

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.03.010

环氧沥青固化过程中的粘度特性

荆儒鑫, Panos Apostolidis, 刘学岩
(荷兰代尔夫特理工大学, 代尔夫特, 荷兰 2628CN)

摘要: 针对环氧沥青固化过程中的流变学特性, 采用粘度为表征参数, 重点研究固化温度、剪切速率以及稀释比对其固化速度的影响。结果表明, 温度越高, 环氧沥青的固化速度越快; 过快的剪切速率会干扰并破坏固化结构的形成; 采用基质沥青对环氧沥青进行稀释可以有效控制固化速度并降低材料成本。综合考虑施工和易性等因素, 推荐稀释比(环氧沥青:基质沥青)为 25:75, 材料拌合速度为 20 r/min, 材料在拌合、运输及压实过程中温度应保持在 130 °C, 道路施工需在 5 h 内结束。

关键词: 环氧沥青; 固化; 流变性

中图分类号: O37

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)03-083-05

Viscosity changes of epoxy bitumen due to curing

JING Ruxin, Panos Apostolidis, LIU Xueyan

(Delft University of Technology, Delft, 2628CN, The Kingdom of the Netherlands)

Abstract: In this study, a series of viscosity tests were performed to investigate various conditions, i.e. temperature, shear rate and dilution level, on the curing behavior of epoxy bitumen. The results show that curing rate of epoxy bitumen increased with temperature; high shear rate would interfere the formation of crosslinks in epoxy bitumen, resulting in a negative effect on curing rate; diluting epoxy bitumen by a base bitumen was an effective way to control the curing rate and reduce the material cost. Considering the workability and durability of paving materials, it is recommended that dilution level of epoxy bitumen is 25%, mixing rate is 20 r/min, curing temperature is 130 °C, and the pavement construction should be finished within 5 hours.

Keywords: epoxy bitumen; curing; rheology

对基质沥青进行聚合物改性是道路工程中常用的一种技术, 可以有效提高路面的耐久性, 延长使用寿命。塑性改性剂(如聚乙烯改性剂)和弹性改性剂(如 SBS)是 2 种常见的热塑性聚合物改性剂^[1]。热固性聚合物, 如环氧树脂和聚氨酯, 越来越广泛地用来开发长寿命沥青路面技术^[2]。环氧沥青是一种特殊的热固性沥青材料^[3-5], 这种材料由壳牌石油公司于 20 世纪 60 年代率先开发, 用于工业园区的重载交通路面。20 世纪 70 年代, 环氧沥青成功地应用在圣马特奥—海沃德大桥的桥面铺装。该桥位于美国加利福尼亚州的旧金

收稿日期: 2021-08-23

基金项目: 荷兰海尔德兰省(Gelderland)交通厅资助项目。

Supported by Epoxy modified asphalt concrete.

作者简介: 荆儒鑫(1990—), 男, 博士后研究员, 主要从事沥青材料耐久性研究; 环境友好型路面材料研发, (E-mail) R. Jing@tudelft.nl.

山湾,日交通量约为 27 000 辆,历经 50 年,桥面性能依然良好。环氧沥青开始在世界范围内应用于桥面铺装工程^[6-8]。

环氧沥青作为一种优质的筑路材料逐步应用在道路工程中^[9-10]。尽管如此,环氧沥青技术的应用仍然存在着诸多问题,比如,不可控的固化速度。过快的固化速度会导致材料的施工和易性变差,使得路面材料无法被压实;过慢的固化速度会导致施工过程中材料的粘度过低,导致在拌合和运输过程中发生离析现象,在开放交通时路面无法提供一定的强度。环氧沥青的固化速度受到多种因素的影响,比如,材料用量、固化温度、材料拌合时的速度^[11-13]。此外,高昂的材料费用,限制了环氧沥青的广泛应用。为此,使用基质沥青对环氧沥青进行稀释可以有效降低材料成本并提高使用性能。这一设想已成功应用于新西兰和荷兰的道路工程中,制备出耐久性强、施工和易性好的环氧沥青混合料^[14-16]。试验表明,稀释环氧沥青,可以有效降低复数模量,提高相位角。与此同时,使用稀释后的环氧沥青(稀释比 1:3)可以有效提高路面使用寿命,大幅降低道路维护成本。虽然,稀释后的环氧沥青可以有效提高路面材料的性能,但对其固化过程中的流变学特性变化仍不明确。为此,文中开展了不同条件下环氧沥青固化的特性研究。

