，以及在固化的聚合物基体中添加分散的增韧相颗粒(如微尺寸颗粒)或含有柔性链段的大分子[13]。

5.1. 固化过程

除了环氧基热塑性塑料和高分子量的苯氧树脂外，几乎所有的环氧树脂都需要添加一些交联剂才能成为热固性树脂，这些交联剂被称为固化剂。这些固化剂形成的化学键和交联的程度是环氧树脂的特征。固化剂是根据所要使用的应用来选择的。固化影响环氧树脂的耐化学性、耐热性和机械性能[14]。

He 等[15]合成了一种含聚醚链段的结构可控自乳化环氧固化剂，为调节固化剂的固化活性和凝结时间，将 TETA、E51 及环氧封端聚醚醇(DGPEG)作为反应物，用 BGE 对加成物 TETA-E51-DGPEG 中剩余的伯胺进行封端，形成的固化膜平坦透明，几乎没有气泡，硬度高且附着力强，凝胶时间为 40 min。Huang 等[16]以 PPGDGE、环氧树脂和 PGE 改性的 TETA 为反应物，合成了一种具有良好水分散性、乳化性和与环氧树脂相容性的非离子型水性环氧固化剂，得到的水性环氧涂膜在力学性能和耐腐蚀性能方面都有很大的提升。饶兴兴等[17]针对目前厚浆型环氧树脂与厚浆环氧固化剂搭配使用时涂层室温实干时间过长，不满足高固含压载舱涂料的室温实干时间($\leq 4\text{ h}$)问题，采用了苯酚、多聚甲醛、硫脲、三乙烯四胺作为原料合成制备出一种酚醛胺加成固化剂，这种固化剂不仅可以缩短涂层室温实干时间至 3.5 h，而且环氧涂层还具有优异的力学性能和耐候性能，满足目前高固含压载舱涂料的性能需求。环氧化物独特的高反应性为更多类型的固化剂与树脂一起使用开辟了空间。

5.2. 氟化改性

环氧树脂的氟化改性是通过引入氟原子或氟化基团来改善环氧树脂的性能，如提高其耐热性、耐腐蚀性、疏水性、耐湿性、介电性、耐污染性、阻燃性以及机械性能等。含氟环氧树脂因其优异的耐热性、

耐腐蚀性以及低摩擦系数等特性在特殊应用领域,例如航天太阳能电池板、船舶涂料、光导纤维等的胶黏剂方面具有重要用途。氟化环氧树脂的合成方法主要由 4 种,分别为单体聚合法、氟化物引入法、物理共混法和直接氟化法。

单体聚合法是通过聚合含氟的环氧树脂单体来合成氟化环氧树脂。饶建波等人[18]通过将含氟化合物与苯酚在 80°C 左右反应 4 小时,生成含氟单体,再含氟单体与环氧氯丙烷在催化剂作用下反应,制备含氟环氧树脂。通过这种方法合成了一种新型含氟环氧树脂,环氧值达到 0.54,适用于涂料用途,具有良好的防腐蚀性。并确定了最佳反应条件,为以后生产应用提供途径。

氟化物引入法即接枝法是利用含氟改性剂的官能团与环氧树脂发生接枝反应,在环氧树脂的合成过程中引入氟化物,生成氟化环氧树脂。虞鑫海等人[19]通过还原反应合成了一种新型的含氟环氧固化剂,命名为 2,2-双(3-氨基-4-羟基苯基)六氟丙烷(BAHPFP)。该固化剂含有伯胺基和酚羟基,可以与环氧基反应,且分子中含有 6 个活泼氢。研究了该固化剂的熔点、通过傅立叶转换光谱和元素分析确认了其化学结构以及探求了其化学反应性表示其能与 TGDDM (四缩水甘油基-4,4'-二苯甲烷)环氧树脂在 50°C 附近即可发生化学反应。发现其作为固化剂制备的环氧胶粘剂有较高的室温粘结强度,且其固化物呈现较低吸水性。

物理共混法是将含氟的聚合物或添加剂物理混合到环氧树脂中以改善其性能。这些填料通常包括含氟有机物和氟化无机物,它们都不与环氧树脂发生反应。Jin 等[20]将制备的氟环氧树脂(FEP)与市售的 4 官能度的环氧树脂(TGDDM)共混,提高了环氧树脂的界面和力学性能。

