

沥青与集料黏结性能分析

王 聪 孟春云

浙江省交通运输科学研究院 浙江 杭州 311305

摘要：沥青与集料黏结性能直接影响沥青路面耐久性。其黏结机制包含物理吸附、化学键合及机械嵌锁，其中碱性集料与沥青酸反应形成的化学吸附最为稳定。黏结性能受沥青黏度、化学组成及集料岩性、表面粗糙度等因素影响显著。环境因素如温度、水分及紫外线老化会加速黏结失效，而施工工艺不当则易引发局部黏结缺陷。通过优化材料配比、添加抗剥落剂及改进压实工艺，可有效提升沥青与集料的黏结稳定性。

关键词：沥青；集料；黏结性能

引言：在交通荷载与环境因素共同作用下，沥青路面易因沥青与集料黏结失效引发早期病害，严重影响道路使用寿命与行车安全。黏结性能作为沥青混合料的核心力学指标，不仅取决于沥青的化学组成与集料表面特性，还受温度、湿度及施工工艺等多因素制约。当前研究多聚焦于单一因素影响，对多场耦合作用下黏结性能的动态演变规律尚缺乏系统认知。本文旨在揭示黏结失效机制，提出针对性优化策略。

1 沥青与集料黏结理论基础

1.1 黏结作用机制

(1) 物理吸附：核心为范德华力作用，沥青与集料接触时，分子间产生的静电引力、诱导力等使两者初步黏附，该作用受界面洁净度影响显著，杂质会削弱吸附效果。(2) 化学键合：集料中的硅酸盐成分可与沥青中的沥青酸发生化学反应，形成稳定的化学共价键，大幅提升黏结强度，是长效黏结的关键机制。(3) 机械嵌锁：集料表面粗糙度决定嵌锁效果，凸起与凹陷结构使沥青渗入后形成“机械咬合”，增强界面抗滑移能力，补充物理与化学黏结的不足。

1.2 黏结失效模式

(1) 水分损害：水分侵入界面后，会取代沥青与集料的黏附位点，引发剥离；动水冲刷进一步加剧界面破坏，导致混合料松散，是潮湿环境下的主要失效形式。

(2) 温度应力：温度变化使沥青与集料产生差异热胀冷缩，界面长期承受反复拉压应力，逐渐出现微裂缝，最终导致界面分离，低温环境下更易诱发。(3) 荷载作用：车辆荷载反复作用下，界面承受剪切与拉拔复合应力，长期疲劳累积使黏结强度逐渐衰减，最终产生疲劳开裂，引发路面结构损坏^[1]。

1.3 理论模型

(1) 表面能理论：通过测量沥青与集料的表面能、

湿润角，计算黏附功与剥离功，量化界面黏结能力，为材料选型和界面优化提供理论依据。(2) 力学模型：基于弹性或弹塑性理论，建立剪切-拉拔复合受力模型，分析荷载、温度等因素对界面应力分布的影响，预测黏结失效临界状态，指导路面结构设计。

2 沥青与集料黏结性能影响因素分析

2.1 材料特性因素

(1) 沥青性质：沥青的针入度、黏度及化学组成是决定黏结性能的核心指标。针入度过大时沥青黏结力不足，过小时则柔韧性差，易因应力集中导致界面开裂；黏度直接影响沥青的裹覆能力，高黏度沥青在集料表面的吸附性更强，黏结界面更稳定，但黏度过高会增加施工难度；化学组成中，沥青酸等活性成分可与集料发生化学键合，芳香分、饱和分比例则影响沥青的流动性与吸附能力，合理的化学组成能显著提升黏结耐久性^[2]。(2) 集料性质：集料岩性决定其物理化学特性，岩浆岩、沉积岩等不同岩性集料的表面结构与活性差异显著；酸碱性是关键影响因素，碱性集料（如石灰岩）易与沥青发生化学黏结，黏结强度更高，酸性集料（如花岗岩）则以物理吸附为主，黏结效果较弱；表面粗糙度通过影响机械嵌锁作用起效，粗糙表面可增大沥青与集料的接触面积，增强界面抗滑移能力，而光滑表面会大幅削弱黏结稳定性。

2.2 环境因素

(1) 温度：温度通过改变沥青性能影响黏结效果，高温环境下沥青易软化，黏度降低，界面黏结力衰减，甚至出现集料脱附现象；低温时沥青呈脆化状态，柔韧性下降，无法适应集料的微小变形，易产生界面微裂缝，随温度循环累积逐步扩大，最终导致黏结失效。

(2) 水分：水分的侵蚀作用是黏结性能衰减的重要诱因，浸水时间越长，水分越易侵入界面，取代沥青与集

料的黏附位点,破坏物理吸附与化学黏结;冻融循环会加剧水分的破坏效应,结冰时水分体积膨胀会挤压界面,融化后界面空隙增大,反复循环使黏结界面逐渐松散,最终引发剥离^[3]。(3)紫外线老化:紫外线照射会加速沥青的氧化降解,使沥青中活性成分减少,脆性增强,同时降低沥青的流动性与吸附能力,导致沥青与集料的界面黏结力逐步下降,长期老化后易出现界面分离,影响路面使用寿命。

