

基于旋转压实技术的RAP力学特性分析

穆明浩¹, 卢喆², 王峥¹, 刘新强¹, 冯振刚², 李新军²

¹山东高速集团有限公司创新研究院, 山东 济南

²长安大学公路学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年8月23日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月28日

摘要

沥青路面的养护翻修会产生大量的废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)。对RAP的性能进行科学、准确评价是提高热再生沥青混合料中RAP掺量, 改善热再生沥青混合料性能的前提。基于旋转压实技术, 通过调整压实速度与压实温度, 研究五种不同废旧沥青混合料在旋转压实过程中的受力状态(应力、应变、压实功与工作性), 分析不同压实速度与压实温度对RAP力学特性的影响。结果表明, 温度升高可以提高RAP的工作性, 有利于RAP的压实; 在相同温度下, 当压实速度为1.5 mm/s时, RAP的工作性最好, 更易于压实。

关键词

废旧沥青混合料, 旋转压实, 压实温度, 压实速度, 力学特性

Analysis of Mechanical Properties of RAP Based on Rotary Compaction Technique

Minghao Mu¹, Zhe Lu², Zheng Wang¹, Xinqiang Liu¹, Zhengang Feng², Xinjun Li²

¹Innovation Research Institute of Shandong High-Speed Group, Jinan Shandong

²School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 23rd, 2022; accepted: Sep. 20th, 2022; published: Sep. 28th, 2022

Abstract

The maintenance and refurbishment of asphalt pavement will generate a huge amount of reclaimed asphalt pavement (RAP). Scientific and accurate evaluation of RAP performance is the premise to increase the content of rap in hot recycled asphalt mixture and improve the performance of hot recycled asphalt mixture. Based on the rotary compaction technology, the mechani-

cal properties (stress, strain, compaction work and workability) of five different RAPs in the process of rotary compaction were studied by adjusting the parameters of compaction speed and compaction temperature. The effects of different compaction speed and compaction temperature on the mechanical properties of RAP were analyzed. Results show that the workability of RAP can be enhanced by increasing compaction temperature, which is helpful for the compaction of RAP. When the temperature is the same, the workability of RAP is the best at the compaction rate of 1.5 mm/s.

Keywords

Reclaimed Asphalt Pavement, Rotary Compaction, Compaction Temperature, Compaction Speed, Mechanical Properties

Copyright © 2022 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

近年来,我国相当多的高速公路在自然环境和重载交通的共同作用下发生了老化和损坏,从而进入了大规模维修期[1] [2]。沥青路面的养护翻修会产生巨量的废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)。将 RAP 进行再生对于实现 RAP 循环利用,保护环境,降低沥青路面施工成本具有重要的意义[3] [4]。

对 RAP 抽提分离,进而开展性能评价是认识 RAP 中沥青性能与矿料级配的常用方法,也是后续进行再生沥青混合料设计的基础[5]。RAP 抽提方法主要有离心分离法、回流抽提法和真空抽提法等[6] [7]。这些方法都有明显的局限性:一方面,沥青回收溶液中会残留少量矿粉,改变沥青的物理性质,造成试验结果不稳定;另一方面,沥青中会残留三氯乙烯,导致沥青含量和性能数据与实际情况产生较大差异[8] [9] [10] [11]。因此,对 RAP 的性能评价提出一种快速、简便、绿色、准确且行之可靠的方法,对于精准认识 RAP 的特性,提高热再生沥青混合料的性能,推动热再生沥青混合料高掺量应用与质量提升具有重要的意义。

鉴于此,本文选取了 5 种不同类型的 RAP,基于旋转压实技术,通过调整压实速度与压实温度参数,研究 5 种 RAP 在旋转压实过程中的受力状态(应力、应变、压实功与工作性),分析不同压实速度与压实温度对 RAP 力学特性的影响。基于此,提出 RAP 性能快速检测的适宜压实温度与压实速度。

2. 原材料

选择 5 种不同类型的 RAP(RAP1, RAP2, RAP3, RAP4, RAP5),5 种 RAP 的技术指标如表 1 所示。

Table 1. Technical indexes of the RAPs

表 1. RAP 的技术指标

RAP 类型	旧沥青含量(%)	级配
RAP1	2.42	AC-20
RAP2	3.14	AC-20
RAP3	3.42	AC-16
RAP4	5.51	AC-16
RAP5	3.84	AC-13

