

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.01.026

喷涂聚脲弹性体抗爆抗冲击性能研究进展

黄微波,宋奕龙,马明亮,吕平,张锐,梁龙强

(青岛理工大学功能材料研究所,山东青岛 266033)

摘要:以喷涂聚脲弹性体抗爆抗冲击性能研究为重点,从非建筑构件、建筑构件以及 LS-DYNA 有限元模拟三个方面,综述了喷涂聚脲弹性体在爆炸冲击载荷作用下的防护研究进展,简要介绍了喷涂聚脲弹性体的研究成果和实际应用情况,指出了喷涂聚脲弹性体在结构背面加固时突显出的优异抗爆性能和吸能效率,最后指出了喷涂聚脲弹性体抗爆抗冲击性能研究存在的问题以及今后的发展方向。

关键词:喷涂聚脲弹性体;抗爆;爆炸冲击载荷;有限元模拟

中图分类号: O383.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)01-0148-06

Research Progress on Blast Mitigation and Shock Resistance Performance of Spray Polyurea Elastomer

Huang Weibo, Song Yilong, Ma Mingliang, Lyu Ping, Zhang Rui, Liang Longqiang

(Functional Materials Research Institute, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract : Taking the blast mitigation and the shock resistance performance of spray polyurea elastomer as research object, the protective measures under the blast-impact load were reviewed from three aspects of the nonstructural components, the building components and the finite element analysis. The research achievement and the practical application of the spray polyurea elastomer were mainly described. The excellent blast mitigation performance and energy absorption efficiency of the spray polyurea elastomer when it is strengthened on the back side of the structures were pointed out. In the end, the some existing problems and the future directions of the research on blast mitigation and the shock resistance performance of spray polyurea elastomer were presented.

Keywords : spray polyurea elastomer ; blast mitigation ; blast-impact load ; finite element analysis

近年来,随着恐怖主义的蔓延,爆炸事件频发,炸弹恐怖袭击已严重威胁到人民的生命财产安全。爆炸冲击波不仅会对周围的建筑、车辆造成严重的损害,爆炸产生的碎片才是威胁人身安全的罪魁祸首。统计发现,炸弹恐怖袭击中的门窗、玻璃、墙体碎片是威胁生命安全的最大隐患^[1]。减少爆炸碎片的飞溅,是保障生命财产安全的有效措施。建筑结构可采用合理的配筋设计从根本上提高其抗爆性能,也可通过钢板、夹芯板加固等传统的防护措施实现^[2-6]。碳纤维复合材料具有优良的力学性能且施工相对便捷,已广泛地运用到抗爆领域^[7-9]。但在实际应用中,存在着增加建筑构件自重、施工周期长且复杂等诸多缺点,这些不足都限制了其使用的领域^[10]。因此,发展新材料和新工艺就显得尤为重要。

20 世纪 80 年代中期,美国 Texaco 公司(现 Huntsman 公司)在化学家 Dudley J. Primeaux II 的带领下,率先研制

出喷涂聚脲弹性体技术,于 1989 年发表了首篇研究论文。聚脲弹性体不仅具有高强度、高韧性等优良的力学性能,还兼顾施工快捷、无污染的特点,具有广泛的应用前景^[11-14]。

笔者于 1995 年在国内率先对喷涂聚脲弹性体技术开展研究工作,并从 1999 年开始,陆续将喷涂聚脲弹性体技术成功地运用到我国的大型基础设施领域。从最初喷涂 100 m² 的青岛海豚馆室外表演水池起步,到 1 200 万 m² 的京沪高速铁路工程^[15-20],喷涂聚脲弹性体技术在中国得到了飞速的发展。

喷涂聚脲弹性体技术与传统的涂装技术相比,具有固化速度快、施工便捷、涂层厚等优点^[21]。同时,聚脲材料不仅具有优异的防护性能,还能够通过其高韧性减少爆炸碎片对人体造成的伤害,且成本低、施工便捷,对提高结构的抗爆性能具有得天独厚的优势。笔者根据聚脲弹性体在非建筑

