

聚脲弹性体的研究进展

金书含¹, 梁薇²

(1. 大庆化工研究中心, 黑龙江 大庆 163000;
2. 中国石油大庆炼化公司研究院, 黑龙江 大庆 163711)

摘要: 聚脲弹性体是一种具有高强度、高韧性、耐磨防腐等优异性能, 同时又兼具黏接性及吸能性的高性能新型聚合物材料, 现已成为实现高效轻质化防护的重要材料之一。本文首先对聚脲弹性体的合成、改性等进行综述, 重点介绍了其在各应用领域的研究进展, 并对其发展前景进行展望。

关键词: 聚脲弹性体; 合成; 改性; 应用领域

中图分类号: TQ323.8

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)01-0001-07

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.01.001

聚脲弹性体是主链上含有重复脲基($-\text{NH}-\text{CO}-\text{NH}-$)链段的聚合物, 具有防爆抗冲击、耐磨防水和吸能等多功能性, 且高固含低VOC, 在日常生活、交通、工业及国防应用范围广泛, 是国民经济和国防工业不可缺少的重要物资^[1]。聚脲合成研究始于20世纪60年代, 1995年黄微波团队将聚脲技术引入国内, 并于1999年在我国投入商业使用^[2]。随着对聚脲弹性体的生产技术革新和品质优化, 目前, 聚脲弹性体已经在机械、电力、化工、建筑等行业得到广泛应用, 本文重点介绍近年来聚脲弹性体的发展情况。

1 聚脲弹性体材料研究

1.1 聚脲弹性体的发展

聚脲弹性体发展至今共三代, 第一代芳香族聚脲、第二代脂肪族聚脲与第三代聚天冬氨酸酯聚脲(天冬聚脲)。国内天冬聚脲市场正呈现快速发展态势, 从2009年全国天冬聚脲产量不足1 t, 到2021年超过4 000 t, 预计2023年将超过5 000 t。

芳香族聚脲是由芳香族异氰酸酯(A组分)、多元醇和氨基扩链剂(R组分)组成, 由于反应体系中, 伯胺与异氰酸酯的反应活性远远大于聚氨酯体系中羟基与异氰酸酯, 所以减少了异氰酸酯与空气中水分的反应, 使聚脲涂层不易出现气泡、针孔等问题。过高的反应活性也导致反应速度过快、胶凝时间短(3~5 s)、附着力差、使用周期短的问题。分子链硬段中刚性芳环的存在, 带来较好的力学性能的同时, 也使聚脲涂

层光照下易变黄老化, 紫外线下易自氧化生成醌亚胺, 因此在使用中通常需要加入抗氧剂和耐紫外线成分延长使用寿命^[3]。

脂肪族聚脲的A组份是由脂肪族二异氰酸酯与端氨基聚醚通过预聚反应制得, R组份由聚醚与脂肪胺类扩链剂组成, 无需催化剂。二代聚脲具有优异的耐光性、耐低温性, 且致密、无接缝、防水防腐, 适用于一些对颜色要求高的室外场景。二代聚脲一定程度上降低了反应速度, 但是力学上偏软、耐高温性差。

三代天冬聚脲通过在具有空间位阻结构的脂肪族仲胺化合物—聚天冬氨酸酯分子中引入不同的取代基, 在保留优异性能的基础上, 实现慢反应且性能可调, 解决了反应速度难以控制的问题。此外, 耐候型的天冬聚脲固含高, 可做到零VOC排放, 是高性能的环保绿色弹性体材料, 是目前的研究热点, 但品种少、价格高。

1.2 聚脲弹性体的合成

聚脲弹性体的合成为预聚、扩链两步。在预聚物的合成反应中, A组分一般是异氰酸酯的聚合体、衍生物、预聚物或半预聚物。

在扩链合成反应中R组分一般由聚醚和胺类扩链剂、助剂等组成, 合成本质是预聚物与端氨基聚醚和胺类扩链剂的反应。通过调整A、R组分中的软、硬

作者简介: 金书含(1990-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为炼化助剂、新材料等。

段的比例，可以制备不同弹性、抗张强度及硬度的聚脲材料^[4]。

1.3 聚脲弹性体的微相分离结构

聚脲弹性体的分子链段是由软、硬段交替连接而成的 $(AB)_n$ 型嵌段共聚物，其分子链结构示意图如图1所示。微相结构对其热性能、力学性能及加工处理影响很大，尤其是对力学性能的影响。玻璃化温度(T_g)较低的软段为基本相，柔顺性好， T_g 较高的硬段在氢键的作用下形成硬相，刚性大可起到物理交联和增强填料的作用，显著提高聚脲的物化性能^[5]。软硬段之间热力学性质的差异，及分子链间的复杂作用力，使他们内部呈现复杂的多相体系。在一定范围内，微相分离程度越大，聚脲的拉伸强度、硬度和模量等均显著增强^[6]。目前，对影响聚脲微相分离结构的因素的观点主要集中在：软硬段组成；氢键作用^[7]。