3. RAP 性能快速检测试验

采用 RAP 性能快速检测系统对 5 种 RAP 进行旋转压实试验, 压实温度分别为 20℃、60℃和 110℃。

1) RAP 性能快速检测系统调试

RAP 性能快速检测系统基于旋转压实仪, 能够以额定的加载速率将力施加到圆柱形模具中的材料试样上, 同时测量和记录施加的应力、试样高度和时间。通过在圆柱形模具内已知温度下对松散材料试样施加恒定加载速率, 当试样固结成圆柱形时, 记录产生的法向应力和应变。

RAP 性能快速检测系统调试步骤如下: 调节“应变率”压实模式, 在旋转压实仪显示界面选择“Profile Type 3”并确认; 设置 Profile 1 模式压实速度为 4.00 mm/s, 压力为 25 kPa; 设置 Profile 2 模式压实速度分别为 0.5 mm/s、1.5 mm/s、2.5 mm/s 和 3.5 mm/s, 压力为 40 kPa; 设置 Profile 3 模式压实速度为 0.05 mm/s, 压力为 700 kPa。

2) RAP 取样

按照 JTG E20-2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》T 0701-2011 方法取 RAP 样。

3) 试验过程

试验开始前首先设定 RAP 性能快速检测系统的旋转角为 1.16°, 垂直压力为 600 kPa, 旋转速率为 30 r/min; 将 RAP 性能快速检测系统的压头加热保温不少于 15 min, 同时模具、模具端板在试验温度下保温至少 45 min; 将拌和好的沥青混合料(4800 ± 200) g 迅速装入试模并整平, 在顶面盖上一张圆纸后放入旋转压实仪中, 装上压头, 启动计算机, 开动旋转压实仪成型试件, 成型后的试件如图 1 所示。



Figure 1. The RAP samples after rotary compaction
图 1. 成型后的 RAP 试件

4. 结果与讨论

4.1. 压实参数对不同 RAP 应力 - 应变的影响

当旋转压实速度为 0.5 mm/s 时, 不同旋转压实温度下 RAP 的应力 - 应变曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出, 在不同压实温度下, 不同类型 RAP 的应力 - 应变曲线表现出明显的差异。当速度为 0.5 mm/s、应变小于 30% 时, 5 种 RAP 的应力都接近 0; 应变超过 30% 后, RAP 料的应力逐渐增大。随着温度的升高, 不同 RAP 应力 - 应变的变化速率逐渐增大。在 20℃ 时, RAP1 的斜率最小, 其他 4 种 RAP 的应力 - 应变曲线变化速度较为接近。在 60℃ 和 110℃ 时, 不同 RAP 的应力 - 应变曲线变化速度也较为接近。