1 材料与试验设计

1.1 试验材料

环氧沥青材料由美国的 ChemoCo Systems 公司提供,由 2 部分混合而成。成分 A 是由环氧氯丙烷和双酚 A 形成的环氧树脂,成分 B 为固化剂。根据材料供应商建议,成分 A 和 B 按照 25:75 的比例进行拌合。在拌合之前,成分 A 和 B 置于烘箱内,分别在 85 °C 和 110 °C 下预热 1 h。与此同时,针入度为 70~100 的基质沥青也置于 110 °C 烘箱内预热 0.5 h。预热结束后,将成分 A 和 B 进行手动拌合 30 s,加入基质沥青进行稀释后继续拌合 30 s。为了研究不同稀释比对环氧沥青固化行为的影响,选择了 3 种不同的稀释比(环氧沥青:基质沥青),即 50:50,25:75 和 12.5:87.5。此外,也分析了未稀释的环氧沥青(EB100)的固化行为和基质沥青的短期老化行为,用以参照对比。表 1 列出了不同稀释比环氧沥青的材料组成。拌合结束后,所有的材料置于冰箱内-20 °C 的条件下进行保存,以确保没有任何固化行为发生。

表 1 不同稀释比环氧沥青的材料组成

Table 1 Composition of various diluted epoxy bitumen

样品名称	EB0	EB12.5	EB25	EB50	EB100
环氧沥青用量/%	0	12.5	25	50	100
基质沥青用量/%	100	87.5	75	50	0

1.2 试验和固化条件

由于固化试验规程并不完善,不适用于稀释的环氧沥青,文中着重研究不同条件、不同稀释比对环氧沥青固化行为的影响。使用美国 BROOKFIELD 公司生产的 DV2-T 粘度仪,采用同轴圆筒测试系统。流变仪配备的智能温度控制系统精度达到 0.1 °C。表 2 列出了不同固化条件的试验结果,固化时间为 5 h,试验过程中每分钟记录 1 次结果。

表 2 粘度试验参数

Table 2 Viscosity testing conditions

参数	试验样品	温度/°C	转速/(r·min ⁻¹)
不同的固化温度/°C	EB25, EB100	100, 130, 160	20
不同的转速/(r·min ⁻¹)	EB25	130	2, 20, 200
不同的稀释比	EB0, EB12.5, EB25, EB50, EB100	130	20

2 试验结果与分析

2.1 固化温度的影响

不同温度对环氧沥青(EB100)和稀释的环氧沥青(EB25)的固化影响如图1所示。由于固化作用,环氧沥青的粘度随着时间而增加。图1(a)为未稀释环氧沥青(EB100)的粘度变化曲线。可以观察到,温度显著影响固化过程中粘度的变化,即固化速度。比如,EB100在160℃时仅需25 min即可达到40 Pa·s的粘度;而固化温度为100℃时,则需要280 min才能达到这一粘度。对于道路工程,从材料拌合到路面施工结束,通常需要2.5~5 h。因此,筑路材料需要在5 h内具有较低的粘度,确保良好的施工和易性。图1(a)表明,未经稀释的环氧沥青不宜直接应用在道路工程中,对其进行稀释是一种降低固化速度的有效方法。如图1(b)所示,由于稀释作用,EB25在5 h内粘度变化在8 Pa·s以内。值得注意的是,EB25的粘度在低温时变化较高,而在高温时变化较低。如100℃时,粘度5 h内的变化由1.5 Pa·s升至7.6 Pa·s;而在160℃,粘度仅由0.5 Pa·s升至1 Pa·s,主要是由基质沥青的流变学特性决定的。

