

基于生命周期的中国道路材料能耗量化研究

蒯海东¹, 薛金顺², 唐 皓³, 陈 芳¹

(1. 新疆交通建设集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为了研究中国道路工程常用材料的能耗,从生命周期的角度对各类道路材料的生产全过程进行实地调研,以过程生命周期分析法为主,构建了中国道路材料能耗计算模型。依据中国统计资料 and 现场调研数据,建立了中国道路材料能耗数据库。对数据库进行分析的结果表明,数据库与发达国家研究成果的吻合性好;沥青类材料的综合能耗值均超过水泥。所提出的道路材料能耗模型与数据库可为国内外同行开展相关研究提供参考。

关键词:道路工程;生命周期分析法;道路材料;能耗量化

中图分类号:U414.02 **文献标志码:**A

Quantitative Study on Energy Consumption of Road Material in China Based on Life Cycle

KUAI Hai-dong¹, XUE Jin-shun², TANG Hao³, CHEN Fang¹

(1. Xinjiang Communications Construction Group Co., Ltd., Urumqi 830001, Xinjiang, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. School of
Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the energy consumption of materials commonly used in road engineering in China, the whole production process of various road materials was investigated on spot investigation from the perspective of life cycle and the calculation model of energy consumption of road materials in China was constructed based on the process life cycle analysis method. A database on energy consumption of road materials in China was established according to the statistical data and on-site survey data. The analysis of the database shows that the results are in good agreement with the research results of developed countries; the comprehensive energy consumption value of asphalt materials exceeds that of cement. The energy consumption model and database of road materials proposed in the current study can provide reference for relevant researches at home and abroad.

Key words: road engineering; life cycle analysis method; road material; energy consumption quantization

0 引言

目前,中国道路行业常用材料的能耗研究没有系统、公认的成果,导致中国学者在研究道路工程全生命周期能耗时,材料生产阶段的参数多采用欧美等发达国家的数据。这些数据是基于发达国家的行

业平均水平建立的,并不符合中国国情;同时,国内外多项研究表明,道路工程中各类材料的生产能耗占总能耗的40%^[1]。因此,有必要从生命周期的角度量化中国道路工程常用材料的能耗。

本文基于生命周期分析法,研究中国道路行业材料生产过程,分析能耗分布,推导相关公式,建立

收稿日期:2018-03-28

作者简介:蒯海东(1979-),男,江苏盐城人,博士研究生,高级工程师,研究方向为道路、桥梁工程。

能耗模型。依据中国已有的相关标准、大数据资料与现场调研数据,确定各个环节的能耗参数,并结合模型,得到中国道路材料能耗数据库,之后与西方研究成果进行比较,验证模型和数据库的正确性并得出普遍结论。

1 研究方法

1.1 道路材料概念

道路材料是指中国各级公路和城市道路路面结构(面层和基层)中用到的各类基础材料,包括道路用沥青类材料(普通沥青、改性沥青、乳化沥青等)、水泥、集料、钢材、石灰和工业用水等^[2-4]。

1.2 生命周期分析法

对于产品的能耗研究,最全面、准确的方法是生命周期分析法(LCA)^[5]。生命周期分析是对一个产品系统的生命周期中的输入、输出及潜在环境影响的综合分析和评价。生命周期的清单分析是对系统整个生命周期的输入和输出进行汇编的过程,也是生命周期分析的基础。生命周期分析方法按清单分析主要分为3类:基于流程的生命周期分析、基于投入-产出的生命周期分析、复合生命周期分析^[6]。

本研究以基于流程的生命周期分析为主,以基于投入-产出的生命周期分析为辅,对道路材料能耗进行清单分析。其优越性体现在:可以通过流程分析对材料的生产过程不断进行细化,从而保证结果更为详细、准确;在数据不易搜集或数据量过大的子流程中,通过投入-产出的分析法控制分析规模,消除边界条件误差^[7]。

1.3 能源生命周期分析

1.3.1 能源生命周期边界

能源的生命周期分析是道路材料能耗量化的基础。能源生命周期的能耗分析不仅包括体现能源自身价值的直接能耗,还包括生产所需的开采、生产以及运输等间接能耗,这就出现了能源之间的相互引用问题。

