

沥青路面结构设计的几个问题讨论

黄晓明

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 沥青路面结构组合是沥青路面结构设计的关键, 它涉及沥青路面结构设计整体目标及思路, 因此, 如何结合当地交通材料、地质地理、气候环境、施工管理等要素, 合理进行沥青路面结构组合设计, 是路面结构设计的关键。只有明确沥青路面结构设计目标, 才能提出符合实际的路面结构组合、才能控制路面结构的施工过程、才能保证沥青路面的使用性能和耐久性。论文从结构受力与结构组合设计要求、路面抗滑与排水特性、路面再生与资源节约三方面的问题进行讨论。

关键词: 沥青路面; 路面结构; 受力性能; 耐久性

1 沥青路面结构受力与结构性能要求设计问题

到 2013 年底, 我国公路总里程达到了 435.6 万多 km, 其中 8.5 万 km 为高速公路。我国高速公路沥青路面结构主要有 3 种典型结构 (图 1), 即以江苏为代表的进行充分软土地基处理 (如果有软土地基) 的半刚性基层沥青路面、以山东为代表的半刚性基层上有大粒径排水性沥青混凝土联接层的沥青路面结构、以福建为代表的半刚性基层上有级配碎石过渡层的沥青路面结构。

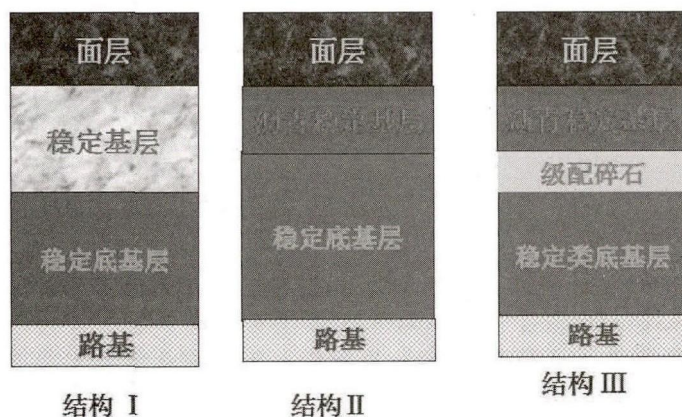


图 1 沥青路面的 3 种典型结构

路面结构 I 是目前我国沥青路面的最主要的典型结构, 沥青层厚度一般为 16~20 cm, 多采用 18 cm (4 cmAC-13 或 SMA-13 + 6 cmAC-20 + 8 cmAC-25)。这种结构半刚性基层一般采用 36~40 cm 的水泥稳定粒料, 底基层一般采用 20~40cm 的稳定土类或低剂量水泥稳定粒料。这种路面结构的受力特点主要是表面主要受压、底基层 (或基层) 主要受拉 (见图 2)。因此目前的结构组合设计原则表面考虑了剪应力与压应力的影响, 将车辙作为主要的考虑要素。底基层则主要受到拉应力, 但是采用抗拉性能较差的材料, 这与底基层材料处于最不利拉应力 (或应变) 的疲劳状态的要求不一致。因此, 底基层材料选择与受力状态不相符合, 路面结构组合设计理念需要改进。同时, 如果路基产生

不均匀沉降,路面结构的附加应力将主要集中在底基层和基层,容易导致底基层和基层出现开裂。对有软土地基且不均匀沉降严重的道路,结构 I 将产生过大的附加应力,结构组合设计选择时必须注意这一点。江苏高速公路建设则十分重视软土地基的处理,尤其是采用以水泥为主要处理材料的化学固结或复合地基技术,软土地基的工后沉降和工后不均匀沉降很小,路面结构目前的使用状态良好。实际工程调查表明,一些省份由于软土地基处理不完全到位,不均匀沉降严重,路面出现了不同程度的结构性病害。

