

单调荷载试验评价沥青混合料抗车辙性能研究进展

葛俊保

苏州科技大学 江苏苏州 215000

摘要: 随着道路交通荷载的不断加剧, 沥青路面车辙病害的高效防治亟需简便可靠的试验测试方法作为技术支撑。目前, 国内外有多种单调加载测试方法来评价沥青混合料的抗车辙性能。单轴加载测试方法试验具有设备构造简单、试验操作便捷的技术特性, 既满足实验室精密测试要求, 又适应工程现场快速检测需求。本文综述了几种主要的单调加载测试方法的研究进展, 为后续对沥青混合料路用性能进行更有效的评价提供一定的借鉴意义, 为构建多尺度车辙评价体系提供方法论参考。

关键词: 沥青混合料; 抗车辙性能; 单调加载测试方法

引言

车辙是沥青路面在长期荷载和环境因素作用下发生的不可逆永久变形, 严重影响道路的使用寿命和行车安全。尤其在高温环境和重载交通条件下, 车辙问题尤为突出^[1]。为了提高道路的耐久性, 准确评估沥青混合料的抗车辙性能成为道路工程领域的重要研究课题。目前, 评估沥青混合料车辙潜力的方法主要包括车辙试验、动态剪切流变试验、蠕变试验等。其中, 单调荷载试验因其设备要求相对简单、试验操作便捷、数据处理直观, 通过控制加载速率与温度场可实现多场景性能推演, 在实验室研究中得到了广泛应用, 近年来多种单调荷载试验方法已被开发并标准化, 被用于评价沥青混合料的抗车辙性能^[2]。

本综述旨在系统总结单调测试加载方法在评估沥青混合料车辙潜力方面的研究进展, 重点评述高温间接拉伸试验 (IDT)、理想剪切车辙试验 (IDEAL-RT) 及单轴贯入试验的研究进展。通过解构各方法的加载机制、评价指标与适用边界, 揭示其不同尺度和维度的车辙表征能力, 为构建多层次车辙评价框架提供理论依据与方法学支撑。

一、高温间接拉伸试验

间接拉伸试验历经数十年发展, 已成为沥青混合料

性能评估的重要方法。该试验采用圆柱体试样, 通过在试件径向平面施加恒定的轴向位移加载速率实现力学响应分析。试验可通过调节温度、加载速率及试样规格, 系统性探究沥青混合料在不同条件下的性能。之前的研究中, 可以结合回弹模量、拉伸蠕变等复合测试表征材料的低温抗裂性能; 能够预测混合料的长期水敏感特性; 评估中温区间的疲劳损伤等。近年来, 间接拉伸试验被拓展应用于高温车辙性能研究。

现行针对沥青混合料车辙性能 IDT 试验普遍采用高温预处理结合力学加载的试验范式。具体而言, 试样需在设定温度下完成规定时间的温度平衡后, 通过伺服加载系统实施恒定速率径向压缩。试验装置可集成温控环境箱, 或在室温条件下通过提高加载速率来维持试样温度稳定性。图 1 所示为高温环境下的 IDT 试验系统配置。试验结束后采用间接抗拉强度作为评价指标, 其计算基于试验峰值荷载与试件几何参数, 如公式 1 所示。



图 1 间接拉伸试验装置

作者简介: 葛俊保 (1998年8月), 男, 汉族, 河南驻马店人, 硕士, 目前在苏州科技大学就读研究生, 主要研究方向为路基路面结构与材料。

此外, 荷载-位移曲线的曲线斜率、能量吸收值等亦可作为辅助评价依据。研究表明, 沥青混合料的计算抗拉强度值与抗车辙能力呈显著正相关, 强度指标越高表征材料的抗永久变形性能越突出。

$$St = \frac{2000P_{max}}{\pi tD} \quad \# \text{公式 (1)}$$

式中: St 为间接拉伸强度, kPa; P_{max} 为最大载荷, N; t 为试件高度, mm; D 为试件直径, mm。

高温间接拉伸试验 (IDT-HT) 作为一种评估沥青混合料抗车辙性能的潜在方法, 近年来通过多国学者的系统性研究, 逐步从理论探索迈向工程规范应用。Takahashi 和 Tran^[3]以印尼、越南的 13 种表层混合料为对象, 采用马歇尔混合设计法, 测试温度 30℃, 加载速率为 2.5-3 mm/min, 对比了 IDT 强度与 60℃ 下的日本轮迹试验的动态稳定性, 发现二者线性相关性显著, 并提出 IDT 强度 ≥ 300 kPa 的抗车辙阈值。

