

抗低速冲击个体防护材料的研究进展

安 超¹ 贾清秀^{1*} 周孟娇¹ 叶 欣^{2*}

(1.北京服装学院材料设计与工程学院,北京 100029;

2.北京化工大学材料科学与工程学院,北京 100029)

摘 要 新时代下个体防护问题越来越受到人们的关注,防护需求也呈现出平民化的趋势。根据材料适用范围和用途,分析了抗低速冲击防护材料与防弹防刺材料的区别、低速冲击概念及机理,综述了现有抗低速冲击个体防护材料的分类、制备方法以及在各领域中的应用,并对抗低速冲击个体防护材料今后的发展方向做出了展望。

关键词 低速冲击,个体防护,防护材料,能量吸收

Research progress of individual protective material against low velocity impact

An Chao¹ Jia Qingxiu¹ Zhou Mengjiao Ye Xin²

(1.School of Materials Science and Engineering,Beijing Institute of Fashion Technology,

Beijing 100029;2.Beijing University of Chemical Technology,Beijing 100029)

Abstract The issue of individual protection is attracting more and more attention.The difference between the anti-low velocity impact protection material and the bulletproof and stab-resistant material was analyzed.The concept and the mechanism of low velocity impact were studied.The classification,preparation method and application in various fields of the existing low velocity impact individual protection materials were summarized.The future of the anti-low velocity impact individual protection materials was prospected.

Key words low velocity impact,individual protection,protective material,energy absorption

随着科技的进步以及人们健康意识的提高,个体防护材料受到越来越多的重视。个体防护材料是指可使人员免伤或减伤的材料。抗冲击防护材料则是其中一个主要类别。抗冲击材料按照适用范围和用途可分为三类:防弹材料、防刺材料和抗低速冲击材料。防弹材料用于防护弹头或弹片的伤害^[1];防刺材料用于抵抗刀等锐器的伤害^[2];抗低速冲击材料一般特指防护低速下钝物的冲击。

由于涉及军工,防弹防刺领域研究发展很快,现体系已较成熟。防弹材料的发展趋势是采用多种材料配合,添加功能填料,制得高性能组合防弹材料,并通过调节材料配比、优化设计结构、改善界面性能和成型工艺等途径实现防弹材料功能性、灵活性和经济性兼具的目标^[3-7]。防刺服的研究重点是,在保

证防刺的前提下,实现轻质化,提高柔韧性。目前,大部分柔性防刺服都是先由高性能纤维和树脂合成单层织物,再经多层叠合制成^[8-9]。相比之下,抗低速冲击防护材料的研究还有待完善,相关的研究综述甚少。

在日常生活中,百姓对防弹防刺的要求甚少,遇到更多的是交通事故、高空坠物、运动撞击等钝物低速冲击,这类抗低速冲击防护实为最普遍的需求。个体抗低速冲击材料相比防弹防刺材料而言,对抗冲击强度方面要求有所降低,但在人体服用性方面要求高出很多。如今防弹防刺服已开始重视舒适性和非贯穿损伤对人体的影响。抗低速冲击材料的研究成果,是对防弹防刺材料的很好补充。笔者详细介绍了目前抗低速冲击个体防护材料的研究进展。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51273005);北京市教委市属高校创新能力提升计划项目(TJSHG201510012014);北京服装学院创新团队建设计划(BIFTTD201904)

作者简介:安超(1994-),男,硕士研究生,主要从事特种防护纤维及纺织品的研究。

联系人:贾清秀;叶欣。

1 低速冲击概述

1.1 冲击类型的划分

根据冲击速率不同,冲击可分为低速、中速、高速和超高速冲击 4 种^[10],但具体分界还未有公认值。Sjoblom 等^[11]和 Shivakumar 等^[12]认为低速冲击速率最高可达到几十米/秒,且与冲击目标的模量、刚度和特性均有关,认为可按准静态处理低速冲击过程。Abrate^[13]则认为冲击速度不大于 100m/s 即为低速冲击。