直接氟化法是一种化学改性技术,它通过直接在环氧树脂的分子链上引入氟原子或氟化基团来实现。在这一改性过程中,环氧树脂的表面首先经历化学键的断裂,随后,氟元素从含氟气体中被接枝到环氧树脂的表面。这种改性方法能够提高环氧树脂的表面性能,如提高其耐化学腐蚀性和降低表面能等。詹振宇[21]采用低温等离子体技术对环氧树脂绝缘试样进行氟化改性处理。直接氟化法是一种有效的合成氟化环氧树脂的方法,可以精确控制氟原子的引入,为环氧树脂的性能改进提供了一种直接的途径。然而,这种方法也需要仔细考虑反应条件和安全因素。

氟化改性后的环氧树脂表面张力低,有助于提高疏水性和耐污染性。碳氟原子紧密排列,增强了分子结构的致密性,提高了耐腐蚀性和耐热性。折射率可调,适合作为某些光学应用的胶黏剂。介电性能得到改善,适用于电子和电气绝缘材料。氟化改性环氧树脂的合成方法正在向着环保和成本效益更高的方向发展。然而,由于氟化环氧树脂的价格通常较高,它们主要应用于对性能有特殊要求的领域。

5.3. 含磷改性

磷改性是目前环氧阻燃改性的主流方向,由于磷类化合物在气相和缩合相中具有阻燃性和增焦性,因此磷类环氧树脂体系具有较高的阻燃性能。与卤化化合物相比,它们释放的烟雾和有害气体更少。磷可以用含磷的氧环体系掺入到环氧树脂中。Liu 等人[22]合成了含磷的二官能团和三官能团环脂肪族环氧树脂,该树脂具有高玻璃化转变温度、优良的再加工性、高机械模量和无卤阻燃性,能够用于环境友好的光电和微电子封装应用。其中高玻璃化转变温度的提升可以使材料在较高温度下仍能保持其机械性能和稳定性。Wang 等人[23]合成的 10-(2,5-二羟基苯基)-9,10-二氢-9-氧-10-磷菲壬烯氧化物(DHPDOPO)是一种有机磷化合物,具有良好的阻燃性能。含磷环氧树脂在与含氮固化剂 Novolac、酚醛三聚氰胺、双氰胺的协同作用下,进一步增强了树脂的阻燃性能。Li 等人[24]研制了一种含磷硅环氧树脂,具有优异的 400°C 以上热稳定性、高机械性能和阻燃性。该树脂以磷酸三酰胺、环氧官能化聚硅氧烷和双酚-F 型环氧树脂为原料,DDM 为固化剂制备该树脂。这些研究均表明,通过引入含磷化合物并与其他元素协同作用,提高了环氧树脂地热稳定性、机械性能和阻燃性等性能,使其在高性能和环保阻燃材料应用领域得到更

好发展。

5.4. 含硅改性

硅是一种环境安全的阻燃剂，可以加入到环氧树脂中，使其具有阻燃性能。这些类型的树脂可以用两种方法制备：1) 烷氧基硅烷和甘油醚的酯醚化反应或硅氧烷和环氧氯丙烷的末端羟基之间的缩合反应；2) 硅氢化反应。所用方法按照反应机理，可分为物理共混和接枝共聚改性两种方法[25]。通过这些方法制得的树脂具有硅树脂和环氧树脂的双重性能。Mercado 等人[26]用含硅环氧物或含硅预聚物用 4,4'-二氨基二苯基甲烷固化，制备了不同硅含量的环氧树脂。硅基化合物相较于传统环氧树脂，对胺类固化剂展现出更高的反应活性。随着硅元素含量的提升，材料的玻璃化转变温度维持在适中水平，并呈现出随硅含量增加而逐渐下降的趋势。此外，随着硅含量的增加，环氧树脂的起始热分解温度有所降低，同时在热解过程中产生的炭质残留物比例升高。硅元素的加入显著提高了环氧树脂的阻燃性能，这一点从其较高的极限氧指数(LOI 值)中可以得到证实。Xin 等人[27]通过 2-(3,4-环氧己基乙基)甲基二氧基硅烷(EMDS)的水解缩合和 EMDS 与二甲基二氧基硅烷的共水解缩合合成了硅-环氧树脂(SiE)。与商用发光二极管封装材料(一种名为 CEL-2021P 的环氧树脂)相比，固化的 SiE 树脂具有更好的热稳定性和更高的耐热性和抗紫外线性。研究了环氧值对 SiE 树脂固化后的热力学性能、热老化性能和 UV 老化性能的影响。环氧树脂的柔韧性随环氧值的降低而增强，环氧值适中的树脂耐热性和抗紫外线性最高。