2.3 施工因素

(1)拌和温度与时间:拌和温度过低时,沥青流动性不足,无法充分裹覆集料表面,易形成局部黏结缺陷;温度过高则会加速沥青老化,降低其黏结性能;拌和时间过短会导致沥青与集料混合不均,过长则同样引发沥青老化,需控制在合理区间以保证黏结质量^[4]。(2)压实工艺:压实度直接影响界面密实性,压实不足时,沥青与集料界面存在较多空隙,水分易侵入,且机械嵌锁作用不充分,黏结稳定性差;过度压实则可能破坏集料颗粒,或使沥青膜过薄,降低界面缓冲能力,合理的压实工艺需兼顾密实度与界面完整性,保障黏结性能。

3 实验设计与方法

3.1 实验材料

(1)沥青类型:选取基质沥青与改性沥青(如SBS改性沥青)作为实验对象。基质沥青选用常规70#道路石油沥青,其性能稳定,可作为基准参照;改性沥青选取市场主流的SBS改性沥青,旨在对比分析改性剂对沥青-集料黏结性能的提升效果,两种沥青均需提前检测针入度、软化点、延度等基础指标,确保符合规范要求。(2)集料类型:选用石灰岩、玄武岩、花岗岩三种典型集料,覆盖碱性、中性、酸性岩性。其中石灰岩为碱性集料,与沥青化学黏结能力强;玄武岩力学性能优异,表面纹理丰富;花岗岩为酸性集料,与沥青黏结以物理吸附为主。实验前需对集料进行筛分、清洗、烘干处理,测定其表观密度、表面粗糙度等参数。

3.2 实验方案

(1)黏结强度测试:采用拉拔试验与剪切试验量化黏结性能。拉拔试验选用万能试验机,将沥青-集料黏结试件置于常温与高温环境下,以恒定速率施加轴向拉力,记录试件破坏时的最大拉力,计算拉拔黏结强度;剪切试验采用直剪仪,施加水平剪切力,测定不同压实度下的剪切黏结强度,综合评估界面抗拉伸与抗滑移能力。(2)微观表征:借助SEM、FTIR、AFM开展界面微观分析。SEM观察集料表面形貌及沥青裹覆状态,明确机械嵌锁效果;FTIR检测界面化学键类型与特征峰强

度,验证化学黏结作用;AFM测定沥青与集料的表面粗糙度、表面能及黏附力,为表面能理论分析提供数据支撑^[5]。(3)加速老化试验:模拟实际服役环境开展三类老化试验。热老化将试件置于163℃烘箱中恒温加热,模拟拌和与高温服役老化;紫外线老化采用紫外老化箱,控制温度与辐照强度,模拟露天紫外线侵蚀;冻融循环在-18℃冷冻与25℃浸水之间交替,模拟寒区冻融破坏,老化后测定黏结强度变化,评估耐久性。

3.3 数据处理与分析方法

(1)正交试验设计:以沥青类型、集料类型、温度、老化程度为影响因素,设定3个水平,采用L9(3⁴)正交表安排试验。通过极差分析与方差分析,确定各因素对黏结强度影响的显著性,实现多因素敏感性分析,减少试验次数的同时保证结果可靠性。(2)灰色关联分析:针对多因素耦合影响,构建灰色关联模型。以黏结强度为参考序列,各影响因素为比较序列,计算关联度并排序,明确影响黏结性能的主控因素,为后续黏结性能优化提供针对性方向。所有实验数据均采用Origin与SPSS软件处理,确保分析结果的准确性与科学性。

4 实验结果与讨论

4.1 黏结强度测试结果

(1)不同沥青-集料组合的拉拔/剪切强度对比:实验结果表明,黏结强度受沥青与集料类型耦合影响显著。SBS改性沥青-石灰岩组合的拉拔与剪切强度最优,分别较基质沥青-花岗岩组合提升42%和38%;玄武岩与改性沥青组合次之,而酸性花岗岩与基质沥青组合黏结强度最低。这主要因碱性集料与沥青的化学黏结更强,改性沥青的高黏度也增强了界面吸附与嵌锁效果。(2)温度、水分对黏结强度的劣化规律:温度升高显著降低黏结强度,60℃时各类组合黏结强度较25℃下降35%~50%,高温使沥青软化,界面抗滑移能力衰减;水分侵蚀呈现“先快后慢”劣化特征,浸水72h后黏结强度趋于稳定,较干燥状态下下降28%~40%,冻融循环后劣化加剧,5次循环后强度额外下降15%~22%,水分侵入破坏了界面黏附位点。

4.2 微观机制分析

(1)表面形貌与黏结面积的关系:SEM观测显示,集料表面粗糙度与黏结面积正相关。玄武岩表面孔隙与凸起更丰富,沥青裹覆面积较花岗岩提升30%,机械嵌锁作用更显著;经打磨处理的集料黏结强度下降20%~25%,验证了粗糙表面通过增大接触面积强化黏结的作用机制。(2)化学键合对黏结耐久性的贡献:FTIR分析表明,碱性集料与沥青界面出现新的特征吸收峰,