张争奇^[4]等通过多变量试验在不同温度、不同加载速率下进行 IDT 试验, 发现 IDT 强度在 40℃ 时对沥青用量敏感度最高, 且与车辙动稳定度和车辙深度强相关, 提出 40℃、50 mm/min 为标准化条件, 替代马歇尔稳定度。还验证了多级配的适用性, 表明级配越细, IDT 强度峰值对应沥青用量越高。还有团队通过 AASHTOT 283 标准测试 (44℃, 50 mm/min, 150 mm 直径试件), 对比 APA 试验的车辙深度, 揭示了 IDT 强度与 APA 结果的指数相关性 ($R^2=80\%$) 及更优的试验稳定性。后续研究进一步验证了 IDT 在平衡混合料设计中的适用性, 通过含再生料及改性沥青的混合料测试, 证实 IDT 与 APA 的对数线性关系, 其决定系数达到 89%, 且环形比对试验表明 IDT 单操作员与多操作员 COV 分别低至 8.2% 和 11.8%, 试样的高度及干湿状态对结果无显著影响。

为拓展 IDT 的普适性, Zielinski^[5]初期研究以 21 种混合料为对象, 采用 100mm × 50mm 试件在 40℃、50mm/min 条件下测试, 发现 IDT 强度与波兰轮迹试验 (60℃) 车辙深度通过幂函数强相关 ($R^2=82\%$), 且变异系数小于 10%, 但混合料组成参数 (级配、结合料类型) 与车辙无显著关联。扩展研究进一步纳入 55 种混合料且新增断级配, 调整试件尺寸为 101.6mm × 63.5mm, 新增 25℃ 试验条件, 结果表明: 40℃ IDT 强度对密级配和断级配均具强预测性; 而 25℃ 时仅断级配保持显著相关性。研究最终明确了 IDT 评价需匹配级配与温度——40℃ 普适性高, 25℃ 适用于断级配, 为工程中差异化试验条件选

择及抗车辙性能精准评估提供了理论依据。Alsalihi^[6]量化了沥青结合料等级、RAP 含量及生产温度对 IDT 高温强度的影响, 发现其与动态剪切参数 $G^*/\sin \delta$ 强相关, 试验最大变异系数为 11.3%。Divandari^[7]通过整合 IDT 强度、马歇尔稳定度及竖向变形构建线性模型, 可精准预测轮迹车辙深度。Yin 等^[8]验证了 IDT 在 50.2℃ 下与汉堡车辙试验 HWT (50℃) 的线性替代潜力, 相关性 R^2 为 63%。

实际应用中, Vamsikrishna, G^[9]研究建立了 HT-IDT 强度与 HWTT-RRRI 的相关关系, 并提出 HT-IDT 强度的临界阈值建议值为 135 kPa, 作为混合料合格/不合格的判定标准, 能够有效区分混合料的优劣抗车辙性能。实际应用中, 阿拉巴马州交通部率先将 IDT (50℃, 50 mm/min, 7% 空隙率) 纳入 BMD 规范, 要求最低强度 137.9 kPa。综上, IDT 通过温度优化 (40-50℃)、加载速率标准化 (50 mm/min) 及多变量敏感性验证, 已成为兼具低变异 (COV < 10%)、高相关性 (R^2 普遍 > 80%) 及工程适用性的抗车辙评价工具, 为沥青混合料性能设计与质量控制提供了高效解决方案。

二、理想剪切车辙试验

Zhou^[10]等研发了一种名为理想剪切车辙试验的单调加载车辙测试方法, 旨在开发一套适用于配合比设计、工厂生产与现场铺装全流程的标准化检测工具。该试验操作流程与间接拉伸试验 (IDT) 相似, 核心区别在于采用剪切夹具替代传统 IDT 夹具。试验采用与 IDT-HT 相同尺寸及目标空隙率的三个平行试件, 测试前需在 54.4℃ 下条件处理 2 小时。试件被安置于 U 型剪切夹具中, 沿其直径平面以 50 毫米/分钟的速率施加荷载。如图 2 所示。对沥青混合料抗车辙性能的评价采用车辙耐受性指数 (RT 指数) 进行量化, 如公式 2 所示。RT 指数越高, 表明材料抵抗永久变形的能力越强。