5.5. 其他改性方法

为了满足工程应用，还可以通过在环氧树脂中加入改性物质或者对其某一特定性能进行改性，表 2 为其他改性方法。

Table 2. Other epoxy resin modification methods [28]-[31]

表 2. 其他环氧树脂改性方法[28]-[31]

方法	材料	性能	应用
填充改性	加入填充剂，如二氧化硅、氧化铝、石英粉等	提高力学性能、热稳定性和耐磨性，填充剂还可以降低环氧树脂的收缩率，提高其加工性能。	航空航天、汽车、船舶
纤维增强改性	加入纤维增强材料，如玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等	提高力学性能和耐热性	航空航天、汽车、船舶、体育用品等领域
弹性体增韧	将液体橡胶或其他弹性体添加到环氧树脂中	提高韧性、抗冲击性能和耐磨性能	航空航天、汽车、船舶
纳米材料改性	加入纳米材料，如碳纳米管、石墨烯	提高环氧树脂的力学性能、电性能和耐腐蚀性能	电子、航空航天、能源
耐热改性	加入耐热树脂、热稳定剂	提高环氧树脂的热稳定性和耐热性	发动机外壳、耐高温电子元件
阻燃改性	加入阻燃剂，如磷系阻燃剂、卤系阻燃剂、氮系阻燃剂等	提高阻燃性能	建筑、电子、交通运输等领域
光敏改性	加入光敏树脂，如聚乙烯醇二缩醛、聚丙烯腈等	提高环氧树脂的光敏性	光固化印刷、光固化涂料等领域

6. 应用研究

6.1. 航空航天

环氧树脂因其高强度、低收缩、耐腐蚀和防水等优异性能，广泛应用于航空航天领域。可用于飞机结构件、航天器结构件和航空电子设备等。此外，环氧树脂还可以用于航天器热防护涂层和航天器化学试验材料等。以下是环氧树脂在航空航天领域的一些研究实例：

1) 复合材料：环氧树脂是制造航空航天复合材料的重要原材料之一。通过将环氧树脂与纤维增强材料(如碳纤维[32]、玻璃纤维等)结合，可以制成高性能的复合材料，用于制造飞机结构、火箭外壳、卫星星体等部件。

2) 粘接剂：环氧树脂具有良好的粘接性能，因此广泛用于航空航天领域中的粘接剂。例如，环氧树脂可以用于粘接飞机零件、航天器零部件、导弹弹体结构等。

6.2. 汽车

环氧树脂也可用于汽车领域，主要用于汽车车身材料、汽车底盘材料和汽车电子设备等。环氧树脂具有优异的强度、刚度和耐腐蚀性能，可提高汽车的安全性能和性能。此外，环氧树脂还可以用于汽车发动机润滑油添加剂和汽车尾气净化装置等。以下是环氧树脂在汽车领域的一些研究实例：

1) 复合材料：环氧树脂可用于制造汽车零部件，如车门、车顶、引擎盖等，通过与纤维增强材料结合，可以提高零部件的力学性能和耐久性。

2) 粘接剂：环氧树脂可用于制造汽车零部件之间的粘接剂，例如车身结构粘接、汽车玻璃粘接等。

3) 防腐涂层：环氧树脂具有良好的耐腐蚀性和耐化学性，可以用于制造汽车零部件的防腐涂层，如汽车底盘防腐、油箱内壁涂层等[33]。

6.3. 建筑

环氧树脂在建筑领域也有广泛的应用。可用于制作建筑结构件、建筑胶和建筑涂料等。环氧树脂具有优异的强度、耐腐蚀性和防水性能，可提高建筑物的耐久性和稳定性。此外，环氧树脂还可以用于制作建筑材料的防火隔离层和建筑物的表面保护层等。以下是环氧树脂在建筑领域的一些研究实例：