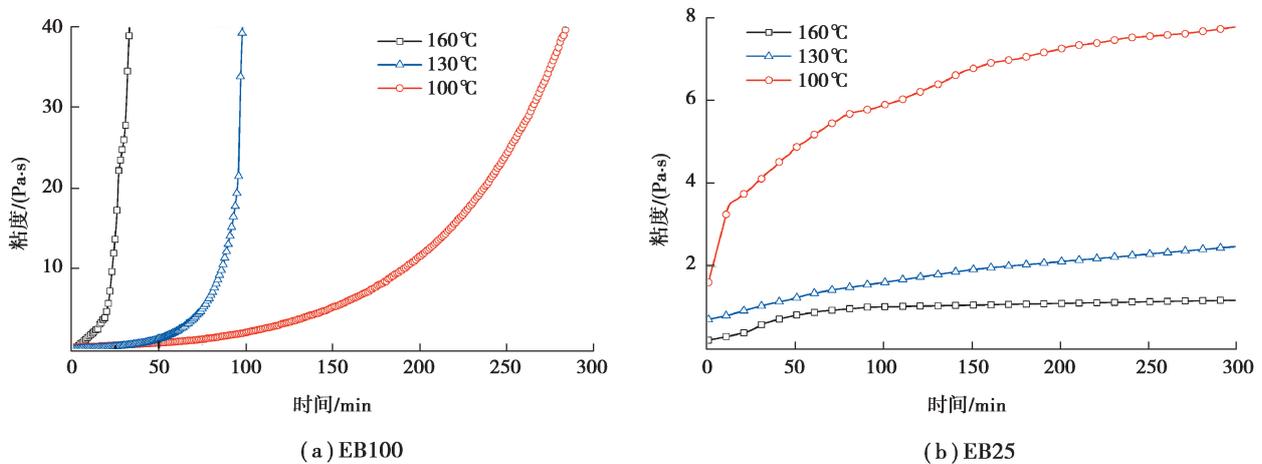


图1 环氧沥青在不同固化温度下的粘度变化曲线

Fig. 1 Viscosity changes of epoxy bitumen at different temperatures

在稀释的环氧沥青中,基质沥青的占比为75%,粘度特性主要由基质沥青部分决定。而基质沥青的粘度随温度的升高成指数型下降,如图2所示。若仅观察图1(b)中粘度在5 h时处的变化,可知在160℃时,EB25粘度不再发生变化,意味着环氧沥青固化已经完成;在100℃时,EB25的粘度变化仍然较大,意味着固化作用尚未完成。在道路工程中,筑路材料需要在拌合和施工中保持相对较低的粘度以保证施工和易性,在施工结束后,路面材料可以持续进行固化以确保路面拥有较高的强度。因此,推荐130℃作为稀释环氧沥青EB25的固化温度,材料在拌合、运输及施工过程中需保持这一温度。