在能源生命周期分析方面,由于中国统计数据不全,不同的研究者在研究中又借鉴了不同国家的研究数据,导致研究结果存在差异,并且这些差异毫无规律可循^[8]。因此,本文不计化石燃料上游的间接能耗,并结合能耗国标的规定,将能源的生命周期边界界定为自化石燃料的使用开始,

如图1所示。

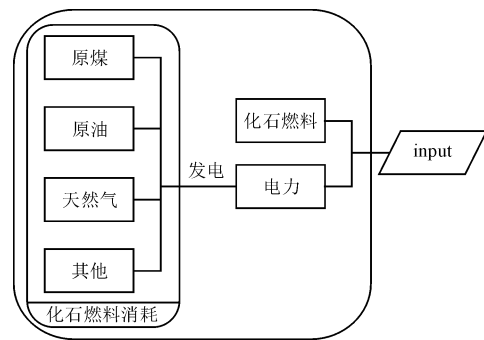


图1 能源生命周期边界

1.3.2 能源折算方式

目前,世界上各国的能源折算方式主要有3种:当量热值法、等价热值法、等效电法。国际上一般采用当量热值法,中国通常综合应用当量热值法和等价热值法。

当量热值法把能源换算成以焦耳或卡为单位的能耗数据,忽略了不同能源品味和做功能力的差别;而等价热值法在某种二次能源消耗时,通过统计获得一个度量单位的该种二次能源所消耗的、以热值表示的一次能源量。等效电法应用很少,且并不适用中国国情^[9]。

综合考虑3种能源折算方式的优缺点,兼顾能耗模型的通用性和实用性,本研究采用的能源折算方式为:以单位质量标准煤作为能源度量单位;电力按照发电平均煤耗,即采用等价热值法折算;热力和其他能源按照当量热值法折算。

1.3.3 能源生命周期清单

根据本研究中能源生命周期边界和能源折算方式,引用《综合能耗计算通则》中的数据,分析原材料生产所用能源的平均低位发热量,并统一折算成标准煤系数,如表1所示。

表1 能源清单分析结果 $\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$

能源名称	折标准煤系数
原煤	0.714 3
标准煤	1.000 0
原油/燃料油	1.428 6
汽油	1.471 4
柴油	1.457 1
油田天然气	1.330 0
蒸汽(低压)	0.128 6
电力(2011年)	0.308 0

2 道路材料生命周期能耗分析

2.1 道路材料生命周期边界

对道路材料全生命周期能耗的研究应考察人类从自然界中开采矿产后,对一种或多种矿产进行加工处理形成道路材料的整个过程。由于道路材料只是半成品,所以该生命周期并不考虑材料寿命完全终结。因此,道路材料的生命周期边界定义为:以自然界的矿物开采为起始,以形成道路要求的原材料为终止。

2.2 沥青类材料

由于中国道路工程主要采用的是石油沥青,故本文的沥青类材料均指石油沥青及其衍生物。

2.2.1 普通沥青

普通沥青寿命周期主要分为 2 个阶段,一是石油的生产阶段,二是石油提炼沥青阶段。

(1)石油生产阶段。中国石油来源非常广泛,有一半以上的石油来自于沙特阿拉伯等数十个国家^[10],难以详细统计。为了能获取便捷实用的基础数据,同时反映中国的石油生产技术水平,本文主要分析中国出产石油的能耗情况。

石油和天然气一般是共生的。因此,在统计石油生产能耗时一般统计石油和天然气的总生产能耗。应用《工业企业单位产品能耗指标计算方法》推荐的热值等量转换法,推导出式(1)。

$$E_u = E_f / (P_o + P_g \zeta_g) \quad (1)$$

式中: E_u 为中国石油生产综合能耗; E_f 为统计期(年)内,中国油气田综合能源消费量; P_o 为统计期(年)内,中国石油产量; P_g 为统计期(年)内,中国天然气产量; ζ_g 为天然气折原油系数,一般可直接取推荐值 $1/125.5 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