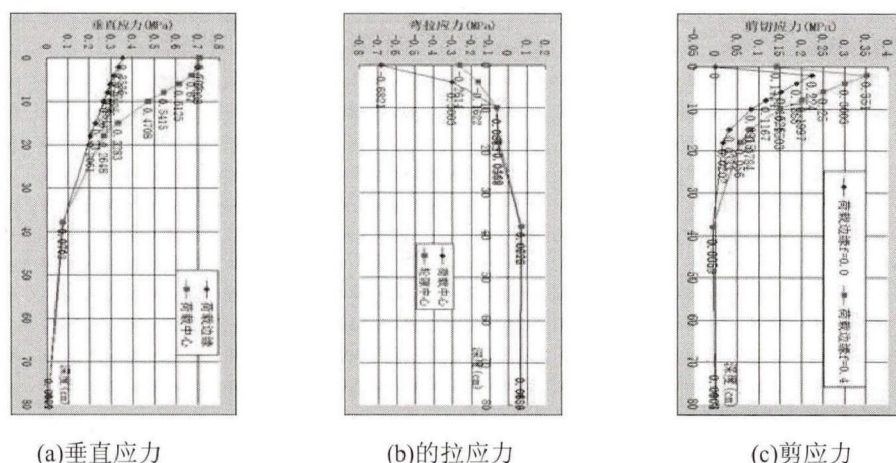


图 2 结构 I 的垂直应力、层底拉应力、剪应力沿深度的变化

因此,传统的沥青路面结构组合设计仅考虑了沥青路面的抗压应力,认为从上到下沥青路面的应力逐渐变小(图 2a),所用的材料可以愈来愈差,传统的沥青路面结构组合如图 3 所示。因此,必须结合沥青路面三种应力的特点,结合各层位置的功能需求,从材料和结构受力两方面综合考虑结构组合设计。针对江苏和沿海地区,如果采用这种结构,必须重新考虑底基层的抗疲劳问题,同时考虑软土地基的不均匀沉降的而影响问题。

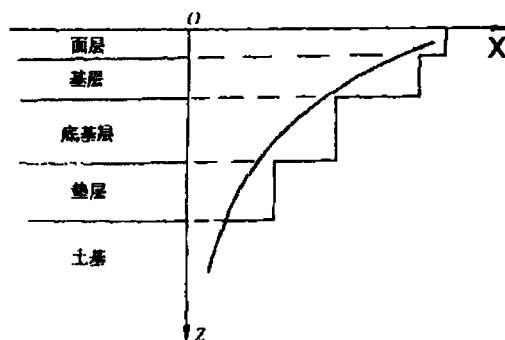


图 3 沥青路面基于压应力的结构组合

路面结构 II 是山东等省的典型路面结构,沥青层主要有 2 种形式,山东主要采用 18 cm 左右(4 cmAC-13 或 SMA-13+6 cmAC-20+8 cmAC-25)与 10~12 cm 的透水性大粒径沥青混合料(LSPM)组合;还有其他一些省份通过研究在部分高速公路采用 18~22cm 左右(4 cmAC-13 或 SMA-13+6 cmAC-20+8~12 cmAC-25 或 ATB-25)的沥青层,基层采用 36~40 cm 的水泥稳定粒料,底基层采用 20 cm 左右的稳定土类或低剂量水泥稳定粒料。这种路面结构的受力是表面主要是受压、底基层(部分基层)主要是受拉,中间由于含有模量较小的夹层而出现小的拉应力和压应力变化。

山东研制的大粒径透水性大粒径沥青混合料(LSPM)是公称最大粒径大于 26.5 mm, 采用粘度较高的改性沥青保证沥青膜厚度, 形成的混合料是“单粒径骨架连通空隙结构”, 空隙率一般在 13 %~18 %。该混合料具有良好的透水性、抗车辙和抗反射裂缝能力以及较好的抗疲劳性能, 上部沥青层虽然有一定的拉应力, 但由于其拉应力很小, 不是应力控制层, 仍具有很好的耐久性。如果沥青层的下层采用密级配沥青稳定碎石(ATB), 那么结构层受力有一定的差别, 主要是 ATB 也可能整体处于受压状态。同时由于 ATB 虽是整体性材料、具有良好的疲劳性能和抗裂性能, 但其抗反射裂缝能力较沥青混凝土好, 同时沥青厚度也大于 20cm, 因此基层裂缝一般不能导致 ATB 出现开裂, 因此这种结构也具有较好的耐久性。由于路面结构 II 整体疲劳控制层还是半刚性基层或底基层, 因此由于路基不均匀沉降和重载导致的路基疲劳问题仍应重视。