图2 理想剪切车辙试验装置^[10]

$$RT_{index} = 6.618 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0.356 P_{max}}{(t \cdot w)} \quad \# \text{公式 (2)}$$

式中： RT_{index} 车辙耐受 RT 指数； P_{max} 为最大载荷，N； t 为试件高度，m； w 为上部加载条宽度，取 0.0191m

为了建立 IDEAL-RT 与 APA 测试之间的关系，Zhou 等研究了 18 种密级配沥青混合物料，包括不同的再生沥青料 (RAP)、结合料等级、集料类型和级配，并在两种测试中进行了测试。研究表明，理想剪切车辙试验对沥青结合料含量、胶结料类型、空隙率、集料形态、RAP 等沥青混合物料关键组分具有显著敏感性，在 64℃ 和 8000 次加载下，IDEAL-RT 与 APA 车辙深度之间具有良好的相关性。作者还提出，对于 IDEAL-RT，在 135℃ 下进行 4 小时松散混合物料养护后的沥青混合物料，其最小剪切强度值应达到 0.85 MPa。此外，IDEAL-RT 与汉堡车辙试验 (HWT) 试验之间存在线性关系，IDEAL-RT 最大变异系数仅为 6.7%，显著低于 HWT。

Yin 等^[8]也评估了 IDEAL-RT 作为 HWT 试验的潜在替代车辙测试方法。IDEAL-RT 在 50.2℃ 下进行，加载速率为 50 mm/min，试件高度为 62 mm，直径为 150 mm，空气空隙率控制在 $7 \pm 0.5\%$ ，HWT 试验 50℃ 下进行。测试结果表明，IDEAL-RT 与 HWT 试验之间没有明显的相关性。然而，当去除某一个特定数据点后，结果显示两者之间存在合理的线性相关性， R^2 值达到 73%。此外，IDEAL-RT 试验的最大变异系数 (COV) 为 12.6%。

Boz, I^[11]等将理想剪切车辙试验作为平衡配合比设计中评估沥青混合物料车辙潜力的方法。对 17 种工厂生产的不同交通量等级密集级配沥青混合物料进行评价。具有设备普及 (可利用现有加载框架)、测试快速 (单次测试仅需数分钟) 及高重复性 (平均变异系数 12.2%) 等优势。通过数字图像相关技术 (DIC) 分析，RR 试验在试件表面诱发局部高剪切应变，与实际车辙的剪切失效机理一致。研究发现，理想剪切车辙试验其与沥青路面分析仪 (APA) 的关联性良好， RT 指数与沥青结合料的非恢复蠕变柔量 (J_m) 呈现良好相关性。

三、单轴贯入试验

单轴贯入试验可较真实地反映实际路面在荷载作用下的剪应力分布状况，加载过程中压头周围的混合物料可形成对接触压头的动态侧向约束，且试验方法易操作、设备简单。

唐铁^[12]通过 ABAQUS 有限元软件建立马歇尔试件模型，系统分析贯入速度和贯入面积的影响。研究发现，

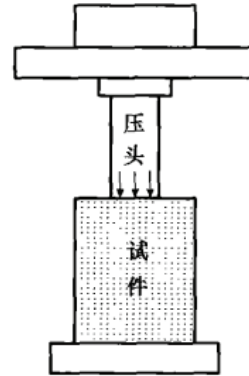


图3 贯入试验示意图

贯入速度增加导致剪应力线性增长，但超过 1.6 mm/min 后因材料剪切破坏阈值限制，增速显著放缓；贯入面积增大则因应力分散使剪应力降低 22.68%。通过皮尔逊相关系数验证，推荐 1.6 mm/min 速度与 637.94 mm² 面积作为标准参数。