2011 年中国的石油产量为 20 287.55 万 t,天然气产量为 1 026.89 亿 m^3 。石油和天然气生产需要原煤、原油、电力、天然气等多种能源,采用本文的能源折算方式,中国油气田生产综合能源消费总量为 3 645.74 万 t 标准煤。将以上数据代入式(1),可得中国石油单位产量综合能耗为 $128.10 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

(2)石油提炼沥青阶段。普通沥青的提炼过程包括物理分离和化学反应^[11],具体生产工艺流程如图 2 所示。

常减压渣油是石油炼油厂常减压塔底抽出的残渣油。因此,常减压渣油本质上是石油提炼产生的

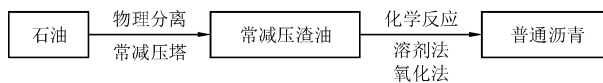


图 2 沥青生产流程

废料,其生产过程并不需要消耗特定的能源。所以,沥青的生产提炼能耗仅考虑常减压渣油提炼沥青的化学反应过程能耗。

该过程的能耗折算可用基于投入-产出的生命周期分析法,通过输入和输出沥青生产装置的能源量推导出能耗表达式为

$$E_r = \frac{\sum (M \times R) + Q}{C} \quad (2)$$

式中: E_r 为沥青提炼阶段综合能耗,以标油计; M 为某种能源或耗能工质的实物年消耗量或输出量; R 为对应某种能源或耗能工质的能量折算系数; Q 为每年与外界交换的有效能量折合为标油的代数和; C 为装置的年原料加工量。其中,向沥青生产装置输入的实物消耗量和有效热量计为正值,输出时为负值。

中国对沥青的化学提炼过程能耗制定了相关国家限额标准,现将标准中 2 种生产工艺的综合能耗数据进行总结,见表 2。

表 2 普通沥青化学提炼综合能耗限额

提炼方法	综合能耗/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)		
	一级	二级	三级
氧化法	≤ 20	≤ 25	≤ 30
溶剂法	丁烷	≤ 24	≤ 30
	丙烷	≤ 28	≤ 32
		≤ 36	≤ 38

注:综合能耗以标油质量为单位。

尽管各油田原油品质不同,但相关研究表明,几乎所有的原油通过溶剂脱沥青法都可以生产出合格的道路沥青^[12]。本研究对国内多家道路沥青生产厂家进行了调研,大部分沥青生产厂均采用溶剂脱沥青生产装置,所用溶剂一般为丙烷混掺丁烷。根据式(2)和调研统计资料,测算出中国沥青炼制业平均指标水平接近丁烷二级。

(3)普通沥青综合能耗。对石油的生产能耗进行各子产物分配后,采用基于过程的生命周期分析法,得到普通道路沥青的生命周期能耗计算公式为

$$E_a = E_u A_a + E_r \zeta_p \quad (3)$$

式中: E_a 为普通沥青综合能耗; A_a 为子产物分配系数,经过约分运算和考虑原油加工损失率后一般可取 $1.0 \sim 1.25$; ζ_p 为标油折算标准煤系数。代入相

关数据,即可得中国普通道路沥青的综合生产能耗。

2.2.2 改性沥青

从过程生命周期角度出发,改性沥青全生命周期分为 3 个阶段:普通沥青生产阶段、改性剂生产阶段、改性沥青生产阶段。

由于大部分改性剂是基于原油等化石燃料生产的,不仅在生产加工过程消耗了一定的能源,其材料自身还消耗了一定的潜在能源。为了控制生命周期分析规模,对于改性剂的生命周期能耗清单分析,采用基于投入-产出生命周期分析法,得到改性剂生产综合能耗公式为

$$E_{cz} = \sum (e_{ic} K_{1i}) + \sum (e_{iff} K_{2i}) + \sum \left(\frac{E_i P_i}{100} \right) \quad (4)$$

式中: E_{cz} 为改性剂综合能耗; e_{ic} 为产品加工消耗的某种能源实物量; e_{iff} 为产品加工消耗或损失的潜在能源量; K_{1i} 为某种实物能源折标准煤系数; K_{2i} 为某种潜在能源折标准煤系数; E_i 为输入改性剂生产系统的某种原料的生产能耗; P_i 为输入改性剂生产系统的某种原料的质量百分比数值。