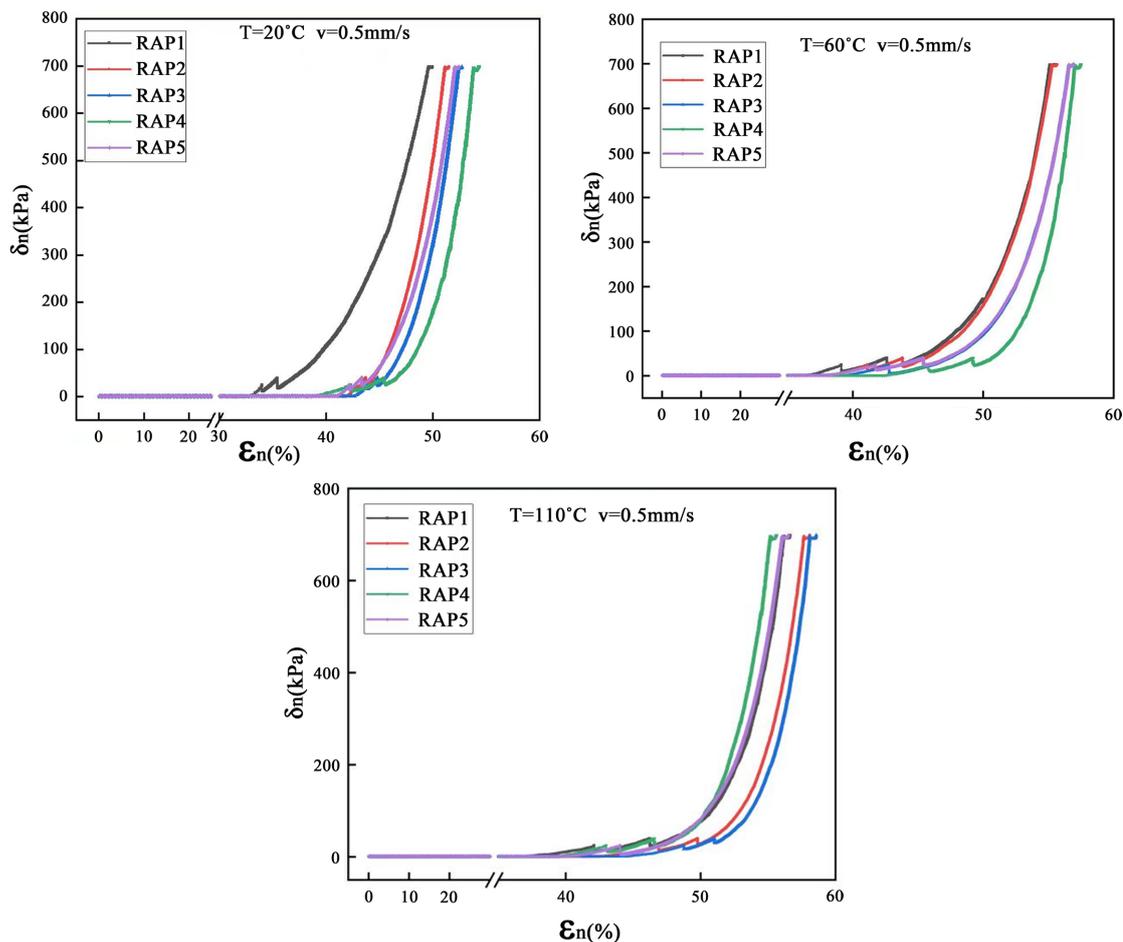
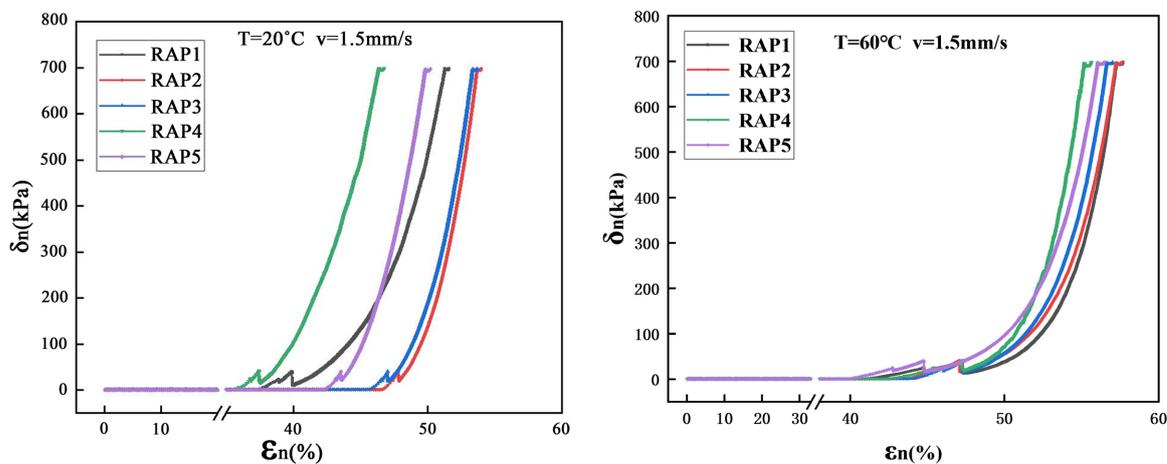


Figure 2. The stress-strain curves of RAP at different temperatures ($v = 0.5 \text{ mm/s}$)
图 2. 不同温度下 RAP 的应力 - 应变曲线($v = 0.5 \text{ mm/s}$)