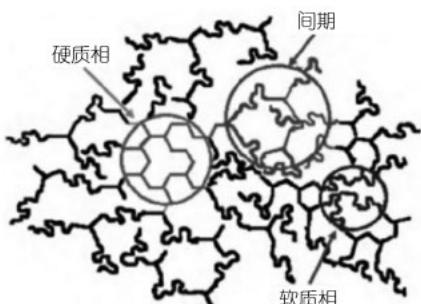


图1 聚脲弹性体微相分离结构

1.3.1 软硬段的影响

原料的结构种类、化学配比、链段结构和链长均会影响聚脲微相分离结构。在硬段含量一定时，软段分子量越高，微相分离程度越大，拉伸强度和冲击强度增高，滞后和蠕变明显减弱^[7]。目前，制备聚脲弹性体多使用二异氰酸酯或是其三聚体，因为研究发现异氰酸酯的对称性越好，所得聚脲产品的微相分离程度越高，力学性能也更优。因为对称的异氰酸酯单体更有利于聚脲弹性体硬段的有序堆积和结晶，内部形成结合牢固的硬段微区，填料增强效应更强^[7]。

异氰酸酯指数是影响聚脲弹性体理化性能的重要指标，通过设计异氰酸酯与端氨基聚醚、端氨基聚醚与扩链剂的化学配比，调整聚脲软硬段的比例，从而改变聚脲的力学性能。异氰酸酯组份与氨基组份的配比通常在1.05~1.10上下。

1.3.2 氢键的影响

氢键是影响聚脲内部微相分离的主要作用力，起

到促进硬段的有序堆积和结晶作用，使得聚脲弹性体具有良好的耐磨性、强度，提高熔点。聚脲分子链中脲键的两个活性氢可形成平面状双分叉结构，脲键之间形成的双配位氢键在硬段微区有着更强的凝聚力，带来更大的微相分离程度及更优异的力学性能，如图2所示。

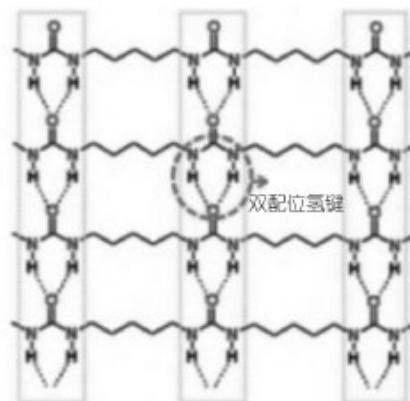


图2 聚脲弹性体氢键微观示意图

1.4 聚脲弹性体的改性

为提高聚脲弹性体的低温环境柔韧性、耐高温性和阻燃等性能，常对其进行改性。目前，对聚脲弹性体的改性方法主要有纳米改性、树脂改性以及其他改性。

1.4.1 纳米材料改性

将纳米材料引入聚脲弹性体中，使纳米粒子的表面活性中心与脲键结合，再通过调整软硬链段的结构、含量以及交联度形成聚集态结构，可有效提升聚脲弹性体的耐磨性、耐污性、耐候性、附着力和力学性能等。

冯永慧^[8]利用核壳结构纳米Ag@SiO₂材料对制备的有机硅基聚脲改性。制备的PDMS-PUa/Ag@SiO₂相比传统有机硅基防污材料，不仅具有更好的机械性、黏结性和自修复性，而且在纳米银添加量0.5%（质量分数）时，展现出了最佳的抗蛋白吸附性和杀菌效果。

王伟烽^[9]采用纳米SiO₂来改性水性聚脲，当纳米SiO₂加入量为2%时，涂膜热分解温度提高10℃，吸水率从30.56%降低到11.12%，拉伸强度先上升后降低，最大可达29.7 MPa，断裂伸长率不断减小。

