

粉煤灰在道路混凝土工程中的应用的 研究进展与趋势 ——基于CiteSpace文献计量综述*

王继伟¹,秦泽同¹,徐湘田¹,王威²,党悦³,郭善坤⁴,刘宇航¹

(1. 内蒙古大学交通学院,呼和浩特 010070; 2. 内蒙古天础建设有限公司,内蒙古锡林郭勒 026200; 3. 中交路桥华北工程有限公司,北京 101100; 4. 中国联合网络通信有限公司内蒙古自治区分公司,呼和浩特 010050)

摘要:粉煤灰是燃煤电厂产生的大宗固废,在“双碳”战略目标下,大掺量粉煤灰混凝土可实现固废资源化利用与低碳道路系统化协同发展。本研究基于中国知网数据库,检索并筛选出2000—2024年1453篇核心文献作为样本,运用CiteSpace软件进行文献计量和可视化分析,系统揭示了粉煤灰基混凝土及其在道路应用领域的热点分布与研究趋势。结果表明,我国粉煤灰基混凝土研究历经了“基础探索—技术突破—深化整合”3个阶段,研究热点集中于配合比设计、力学性能和耐久性能等方向,当前研究趋向多材料协同效应与材料配比优化,重点强化极端环境下性能调控机制,推动粉煤灰基混凝土在软弱地基与寒区路基等复杂场景的高附加值应用。

关键词:粉煤灰混凝土; 道路工程; CiteSpace; 文献计量; 力学性能; 耐久性

中图分类号:U414 **文献标志码:**A

我国能源结构长期呈现“富煤、贫油、少气”的特征,煤炭作为基础性能源持续主导电力供应体系。国家统计局长期统计结果表明(图1),我国煤炭消费量从2000年13.57亿t上升到2023年44.82亿t。根据相关测算方法,每燃烧1t标准煤会产生约138kg的粉煤灰^[1]。随着煤炭消费量增加,粉煤灰年产量也同步上升^[2]。相关数据表明,全球火电行业每年排放粉煤灰超过5亿t^[3]。粉煤灰累积堆存会引发土地侵占、重金属渗滤和扬尘污染等环境风险^[4-6],其高效资源化利用已成为推动“双碳”战略实施的重要环节。

将粉煤灰作为矿物掺合料和主体基料大掺量地加入混凝土中(下文简称粉煤灰混凝土),是提升其资源化利用效率的重要途径。研究表明,粉煤灰的掺入能有效降低水化热,减少温度裂缝的形成,显著改善混凝土的抗裂性能^[7-9]、抗渗性^[10-11]及和易性^[12]等关键性能指标,并可以提升其后期强度与微观结构性能,为在道路工程中的规模化应用奠定了技术基础。道路工程作为基础设施建设的关键领域,为粉煤灰混凝土的大宗消纳与性能发挥提供了重要场景。然而,尽管粉煤灰混凝土的技术效益显著,但其在道路工程中的实际利用率在国家和地区间存在显著差异。由图2可知,粉煤灰在道路工程中的利用率呈现显著地域分化:发达国家中,美国、日本及欧盟均突破10%,而我国与印度还不足10%,揭示了我国粉煤灰在道路应用相关研究方面仍存在提升空间。

* 收稿日期:2025-09-09; 修回日期:2025-11-06

基金项目:内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2023YFDZ0032);国家自然科学基金青年科学基金项目(42201143);内蒙古自治区第一批“英才兴蒙”工程团队项目(2025TEL01)

作者简介:王继伟(1992—),男,内蒙古包头人,副教授,博士。主要从事固废材料、土木工程和路基路面等研究。E-mail:wangjiwei@imu.edu.cn