当旋转压实速度为 1.5 mm/s 时, 不同压实温度下 RAP 的应力 - 应变曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 在不同压实温度下, 不同类型 RAP 的应力 - 应变曲线也表现出明显的差异。当速度为 1.5 mm/s 、应变小于 35% 时, 5 种 RAP 的应力都接近 0; 在应变达到 35% 后, RAP 料的应力也逐渐增大。在不同压实温度条件下, 相同应力下 RAP4 的应变最小, 接下来依次是 RAP5、RAP1 和 RAP3, RAP2 的应变最大。



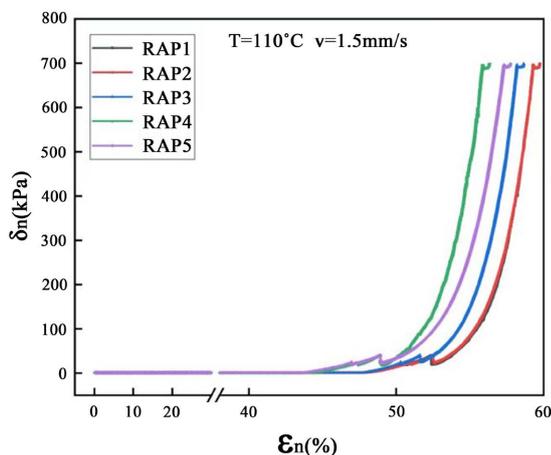


Figure 3. The stress-strain curves of RAP at different temperatures ($v = 1.5 \text{ mm/s}$)
图 3. 不同温度下 RAP 的应力 - 应变曲线($v = 1.5 \text{ mm/s}$)

当旋转压实速度为 2.5 mm/s 和 3.5 mm/s 时, 不同旋转压实温度下 RAP 的应力 - 应变曲线分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知, 与旋转压实速度为 0.5 mm/s 和 1.5 mm/s 时相似, 在 20°C 下, 不同类型 RAP 的应力 - 应变曲线也表现出明显的差异。但是当温度为 60°C 和 110°C 时, 不同类型 RAP 的应力 - 应变曲线基本重合, 应力 - 应变特性基本相同。