路面结构 III 是福建等省的典型路面结构, 沥青层厚度取决于结构层的疲劳寿命, 采用采用 18~30 cm 左右 (4 cmAC-13 或 SMA-13+6 cmAC-20+8~20 cmATB-25) 结构层, 中间夹层采用 15~20 cm 左右的级配碎石, 基层采用 20~40 cm 的水泥稳定粒料, 底基层采用 20 cm 左右的稳定土类或低剂量水泥稳定粒料。根据受力分析, 由于这种路面结构中间含有级配碎石, 沥青层与级配碎石层之间只能看成完全光滑, 因此沥青层上部处于受压状态、下部处于受拉状态, 上面层应采用抗车辙性能好的材料, 下部应采用抗疲劳好的材料。随着沥青混凝土油石比的增加沥青混凝土的抗疲劳性能也得到改善, 靠近级配碎石的沥青层建议采用 4~6 cm 的富有沥青混凝土疲劳层; 如果采用 ATB 层, 那么其油石比不宜偏少, 应保证其具有良好的抗疲劳性能。由于半刚性基层的整体性 (虽然半刚性层可能出现开裂) 和级配碎石的排水和过渡作用, 这种路面结构不仅具有良好的整体性能, 而且具有整体的软土地基适应性。结构 III 的半刚性基层强度刚度大、整体性好, 虽然容易出现干缩开裂、温缩开裂和地基不均匀沉降引起的开裂, 但由于级配碎石的缓解作用, 下基层的开裂不易反射到上面的沥青层, 路面结构具有良好的使用性能, 是我国半刚性基层和国外级配碎石基层的良好组合。

2 耐久性沥青路面结构设计要求

如果各层之间属于完全连续结构, 结合结构层的受力分析, 可以看出表面及向下 5 cm 左右属于高压应力区, 结构层下面 3~6 cm 属于高剪应力区, 结构层最下面属于高拉应力区, 中间有一部分属于拉压过渡区 (见图 4)。实际上国外的长寿命沥青路面结构设计就是基于这一原理进行的, 为我们后续的路面结构设计提供了很好的参考, 具体设计要求如下。

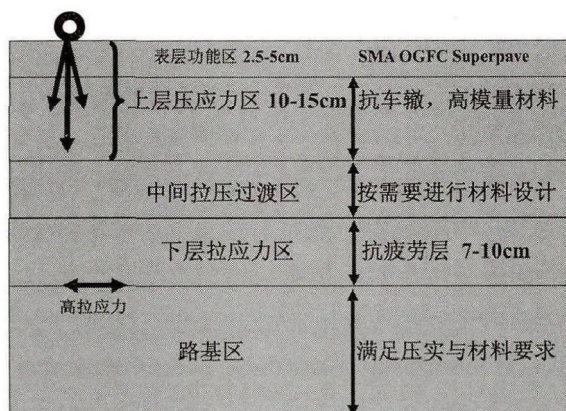


图 4 沥青路面结构在荷载作用下的受力分区图

表层抗滑功能区：由于表面主要承受行车荷载的作用，因此，表层不仅要提供良好的抵抗行车何在而产生的车辙的功能，更要提供良好的行车功能，如抗滑、低噪声等。因此，从抗滑的角度，利用高粘度沥青做成的抗滑沥青磨耗层（OGFC）和排水性沥青混凝土（PAC）是一种良好的选择。由于 OGFC 和 PAC 的设计空隙率接近于 20%，同时采用高粘度沥青，其不仅具有良好的排水性能，还具有很好的抗车辙能力。由于 OGFC 属于大空隙的抗滑表层，设计厚度一般为 25~30 mm；PAC 则需要通过结构层排水，设计厚度一般采用 45~50 mm。从抗车辙的角度，SMA 和 Superpave 沥青混凝土是良好的选择，设计厚度一般采用 40~50 mm。

上层高压区：上层高压区主要包括表层抗滑功能区、中间连接层（中面层和下面层）。表层抗滑功能区不仅要具有良好的抗滑功能，还要具有良好的抗车辙能力。中间连接层（中面层和下面层）同样应该具有良好的抗车辙能力。研究表明，由于中面层不仅受到高压应力，而且温度也处于最高点，因此中面层需要有更好的抗车辙能力，改性沥青和抗车辙设计是中面层沥青混合料设计的重要内容。下面层虽然温度场有所下降、荷载压应力也有所下降，但是下面层的抗车辙能力也十分重要，必须重视起抗车辙性能评价，低标号的高粘度沥青是一个良好的选择。