通信作者:徐湘田(1983—),男,湖南湘潭人,教授,博士。主要从事固废资源化利用和寒区工程病害防治等研究。E-mail:jtxxt@imu.edu.cn

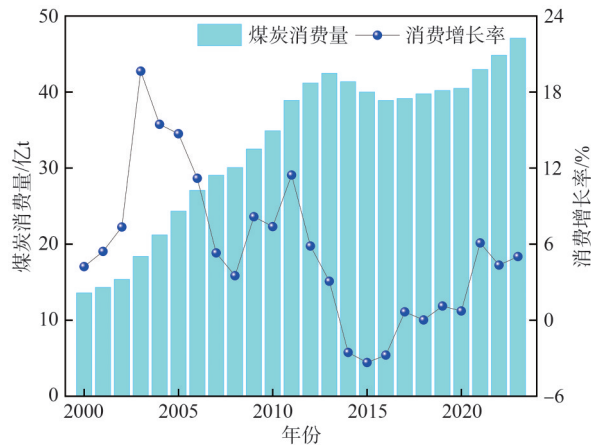
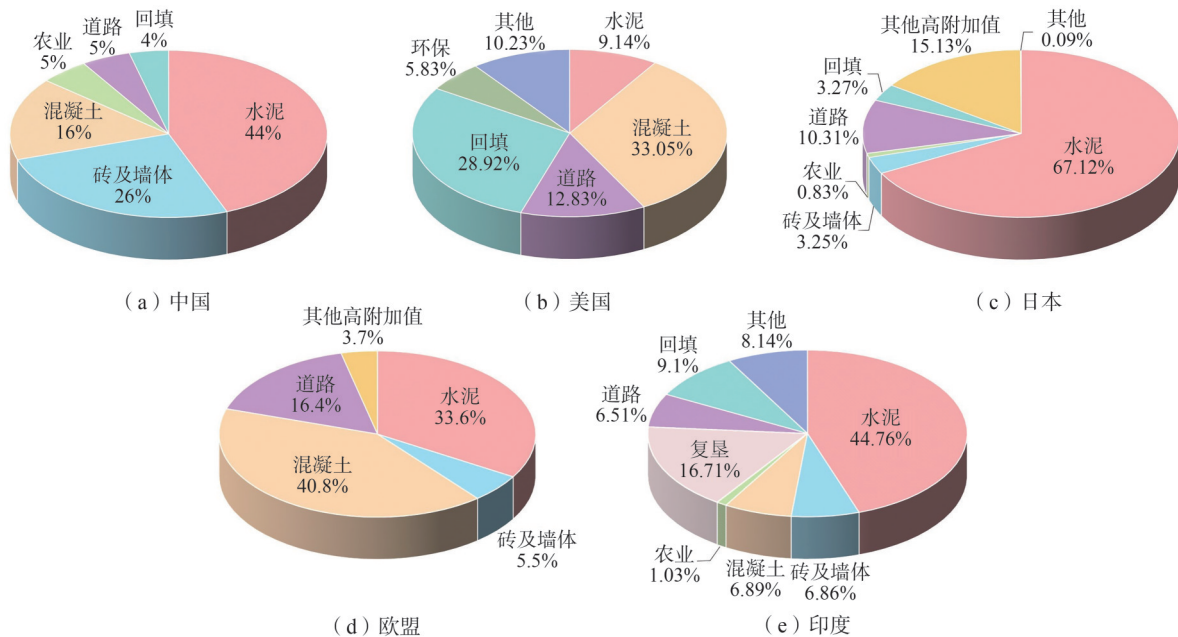


图 1 2000—2023 年我国煤炭年消费量和增长率示意图

Fig. 1 Schematic diagram of China's annual coal consumption and growth rate from 2000 to 2023

图 2 各主要国家及地区粉煤灰综合利用比例^[13]Fig. 2 Comprehensive utilization rates of fly ash in major countries and regions^[13]

近年来,国内围绕粉煤灰混凝土已积累了大量的研究成果,但研究焦点分散,缺乏对整体知识结构与演进脉络的系统性梳理。传统的文献综述方法难以客观、量化地揭示该领域的研究进展与发展趋势。为系统把握该领域的研究态势,本研究采用文献计量学方法,运用 CiteSpace 可视化分析软件,通过构建发文量统计图、作者与机构合作共现图谱以及关键词共现、聚类和突现图谱,对我国 2000—2024 年间粉煤灰混凝土在道路应用方面的学术成果进行系统性梳理。其中,作者与机构合作网络图谱展示了粉煤灰工程应用领域的核心研究力量及其空间分布特征;关键词共现、聚类和突现图谱阐明了粉煤灰混凝土及其在道路应用方面的发展趋势与应用前景,以期为我国拓展粉煤灰作为道路材料的资源化利用途径提供参考。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

以中国知网(CNKI)学术期刊数据库为检索数据库,设置高级检索条件,主题为粉煤灰混凝

土,研究层次为工程应用,文献类型为期刊论文,来源类别为SCI来源期刊、EI来源期刊、北大核心、CSSCI和CSCD,时间年限为2000年1月1日至2024年12月31日。通过检验与筛查,排除与研究主题无关的和重复性的文献,最终获得1453篇有效文献作为本研究的样本集。

1.2 研究方法

采用综合CiteSpace文献计量法^[14]和可视化分析法,基于CiteSpace v6.3.R1软件对CNKI数据库中的有效文献开展分析,CiteSpace软件具体操作流程如图3所示。文献以Refworks格式导出后存储至Data文件夹,将时间范围设定为2000年1月—2024年12月,时间切片选定为1,节点类型选择作者、机构、关键词。通过知识图谱的可视化呈现,对作者与机构合作共现图谱以及关键词共现、聚类 and 突现图谱进行可视化调整,最后对知识图谱进行结果分析。