Robinson 和 Davies 将低速冲击定义为一种应力波,其没有对材料的应力分布产生显著影响,并给出了模型来描述低速冲击向高速冲击的转变^[14]。

Liu 等^[15]及温卫东等^[16]从损伤的角度对冲击速度进行了划分:高速冲击对复合材料造成的损伤一般是贯穿性的,使复合材料产生一定范围的分层;中速冲击主要造成局部破坏分层,如局部纤维断裂、树脂基体开裂等;低速冲击通常会在材料内或表面上造成微小损伤,肉眼不易看到。

1.2 抗低速冲击机理

抗低速冲击机理的研究主要从三方面进行:应力波传递、材料损伤破坏和能量消耗吸收机制。已有的机理研究集中在复合材料上^[17],少有仅针对纤维纺织品抗低速冲击的机理研究,但应力波传递在纺织品防弹研究中有所涉及^[18]。

纺织材料在冲击点处形成沿着纱线向两端传播的应变波。部分波在遇到织物交点时继续传播,部分则形成反射。波在交点处将部分能量转移到另一根纱线上,能量在新纱线上继续传播。当材料被贯穿时,纤维断裂被拔出会吸收绝大部分能量;未被穿透时,能量被纤维的拉伸变形和应力波传递过程消耗掉。

杨光松^[19]总结了复合材料层压板低能量冲击损伤机理:冲击导致层压板弯曲,冲击点背面受拉应力最大。冲击产生的弯曲拉伸应力波在层压板内传播,到达边界和上下表面时发生反射,导致基体从冲击背面沿厚度方向向正面开裂。对于多向铺层的层压板,纤维将会阻碍基体沿厚度方向的开裂,导致基体开裂转变为在较薄弱的界面层间发生分层。

复合材料的冲击能量吸收过程可分为 6 步:基体破坏、基体与纤维脱粘、纤维抽拔、应力重新分布、基体变形和纤维材料破坏^[20]。

有大量针对材料损伤的机理研究,但对材料本身而言,人的身体损伤才应是最重要的关注点。刘

书华等^[21]研究了材料对冲击能的吸收传递、受保护侧的剩余冲击能量与材料特性间的关系,认为应充分利用应力波在界面间的反射耗散能量;受冲击面应具有较高的刚度和弯曲断裂功;缓冲层要有适当的压缩模量。

1.3 低速冲击下人体损伤研究

低速冲击相对于高速冲击而言,伤害形式主要表现为非贯穿性损伤,但严重时同样可以致命^[22-23]。最直接有效的防护方式就是将冲击点处的集中应力分散,降低单位面积所受冲击力,从而将对人体的影响降至低伤害阈值^[24]。

1.4 抗低速冲击性能测试与评价

目前,冲击实验采用的仪器主要有两种:低速和高速冲击测试仪。低速冲击测试仪有 3 种:无蓄能功能的摆锤、落锤式冲击仪和有蓄能功能的测试仪^[25-26];高速冲击测试仪均以空气炮为主^[27]。

抗低速冲击性能的评价多针对材料本身,如冲击后剩余拉伸/压缩强度、层内开裂临界能、层间分层临界能等^[28-29],很少考虑保护的个体目标。对个体防护更有实际意义的评价因素有材料缓冲率和能量吸收系数等。

冲击力是非常直观的评价标准,材料缓冲率可以表征人体穿着舒适性,见式(1)。

$$\text{缓冲率} = \left(1 - \frac{\text{加缓冲材料后的冲击力}}{\text{不加缓冲材料的冲击力}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

能量吸收系数^[30],即吸收能量和初始冲击能量之比,便于评价材料对人体损伤防护的能力,见式(2)。

$$i = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{v_1^2} \quad (2)$$

式中, m 为重锤质量,kg; v_1 为重锤冲击到试样的初始速度,m/s; v_2 为重锤冲击到试样后的反弹速度,m/s。

2 抗低速冲击个体防护材料

2.1 弹性体材料

弹性体是指在弱应力下显著形变并且在应力撤去后能迅速恢复原有尺寸状态的聚合物。弹性体可以很好地吸收冲击能,将动能转换为弹性势能,但实际中单独应用弹性体材料的并不多见。现有的应用是将弹性体材料制成海绵形式作泡沫缓冲材料使用,其中发泡聚乙烯(EPE)和发泡聚苯乙烯(EPS)最常见。发泡聚乙烯通常被称作珍珠棉,其内部结