1.4.2 树脂改性

树脂改性是通过嵌段和接枝等手段，将树脂分子贯穿在聚脲分子中的方法，常用酚醛树脂、环氧树脂、有机硅树脂进行改性，用于改善聚脲弹性体的耐温性、

反应速度、机械性能等，方法简便、效果好。并且改性后材料内部空间位阻变大，与-NCO 的反应受到阻碍，可一定程度延长涂料的黏结时间，提高黏附力。

酚醛树脂改性常用于提升材料的机械性能、耐热性能和电性能。王镠旸等^[10]制备了酚醛树脂改性聚氨酯 / 聚脲涂料，发现当材料 R 组分中酚醛树脂含量为 50% 上下时，涂膜拉伸强度由 8.9 MPa 提升至 13.2 MPa，耐强酸性和阻尼性能得到提升， T_g 由 12 °C 提升至 106 °C。环氧树脂具有优良的物理机械和电绝缘性能，且环氧分子链能较好地分散并贯穿于聚脲分子链中形成交联网络。

刘方方等^[11]采用自制环氧树脂对聚脲进行改性，发现改性后各性能均得到一定程度的改善。当用自制环氧树脂完全取代 R 组分中的 D1 000 和 D2 000 后，所制涂层的拉伸强度由 4.55 MPa 提升至 16.63 MPa，初始分解温度由 288.1 °C 升至 334.1 °C， T_g 由 12.6 °C 升至 90.0 °C。

李灿刚等^[12]为提高聚脲材料的阻尼性能，以硅烷偶联剂 A-187 为改性剂，采用溶液浸泡法改性 100 目云母粉，将改性云母粉添加到聚脲阻尼树脂中，结果表明：硅烷偶联剂 A-187 改性云母粉添加到聚脲树脂中可提高材料的阻尼性能；硅烷偶联剂 A-187 添加量为 4% 时，改性云母粉的活化指数最高、水接触角最大，改性效果最好；随着颜基比增加，聚脲阻尼材料的拉伸强度、断裂伸长率上升，阻尼因子峰值升高， T_g 向低温方向移动。

有机硅是一种具有低表面能和低弹性模量等优异性能的材料，还具有良好的热稳定性和抗氧化能力。

刘俊仁等^[13]采用双端环氧基聚硅氧烷 (PDMS) 对天冬聚脲进行改性，通过 D200 与端环氧基发生开环反应，将 PDMS 接枝到主链上再和马来酸二乙酯的 Michael 加成反应，合成了有机硅改性聚天冬氨酸酯 (PAE-S)。将 PAE-S 与 HMDI 预聚体常温聚合，制备了有机硅改性聚天冬氨酸酯聚脲。评价后发现，有机硅改性聚脲的耐高温性有不同程度的改善，且硬段含量在 12.8% 时聚脲的断裂伸长率最大，也具有较好的柔韧性。

胡春艳等^[14]以氨基封端聚二甲基硅氧烷 / 氨基封端聚醚 (聚醚胺, PEA)、异佛尔酮二异氰酸酯 (IPDI) 和正丁胺基甲基三乙氧基硅烷 (S151) 为原料，通过“预聚物封端法”和“软硬段调控法”，并与 PEA20 和 PEA9 单体复配，合成了力学性能与修复性可刚柔

协同的硅氧烷改性聚脲弹性体 SPUR。对 SPUR 进行拉伸试验和修复性能测试：SPUR4 的拉伸强度为 5.26 MPa、断裂伸长率为 530%、修复率为 30%，兼具有最佳的综合强度和弹性。

1.4.3 其他改性

聚脲改性还有氟改性、环氧大豆油 (ESO)、蓖麻油改性等方法，氟原子的强电负性，使得高键能的碳氟键能保护主链大分子，赋予材料良好的表面性能和电学性能，并且有机氟还能起到非常好的疏水效果。

冯明伟等^[15]采用氟改性脂环族慢反应仲胺基树脂作为新型聚脲体系的 A 组分，B 组分为聚酯多元醇与脂肪族多异氰酸酯反应制成的预聚体，合成了氟改性聚脲材料。由于引入的氟元素电负性大、F—C 键能高、低表面能等多种特性，结合特殊配方设计，使得该材料具有非常优异的耐老化性能、防水性、低温柔韧性、抗冲磨性能、附着力强等优点，并且可低温固化，受外界温湿度影响小，非常适用于水工建筑物的各类表面防护处理。

张余英^[16]采用氟硅改性脂肪族天冬聚脲树脂作为主体树脂，脂肪族异氰酸酯为固化剂，研制了一种用于风电叶片防护的超高固含量的改性脂肪族天冬聚脲面漆。并考察了面漆的疏水性、耐磨性、耐雨蚀性和耐候性。结果表明：改性脂肪族天冬聚脲面漆的固含量达到 95%，涂膜光泽 < 30；该漆膜的机械性能、耐雨蚀性能和耐紫外老化性能优异，疏水性良好。