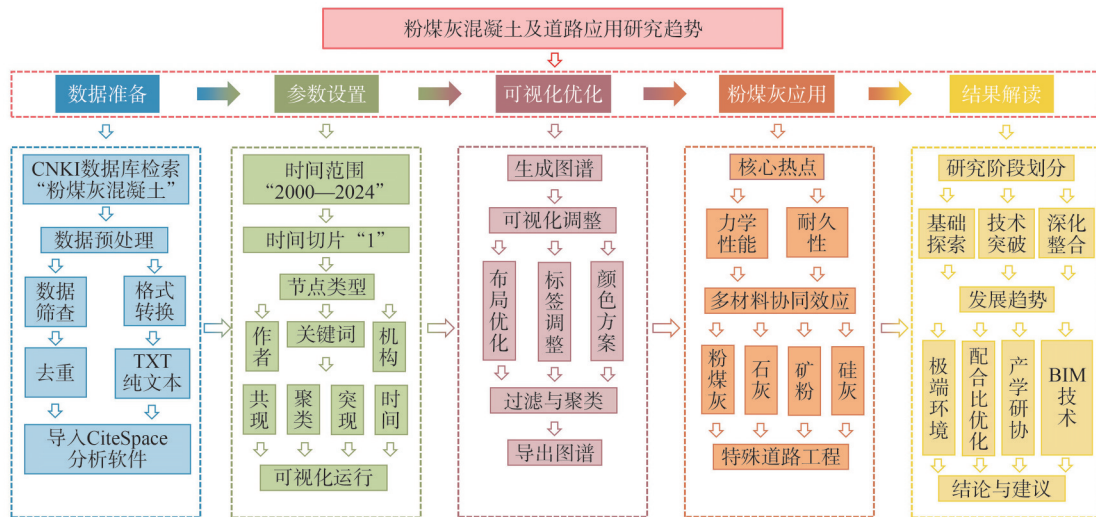


图3 基于CiteSpace的文献计量与可视化分析流程图

Fig. 3 Flowchart of bibliometric and visualization analysis based on CiteSpace

2 文献可视化结果分析

2.1 文献计量分析

2.1.1 文献年发文量分析

发文量能够表征特定时段内某学科领域的产出规模,基于文献时序分布的量化分析,构建中国知网数据库2000—2024年间粉煤灰混凝土的文献数量时序分布模型。由图4可知,国内粉煤灰混凝土研究呈现3个阶段:第一阶段,2000—2004年为探索阶段,文献数量有限,增长缓慢,研究集中于粉煤灰混凝土的基础性能与工程应用;第二阶段,2005—2020年为快速发展阶段,文献数量显著增加且呈波动式增长,该阶段受道路建设需求与国家固废利用政策推动,研究重点转向耐久性、力学性能及复合材料的协同效应,并注重水泥替代与成本控制;第三阶段,2021—2024年为稳定深化阶段,发文量较第二阶段有所减少,研究更注重粉煤灰的资源化利用与高附加值开发,方向趋于多学科交叉与微观结构解析。总体而言,我国粉煤灰混凝土研究遵循“基础探索—技术突破—深化整合”的演进路径,在技术与政策双轮驱动下,实现了工程应用与生态效益的协同提升。

2.1.2 文献作者统计分析

作者合作共现图谱以作者为节点,节点直径与作者产出规模正相关,连线表明作者之间的合作关系。如图5所示,网络节点有290个,连线有253条,网络整体密度为0.006,说明目前已形成一定数量的合作关系,仅有少部分作者之间存在一定程度的合作关系,而大部分作者之间的交流相对较少,呈现“内聚性强、外联性弱”的显著特征。由图5可知,核心合作群体已形成一定的规模,主要围