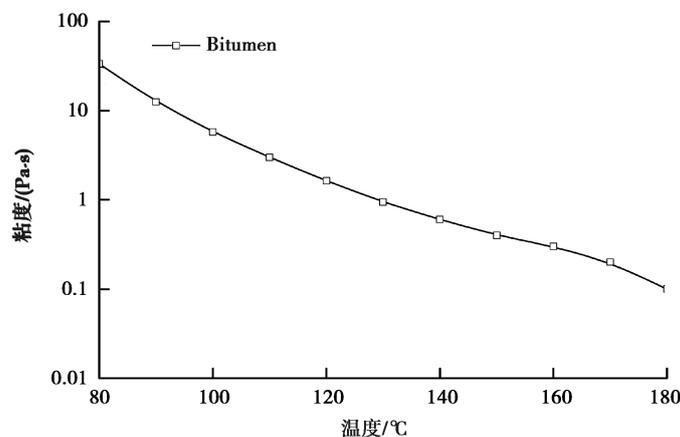


图2 基质沥青粘度随温度的变化曲线

Fig. 2 Bitumen viscosities at different temperatures

2.2 稀释比例的影响

不同稀释比对环氧沥青固化行为的影响结果如图 3 所示。总体来说,稀释比越大,环氧沥青的固化效果越不明显。比如,未稀释环氧沥青 EB100 在 75 min 时,其粘度达到 $8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$;对于稀释环氧沥青 EB50 经过 5 h 的固化作用,其粘度仍未达到 $8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。对于基质沥青 EB0,由于不存在固化作用且短期老化影响较小,所以粘度在 5 h 内几乎没有变化。对于稀释比最高的环氧沥青 EB12.5,固化作用导致的粘度变化较小。通常为了保证筑路材料的施工和易性,需要保证粘度在施工过程中不超过 $3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。因此,推荐稀释比(环氧沥青:基质沥青)为 25:75,可以确保材料拥有良好的施工和易性,又可以保证拥有较高的强度。

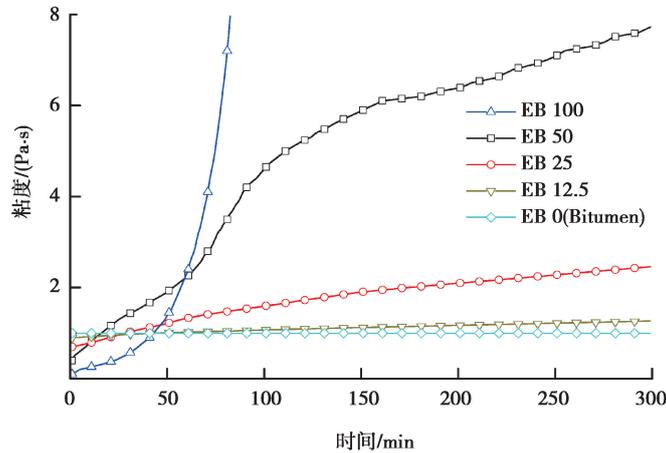


图 3 不同稀释比的环氧沥青的粘度变化曲线

Fig. 3 Viscosity changes of epoxy bitumen at different dilution levels

2.3 剪切速率的影响

文中研究了不同拌合速度对稀释环氧沥青 EB25 固化行为的影响,结果如图 4 所示。试验中,使用一种常用的转速为 20 r/min ;一种相对较快的转速为 200 r/min ;一种相对较慢的转速为 2 r/min 。结果表明,固化过程中 EB25 的粘度在低转速时变化较大,在高转速时变化较小。比如,EB25 在 2 r/min 时,其粘度在 5 h 后由 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 升至 $4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,曲线斜率表明固化在持续进行中;而转速为 200 r/min 时,其粘度在固化过程中仅由 $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 升至 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,原因可能是过高的转速(高剪切速率)会干扰环氧沥青内部固化结构的形成,会破坏已形成的交联结构;相反,低转速(低剪切速率)不会过多的干扰交联结构的形成,从而粘度会在固化过程中持续增长。如前文所述,考虑到筑路材料的施工和易性等问题,推荐使用转速为 20 r/min 。

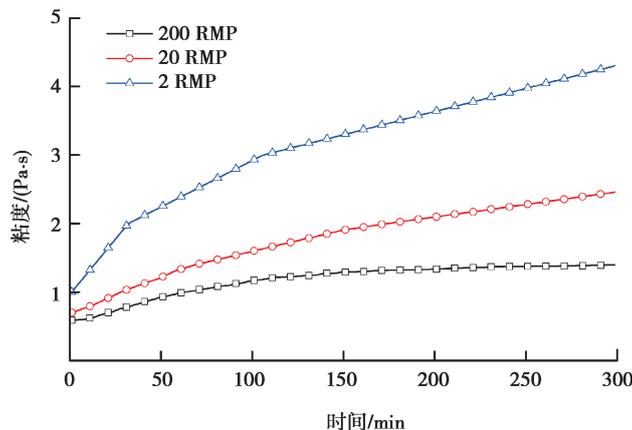


图 4 稀释环氧沥青 EB25 在不同剪切速率的粘度变化曲线

Fig. 4 Viscosity changes of EB25 at different shear rates

3 结 论

研究了环氧沥青固化过程中的流变学特性,考虑不同影响因素(温度、稀释比、剪切速率)对固化行为的

影响。得到以下主要结论。

1)温度显著影响环氧沥青的固化速度,温度越高固化速度越快,粘度变化越大。但对于稀释的环氧沥青而言,由于基质沥青的流变学特性的影响,导致温度越高其固化速度越快,但其粘度变化越小。