环氧大豆油 (ESO) 资源丰富可再生、环境友好、价格低且热稳定性和耐溶剂性好，采用伯胺开环后的 ESO 可以合成轻度网络交联，改善聚脲的力学性能。

何金文等^[17]向 IPDA 与马来酸二乙酯反应得到 Michael 加成产物中加入 ESO，经催化合成改性聚天冬氨酸酯 (PAE)。研究结果表明：ESO 改性 PAE 形成了交联网络结构，反应温度控制在 95~105 °C，ZnCl₂ 作催化剂，环氧基与氨基物质的量比为 1:1.25，ESO 加入量控制在 6%~13% 效果最佳。ESO 的加入提高了 PAE 的热稳定性。

王晓涛等^[18]在聚脲组分中添加一定量改性蓖麻油，通过喷涂的方式得到蓖麻油改性喷涂聚脲弹性体，研究了蓖麻油含量对喷涂聚脲弹性体接触角、力学性能、吸水率和拉伸强度保持率的影响。结果表明：蓖麻油能够提高喷涂聚脲弹性体的耐水性能，其质量分数为 30% 时，喷涂聚脲弹性体 7 d 吸水率 0.8%，接触角为 105°，30 d 拉伸强度保持率大于 90%；喷涂聚

脲弹性体力学性能随着蓖麻油含量的增加而降低，当蓖麻油质量分数为 50% 时，材料拉伸强度减小至 15 MPa、撕裂强度减小至 100 N/mm。

2 聚脲在各领域的应用

目前，聚脲市场主要分布在美国、日本等国家，近些年在我国需求量不断增长。国内聚脲材料主要应用在海洋防腐、铁路修建以及重要设施的建设上。2022 年全球聚脲涂料市场规模达到 62.94 亿元，中国为 18.23 亿元。

2.1 聚脲在建筑领域的应用

聚脲在建筑领域应用最为广泛，如墙体防水、地下输水等水体密封、防渗及防漏等，其耐湿滑性也适用于对防滑要求较高的大型运动场如游泳池及海洋动物表演馆等。喷涂聚脲于 2004 年开始在电力行业、海洋设施等防腐工程中推广应用，在 2008 年奥运场馆应用后，喷涂聚脲在体育建筑领域得到广泛应用。

浙江黄龙体育中心作为 2022 年杭州亚运会比赛场馆，主体育场看台面层年久老化，采用耐候型 PAE 聚脲面漆进行改造翻新^[19]。材料的 A 组分是 IPDI 预聚体，R 组分是由 PAE 中加适量粉料和助剂组成。漆膜不含变色基团，强度高、弹性好、耐磨性好、耐黄变，实际应用后保色度高、防水效果显著。

2022 年北京冬奥会带动了人造仿真冰的研发，仿真冰场通常由超高分子量聚乙烯制成的仿真冰板拼接而成，成本低、建设速度快、维护简单。但拼接缝会影响冰面整体平整度，标志标线也无法预埋，尤其是冰刀滑行后冰面出现大量毛刺或塑料丝，影响运动员做出高难度技巧性动作，同时聚乙烯板材受热易变形甚至起火，存在安全隐患和消防风险^[20]。聚脲液态仿真冰又“脆”又耐磨、制造工艺简单、性能良好，具备很强耐磨性和耐候性，成为了人工冰研究的焦点。

专利 CN106634496B^[21]采用天冬聚脲、纳米级刚性固体填料 HDI 和 HMDI、及稀释剂合成了一种人造仿真冰。与现有技术的人造冰场相比，聚脲仿真冰冰面承载刚性卓越、冰面滑阻系数最佳、施工简单便捷、运动色彩极其丰富，并且符合国际顶级环保标准。此外，当冰场迁移或改变规格时，只需要将聚脲仿真冰体进行重新分割或拼接，再用新的液体材料浇筑接缝即可。此外，天冬聚脲具备挥发性有机物、重金属含量低，不含溶剂等特点，不污染环境，也不会损害施工人员的健康。

聚脲弹性体优异的防水防锈、耐腐蚀性，在高速公路、轨道交通、跨海大桥等重大项目中，被认为是保护工程强度和安全的关键材料，优良的耐盐雾、耐氧化的性能，也使其成为船舶及海洋工程领域的理想防腐材料。