基金项目: 国家自然科学基金项目(51503116,51578298),国防科技创新特区项目

通讯作者: 黄微波,工学博士,教授,主要从事聚脲抗爆抗冲击性能研究及应用 E-mail: spua@163.com

收稿日期: 2018-10-11

引用格式: 黄微波,宋奕龙,马明亮,等. 喷涂聚脲弹性体抗爆抗冲击性能研究进展[J]. 工程塑料应用,2019,47(1): 148-153.

Huang Weibo, Song Yilong, Ma Mingliang, et al. Research progress on blast mitigation and shock resistance performance of spray polyurea elastomer[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1): 148-153.

构件、建筑构件以及有限元模拟等方面的抗爆研究现状,综述了国内外的专家学者在该领域的最新研究进展。

1 非建筑构件聚脲弹性体抗爆研究

1.1 地面设施的抗爆防护

地面设施往往具有较大的人流量,且炸弹设置方便,因此会成为爆炸恐怖袭击的首选目标。对地面设施的抗爆防护研究就显得尤为重要。

美国海军曾测试过多种聚合材料在爆炸载荷下的动态响应过程,发现喷涂聚脲弹性体涂层可显著提高砌体墙的抗冲击能力,并能有效地包裹爆炸产生的墙体碎片,减少对人体造成的伤害^[22]; M. Grujicic 等^[23]提出聚脲弹性体作为外部涂层或衬里可显著提高建筑物、车辆和实验室测试板的防弹穿透能力和爆炸生存能力,也可应用到具有抗爆抗冲击能力的作战头盔上,可显著降低脑震荡发生的可能性。当车辆遭到地雷攻击时,车内人员可能会受到永久性的创伤性脑损伤,甚至严重威胁到生命安全, G. J. Mcshane 等^[24]研究发现,在军用车辆底部喷涂聚脲弹性体,能够有效地减少地雷或榴霰弹对内部乘员造成的伤害。F. Tchantchou 等^[25]将雄性成年鼠限制在一个铝制平台上,并在其底部引爆一枚小型炸药,试验中 67% 的成年鼠在爆炸载荷的作用下立即死亡;当在平台之间涂敷聚脲弹性体材料后,在相同的爆炸情况下,试验中的成年鼠全部存活;通过该试验结果可推测出,聚脲弹性体的应用有助于下一代防爆车辆的发展。

在爆炸载荷作用下,建筑物的填充面板会受突发载荷的影响向外飞射^[26],对人身安全造成极大的威胁,因此对建筑物夹芯板和钢面板的动态响应与防爆研究就显得十分必要。R. B. Bogoslovov 等^[27]在钢板表面涂敷了 10 mm 厚的聚脲弹性体涂层,发现聚脲弹性体从橡胶态到玻璃态的转变是发挥其抗爆作用的主要因素,当发生玻璃化转变时,其抗冲击吸能密度提升了 100 倍,由原本的 0.04 GJ/m^3 提升至 4 GJ/m^3 。N. Gardner 等^[28]将聚脲弹性体涂覆于泡沫铝夹层复合结构的背部,利用霍普金森压杆装置对试样进行动态压缩试验,试验结果发现,聚脲弹性体涂层能显著减少背板的变形,且后面板的挠度、应变和速度峰值分别降低了 35%、35% 和 15%,聚脲弹性体加固有效地提高了三明治复合结构的抗爆性能。赵鹏铎等^[29]进行了等面密度条件下三种不同厚度钢板的无涂覆、迎爆面涂敷的外爆破试验,以及等厚度钢板/钢板组成的箱体结构无涂覆、迎爆面涂敷和背爆面涂敷的外部/内部爆破试验,发现涂敷聚脲弹性体可显著提高钢板与箱体结构的抗爆能力,且背爆面涂敷效果更佳。邓希旻等^[30]利用霍普金森发射系统驱动圆柱形子弹,对三种不同形式的聚脲弹性体-铝板复合结构进行了等面密度条件下的低速冲击试验,试验结果表明,当子弹的冲击速度为