颜可珍^[13]通过建立沥青混合物料单轴贯入试验的颗粒流模型，分析了沥青混合料的抗剪作用机理。采用利用离散元法 (PFC2D) 模拟集料与沥青砂浆的相互作用，得到了沥青混合物料单轴贯入时的应力应变曲线变化规律，并将模拟结果进行了验证，揭示了沥青混合物料单轴贯入试验的微观机理。在此基础上提出了合适的试验技术参数，为贯入试验提供技术参考。还有一些研究者探究沥青混合物料单轴贯入试验的细观机理和力学性能，基于数字图像处理技术，构建沥青混合物料真实二维竖向截面离散元模型，结合沥青混合物料集料均匀性指标，模拟集料竖向分布状态对沥青混合物料单轴贯入试验影响，研究发现，集料分布均匀性提升 10%，贯入强度变异系数可降低 0.1，显著提升混合物料性能稳定性，提出施工中需严格控制集料竖向分布，并建议将均匀性指标 (如变异系数 ≤ 0.15) 纳入混合物料质量控制标准。

此外，有研究通过对比车辙试验与单轴贯入试验的指标区分能力，结合熵值赋权法与高低分组法。研究建议将车辙永久变形量阈值纳入路面设计规范，并结合单轴贯入强度 R^2 构建综合评价体系，同时指出贯入强度虽能直接反映抗剪能力，但需结合温度敏感性综合评估。

四、结论与展望

本文系统综述了单调荷载试验在沥青混合物料抗车辙性能评价中的研究进展。综述表明，高温间接拉伸试验 (IDT-HT)、理想剪切车辙试验 (IDEAL-RT)、单轴贯入

试验等试验通过优化参数、模拟实际剪应力分布和提升测试效率,为评估沥青混合料的抗车辙性能提供了重要技术支撑,并且可在混合料生产及验收阶段实现快速检测,及时指导质量控制。

单调荷载试验在评价沥青混合料抗车辙性能时存在显著局限性:其荷载模式单一,难以模拟实际交通荷载的动态性、间歇性及多向剪切效应;受限于边界条件和单一评价指标,难以全面表征实际路面中车辙的复杂形成机制。未来研究需融合离散元模拟与数字图像技术以深化细观机理分析,推动动态分级标准化框架构建,并建立多指标协同评价体系。

参考文献

- [1]孙立军.沥青路面结构行为理论[M].北京:人民交通出版社,2005:309-312.
- [2]Habbouche J, Boz I, Diefenderfer S D. Validation of performance-based specifications for surface asphalt mixtures in virginia[J]. Transportation Research Record, 2022, 2676(5): 277-296.
- [3]Tran N T, Takahashi O. Evaluating the rutting resistance of wearing course mixtures with different fine aggregate sources using the indirect tensile strength test[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2020, 48(4): 2865-2879.
- [4]张争奇,陶晶,杨博.沥青混合料高温性能设计参数研究[J].中国公路学报,2009,22(01):23-28.
- [5]Zieliński P. Indirect tensile test as a simple method for rut resistance evaluation of asphalt concrete[J]. Archives of Civil Engineering, 2019, 65(3): 31-43.
- [6]Alsalihi M A J. Quantification of the Role of the Effective Binder in the Performance of RAP-WMA Mixtures[M]. Temple University, 2020.
- [7]Divandari H. Predict of asphalt rutting potential based on IDT and validation with ANN[J]. Journal of Applied Engineering Sciences, 2019 (2): 131-138.
- [8]Yin F, Taylor A J, Tran N, et al. Performance testing for quality control and acceptance OF balanced mix design[J]. NCAT: Greensboro, NC, USA, 2020, 30.
- [9]Vamsikrishna G, Singh D. Comparison of rutting resistance of plant produced asphalt mixes using Hamburg wheel tracker and surrogate simple performance tests: IDEAL-RT and HT-IDT[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(12): 04023471.
- [10]Zhou F, Crockford B, Zhang J, et al. Development and validation of an ideal shear rutting test for asphalt mix design and QC/QA[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2019, 88: 719-750.
- [11]Boz I, Habbouche J, Diefenderfer S D, et al. Simple and practical tests for rutting evaluation of asphalt mixtures in the balanced mix design process[M]. Virginia Transportation Research Council, 2023.
- [12]唐铁.基于有限元模拟的沥青混合料单轴贯入抗剪试验影响因素分析[J].西部交通科技,2022,(09):77-80+129.
- [13]颜可珍,葛冬冬,游凌云.沥青混合料单轴贯入抗剪试验的细观分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(05):113-119.