机构中有许多泡孔,泡孔通过被压缩和滞留空气耗散掉冲击能量,从而达到缓冲的目的^[31]。

2.2 纤维纺织品材料

一般纤维纺织品抗冲击性能主要取决于 3 个方面:纤维性能、纱线类别和织物结构。因此,影响这类材料抗冲击性能的主要因素有两个:材料的选择和结构的配置。

2.2.1 纤维材料的选择

抗低速冲击防护纤维材料的选择基本要求是高强、高模、耐冲击等。目前主要有碳纤维、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维、芳纶纤维和聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维。

碳纤维具有高轴向强度和模量、无蠕变、耐疲劳和耐腐蚀性好、密度低。但其耐冲击性较差、吸收能量能力弱、易损伤。因此碳纤维在抗低速冲击领域的应用很少^[32]。芳纶纤维具有极高的拉伸强度和弹性模量且密度低、韧性好、耐摩擦、耐高温、易加工成型并具有良好的绝缘性和抗腐蚀性,这使得用芳纶纤维做防护服材料的可行性很高^[33]。但芳纶耐水性差、抗紫外线能力较弱。超高分子量聚乙烯纤维的比强度最高,除了高强高模外,还具有良好的耐化学腐蚀性、耐冲击和抗切割性,且比能量吸收高、摩擦系数低、耐水耐光。因此也是制作抗冲击防护服的理想材料^[34]。不足是耐热性差、粘结性和抗蠕变性能差。PBO 纤维是已知有机纤维中综合性能最好的,尺寸稳定性、耐热性、化学稳定性极佳,耐冲击性也远高于芳纶和碳纤维^[35]。然而 PBO 粘结性很差,使得 PBO 在复合材料领域的应用受限^[36]。

2.2.2 纤维纺织品的结构

目前,基本已对所有纺织结构的低速冲击能量吸收特性进行了研究。结果表明,针织结构材料具有最佳的能量吸收性能,其次是编织和机织结构,最差的是单轴增强结构^[37]。针织物通过其独特的线圈结构吸收能量。在冲击过程中,针织物中的线圈随纱线滑动,导致相邻线圈被紧固。随着纱线滑移,收紧的线圈数量增加,纱线间摩擦变大,阻碍线圈继续扩大,变形最终“自锁”,依靠调动更大面积的纤维来消耗冲击能量^[38]。

李勇等^[39]研究了经编双轴向布和机织平纹布的抗冲击性能,认为经编双轴向布比机织平纹布的纱线强度利用率高,有显著的结构优势,因此抗冲击性能更优。

间隔织物由两个层面和间隔纱构成,是一种三维织物^[40]。在三维织物中,层内和层间纱线相互交

织,使得织物具有优异的耐冲击性、压缩性。缪旭红等^[41]发现经编间隔织物压缩性能与间隔丝密度、垫纱角度、直径以及织物厚度均对经编间隔织物的压缩性能有显著影响,且不同阶段效果不同。郭晓芳等^[42]发现间隔梳栉横移针距数越小、间隔丝的直径越大,冲击能量吸收能力越强。

2.3 纺织复合材料

纺织复合材料具有整体性,提高了抗损伤及厚度方向上的性能,克服了层板复合材料层间性能低、易分层的缺点^[43]。

周荣星等^[30]发现在多轴向经编增强复合材料中,基底结构束缚点越多、分布越均匀、纱线线密度越大,材料的抗冲击性能和能量吸收性能越好。Shyr 等^[44]分析了复合材料层压板在低速冲击下的损伤特性和破坏强度,认为层压板层数是影响复合材料层合板吸能机制的重要参数。Hitchen 等^[45]进一步发现层压方法会影响结构内部的分层损伤模式和能量吸收效果。分层吸收的能量随着铺设角相异层数的增加、相邻层间相异角度的增加而增加。Robinson 等^[14]研究认为冲击损伤与冲击能量和结构尺寸之间存在着复杂的非线性关系。魏俊等^[46]测定出了玻纤环氧树脂复合材料和碳纤维环氧树脂复合材料的能量吸收系数。蒋海滨等^[47]的研究表明,纤维织物本身的特性、纤维含量和界面强度是影响复合材料抗平头冲击能力的主要因素。增加复合材料的刚性或提高复合材料的冲击变形范围是充分吸能的有效途径。