1) 建筑结构材料：环氧树脂可用于制造建筑结构材料，如梁、柱、楼板等，可以提高建筑物的力学性能和耐久性。

2) 防水材料：环氧树脂可用于制造防水材料，如防水涂料、防水胶等，可以提高建筑物的防水性能。

3) 地坪涂料：水性环氧树脂可用于制造地坪涂料，如环氧地坪漆、自流平环氧地坪等，可以提高地面的耐磨性、耐腐蚀性和美观性[34]。

6.4. 医疗

环氧树脂在医疗领域也有广泛的应用。可用于制作医疗器械、生物医学材料和药物等[35]。环氧树脂具有优异的生物相容性和生物降解性，可减少医疗器械对人体的刺激和毒副作用。此外，环氧树脂还可以用于制作药物的释放系统和生物医用材料等。以下是环氧树脂在医疗领域的一些研究实例：

1) 假牙材料：环氧树脂可用于制造假牙材料，如牙冠、牙桥等，可以提高假牙的力学性能和美观性。

2) 医用粘接剂：环氧树脂可用于制造医用粘接剂，如组织粘接剂、伤口缝合剂等，可以提高伤口愈合速度和质量。

3) 医疗器械：环氧树脂可用于制造医疗器械，如注射器、导管等，可以提高医疗器械的耐久性和耐消毒性。

7. 结语

环氧树脂在热固性树脂中名列前茅。环氧树脂的合成方法已有多年的历史。本综述主要讨论了环氧树脂材料的合成、性能和应用。由于其显著的加工通用性和机械和热性能的独特组合，环氧树脂区别于其他热固性树脂。生物基环氧树脂也是这个时代社会和科学领域的新兴前景。本综述可作为环氧树脂进一步发展的基础。随着科技的不断进步和材料研究的深入，高性能环氧树脂基复合材料有望在更广泛的领域发挥出更加重要的作用。

参考文献

- [1] 朱波, 蔡华苏, 孙乃武. 碳纤维复合材料柔性连续抽油杆开发及应用[J]. 石油机械, 2003, 31(1): 29-31.
- [2] 沈敏敏, 哈成勇. 脂环族环氧树脂的合成[J]. 广州化学, 2000, 25(1): 50-57.
- [3] 张世平. 碳纤维/环氧树脂复合材料的应用开发新动向[J]. 科技信息(科学教研), 2007(24): 60-61.
- [4] 郑依豪, 张浩, 栾云博, 等. 碳纤维/环氧树脂仿贝壳珍珠层结构强韧机制与性能优化的实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2): 190-198.
- [5] 崔庆实. 改性环氧树脂提高其耐腐蚀性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- [6] 王坤, 刘振忠, 王福新, 等. 不同环氧树脂与固化剂的耐性研究[J]. 科学技术创新, 2023(14): 50-54.
- [7] Thakur, T., Jaswal, S., Parihar, S., Gaur, B. and Singha, A.S. (2020) Bio-Based Epoxy Thermosets with Rosin Derived Imidoamine Curing Agents and Their Structure-Property Relationships. *Express Polymer Letters*, **14**, 512-529. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.42>
- [8] Ravindran, L., Menon, A., Mohammed Kenz, K.T., Sasidharan, S.P., Sreekala, M.S. and Raghavan, P. (2024) Foams, Aerogels and Hydrogels: The State of the Art and Prospective Technologies. In: Raghavan, P., Ravindran, L., Sreekala, M.S., and Menon, A., Eds., *Handbook of Thermosetting Foams, Aerogels, and Hydrogels*, Elsevier, 3-14. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-99452-1.00024-3>
- [9] Ellis, B. (1993) Introduction to the Chemistry, Synthesis, Manufacture and Characterization of Epoxy Resins. In: Ellis, B., Ed., *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*, Springer, 1-36. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2932-9_1
- [10] 王伟. 环氧树脂固化技术及其固化剂研究进展[J]. 热固性树脂, 2001, 16(3): 29-33+37.
- [11] Gonçalves, F.A.M.M., Santos, M., Cernadas, T., Ferreira, P. and Alves, P. (2021) Advances in the Development of Biobased Epoxy Resins: Insight into More Sustainable Materials and Future Applications. *International Materials Reviews*, **67**, 119-149. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1915936>
- [12] 马松琪, 刘小青, 朱锦. 生物基环氧树脂的研究进展[J]. 粘接, 2014, 35(6): 43-49.
- [13] 白云起, 薛雨梅, 刘云夫. 环氧树脂的改性研究进展[J]. 化学与粘合, 2007, 29(4): 289-292+304.
- [14] Resins, E. (2005) *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley.
- [15] He, L., Liu, L., Cao, C., Jiang, F. and Xu, J. (2021) Improved Curing Performances of Epoxy Resin by a Structure-Controllable Self-Emulsifying Curing Agent. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **36**, 490-506. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1929003>
- [16] Huang, X., Wang, L., Lai, Y., Li, L., Jiang, X. and Zhang, X. (2021) Fabrication of a Nonionic Self-Emulsifiable Waterborne Epoxy Curing Agent with High Cure Properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, **18**, 549-558. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00423-3>
- [17] 饶兴兴, 王木立, 廉兵杰, 等. 环氧树脂室温快速固化剂的合成及其复配性能研究[J]. 热固性树脂, 2024, 39(2): 38-41+47.
- [18] 饶建波. 一种新型含氟环氧树脂的制备及工艺研究[J]. 信息记录材料, 2019, 20(12): 30-32.
- [19] 虞鑫海, 刘万章. 新型含氟固化剂的合成及环氧胶粘剂的制备[J]. 粘接, 2009, 30(5): 36-38.
- [20] Jin, F., Kim, H. and Park, S. (2007) Effect of Fluorine Functional Groups on Surface and Mechanical Interfacial Properties of Epoxy Resins. *Journal of Fluorine Chemistry*, **128**, 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2006.12.001>
- [21] 詹振宇, 阮浩鹏, 律方成, 刘伟, 李志兵, 谢庆. 等离子体氟化改性环氧树脂及其在 C₄F₇N/CO₂ 混合气体中电气性能研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1787-1798.
- [22] Liu, W., Wang, Z., Xiong, L. and Zhao, L. (2010) Phosphorus-Containing Liquid Cycloaliphatic Epoxy Resins for Reworkable Environment-Friendly Electronic Packaging Materials. *Polymer*, **51**, 4776-4783.