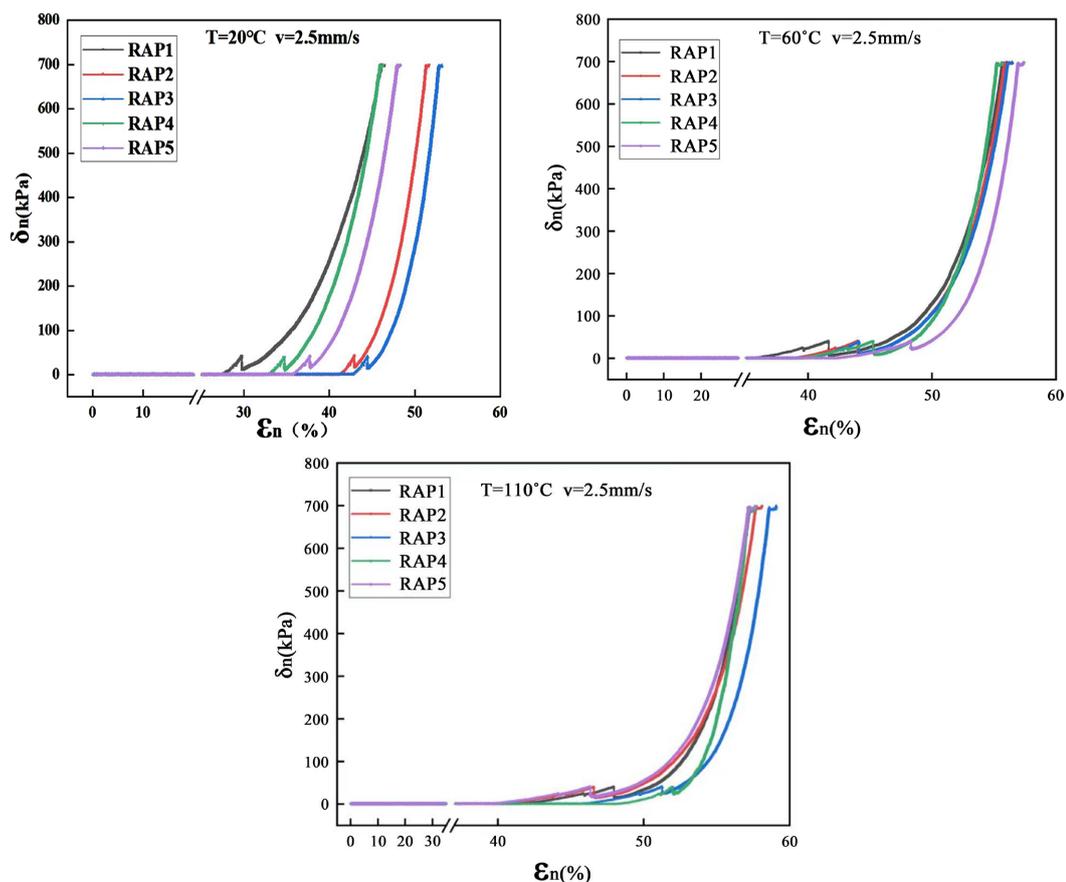


Figure 4. The stress-strain curves of RAP at different temperatures ($v = 2.5 \text{ mm/s}$)
图 4. 不同温度下 RAP 的应力 - 应变曲线($v = 2.5 \text{ mm/s}$)

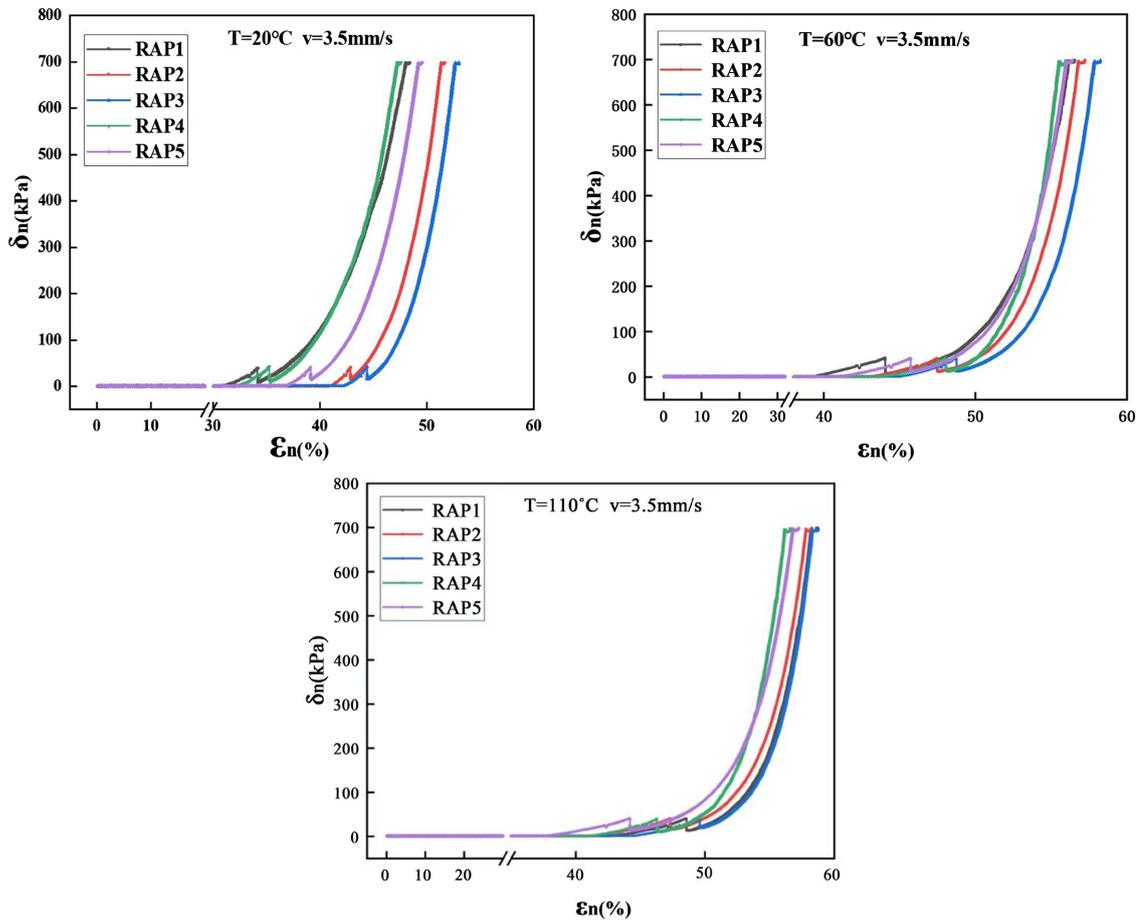


Figure 5. The stress-strain curves of RAP at different temperatures ($v = 3.5 \text{ mm/s}$)
图 5. 不同温度下 RAP 的应力 - 应变曲线($v = 3.5 \text{ mm/s}$)