绕孙伟、周士琼和牛荻涛等高产作者形成区域性合作网络。总体而言,团队内部合作关系较多,但不同研究团队之间合作交流较少。

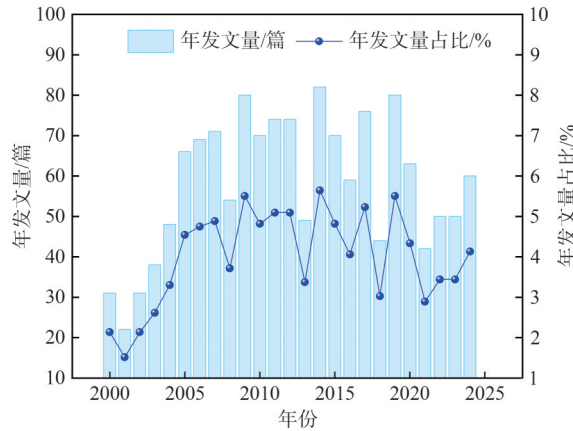


图 4 2000—2024 年发文量统计图

Fig. 4 Statistics of published articles from 2000 to 2024

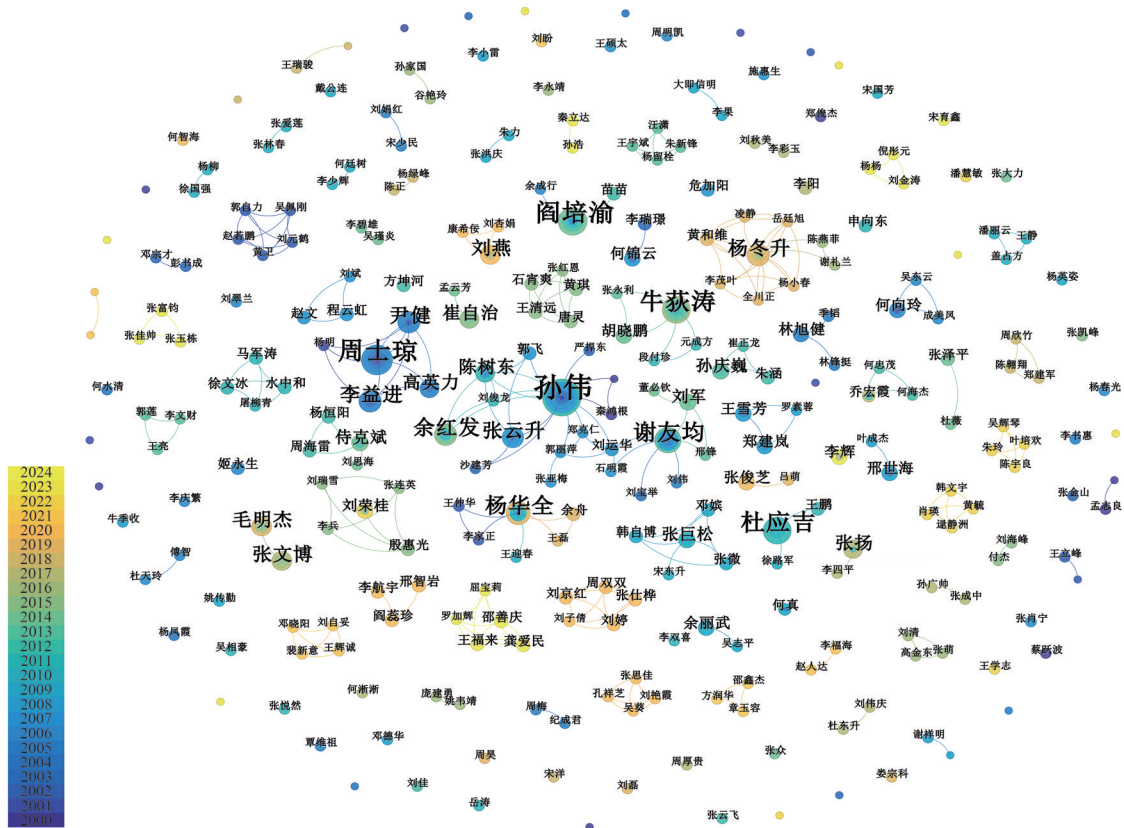


图 5 作者合作关系共现图谱

Fig. 5 Author collaboration co-occurrence map

2.1.3 文献机构统计分析

机构合作共现图谱以机构为节点,节点直径反映学术产出规模,连线表明机构之间的合作关系。在图 6 中,网络节点有 237 个,连线有 57 条,网络整体密度为 0.002,表明机构间合作关系较弱。从图 6 可以看出,2000—2024 年间我国该领域研究力量分布呈现高校主导特征,不同机构在学术方向和技术路径上呈现区域差异。其中,中南大学土木建筑学院(发文量为 28 篇)与宁夏大学土木与水

的文献采用 LLR(Log-likelihood ratio)算法进行聚类分析,聚类模块值和平均轮廓值分别为 0.3624 和 0.7391,均大于临界值,分析结果可信度满足标准。该研究领域的文献关键词聚类标签包括粉煤灰、抗压强度、混凝土、强度、力学性能、耐久性、冻融循环和矿粉,如表 2 所示。其中,聚类#0、#2 和#7 揭示了矿物掺合料可增强混凝土抗冻性、抗渗性及抗氯离子侵蚀能力^[16],适用于冻融和盐渍地区道路的建设;聚类#1 和#3 通过降低水胶比可提升路面抗压强度,适应重载与温变环境^[17];聚类#4 和#5 采用多元掺合料协同与优化配合比设计,可提升道路的综合性能;聚类#6 强调优化养护条件与龄期管理是提升粉煤灰混凝土冻融耐久性的关键因素^[18-19]。总体而言,研究趋势以性能提升、多材料叠加和复杂环境为核心,推动道路工程向高性能化与可持续发展迈进。