- <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2010.08.039>
- [23] Wang, X. and Zhang, Q. (2004) Synthesis, Characterization, and Cure Properties of Phosphorus-Containing Epoxy Resins for Flame Retardance. *European Polymer Journal*, **40**, 385-395. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2003.09.023>
- [24] Li, J., Wang, H. and Li, S. (2019) A Novel Phosphorus-Silicon Containing Epoxy Resin with Enhanced Thermal Stability, Flame Retardancy and Mechanical Properties. *Polymer Degradation and Stability*, **164**, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.03.020>
- [25] 吴明军, 李美江. 有机硅改性环氧树脂的研究进展[J]. 化工新型材料, 2011, 39(1): 32-35.
- [26] Mercado, L.A., Galià, M. and Reina, J.A. (2006) Silicon-Containing Flame Retardant Epoxy Resins: Synthesis, Characterization and Properties. *Polymer Degradation and Stability*, **91**, 2588-2594. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.05.007>
- [27] Yang, X., Huang, W. and Yu, Y. (2010) Synthesis, Characterization, and Properties of Silicone-Epoxy Resins. *Journal of Applied Polymer Science*, **120**, 1216-1224. <https://doi.org/10.1002/app.33108>
- [28] 叶新栋, 鲍观良, 王永垒, 等. 双酚 A 型环氧树脂的合成与应用研究进展[J]. 山东化工, 2018, 47(22): 55-56.
- [29] 冯家赫. 氧化铝填充聚氨酯/环氧树脂互穿聚合物网络及耐磨防腐性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [30] 王醉寒. 玻璃纤维布及碳纤维布增强酚醛环氧树脂复合材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2015.
- [31] 夏春亮, 邓成. 聚酯用反应型阻燃剂的应用及发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(11): 163-164.
- [32] 曾汉民. 高分子复合材料的进展——纤维增强树脂基复合材料(续)III, 纤维增强热塑性树脂复合材料最近的进展[J]. 材料工程, 1990(1): 10.
- [33] 肖艳. 环氧树脂分类、应用领域及市场前景[J]. 化学工业, 2014, 32(9): 19-24.
- [34] 狄宁宇, 曹万荣, 沈鉴峰, 等. 水性环氧树脂涂料的最新研究进展[J]. 绝缘材料, 2009, 42(4): 27-30.
- [35] 蔡永香, 于灏, 卜雨洲, 等. 北京市生物医用材料产业发展思考[J]. 新材料产业, 2014(1): 12-17.