中间过渡区：如果路面结构各层完全连续状态，那么中间将出现一定厚度的拉应力与压应力的过渡区。虽然过渡区从受力特性上讲不是十分重要，但是由于结构层间状态的变化、路面结构疲劳状态的发展、结构层刚度的变化产生的反射裂缝的影响均与这一层有关，故中间过渡层对半刚性基层沥青路面而变，希望是模量较小、抗反射裂缝能力强的整体性材料，山东省公路局和东南大学联合科研设计的大粒径透水性沥青混合料（LSPM）就是基于这一思路。级配碎石虽然有良好的抗反射裂缝的能力，但是它属于一种无粘结材料，使得级配碎石的上层路面结构层底处于受拉状态，沥青路面结构整体受力发生了根本性变化，沥青层的厚度及受力分析也应该与此对应。

下层拉应力区：由于下层拉应力区主要承受拉应力，因此结构层设计必须采用抗疲劳拉应力好的材料。国外沥青路面结构设计经验表明：其沥青路面具有很好的耐久性，使用寿命可以达到 30-50 年，主要在于其结构层整体受力与材料设计紧密相关，且沥青路面下层拉应力区采用抗疲劳性能好的富油沥青疲劳层。

因此，根据沥青路面整体受力分析可以明确，沥青路面结构的受力状态与结构层的连续状态有关，受拉区必须采用抗疲劳性能好的材料，抗压区必须采用抗车辙性能好的材料。

3 沥青路面的抗滑性与纹理之间的问题

沥青路面的抗滑性主要与行驶安全性有关，研究表明车辆由于路面抗滑不足而导致的安全事故主要出现在雨天，而雨天安全事故出现的主要原因是快速运动的车辆由于水的存在而出现的水漂。保证路面抗滑的主要指标是表面纹理深度、侧向抗滑系数及表面层的空隙率。英国的研究表明，高速运动的车辆，单纯的纹理变化并不能减少车辆的事故（图 5）。反而是城市道路随着纹理深度的增加，只要保证一定的车速，增加表面纹理对交通事故有明显的作

用。为了减少雨天的车辆水漂，排水路面（PAC）或抗滑磨耗层（OGFC）是很好的选择（图 6）。由于排水路面（PAC）或抗滑磨耗层（OGFC）的混合料设计空隙率达到 20%，路面和车辆之间不可能出现积水，也就不会出现水漂。

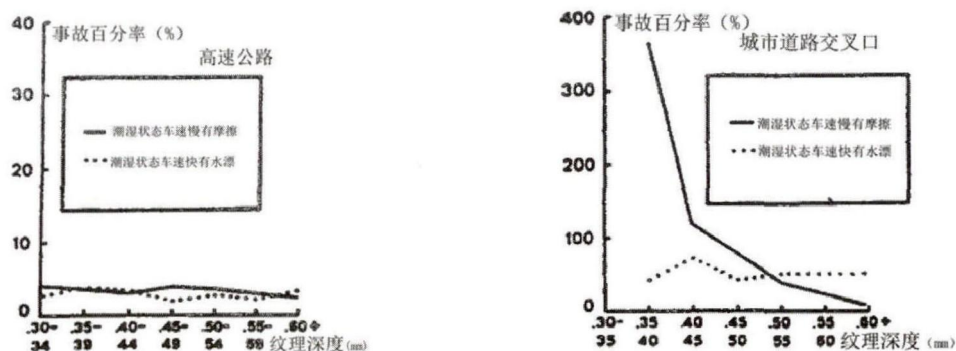


图5 沥青路面的表面纹理与事故百分率的关系

因此, 沥青路面要真正实现雨天抗滑减少事故的效果, 只有采用具有大空隙的排水性沥青路面 (图 6), 但是要实现排水路面 (PAC) 或抗滑磨耗层 (OGFC) 的耐久与稳定, 应采用高粘度沥青 (如添加 12%~15% 的 TPS), 也就是 60 °C 的动力粘度应超过 200 kPa·s, 目前国内几条实体工程 (如江苏盐通高速公路) 甚至达到 300 kPa·s。