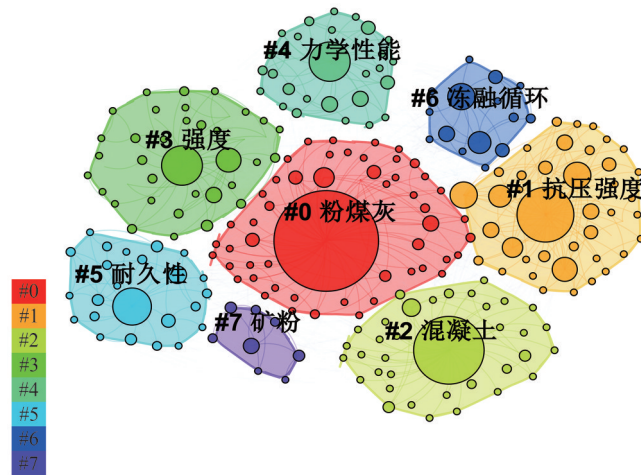


图8 关键词聚类图谱

Fig. 8 Keyword clustering map

表2 前8位关键词聚类情况

Table 2 Top 8 keywords clustering results

聚类 ID	频次	轮廓值	聚类标签	主要关键词
0	52	0.725	粉煤灰	粉煤灰、硅粉、抗冻性、抗渗性、粉煤灰混凝土
1	40	0.798	抗压强度	抗压强度、水胶比、混凝土、抗折强度、正交试验
2	36	0.613	混凝土	混凝土、氯离子、水化、绝热温升、渗透
3	34	0.863	强度	强度、碳化、膨胀剂、抗渗性能、赤泥
4	28	0.657	力学性能	力学性能、耐久性、抗冻性能、石灰石粉、工作性
5	25	0.649	耐久性	耐久性、应用、硫酸盐、机理、复掺
6	15	0.768	冻融循环	冻融循环、试验研究、性能、龄期、脱硫石膏
7	8	0.943	矿粉	矿粉、硫酸钠、养护条件、氯离子扩散系数、掺合料

2.2.3 关键词突现分析

关键词突现分析旨在通过识别特定时段内引用频率显著上升的关键词,来揭示研究热点的演变趋势与规律。基于突现起始时间,对排名前15的关键词突现进行分析,结果如图9所示,粉煤灰混凝土研究呈现出明显的阶段性特征。2005年之前,研究以“耐久性”“应用”“抗渗性”关键词为主,聚焦于材料基础性能优化。通过利用粉煤灰的微集料效应与火山灰活性的协同作用,旨在改善混凝土水化热特性与和易性,进而推动其在工程中的广泛应用。2005—2013年,随着粉煤灰细度指标的放宽,研究重点转向“配合比”“矿渣”“水胶比”等,强调通过多元固废协同优化配合比,发挥不同材料的“协同效应”^[20-21]。2013—2020年,伴随粉煤灰综合利用政策的推进,研究关注点扩展至“冻融循环”“抗

压强度”“碳化深度”等,反映出对极端环境下粉煤灰混凝土长期耐久性与早期性能的重视。2020 年至今,在“十四五”固废资源化政策引导下,研究以关键词如“抗折强度”“微观结构”“力学性能”为主,凸显出研究向微观机理与多学科交叉方向深化,通过微观结构阐释性能演变机制^[22-23]成为当前研究的前沿方向。