高铁采用 CRTS II 型无碴轨道板桥面设计，要求防水层不仅防渗、抗裂，还要能经受火车高速行驶带来的高速重载、交变冲击等。喷涂聚脲涂层在常温下为无定形液态防水材料，无接缝、黏结力强，可做到“皮肤式”防水，同时还具有优异性能，完全满足高铁的特殊要求^[22]。

2006 年京津高铁是喷涂聚脲弹性体技术第一次在高速铁路上获得大规模成功应用的工程^[23]。该工程中聚脲材料的用量超过 2 000 t，防护面积达到 950 000 m²。随后，京沪、京石、石武、沪杭等高铁也陆续采用喷涂聚脲防水层。其中 2009 年修建的京沪高铁全程 1 318 km，全线使用聚脲总量高达 20 284 t。成为聚脲技术自 1986 年在美国问世以来，全世界最大的基础设施聚脲防护工程。

2.2 聚脲在军事领域的应用

常规的环氧树脂、聚氨酯等材料，因耐冲击性、耐磨性等性能一般，且不环保，已不能满足军事领域中防腐、防护等多重要求，聚脲材料将强度与延展性相结合，并且具有强吸能性的同时又有超高的黏附性能，使其与其它材料进行复合的研究成为热点，为我国军事领域开拓了一片崭新的天地^[24]。

目前现有防护装备多针对爆炸瞬间带来的弹道侵彻伤害进行设计，缺少对爆炸带来的冲击波致伤、热辐射致伤的其它致伤因素的针对性设计和多效能耦合的研究。穴胜鹏^[25]设计了新型微纳米夹杂复合聚脲材料 PU-SiO₂ 与 PU-HP 改性头盔，用于抵抗爆炸带来的冲击波致伤。研究结果表明，两种改性聚脲材料对冲击波的防护效果随着粒子含量的提高而提高，对比 PU 材料，PU-SiO₂ 与 PU-HP 在 12 mm 厚度，最高比例夹杂时，其峰值压力分别下降了 8.71% 与 16.77%。颅脑防护实验结果显示，对比裸露头部无防护状态，两种头盔对于额前与颅顶测点的保护效果良好，颅后的保护效果不明显，额前压力的衰减分别降低 44.51% 与 51.74%，加速度峰值衰减分别为 55.80% 与 57.80%。颅顶压力测点，在进行头盔防护后，峰值压力整体明显降低，峰值加速度降低至 40.0 g 以内。

覃尹星^[26]利用聚脲材料的高弹性和强黏附性，将其与轻质高强但抗冲击较弱的玻璃纤维增强复合材料进行复合，对得到的聚脲涂覆玻璃纤维复合板进行了抗冲击性能分析，结果表明，在18 m/s的冲击速度下，背弹面涂覆结构对平头撞击杆的抗冲击防护能力最强；聚脲作为夹层的复合板抗冲击力学性能优于聚脲作为涂覆层的复合板。

现代海战中，舰船和潜艇会遭受爆炸和冲击破坏。于霞^[27]将负泊松比纤维和聚脲进行复合，得到组合性能的聚酯-碳纤维/聚脲复合材料。研究结果表明：

(1) 随着缠绕角减小和直径比增大，材料的断裂能增大；缠绕角5°、直径比9:1、环氧包覆为力学性能和变形情况最佳组合参数，断裂能分别提高了1.6倍、1.4倍和1.1倍。

(2) 最佳组合参数双层编织的复合材料在拉伸至开裂时位移最大，为24.93 mm，承受应变最大为2.513，且拉伸断裂耗能是纯聚脲的2.65倍，有望为舰船用防护材料体系的选型以及舰船抗爆抗冲击功能型防护涂层的结构设计提供参考依据。

2.3 聚脲在汽车领域的应用

随着国家对环境污染整治力度的加强，VOC排放量成为限制汽车行业发展的绊脚石。此外，新能源汽车的核心部件车用动力电池包对碰撞防护要求极高，这就同时要求汽车底盘做到节能降耗和提高防护效果，既要考虑潮湿环境影响强度及刚度，又要抵抗尖锐物体碰撞、刮伤，防止电池因为外力而剧烈燃烧。这些要求均可通过调整具有防水、抗冲击、超黏弹性和滞回特性等复杂的力学性能的配套聚脲涂层做到，并且聚脲涂料适合连续化生产，节省大量能源和空间。