建立改性沥青能耗模型,计算公式为

$$E_{ma} = E_a \left(1 - \frac{A}{100} \right) + E_{cz} A + P\mu + Q \quad (5)$$

式中: E_{ma} 为改性沥青综合能耗; E_a 为普通沥青综合能耗; A 为改性剂添加百分比数值; E_{cz} 为单位改性剂综合能耗; P 为单位改性沥青加热生产能耗,根据实际加热温度和设备具体取值; μ 为工艺系数,“湿法”工艺取值为 1,“干法”工艺取值为 0,一般取 $\mu = 0$; Q 为单位改性沥青加工生产综合能耗,一般为耗电设备耗能。

本文应用该计算模型对中国道路行业应用最广泛的 SBS 改性沥青进行测算。设 SBS 改性剂添加量为常规的 3.5%,得到单位改性沥青生产综合能耗 E_{ma} 为 $272.55 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

2.2.3 乳化沥青

乳化沥青的生命周期分为 3 个阶段:普通沥青生产阶段、添加剂生产阶段、乳化加工阶段。乳化加工阶段包括高速剪切、加热等过程。乳化沥青和改性沥青的生产原理相似,可用改性沥青的能耗公式计算。由于乳化剂种类繁多,生产工艺各异,为了更加便捷地得到乳化沥青的综合能耗,本研究提出了乳化沥青综合能耗简化公式,即

$$E_{ca} = E_a S(1 + E) \quad (6)$$

式中: E_{ca} 为乳化沥青综合能耗; E_a 为普通沥青综合

能耗; S 为固含量,一般取 60%~65%; E 为乳化加工能耗比。

本研究对常用的胺盐类乳化沥青进行测算,得到 S - E 的拟合曲线如图 3 所示,由此可得到不同固含量乳化沥青的能耗值。

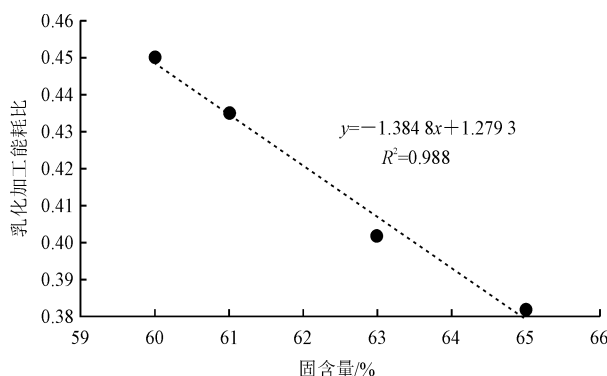


图3 胺盐类乳化沥青的 S - E 拟合曲线

2.3 水泥

道路水泥生命周期主要分为 2 个阶段:熟料生产阶段、水泥生产阶段。依据本文定义的材料生命周期边界,结合国家标准,分别建立熟料和水泥综合能耗模型为

$$E_{CL} = e_r + e_{cl} - e_{he} - e_{hu} + e_{fc} + \zeta_{ee} Q_{CL} \quad (7)$$

$$E_{cem} = E_{CL} g + E_{dr} + \zeta_{ee} Q_s \quad (8)$$

式中: E_{CL} 为熟料综合能耗; e_r 为生产所用原料(石灰石和黏土)的生产能耗; e_{cl} 为烘干和烧成熟料的单位熟料标准煤量($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$); e_{he} 为统计期内余热发电折算的单位熟料标准煤量($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$); e_{hu} 为统计期内余热利用的热量折算单位熟料标准煤量($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$); e_{fc} 为处理废弃物消耗的燃料折算到每吨熟料的标准煤耗量,若没有处理废弃物,按 0 取值; ζ_{ee} 为电能折算标准煤系数; Q_{CL} 为统计期内熟料综合电耗($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$); E_{cem} 为水泥综合能耗; g 为统计期内水泥企业水泥中熟料平均配比; E_{dr} 为统计期内烘干水泥混合材所耗燃料折算标准煤量($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$); ζ_{ee} 为电能折算标准煤量($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$); Q_s 为水泥综合电耗($\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$)。