剪切增稠流体(STF)在普通情况下是稠密的胶体悬浮液,一旦受到高剪切力或剪切速率作用,其黏度将突然增大最终表现类似固体状态。外应力撤去后,又可迅速恢复到其原始液体状态^[48]。Dow Corning 公司将 STF 材料应用到防冲击领域,开发出由硅橡胶 STF 复合三维纺织品的主动防护系统。在受冲击区域,柔性胶体转变为类固态将冲击能量传递给相邻的间隔丝并耗散掉能量。这种材料现已被应用于防护服和防护装备中,如摩托车驾驶服等^[49]。

2.4 其他防护材料

Palmer 根据 STF 原理制成了 D3O 凝胶,英国百足士公司利用其技术推出了 D3O 冲锋衣,现已应用于运动服装护具以及警用、军用防护装备等^[50]。国产已有 D3O 同类产品 P4U,由李峰等^[51]研发成功。赵军^[52]发明了一种带缓冲气囊的运动防护服,内层由乙烯-乙酸乙烯共聚物(EVA)或泡沫材料组

成的保护性缓冲层,中层是空气层,外层是薄膜织物流层。Alpinestars 公司开发的气囊智能防护服,使用运动传感器监测,在事故发生瞬间气囊以毫秒级速度弹出保护骑手^[53]。

3 结语与展望

现有抗低速冲击研究多是针对于设备,并非针对人体防护。而针对人体的防护中低速冲击研究更少。已有抗低速冲击的个体防护材料研究更注重实际应用,理论方面普遍被忽视。这些是目前该领域的主要问题。

在运动碰撞防护产品的开发过程中,会涉及包括运动生物力学、材料力学、服装纺织及服用性等许多不同学科,是一个复杂的学科交叉过程,单从一方面入手无法达到目的。国内目前还没有建立完整的从理论到模型,再到产品的研究体系用来帮助产品开发。因此,从抗低速个体防护的研究到运动碰撞防护产品的应用还有较长的路要走。