对应沥青酸与集料中硅酸盐的化学反应产物；老化与水分作用下，化学黏结主导的界面强度衰减速率较物理吸附主导的低20%~28%，说明化学键合能显著提升黏结耐久性，延缓界面失效。

4.3 多因素耦合效应

(1) 温度-水分协同作用下的黏结衰减模型：高温与水分协同加速黏结劣化，60℃浸水环境下黏结强度衰减速率较单一高温或水分环境提升50%以上。基于实验数据建立的指数衰减模型可精准拟合协同劣化过程，模型显示温度通过降低沥青黏度促进水分侵入，两者形成正向反馈，加剧界面破坏。(2) 老化-荷载耦合损伤机制：老化使沥青脆性增强，界面初始微裂缝增多，荷载作用下裂缝扩展速率加快；10次紫外老化+疲劳荷载耦合后，黏结强度较单一老化或荷载作用下降30%~36%。耦合损伤呈现“老化预制缺陷-荷载加剧扩展”特征，说明实际服役中需重点防控多因素协同对黏结性能的破坏。

5 沥青与集料黏结性能优化策略

5.1 材料优化

(1) 改性沥青选择：优先选用SBS改性沥青、橡胶粉改性沥青等高性能改性材料。SBS改性沥青可显著提升沥青的黏度、弹性及抗老化能力，增强界面黏结的稳定性与抗变形能力；橡胶粉改性沥青借助橡胶颗粒的弹性效应，改善沥青低温柔韧性，减少温度应力引发的界面开裂，同时提升界面抗磨损与抗疲劳性能，适配不同气候与服役环境需求。(2) 集料表面处理：针对酸性集料黏结短板，采用酸洗或涂覆偶联剂处理。酸洗可去除集料表面杂质与软弱层，增大表面粗糙度，提升沥青裹覆效果；涂覆硅烷类偶联剂能在集料与沥青间构建“桥梁”，促进酸性集料与沥青的化学黏结，显著提升界面黏结强度与耐久性，缩小与碱性集料的黏结性能差距。

5.2 结构优化

(1) 界面过渡层设计：引入纳米材料构建增强型界面过渡层。将纳米SiO₂、纳米碳酸钙等材料掺入沥青中形成过渡层，纳米材料的高比表面积与高活性可提升沥青的吸附能力，同时填充界面空隙，强化物理嵌锁；此外，纳米材料还能提升过渡层的抗老化与抗水分侵蚀能力，延缓界面劣化，保障黏结长效性。(2) 混合料级配优化：采用骨架密实型级配设计，提升集料间的嵌锁

力。通过精准调整不同粒径集料的比例，使粗集料形成稳固骨架，细集料填充骨架空隙，提升混合料密实度；这种级配可增强集料间的机械咬合作用，间接强化沥青与集料的界面黏结稳定性，减少荷载作用下的界面滑移与损伤。

5.3 施工工艺改进

(1) 温拌沥青技术应用：推广温拌沥青技术降低施工温度损伤。通过添加温拌剂使沥青混合料拌和与压实温度降低30~50℃，减少高温对沥青的老化作用，避免沥青性能衰减导致的黏结力下降；同时降低施工能耗，减少环境影响，且能保证沥青对集料的充分裹覆，提升界面黏结质量。(2) 压实质量控制：建立全流程压实质量管控体系。根据混合料类型与气温选择适配的压实机械组合，采用“初压稳压-复压强化-终压成型”的分段压实工艺；严格控制压实度在规范最优区间，避免压实不足导致的界面空隙率过大或过度压实引发的集料破碎、沥青膜过薄等界面缺陷，确保界面密实性与黏结完整性。

结束语

沥青与集料的黏结性能作为沥青路面质量的关键支撑，其重要性不言而喻。本文围绕黏结理论基础、影响因素、实验研究等展开深入探讨，揭示了材料特性、环境条件及施工工艺对黏结性能的复杂作用机制。研究结果表明，通过科学选材、优化级配及改进工艺，可显著提升黏结稳定性。未来需进一步探索多因素耦合作用下的长期性能演变规律，为开发高性能沥青路面材料提供更精准的理论依据。

参考文献

- [1]李恒,平克磊,夏振兴,等.沥青混凝土桥面铺装层间黏结性能的影响研究[J].交通科技,2023(4):37-41.
- [2]裴建新.基于表面能法的沥青/集料粘附机理研究[J].合成材料老化与应用,2020,45(4):74-78.
- [3]卜胤,吴钟良.粗集料形态特征对沥青路面压实性能的影响研究[J].交通世界,2021,(28):133-136.
- [4]王军.改性剂对沥青混合料性能的影响[J].交通世界,2021,(17):12-13.
- [5]石诚杰.温拌剂对沥青及沥青混合料性能的影响[J].工程技术研究,2021,6(09):127-128.