2)稀释行为显著影响环氧沥青的固化速度,稀释比越高(即基质沥青掺量越高),其固化速度越慢,过大的稀释比会导致环氧沥青的固化作用不再明显。

3)拌合速度显著影响环氧沥青的固化速度,高转速会干扰并破坏环氧沥青内部固化结构;而低转速不会过多的干扰固化结构的形成,其粘度会在固化过程中持续增长。

4)考虑筑路材料的施工和易性因素,确保开放交通后路面强度可以在固化作用下持续升高。推荐稀释比(环氧沥青:基质沥青)为25:75,材料拌合速度为20 r/min,材料在拌合、运输及压实过程中温度应保持在130℃,道路施工需在5 h内结束。

未来将研究其它尺度下环氧沥青材料的力学行为,比如,胶浆和混合料尺度,进一步研究再生方法和技术,确保环氧沥青路面可以提供良好的路用性能,有效延长路面的使用寿命,又可以进行再生,提高材料的使用效率,最终大幅降低道路的全寿命投资成本。

参考文献:

- [1] Zhu J Q, Birgisson B, Kringos N. Polymer modification of bitumen: advances and challenges[J]. European Polymer Journal, 2014, 54: 18-38.
- [2] International Transport Forum. Long-life surfacing for roads: field test results[R]. ITF Research Reports, OECD, Paris, France, 2017.
- [3] Kang Y, Chen Z M, Jiao Z, et al. Rubber-like thermosetting epoxy asphalt composites exhibiting atypical yielding behaviors[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(3): 1678-1685.
- [4] Xiao Y, van de Ven M F C, Molenaar A A A, et al. Characteristics of two-component epoxy modified bitumen[J]. Materials and Structures, 2011, 44(3): 611-622.
- [5] Apostolidis P, Liu X Y, Erkens S, et al. Oxidative aging of epoxy asphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020: 1-11.
- [6] Gaul, R. W. Epoxy asphalt concrete - a polymer concrete with 25 years' experience[C]. American Concrete Institute Publication Symposium, 1996,166(13):233-251.
- [7] Lu Q, Bors J. Alternate uses of epoxy asphalt on bridge decks and roadways[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 18-25.
- [8] Chen C, Eisenhut W O, Lau K, et al. Performance characteristics of epoxy asphalt paving material for thin orthotropic steel plate decks[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(3): 397-407.
- [9] Zegard A, Smal L, Naus R, et al. Long-lasting surfacing pavements using epoxy asphalt: province of North Holland case study[C]. Transportation Research Board 98th Annual Meeting, Washington D.C., 2019.
- [10] Dinnen J, Farrington J, Widyatmoko D. Experience with the use of epoxy-modified bituminous binders in surface courses in England[J]. Asphalt Professional, 2020:14-21.
- [11] Apostolidis P, Liu X, Kasbergen C, et al. Chemo-rheological study of hardening of epoxy modified bituminous binders with the finite element method[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(28): 190-199.
- [12] Apostolidis P, Liu X Y, Erkens S, et al. Characterization of epoxy-asphalt binders by differential scanning calorimetry[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118800.
- [13] Apostolidis P, Liu X Y, van de Ven M, et al. Control the crosslinking of epoxy-asphalt via induction heating[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(8): 956-965.
- [14] Herrington P, Alabaster D. Epoxy modified open-graded porous asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9(3): 481-498.
- [15] Wu J P, Herrington P R, Alabaster D. Long-term durability of epoxy-modified open-graded porous asphalt wearing course[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(8): 920-927.
- [16] Apostolidis P, Liu X, Erkens S, et al. Evaluation of epoxy modification in bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 361-368.