通过对中国多家水泥厂的现场调研和数据收集得知,新建的水泥厂相比原有水泥厂单位产品能耗平均降低约 $5 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。水泥产量越大,熟料单位综合能耗越低。应用新型干法水泥和余热发电等节能技术的水泥厂家单位,产品的综合能耗亦明显下降。

将本研究成果与《国家能源统计年鉴》中水

泥单位产品综合能耗进行对比分析,结果表明:两者能源折算方式和生命周期边界定义相同,4 000 t 以上窑型的水泥单位产品综合能耗结果接近。为了能全面反映中国水泥厂家的总体节能水准,此处采用年鉴(2012 年)中数值,取水泥单位产品综合能耗为 $136 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

2.4 集料

对采石场及石料生产线进行现场调研,并对各类集料的生产能耗进行清单分析。结果表明,不同粒径、生产方式和类型的集料,综合生产能耗存在较大差异,波动范围在 $0.85 \sim 4.10 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。国内外研究表明,进行集料的能耗分析时,过于细化是没有意义的,因此通常把集料分为粗、细 2 种类型。本研究以 4.75 mm 作为粗细集料的分界线,并以中国道路工程常用的玄武岩作为典型代表。限于篇幅,本文仅将粗集料的能耗清单列于表 3 中,以显示集料生产全过程能耗分布情况。

表 3 粗集料能耗清单

设备(材料)名称	能耗/($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$)
挖掘机	0.611
推土机	0.036
装载机	0.225
电动空压机	0.022
潜孔钻机	0.060
自卸汽车	0.013
爆破器材运输	0.000 04
载货汽车	0.000 02
洒水车	0.005
集料生产线	0.949
炸药	0.035

2.5 钢材

本文参考了中国钢铁工业协会的数据,调研了中国大中型钢铁企业,采用可比能耗的方式,得到了 2012 年中国每吨钢的综合生产能耗为 $673 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

2.6 二灰材料

二灰材料是指粉煤灰和石灰,其中粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰,属于燃煤电厂排出的主要固体废弃物。本研究认为,粉煤灰的生产并不需要消耗特定的能量。为了鼓励在道路工程中适当地应用这类废弃材料,将其综合能耗取为 0。

中国石灰生产分散于冶金、化工、建材等行业中,无法对石灰生产进行全面统计、核算和分析^[13]。

本研究对中国数十家石灰生产企业进行了调研,并基于投入-产出的生命周期法分别对石灰生产前 3 个环节进行能耗分析,结果表明:大部分建材石灰生产企业的产量较小,而单位石灰综合能耗值离散较大,95%置信区间为 $110 \sim 190 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$;石灰企业能耗主要受生产技术、燃料品质的影响,与产量存在较弱的负相关性;入窑煅烧是石灰生产主要的能耗环节,占石灰生产总能耗的 90% 以上,其主要消耗煤等燃料。通过对调研结果的综合考量,提出石灰单位产品综合能耗值,传统回转窑建议值为 $170 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$,新型竖窑建议值为 $138 \text{ kgce} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

3 结果和讨论

应用前述模型对中国道路材料能耗进行了量化,得到了中国常用道路材料综合能耗数据库。现将该数据库与欧美日的研究成果进行对比,见表 4。

表 4 道路材料综合能耗数据库对比

道路材料	单位产品综合能耗/($\text{kgce} \cdot \text{t}^{-1}$)		
	中国	欧美日	数据来源
普通沥青	170.96	167.20	Eurobitume
改性沥青(3.5% SBS)	272.55	212.02	Eurobitume
乳化沥青(60%固含量)	141.76	119.08	Eurobitume
水泥	136.00	118	日本钢铁协会
集料	1.96/3.13	1.36	Athena& IVL
钢材	673	612	日本水泥协会
粉煤灰	0	0	
石灰	170/138	164	Kalkfabrik Netstal

(1)总体来看,中国和发达国家各类道路材料的综合能耗数值均在一个数量级上,且比较接近。此外,本文比较了各类材料的能耗清单分析结果,可知材料的能耗分布相似,从侧面验证了本文模型和数据库的正确性和实用性。