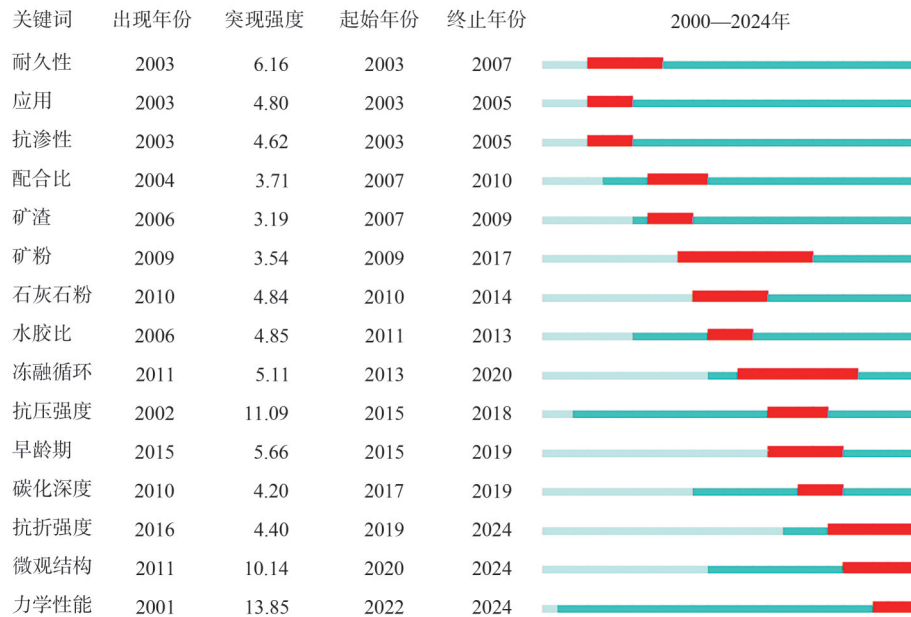


图 9 前 15 位关键词突现图谱

Fig. 9 Top 15 keywords emergence map

3 粉煤灰混凝土及其在道路应用方面的发展趋势

本文基于 CiteSpace 可视化分析工具,系统分析了 2000—2024 年我国粉煤灰混凝土及其在道路应用的研究进展,提炼出当前粉煤灰混凝土在道路工程规模化应用中仍面临以下关键问题。首先,现有研究偏重短期宏观性能,缺乏对粉煤灰混凝土微观结构在荷载-环境长期耦合作用下性能退化机制与寿命预测的系统认识,制约了其在冻融和盐蚀等极端条件下的工程适用性;其次,多组分固废体系的协同设计存在困难,粉煤灰与矿渣、硅灰等组分的复合效应复杂,难以实现从材料设计到性能输出的精准调控;此外,实验室尺度下优化的材料性能,在实体道路结构中的可靠性与适用性仍面临挑战,亟需建立从材料至构件再到结构体系的跨尺度性能表征与设计方法。在未来的研究中,如图 10 所示,我国粉煤灰混凝土在道路工程领域的发展趋势将主要包括以下 4 个方面。

(1) 提升路基工程中的力学性能和耐久性。针对路基材料的特殊需求,通过调控水胶比、优化粉煤灰掺量和复合使用外加剂^[24-25],提高混凝土的强度和抗冻融能力。重点研究冻融循环和硫酸盐侵蚀等恶劣环境下粉煤灰混凝土的损伤机制及防护措施。

(2) 增加矿物掺合料。利用粉煤灰与矿渣、硅灰等掺合料的协同水化效应,优化微观结构,提升混凝土在冻融与氯离子侵蚀等条件下的耐久性,拓展其在冻土区及盐碱地带等特殊场景的应用。

(3) 配合比优化设计方法。配合比优化设计方法朝着精细化、智能化方向发展,通过正交试验法与人工智能算法的结合,利用正交试验方法获得的数据,为人工智能算法提供基础数据和模型^[26-28],提升混凝土性能预测精度与设计效率。

(4) 拓展粉煤灰混凝土在特殊道路工程中的应用。针对软基、冻土与盐渍土等复杂条件^[29-31],对特殊工程环境和结构类型,明确活性激发机制与掺合料复配等关键参数,结合建筑信息模型(Build-