姚学民等^[28]研究了聚脲面漆涂层配套环氧镀锌底漆对汽车底盘的防护效果，在涂膜厚度40 μm时，耐盐雾和耐老化性能达到1 000 h。

王楠等^[29]采用二氧化硅、钛白粉、单层石墨烯和聚天冬氨酸酯聚脲，制备了新能源汽车底盘用防护涂料。研究了防护涂料的力学性能、耐候性、耐盐雾性以及抗石击性等，结果表明：聚天冬氨酸酯聚脲涂层的附着力、力学性能、耐腐蚀性以及抗石击性能优异；加入二氧化硅和钛白粉后，涂层在人工加速老化和耐中性盐雾试验后耐腐蚀性和附着力进一步提高，但拉伸强度和撕裂强度下降；而加入单层石墨烯后，涂层的各项性能均有所改善，尤其是抗石击性。

丁明辉等^[30]采用纳米改性脂肪族聚脲涂料作为公

交车顶面漆，涂料凝胶时间大于25 min，—次性喷涂膜厚达到80 μm不流挂，常温表干时间10~15 min，符合Q/ZZ 21039《各色汽车面漆》中DI型产品的要求，且便于大规模流水线生产，与现有的汽车涂料体系具有良好的配套性及附着力。改性聚脲涂料在公交车顶试用一年，不变色、不粉化，不仅彻底解决了防腐、防水问题，还具有隔热、阻尼降噪的功能。纳米改性脂肪族聚脲涂料因具有优异的物理、化学性能和几乎为零的VOC排放量，在汽车工业必将越来越受到重视。

2.4 聚脲在高端领域的应用

随着生产技术革新和品质优化，聚脲在电子、医疗和航空航天等高端领域应用前景广阔。

线性电介质聚脲聚合物因具有高偶极矩、偶极密度，可保持低介电损耗下的高介电常数，达到高储能密度，又由于制造成本低、介电损耗小、击穿强度高、可靠性高等优点，成为极具发展前景的电能存储材料^[31]。

聚脲中动态受阻脲键的存在使其具有可控的水解性能，因而聚脲干凝胶(Polyu)常用于提供高药物载荷及缓释调节的一种多功能载体，有可能成为经典的聚丙烯酸酯、聚酯或聚氨基酸药物递送纳米系统的有效替代品^[32]。

飞行器要经受各种极端力学应力和严酷的环境条件，聚脲弹性体由于优异的性能适用于航空器和航天器的结构件、零部件及表面防护。同时，其良好的黏附性能，能牢固附着在金属、复合材料等材料的表面，形成一层坚固的保护膜。目前，因为我国对聚脲弹性体材料的研究起步较晚，还存在着强度、抗冲击及导电导热等性能偏低的问题，不能完全满足航空航天领域对材料的严格要求，因此聚脲弹性体未在我国飞行器领域取得广泛应用^[33]。

3 结论

总结了聚脲弹性体的合成、改性以及在各个应用领域的国内外研究进展，重点对改性及在各领域的发展进行了讨论。聚脲材料体系繁多，研究与测试手段各不相同。现有研究获得了一些对聚脲弹性体的基础认知，但国内对聚脲弹性体的研究不够深入，且大多偏向于工程应用，对高端领域的研究涉猎较少，鉴于此，对未来聚脲弹性体的研究提出以下几个方向：