参考文献

- [1] 黄献聪.防弹衣概述[J].中国个体防护装备,2003(5):22-23.
- [2] 赵琴,钱晓明,邢京京.民用防刺服的研发现状[J].纺织科技进展,2016(12):10-13.
- [3] 江洁,董侠,陈美玉,等.现代防弹材料[J].材料导报,2013,27(11):70-76.
- [4] Applebythomas G J, Hazell P J, Stennett C, et al. Shock propagation in a cemented tungsten carbide[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(6): 143-150.
- [5] 韩辉,李军,焦丽娟,等.陶瓷-金属复合材料在防弹领域的应用研究[J].材料导报,2007,21(2):34-37.
- [6] 魏忠仁,杜文泽,王树伦,等.芳纶纤维抗弹复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2009,37(1):75-78.
- [7] Grujic M, Bell W C, Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems[J]. Materials & Design, 2012, 34: 808-819.
- [8] Jr J B M, Wetzel E D, Hosur M V, et al. Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(9): 1095-1105.
- [9] Kim Hodong, Nam Inwoo. Stab resisting behavior of polymeric resin reinforced p-aramid fabrics[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 123(5): 2733-2742.
- [10] Cantwell W J, Morton J. The impact resistance of composite materials—a review[J]. Composites, 1991, 22(5): 347-362.
- [11] Sjoblom P O, Hartness J T, Cordell T M. On low-velocity impact testing of composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22(1): 30-52.
- [12] Shivakumar K N, Elber W, Illg W. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates[J]. Aiaa Journal, 1985, 23(3): 442-449.
- [13] Abrate S. Impact on laminated composite materials[J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(4): 155-190.
- [14] Robinson P, Davies G A O. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(2): 189-207.
- [15] Liu D, Malvern L E. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(7): 594-609.
- [16] 温卫东,徐颖,崔海坡.低速冲击下复合材料层合板损伤分析[J].材料工程,2007(7):6-11.
- [17] Chai G B, Zhu S Q. A review of low-velocity impact on sandwich structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design & Applications, 2011, 225: 207-230.
- [18] Talebi H, Wong S V, Hamouda A M S. Finite element evaluation of projectile nose angle effects in ballistic perforation of high strength fabric[J]. Composite Structures, 2009, 87(4): 314-320.
- [19] 杨光松.损伤力学与复合材料损伤[M].北京:国防工业出版社,1995,117-120.
- [20] Naik N K, Shirao P. Composite structures under ballistic impact[J]. Composite Structures, 2004, 66(1): 579-590.
- [21] 刘书华,林兰天.低速冲击下部分材料的能量吸收与扩散[J].上海纺织科技,2013,41(5):49-52.
- [22] 王以进,郭宝良.人颅脑在静态载荷下应力分析和创伤研究[J].中华创伤杂志,1993(5):255-257.
- [23] 毕大卫,王伟,费骏,等.人体胸腰椎体冲击损伤的生物力学研究[J].中国骨伤,2010,23(10):772-775.
- [24] 薛亚静,林兰天,张福乐.剪切增稠流体在低速冲击防护中的应用研究[J].上海纺织科技,2015(2):1-3.
- [25] Cantwell W J, Morton J. Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP[J]. Composite Structures, 2007, 12(1): 39-59.
- [26] 鞠树生,燕瑛,成传贤.复合材料低速冲击特性分析[C].合肥:全国复合材料学术会议,2000.
- [27] Sevkatt E. Experimental and numerical approaches for estimating ballistic limit velocities of woven composite beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 45: 16-27.
- [28] 白瑞祥,陈浩然.低速冲击后含损复合材料夹层板剩余强度研究进展[J].力学进展,2002,32(3):402-414.
- [29] 张彦中,宁荣昌.复合材料层合板冲击损伤的参数表征[J].航空材料学报,1995,15(1):56-62.
- [30] 周荣星,李炜,冯勋伟.多轴向经编增强复合材料低速冲击下能量吸收特性的研究[J].东华大学学报(自然科学版),2002,28(5):34-38.
- [31] Farley G L. Energy absorption of composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1983, 17(3): 267-279.
- [32] Chen W, Tao Z, Lin F, et al. Effect of poly(etherimide) chemi-

- cal structures on the properties of epoxy/poly(etherimide) blends and their carbon fiber-reinforced composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 119(6): 3162-3169.
- [33] 王波. 高性能纤维防弹材料的基本种类、结构及其防弹性能[J]. 轻纺工业与技术, 2010, 39(4): 22-24.
- [34] 蒲侠, 张兴华, 童速玲, 等. 超高强度高模聚乙烯纤维及其复合材料的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2004, 27(4): 35-38.
- [35] Kitagawa T, Murase H, Yabuki K. Morphological study on poly-*p*-phenylene benzobisoxazole (PBO) fiber [J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 1998, 36(1): 39-48.
- [36] 王颖, 徐伯俊. 防刺服的现状及发展趋势[J]. 纺织导报, 2011(1): 83-84.
- [37] Bibo G A, Hogg P J. The role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behaviour[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(5): 1115-1137.
- [38] 李丽娟, 蒋高明, 缪旭红. 柔性防刺材料的现状与发展[J]. 产业用纺织品, 2010, 28(8): 8-12.
- [39] 李勇, 陈南梁. 机织平纹布和经编双向布层合材料抗冲击性能研究[J]. 产业用纺织品, 2004, 22(2): 26-29.
- [40] 梁春金, 冯勋伟, 周荣星. 间隔织物的良好应用前景[J]. 国外纺织技术, 2001(6): 38-40.
- [41] 缪旭红, 葛明桥. 衬垫用经编间隔织物的压陷性能[J]. 纺织学报, 2009, 30(5): 43-47.
- [42] 郭晓芳, 龙海如. 经编间隔织物的冲击性能[J]. 纺织学报, 2013, 34(4): 45-52.
- [43] Mouritz A P, Bannister M K, Falzon P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 1999, 30(12): 1445-1461.
- [44] Shyr T W, Pan Y H. Impact resistance and damage characteristics of composite laminates[J]. Composite Structures, 2003, 62(2): 193-203.
- [45] Hitchen S A, Kemp R M J. The effect of stacking sequence on impact damage in a carbon fibre/epoxy composite[J]. Composites, 1995, 26(3): 207-214.
- [46] 魏俊, 赵建华. 复合材料板受低速冲击时能量吸收的实验研究[J]. 实验力学, 1998(2): 207-211.
- [47] 蒋海滨, 魏伯荣, 陈青, 等. 薄层复合材料的抗平头冲击特性研究[J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 45-49.
- [48] Gürgen Selim, Kuşhan Melih Cemal, Li Weihua. Shear thickening fluids in protective applications: a review[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 75: 48-72.
- [49] Graham Budden, Fernando Vazquez, 杨静. 智能纺织品防护硅橡胶技术[J]. 橡胶科技, 2007, 5(9): 20-22.
- [50] 徐晓锋. 新材料 D3O 造就的神奇滑雪服[J]. 中国纤检, 2006(5): 48-48.
- [51] 李峰, 彭彬超, 张博文, 等. 剪切增稠凝胶及制备方法和有剪切增稠效应的防破片织物: CN104862975B[P]. 2017-01-11.
- [52] 赵军. 一种具有缓冲气囊的运动防护服和该缓冲气囊的制作方法: CN102210493B[P]. 2013-11-06.
- [53] 王中珍, 丁帅, 王蝶. 耐冲击运动防护服的研究进展及设计要素[J]. 山东纺织科技, 2013, 54(1): 43-47.