ing information modeling, BIM)优化结构设计与施工工艺,形成从材料设计到工程落地的一体化系统。

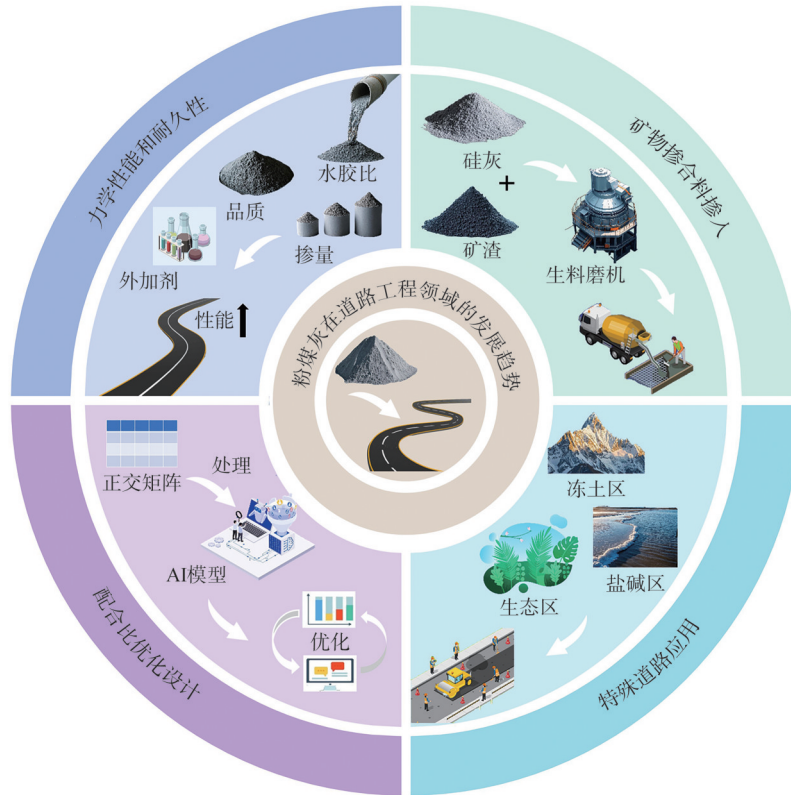


图10 粉煤灰在道路工程领域的应用前景

Fig. 10 Application prospects of fly ash in the field of road engineering

4 结语

本研究通过文献计量与可视化分析,揭示了国内粉煤灰混凝土道路应用的动态发展轨迹,发文量时序分析将其划分为探索、快速发展与稳定深化3个阶段,呈现出“基础探索—技术突破—深化整合”的演进路径,逐步从基础性能验证转向多学科交叉融合与高附加值应用。

关键词图谱分析表明,该领域已形成较为完整的知识体系,研究主线长期集中于材料性能优化,近期则延伸至材料设计与微观结构表征。“力学性能”“耐久性”等高频、高中心性关键词构成网络核心。突现分析进一步表明,研究前沿呈现清晰的演进路径,从早期关注“耐久性”“抗渗性”等宏观性能,到中期聚焦“矿渣”“水胶比”等配合比参数设计,再发展为深入研究“冻融循环”复杂环境下的耐久性及其“微观结构”机理。这种演进表明该领域的研究范式已发生转变,从单一材料在简单环境下的性能评估,转向探究多材料复合体系的协同效应,并致力于揭示其在复杂环境荷载下强度与耐久性的协同调控机制。基于此,未来需重点突破极端环境下材料性能调控机制,开发智能化配比优化模型,并拓展粉煤灰混凝土在软地基、季节性冻土区及盐碱地带等特殊场景的应用,针对特殊工程环境和结构类型,需明确材料制备参数以及制定详细施工工艺。

尽管本研究通过文献计量方法系统揭示了粉煤灰混凝土在道路应用的研究趋势,但仍存在一定的局限性。在数据方面,文献均来源于中国知网,虽反映国内研究态势,但未涵盖国际成果,结论的普适性有待进一步验证。在内容方面,本文主要基于历史文献梳理,对未来前沿的预测能力有限。随着技术发展,后续研究需整合多源数据,加强动态追踪,以提升研究的全面性与前瞻性。

参考文献:

- [1] 王涵. 粉煤灰基多孔保温材料制备与表征[D]. 淄博: 山东理工大学, 2016.
- [2] TANG Z H, MA S H, DING J, et al. Current status and prospect of fly ash utilization in China[C]//2013 Proceedings of World of Coal Ash Conference. Lexington, KY: World of Coal Ash, 2013: 22-27.
- [3] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36(3): 327-363.
- [4] HE P Y, ZHANG X M, CHEN H, et al. Waste-to-resource strategies for the use of circulating fluidized bed fly ash in construction materials: A mini review[J]. Powder Technology, 2021, 393: 773-785.
- [5] LONG K, LI B Y, MA J Y, et al. Ecological risk analysis of leakage caused by coal-based solid waste backfill slurry bleeding: An experimental study[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 494: 144993.
- [6] ŠLOSÁR D, PUZDER M. Alternative storage of ashes to reduce the impacts to the environment[C]//LITVINENKO V. XVIII International Coal Preparation Congress. Cham: Springer, 2016: 667-671.
- [7] WANG S Z, LLAMAZOS E, BAXTER L, et al. Durability of biomass fly ash concrete: Freezing and thawing and rapid chloride permeability tests[J]. Fuel, 2007, 87(3): 359-364.
- [8] KHALIQ W, KODUR V. Behavior of high strength fly ash concrete columns under fire conditions[J]. Materials and Structures, 2013, 46(5): 857-867.
- [9] SAHA A K. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete[J]. Sustainable Environment Research, 2018, 28(1): 25-31.
- [10] 王建东, 吕萌, 章玉容, 等. 粉煤灰混凝土渗透相关性的试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(2): 217-221.
- [11] NATH P, SARKER P. Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1149-1156.
- [12] 鲁丽华, 潘桂生, 陈四利, 等. 不同掺量粉煤灰混凝土的强度试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(1): 107-111.
- [13] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 31-39.
- [14] HOU J H, YANG X C, CHEN C M. Emerging trends and new developments in information science: A document co-citation analysis(2009—2016)[J]. Scientometrics, 2018, 115(2): 869-892.
- [15] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2005, 57(3): 359-377.
- [16] DING P X. The influence of materials parameters on chloride diffusion coefficient in concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 643(1): 012050.
- [17] KUMAR S, TAUHEED R. Effect of fly ash on strength of pavement quality concrete[J]. International Journal of Creative Research Thoughts, 2022, 10(6): 874-901.
- [18] YUAN Z, JIA Y M, XU J M. Study on the improvement effect of polypropylene fiber on the mechanical properties and freeze-thaw degradation performance of high fly ash content alkali-activated fly ash slag concrete[J]. Polymers, 2025, 17(2): 175.
- [19] ZHOU E Q, TANG S, JING T X, et al. Experimental research on the performance of acid-activated geopolymer and its application in dredged soil stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2025, 474: 141165.
- [20] DUAN S Y, LIAO H Q, CHENG F Q, et al. Investigation into the synergistic effects in hydrated gelling systems containing fly ash, desulfurization gypsum and steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 1113-1120.
- [21] LU C Y, SHEN Q, ZHANG Z G, et al. Synergistic effect of waste steel slag powder and fly ash in sustainable high strength engineered cementitious composites: From microstructure to macro-performance[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 113: 114039.
- [22] 随春娥, 乔丹, 杨文军. 水胶比和矿物掺合料对硬化水泥浆体微观孔隙特征参数的影响[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 412-420.
- [23] ANWAR H, AHMED S F U, PRABIR S, et al. Nano- and micro-scale characterisation of interfacial transition zone (ITZ) of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano SiO₂ and nano CaCO₃[J]. Construction and Building Materials, 2020, 269: 121311.