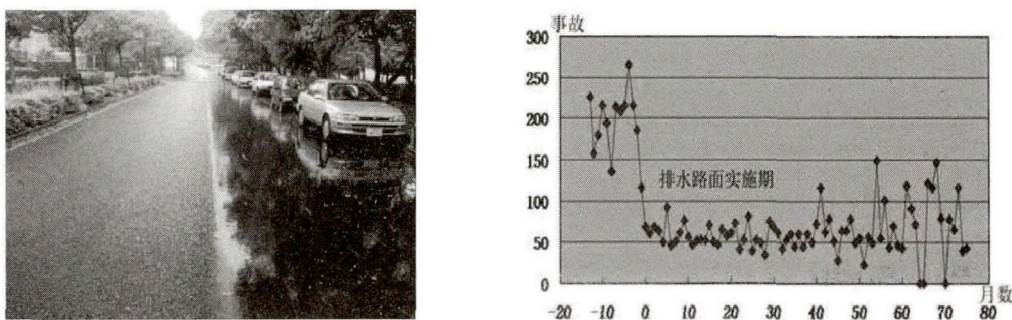


图6 排水性沥青路面 (左) 和常规路面 (右) 的比较

4 沥青路面的环保生态特性与资源节约

随着沥青路面整体使用要求的提高, 不仅要求沥青路面具有很好的耐久性, 还要求沥青路面具有良好的环保与生态特性。环保特性主要是指沥青路面在使用过程中具有降温、低噪声等特性, 具有城市凉爽型路面特点和低噪声特性, 可以减少城市热岛效应、减少噪声对人体的影响。

城市凉爽型路面是一种低吸热路面, 通过路面低吸热, 减少路面放热对环境的影响。图 7 是两种沥青路面表面的对比, 图 8 表面涂刷了路面涂层位置的路表温度明显降低。由于路面的储热能力明显降低, 可以减少城市的热岛效应。因此, 路面降温涂层在城市道路的交叉口、公交车停靠站对减少由于高温引起的路面车辙具有很好的作用。

低噪声路面 (图 9) 是路面在使用过程中具有低的道路噪声, 减少对人体的影响。低噪声路面包括对车外人的影响和车外人的影响两个概念。研究表明, 要实现车内人的低噪声, 路面表面特性主要应该具有更多的负纹理; 相反, 要实现车外人的低噪声, 具有正纹理的路面是一个良好的选择。但是, 从整体上来讲, 对城市道路, 主要应该考虑的是车外人的影响, 对野外公路来说则主要应该考虑车内人的影响。

温拌沥青及沥青混合料 (Warm Mix Asphalt, 简称 WMA), 就是通过一定的技术措施, 使沥青能在相对较低的温度下进行拌和及施工, 同时保持其不低于热拌沥青混合料 (Hot Mixture

Asphalt-HMA) 的使用性能的沥青混合料技术, 也称为温拌沥青技术。其技术关键是在不损伤 HMA 路用性能的前提下降低沥青的拌和粘度。目前, 国际主流温拌技术主要通过外加材料降低沥青混合料的高温粘度来实现。同时, 先进的温拌沥青技术完全可以使温拌沥青混合料达到热拌沥青混合料的性能。同时实现减少烟气对环境的影响(图 10)。