4.2. 压实参数对 RAP 压实功的影响

通过式(1)可以计算得出不同 RAP 在旋转压实过程中的压实功,以反映 RAP 在压实过程中的能量变化。

$$W_n = \int_A^B F_n dx \tag{1}$$

其中: W_n —— 压实功, 单位 J; F_n —— 压力, 单位 kN。

在不同压实速度下, RAP 的压实功随温度的变化规律如图 6 所示。由图 6 可知, 不同 RAP 的压实功在不同压实速度和压实温度下也表现出了明显不同。RAP1 在 20°C 条件下的压实功最大, 在四种压实速度下都随温度的升高逐渐减小。压实速度为 0.5 mm/s 时 110°C 条件下各 RAP 料的压实功区分度较高; 压实速度为 1.5 mm/s 情况下的 20°C 和 60°C、压实速度 2.5 mm/s 时 20°C 和 110°C、压实速度 3.5 mm/s 时 60°C 下的 RAP 料的压实功区分较好。

4.3. 压实参数对 RAP 工作性能的影响

基于应力 - 应变结果, 通过式(2)可以计算得出不同 RAP 在旋转压实过程中的工作性指标, 以反映 RAP 在压实过程中的难易程度。

$$DWT = \frac{\sigma_{650} - \sigma_{550}}{\epsilon_{650} - \epsilon_{550}} \tag{2}$$

其中： DWT ——工作性指标； σ_{550} ——550 kPa 的应力值； σ_{650} ——650 kPa 的应力值； ε_{550} ——550 kPa 应力对应的应变值，单位%； ε_{650} ——650 kPa 应力对应的应变值，单位%。

不同压实条件对 RAP 工作性指标的影响如图 7 所示。由图 7 可知，RAP1 的工作性指标在 4 种压实速率下均随温度的升高逐渐增大；其它 4 种 RAP 的工作性指标在不同压实条件下表现出不同的变化规律。