- [24] ZHANG Y D, ZHANG H J, LI H Y, et al. Nonlinear tensile creep behavior and model improvement of early-age fly ash concrete incorporating temperature-control admixture[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 113: 114193.
- [25] RATTANASAK U, PANKHET K, CHINDAPRASIRT P. Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2011, 18(3): 364-369.
- [26] LI Y, SHEN J L, LIN H, et al. Optimization design for alkali-activated slag-fly ash geopolymer concrete based on artificial intelligence considering compressive strength, cost, and carbon emission[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 75: 106929.
- [27] SHARIATI M, MAFIPOUR M S, MEHRABI P, et al. Prediction of concrete strength in presence of furnace slag and fly ash using hybrid ANN-GA(Artificial neural network-genetic algorithm)[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 25(2): 183-195.
- [28] SHOBEIRI V, BENNETT B, XIE T Y, et al. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01832.
- [29] ZHANG C, ZHANG Y, ZHU Z D, et al. Applicability and chemical mechanism of lightweight cement composite containing fly ash and sand for sustainable Embankment[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443: 137735.
- [30] HU F Z, ZHANG S J, LIU J, et al. Performance test of road fly ash concrete under temperate climate and high salt environment in Asia[J]. *AIMS Materials Science*, 2025, 12(5): 928-943.
- [31] NING Z J, LI H X, NIE K J, et al. The performance evolution characteristics of in-situ concrete at the permafrost regions[J]. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, 2024, 39(6): 1534-1540.

Progress and Trends in Research on Fly Ash Application in Road Concrete Engineering: A CiteSpace Bibliometric Review

WANG Jiwei¹, QIN Zetong¹, XU Xiangtian¹, WANG Wei²,
DANG Yue³, GUO Shankun⁴, LIU Yuhang¹

(1. *Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

2. *Inner Mongolia Teamcheer Construction Co., Ltd, Xilingol 026200, China;*

3. *Road & Bridge North China Engineering Co., Ltd, Beijing 101100, China;*

4. *Inner Mongolia Branch, China United Network Communications Co., Ltd, Hohhot 010050, China)*

Abstract: Fly ash is a bulk solid waste produced by coal-fired power plants. Under the “dual carbon” strategy, high-volume fly ash (HVFA) concrete can achieve both the resource utilization of solid waste and the systematic coordinated development of low-carbon roads. Based on the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) database, were 1 453 core papers from 2000 to 2024 as samples were. Using CiteSpace software for bibliometric and visualization analysis, the hotspots and research trends of fly ash-based concrete and its applications in road construction were systematically revealed. The results show that research on fly ash-based concrete in China has gone through three stages: “basic exploration—technological breakthroughs—deep integration”. Research hotspots focus on mix design, mechanical properties, and durability. Current studies tend to emphasize multi-material synergy and optimization of material ratios, with a focus on mechanisms for performance regulation under extreme conditions, promoting high-value applications of fly ash-based concrete in complex scenarios such as weak foundations and cold region roadbeds.

Key words: fly ash concrete; road engineering; CiteSpace; bibliometric; mechanical property; durability