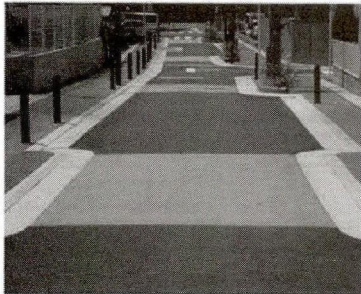


图 7 涂刷热反射材料的
沥青路面

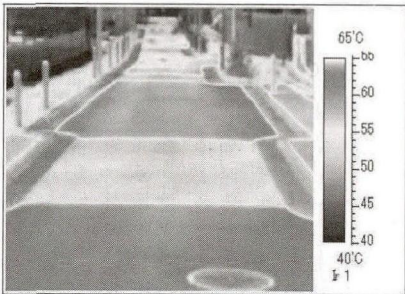


图 8 涂刷热反射材料的
沥青路面温度场

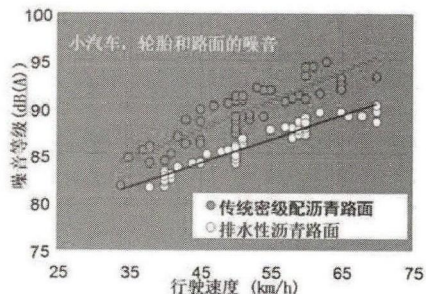


图 9 沥青路面车外噪声与路面种类
及车速的关系

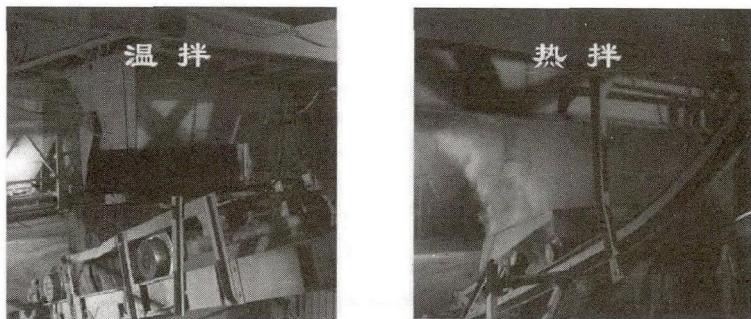


图 10 沥青路面拌合方式对比(左-温拌无烟尘, 右-热拌有烟尘)

路面生态特性是指路面达到其使用寿命末期时, 具有可再生的性能。沥青路面的再生技术主要包括就地与厂拌冷再生、就地与厂拌热再生 4 种。本质上讲, 厂拌热再生(图 11)是将沥青路面恢复成与热拌沥青混合料相同的技术性质, 是真正意义上的再生。就地热再生主要应用于只有表面功能病害、没有结构性病害的路面, 只是解决路面功能病害的技术措施, 并没有实现路面再生。厂拌和就地(图 12)冷再生只是进行材料的再利用, 其技术特性明显比热拌沥青混合料差, 但是实现了再利用, 铺筑于结构层的合理层位, 满足生态路面的基本要求。

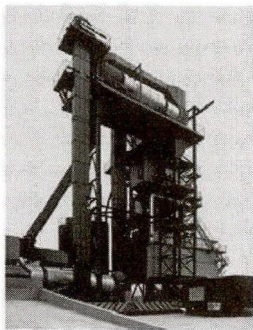


图 11 沥青路面厂拌热再生系统



图 12 沥青路面就地冷再生系统

深入了解沥青路面的使用要求是保证沥青路面长期使用性能的重要条件, 只有在明确沥青路面使用要求的条件下设计不同层位的路面材料, 才能保证沥青路面的整体质量和使用性能。同时路面设计不仅要考虑其使用耐久性, 还要考虑其使用安全性和环保生态特性。

5 结论与建议

根据上面的分析, 主要结论如下:

(1) 沥青路面结构设计必须考虑结构层每层的功能需要, 不能单纯考虑压应力的变化。虽然目前进行了拉应力验算, 但是由于参数、疲劳特性等没有与材料特性相一致, 因此, 必须参考国外长寿命沥青路面的组合特点进行全面更新。

(2) 沥青路面的抗滑特性不仅与表面的纹理有关, 而且与表面的联通空隙有关, 为了提高雨天路面的抗滑安全性, 采用康华表层(OGFC)和排水性沥青路面(PAC)是一个合理选择。

(3) 路面再生或循环利用是今后的大势所趋, 但是, 必须考虑再生过程的资源消耗和再生材料的实际价值。也就是, 必须从经济的角度进行全方位分析, 不能单纯说再生利用了, 就是资源节约型路面维修技术, 因为如果消耗的其他资源太多, 虽然再生利用了沥青混凝土, 但是整体是不节约的过程。

参考文献

- [1] JTG/T D33—2012 公路排水设计规范[S].
- [2] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].
- [3] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [4] JTG F41—2008 公路沥青路面再生技术规范[S].
- [5] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].
- [6] 邓学钧. 路基路面工程(第一版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.2
- [7] 邓学钧. 路基路面工程(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.8
- [8] 邓学钧. 路基路面工程(第三版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.5
- [9] 黄晓明. 路基路面工程(第四版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.8
- [10] 黄晓明. 路基路面工程(第一版)[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.10
- [11] 黄晓明. 路基路面工程(第二版)[M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.6
- [12] Philip White, Jay S. Golden, Krishna P. Biligiri, et al. Modeling climate change impacts of pavement production and construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(11): 776-782.
- [13] Kawakami A, Nitta H, Kanou T, et al. Study on CO₂ emissions of pavement recycling methods[J]. Transportation, 2009, 20: 20km.
- [14] Zaumanis M, Jansen J, Haritonovs V, et al. Development of calculation tool for assessing the energy demand of Warm Mix Asphalt[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 48: 163-172.