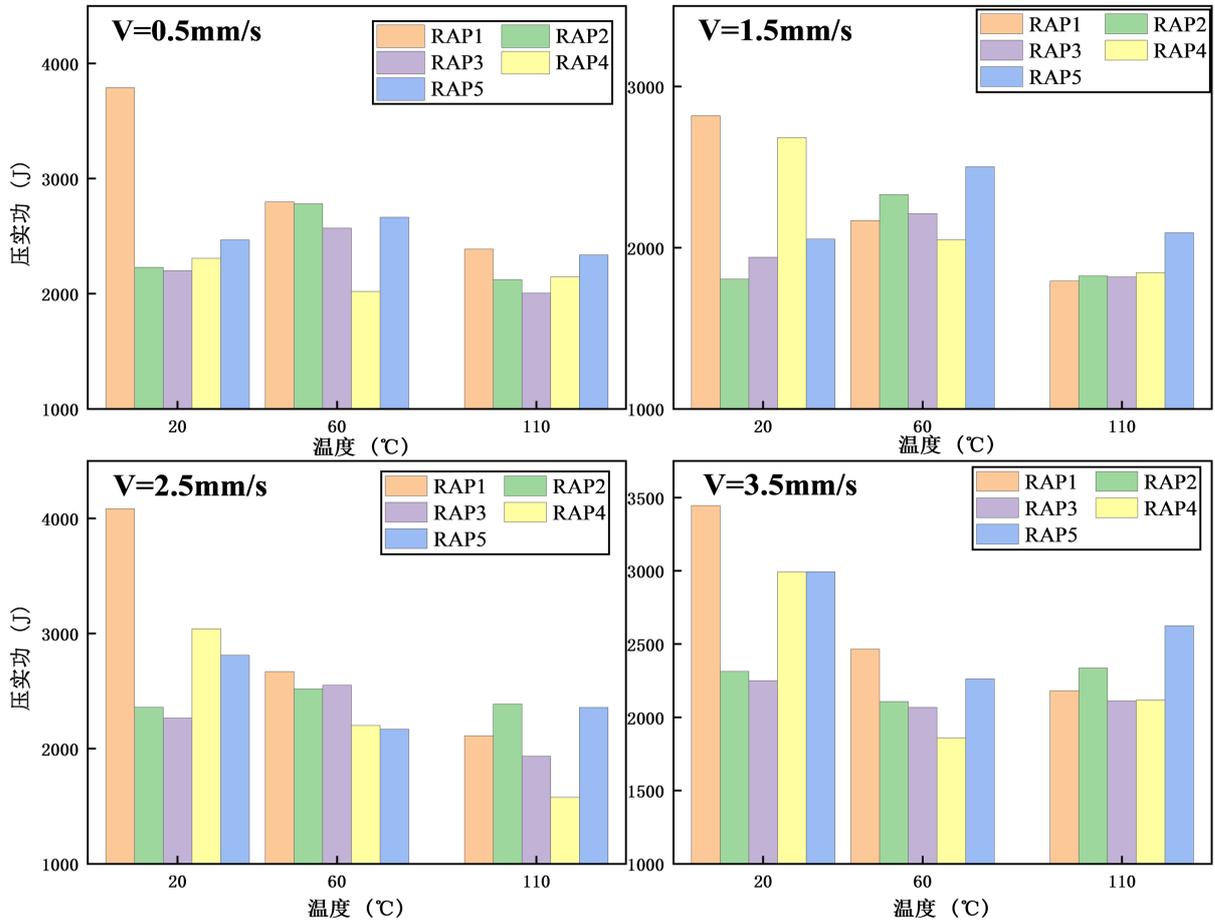
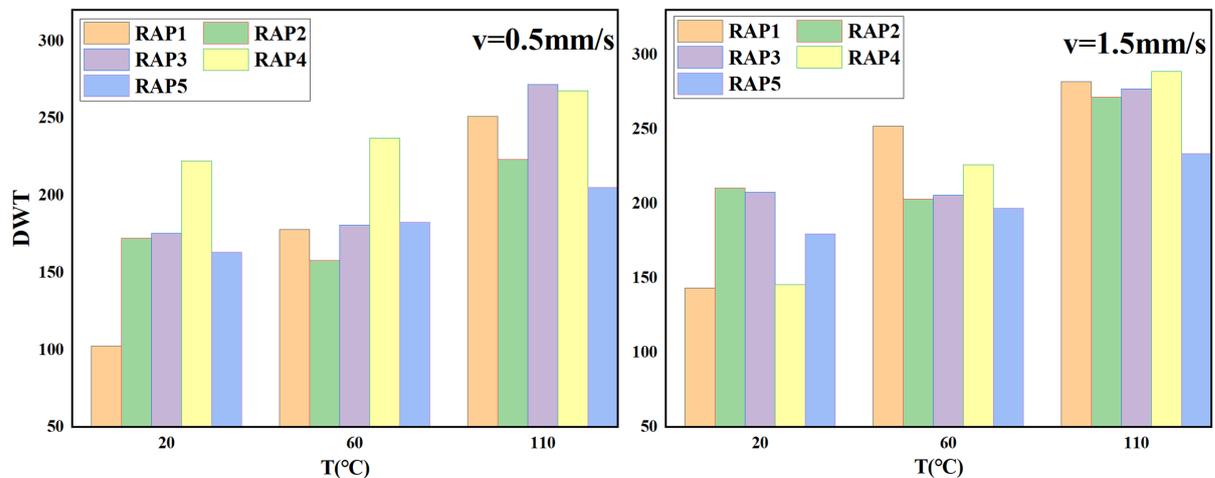