(1) 明确聚脲弹性体结构与性能间的关系，对聚脲微相分离进行定性和定量研究，并形成统一成体系

的表征方法。

(2) 对聚脲体系的研发仍应继续针对不同应用环境、使用期限、附着力等性能要求进行分子结构设计或材料改性，优化聚脲成型工艺过程。

(3) 聚脲弹性体易于加工、高成本效益、可应用范围广，但目前对于聚脲高端领域如电子、航空航天等领域的研究仍处于起步阶段，尚未工业化。

参考文献：

- [1] 郭国吉, 陈彩英, 王向明, 等. 聚脲弹性体防护材料的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2021,34(06):1–20.
- [2] CASALINI R, BOGOSLOVOV R, QADRI S B, et al. Nanofiller reinforcement of elastomeric polyurea [J]. Polymer, 2012, 53 (6):1 282–1 287.
- [3] 刘俊仁, 俞科静, 钱坤等. 聚天冬氨酸酯聚脲的研究进展 [J]. 涂料工业, 2022,52(06):77–82.
- [4] Do S V. Synthesis and Characterization of Polyurea-Polyurea Composite[D]. San Diego State University, 2018.
- [5] 李少杰, 闫军, 杜仕国, 等. 聚脲弹性体微相分离研究及主要进展 [J]. 材料导报, 2020, 34(21):6.
- [6] 龚臣成, 陈艳, 戴兰宏. 聚脲弹性体力学性能与本构关系研究进展 [J]. 力学学报, 2023,55(01):1–23.
- [7] Song J, Liang S, Wang Y, et al. Physical ageing of polyurea elastomers upon water absorption: Molecular dynamics and microphase structures[J].Polymer Degradation and Stability, 2024:110 690.
- [8] 冯永慧. 纳米粒子改性有机硅基聚脲海洋防污材料研究 [D]. 东北电力大学, 2021.
- [9] 王伟烽. 纳米 SiO_2 改性水性聚脲的制备与性能研究 [D]. 南京理工大学, 2020.
- [10] 王镠旸, 叶梦醒, 王姗, 等. 酚醛树脂改性聚氨酯 / 聚脲涂料的制备及其性能研究 [J]. 涂料工业, 2018,48(01):17–21.
- [11] 刘方方, 王镠旸, 刘欣伟, 等. 环氧树脂改性聚脲涂层的制备及性能 [J]. 电镀与涂饰, 2018,37(06):259–262.
- [12] 李灿刚, 王桂刚, 王德威, 等. 硅烷偶联剂改性云母粉及其在聚脲阻尼材料中的应用 [J]. 涂料工业, 2022,52(10):8–13.
- [13] 刘俊仁, 俞科静, 钱坤, 等. 环氧硅油改性聚天冬氨酸酯聚脲的合成及性能研究 [J]. 功能材料, 2021,52(11):11 094–11 099.
- [14] 胡春艳, 黄文杰, 郝同辉, 等. 可自修复高拉伸硅烷封端聚脲弹性体的研制 [J]. 有机硅材料, 2022(001):036.
- [15] 冯明伟. 新型双组分氟改性抗冰拔面漆的研发及应用 [J]. 四川水利, 2021,42(02):29–31+35.
- [16] 张余英. 氟硅改性脂肪族天冬聚脲风电叶片面漆制备及性能 [J]. 涂料工业, 2022,52(07):39–42+47.
- [17] 何金文, 杨清萍, 黄顺礼, 等. 环氧大豆油改性聚天冬氨酸酯的制备与研究 [J]. 涂料工业, 2015,45(08):29–33.
- [18] 王晓涛, 姜瑜, 郭飞, 等. 改性蓖麻油提高喷涂聚脲弹性体耐水性能研究 [J]. 化工新型材料, 2022,50(05):115–117+125.
- [19] 金天红, 毛以卫, 祝自强. 既有体育场看台翻新耐候聚脲地坪施工技术 [C]// 浙江省土木建筑学会. 第 26 届华东六省一市土木建筑工程建造技术交流会论文集 (下). 施工技术, 2020:426–430.
- [20] 任志敏. 仿真冰场发展现状及质量检测鉴别探讨 [J]. 文体用品与科技, 2021(21):58–60.
- [21] 牛长安. 人造仿真冰 [P]. 北京 ;CN106634496B.2019.6.25
- [22] 曹广. 京沪高铁冬季喷涂聚脲防水层施工工艺探讨研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019(30):27+16.
- [23] 望雪林, 柯万春. 聚脲防水涂料在京津城际轨道交通工程中的应用 [J]. 铁道标准设计, 2007.
- [24] Wang D, Yang K, Cheng S, et al. Harsh environment resistible and recyclable thermoplastic polyurea adhesive based on stable and density hydrogen bonds[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 482: 148663.
- [25] 穴胜鹏. 抗爆型聚脲多效耦合防护特性研究 [D]. 山东大学, 2024.
- [26] 覃尹星. 聚脲涂覆玻璃纤维复合板的抗冲击性能研究 [D]. 西南科技大学, 2024.
- [27] 于霞. 负泊松比聚酯 – 碳纤维 / 聚脲复合材料力学损伤行为与机理研究 [D]. 青岛理工大学, 2023.
- [28] 姚学民, 孟昭辉, 李姐, 等. 汽车底盘聚脲涂料防护应用研究 [J]. 天津科技, 2018,45(07):77–79.
- [29] 王楠, 陈阳, 唐玲玲, 等. 新能源汽车底盘防护用聚天冬氨酸酯聚脲的综合性能研究 [J]. 涂料工业, 2023,53(01):51–58.
- [30] 丁明辉, 吴国华. 纳米改性脂肪族聚脲在车辆中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2022,25(05):55–57.
- [31] Qin B, Wang J, An J. Clear Viscoelastic Film Based on Low-Hard-Segment Silicone Polyurea Elastomers for Flexible Display Applications[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024.
- [32] Gabriele A. Pedroza, Lucia H.G.M.C. Macêdo, Ricardo de Oliveira, et al. Cost-efficient polyurea carrier for precise control of an anti-inflammatory drug loading and release[J]. Journal Of Drug Delivery Science And Technology, 2022,76(10),103 744.
- [33] 郭国吉. 航空用多功能弹性体复合材料的制备与性能研究 [D]. 沈阳航空航天大学, 2022.