(2)对于同一种材料,中国道路材料的能耗数值均超过发达国家,这表明在道路建材领域,中国工业水平相对落后,节能水平有待提升。

(3)比较不同材料的综合能耗可以发现:集料的能耗值最低,钢材的能耗值最高,其他材料能耗值在一个数量级上;沥青的综合能耗值均超过水泥;改性沥青的能耗值远高于普通沥青,可见改性沥青虽然能够很大程度地提升沥青混凝土的性能,但是环境友好度并不佳。

4 结 语

(1)本研究针对中国国情,应用复合生命周期法构建了中国道路材料的综合能耗模型和数据库。研究方法和成果均能为国内外学者研究道路工程全生命周期能耗提供基础数据的参考。

(2)后续可以在能耗模型和清单分析的基础上,依据各类材料生命周期的具体情况,构建中国道路材料排放物计算模型和数据库。

参考文献:

- [1] 唐 皓,蒯海东,黄晓明.基于生命周期分析法的公路养护能耗模型[J].东南大学学报:自然科学版,2016,46(3):629-634.
- [2] 潘从锦,木合塔尔·买买提,杨启宁.节能技术在丙烷脱沥青装置上的应用[J].石油炼制与化工,2015,46(4):93-96.
- [3] 刘顺妮.水泥-混凝土体系环境影响评价及其应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2002.
- [4] 王 婧,张 旭,黄志甲.基于LCA的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J].环境科学研究,2007,20(6):149-153.
- [5] 卢海涛,杨文安.高速公路全生命周期能耗统计模型[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(5):1044-1048.
- [6] 蔡博峰,曹 东,刘兰翠,等.中国石灰生产和能源消耗分析[J].环境工程,2012,30(1):124-127.
- [7] 杨 博.沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D].西安:长安大学,2012.
- [8] 燕 艳.浙江省建筑全生命周期能耗和CO₂排放评价研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [9] 江 亿,刘兰斌,杨 秀.能源统计中不同类型能源核算方法的探讨[J].中国能源,2006,28(6):5-8.
- [10] 江泽民.对中国能源问题的思考[J].上海交通大学学报,2008,42(3):345-359.
- [11] 陈 军.重交通道路沥青生产工艺及质量控制研究[D].天津:天津大学,2005.
- [12] 程 健,刘以红.溶剂脱沥青生产道路沥青技术进展[J].现代化工,2000,20(9):28-31.
- [10] 金昌宁.塔克拉玛干沙漠流动沙丘分布区公路修筑及沙害防治研究[D].兰州:兰州大学,2006.
- [11] 贾丰卿.阿拉尔和田沙漠公路路面使用性能研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2010.
- [12] 安建林.新疆风积沙力学性质与动力性能研究[D].西安:长安大学,2003.
- [13] 徐 峰.沙漠公路环境影响评价与线形参数研究[D].西安:长安大学,2005.
- [14] 董秀坤.风积沙路基边坡稳定性的室内模拟试验研究[D].西安:长安大学,2004.
- [15] 李志勇.风积砂的压实机理及路用承载力研究[D].重庆:重庆交通学院,2003.
- [16] 李万鹏.风积沙的工程特性与应用研究[D].西安:长安大学,2004.

[责任编辑:杜卫华]

[责任编辑:杜卫华]

(上接第 111 页)

- [3] 张 俊,宋世海.沙漠地区公路设计技术探讨[J].内蒙古交通与运输,2012(1):5-8.
- [4] 郝水鹏.高等级公路风积沙路基施工质量控制[J].山西建筑,2012,38(7):169-170.
- [5] 陈晓光.风积沙特性及筑路问题探讨[J].公路,2000(5):1-4.
- [6] 舒 斌,于进庆,刘桂英,等.颗粒物对风积沙压实特性影响研究[J].工程地质学报,2010,18(5):692-697.
- [7] 周 文,李雨舟,聂晓清.新疆风积沙地区路基设计与施工技术研究[J].工程建设与设计,2008(12):89-92.
- [8] 柯 诚,蒋 峰.风积沙路基干压法施工工艺与质量控制[J].公路交通技术,2011(3):5-8.
- [9] 朱学坤,谢锋涛,雷 宇.新疆内陆风积沙击实特性研究[J].山西建筑,2007,33(8):174-176.