Figure 6. The compaction work of RAP at different rotary compaction conditions

图 6. 不同旋转压实条件下 RAP 的压实功



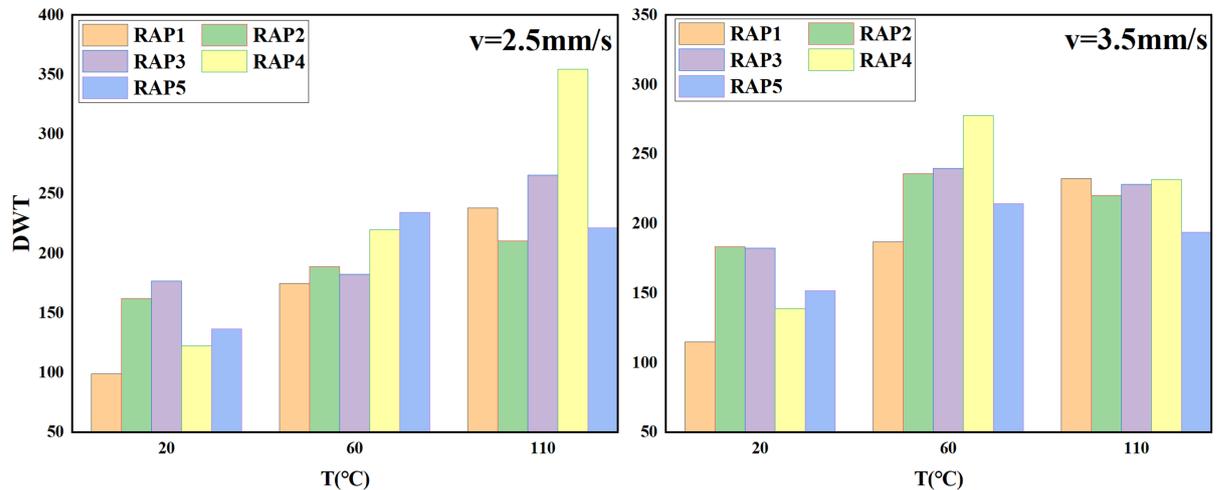


Figure 7. The workability of RAP at different rotary compaction conditions

图 7. 不同旋转压实条件下 RAP 的工作性指标

随着温度的升高, 不同 RAP 的工作性指标均有所增加, 表明温度升高可以提高 RAP 的工作性, 有利于 RAP 的压实。因此, 在压实过程中可以适当提高温度以增加 RAP 压实的和易性。在相同温度下, 当压实速度为 1.5 mm/s 时, 不同 RAP 的工作性指标均最大, 表明当压实速度为 1.5 mm/s 时, RAP 的工作性最好, 更易于压实。

5. 结论

1) 压实温度和压实速度对不同类型 RAP 在旋转压实过程中的应力 - 应变影响显著, 且应力 - 应变变化规律随压实温度和压实速度不同而有所差异。

2) 不同 RAP 的压实功和工作性指标在不同压实温度和压实速度下表现出一定的区分度, 可以通过压实功和工作性指标反映 RAP 的材料特性。

3) 温度升高可以提高 RAP 的工作性, 有利于 RAP 的压实; 在相同温度下, 当压实速度为 1.5 mm/s 时, RAP 的工作性最好, 更易于压实。

基金项目

山东省交通运输厅科技计划项目(2020B38)。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2020 年交通运输行业发展统计公报[J]. 交通财会, 2021(6): 92-97.
- [2] 于华洋, 马涛, 王大为, 等. 中国路面工程学术研究综述-2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [3] 李明欣, 王选仓. 新加沥青标号对高掺量 RAP 再生混合料强度及疲劳性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 9-15.
- [4] 卢桂林. 基于梯度老化的沥青路面疲劳损伤行为研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [5] Copeland, A. (2011) Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Technical Report, Federal Highway Administration, Washington.
- [6] 江照伟. 再生沥青混合料路面材料及结构研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [7] Hajj, E., Sebaaly, P. and Kandiah, P. (2010) Evaluation of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Airfield HMA Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **136**, 181-189. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000090](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000090)

-
- [8] Sullivan, J. (1996) Pavement Recycling Executive Summary and Report. Technical Report, Federal Highway Administration, Washington.
- [9] Jamshidi, A. and White, G. (2019) Evaluation of Performance and Challenges of Use of Waste Materials in Pavement Construction: A Critical Review. *Applied Sciences*, **10**, 226-238. <https://doi.org/10.3390/app10010226>
- [10] Antunes, V., Freire, A. and Neves, J. (2019) A Review on the Effect of RAP Recycling on Bituminous Mixtures Properties and the Viability of Multi-Recycling. *Construction and Building Materials*, **211**, 453-469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>
- [11] West, R., Willis, J. and Marasteanu, M. (2013) Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22554>