Research progress of polyurea elastomers

Jin Shuhan¹, Liang Wei²

(1. Daqing Chemical Research Center, Daqing 163000, Heilongjiang, China;

2. Research Institute of PetroChina Daqing Refining and Chemical Company, Daqing 163411, Heilongjiang, China)

Abstract: Polyurea elastomer is a kind of high-performance new polymer material with excellent

properties such as high strength, high toughness, wear resistance, and corrosion resistance, as well as adhesive properties and energy absorption. It has become one of the important materials for achieving efficient and lightweight protection. This article first reviews the synthesis and modification of polyurea elastomer, focuses on introducing its research progress in various application fields, and looks forward to its development prospects.

Key words: polyurea elastomer; synthesis; modification; application field

(R-03)

oo

中国航空胎市场，下一个掘金新蓝海

The Chinese aviation tire market: The next blue ocean for exploration

近日，市场调研机构 IndexBox 发布了一份新报告：《中国飞机轮胎市场分析、预测、规模、趋势和洞察》。该分析全面概述了 2013~2024 年中国飞机轮胎市场情况，并展望至 2035 年。

2035 年规模将突破 66 万条

2024 年，中国飞机轮胎消费总量为 45.4 万条，与上年基本持平。2013~2024 年间，总消费量以年均 +1.7% 的速度增长，趋势相对平稳，个别年份略有波动。飞机轮胎消费量在 2024 年达到峰值，预计短期内将保持增长。

2024 年，中国飞机轮胎市场规模小幅缩减至 2.63 亿美元，较上年下降 4.1%。该数字反映了生产商和进口商的总收入（不含物流成本、零售营销成本及零售商利润，这些已计入最终消费者价格）。

2013~2024 年间，市场价值以年均 +1.1% 的速度增长，趋势总体一致，个别年份波动较为明显。市场价值在 2018 年达到 3.11 亿美元的历史高点，但 2019~2024 年期间消费水平维持在较低位置。

受中国飞机轮胎需求增长驱动，预计未来 10 年市场消费将保持上升趋势。预计市场表现将加速，2024 至 2035 年期间以 +3.5% 的 CAGR 增长，到 2035 年底市场规模预计达到 66 万条。按价值计算，市场预计以 +4.0% 的 CAGR 增长，到 2035 年底市场价值预计达到 4.05 亿美元（名义批发价格）。

产量增、产值降

2024 年，中国生产的飞机轮胎约为 41.4 万条，较上年增长 1.8%。2013~2024 年间，总产量以年均 +2.7% 的速度增长，趋势相对稳定，仅个别年份有较小波动。

增长最快的是 2014 年，产量较上年增长 12%。产量在 2022 年达到 42.6 万条的最高点，但 2023~2024 年未能恢复增长势头。

按价值计算，2024 年飞机轮胎产值按出口价格估算小幅下降至 2.35 亿美元。2013~2024 年间，总产值以年均 +1.9% 的速度增长，趋势显示某些年份存在明显波动。

增长最显著的是 2014 年，增幅达 38%。飞机轮胎产值在 2018 年达到 2.89 亿美元的峰值，但 2019~2024 年期间产值维持在较低水平。

进出口双向收缩

2024 年，中国飞机轮胎进口量下降至 6.1 万条，较上年减少 13.2%。总体来看，进口量呈现明显下降趋势。增长最快的为 2023 年，较上年增长 157%。进口量在 2013 年达到 8.1 万条的峰值，但 2014~2024 年期间进口量维持在较低水平。

按价值计算，2024 年飞机轮胎进口额显著下降至 5 300 万美元。总体而言，进口额呈现小幅下滑趋势。增长最显著的是 2023 年，进口额增长 206%，达到 6 600 万美元的峰值，随后在次年大幅下降。

2024 年，中国飞机轮胎出口量降至 2.1 万条，较 2023 年减少 14.5%。然而总体来看，出口量仍呈现温和增长态势。增长最快的是 2023 年，出口量较上年增长 165%，达到 2.4 万条的峰值，随后在次年收缩。

按价值计算，2024 年飞机轮胎出口额显著下降至 1 100 万美元。然而总体来看，出口额仍呈现可感知的增长。增长最显著的是 2023 年，增幅达 169%，达到 1 400 万美元的峰值，随后在次年明显下降。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)