收稿日期: 2018-06-15

(上接第 216 页)

- [4] 吴韶亮. 汽车尾气处理用铈钴基催化剂的研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007.
- [5] 孙凤英. 纳米 TiO_2 光催化降解汽车尾气中的 NO_x [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(2): 65-66.
- [6] 都雪静, 许洪国, 关强, 等. 纳米 TiO_2 含量对汽车尾气因子降解效能影响试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(10): 155-158.
- [7] 谢杰光, 匡亚川. 纳米 TiO_2 光催化技术及其在降解汽车尾气中的应用[J]. 材料导报, 2012, 26(15): 141-145.
- [8] 毛晓欧, 董影. 应用于道路表面的可降解汽车尾气材料研究[J]. 山西建筑, 2013, 39(5): 196-197.
- [9] 孙立军, 徐海铭, 李剑飞, 等. 纳米二氧化钛处治汽车尾气效果与应用方法的研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(4): 153-158.
- [10] 张文刚, 王芳, 李忠梅. 分解尾气路面材料制备及紫外光辐照度对其催化性能影响的研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(5): 303-306.
- [11] 李文博. TiO_2 封层式催化分解尾气型沥青路面材料及其路用性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [12] 曾德亮. 水性环氧树脂改性乳化沥青在雾封层养护中的应用[J]. 公路, 2015(2): 212-215.
- [13] 易红晨. 环氧乳化沥青封层养护材料及其工程应用的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2017, 46(6): 67-72.
- [14] 郭东红, 蔡丽娜. 水性环氧改性乳化沥青在沥青路面养护中的应用研究进展[J]. 山西交通科技, 2017(1): 31-33.
- [15] 钱海涛, 高水琴. 水性环氧乳化沥青路面封层的应用研究[J]. 石油沥青, 2015(4): 40-43.
- [16] 高越, 钱海涛. 浅析水性环氧乳化沥青路面封层养护技术[J]. 河南科技, 2014(22): 135-136.
- [17] 曾德亮. 水性环氧树脂改性乳化沥青作为雾封层材料的应用性能研究[J]. 中国建筑防水, 2014(13): 32-35.
- [18] 何远航, 张荣辉. 水性环氧树脂改性乳化沥青在公路养护中的应用[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(5): 37-40.
- [19] 刘晓凤. 稀土掺杂纳米 TiO_2 分子模拟、制备及 NO 降解研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [20] 交通部公路科学研究院. 公路路基路面现场测试规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008, 117-128.
- [21] 李芬, 徐国财, 王涓, 等. 纳米 TiO_2 水分分散体系的制备与性能研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2009, 19(3): 8-11.

收稿日期: 2019-04-23

修稿日期: 2019-06-12