14.1 m/s 时,未涂敷聚脲弹性体的铝板发生了严重的剪切破坏,而背面涂敷聚脲弹性体的涂层结构只遭到轻微的剪切破坏,正面涂层结构无损伤,这也表明了聚脲弹性体涂层的存在可以有效地缓解有棱冲击物造成的应力集中现象,减小结构的局部剪切破坏。

贺红鹰等^[31]利用简支梁冲击试验机对聚脲弹性体/纤维增强树脂基复合材料的抗冲击性能进行了研究,分别进行了无涂敷、正面涂敷以及背面涂敷聚脲弹性体的冲击试验;试验结果表明,未涂敷聚脲弹性体试样的能量吸收为 27.16 J,试样整体的冲击强度为 431.11 kJ/m^2 ;正面涂敷 1 mm 厚的聚脲弹性体试样吸收的能量为 33.51 J,相较于无涂敷结构增长了 23.38%,试样整体的冲击强度为 459.04 kJ/m^2 ,增长了 6.48%;背面涂敷 1 mm 厚的聚脲弹性体试样吸收的能量为 35.21 J,增长了 29.64%,试样整体的冲击强度为 482.32 kJ/m^2 ,增长了 11.88%,且随着聚脲弹性体涂层厚度的增加,能量吸收与冲击强度均得到了提升,且背面涂敷能取得更好的防护效果。黄阳洋^[32]将聚脲弹性体涂敷于玻璃-芳纶纤维复合结构的前后两面,并与无涂敷结构进行了对比试验,试验结果可知,纤维复合材料以其良好的强度与可拉伸性可有效阻止弹片的侵彻作用;当聚脲弹性体材料涂敷于纤维复合材料的正面后,不仅能够通过其自身的变形耗散能量,且不会影响纤维复合结构的分层耗能作用,在相同的弹片类型条件下,降速幅度最大可达 18.3%,且随着聚脲弹性体涂层厚度的增加,弹片的降速幅度呈现线性增长。

笔者在钢板前面板上喷涂 1, 3, 5 mm 厚的 QTECH-190 聚脲弹性体涂层,并进行弹击试验,发现聚脲弹性体涂层可显著减少子弹射击对钢板造成的破坏,随后将 0.01 MPa 的水头压力施加于面板上,均未发生渗水情况;该材料还具有良好的附着性,当喷涂于结构背面时,可有效防止爆炸载荷作用下的脱落现象,提高材料的利用率和结构的整体抗爆性能。

爆炸恐怖袭击中,地面设施的脆弱性决定了其抗爆性能研究的必要性,由上述研究发现,聚脲弹性体具有高强度、高伸长率、高应变率等优异的力学性能,不仅能够显著增强车辆、夹芯板的抗爆性能,还能提高结构的整体稳定性,确保建筑结构在爆炸、冲击载荷作用下的生存能力。

1.2 水下环境的防护

水下爆炸发生时,能量冲击波会导致管道或腔室内产生瞬时的水压激增,这种瞬时变化的运动现象被称为“水锤效应”^[33]。由于水锤效应的存在,爆炸产生的能量远远大于爆炸本身,对船体、大坝、码头造成严重的破坏;而聚脲弹性体涂层的存在,可有效地减少水锤效应的影响,从而降低破坏程度。

H. Matos 等^[34]将 1.12 m 长、25.4 mm 厚的圆柱形约束结构置于直径为 2.1 m 的半球形压力容器内,约束结构的上端开放、下端封闭。在约束结构内部引爆一枚 RP-80 炸药,由于聚脲弹性体层的存在,引起了水锤效应的相移,因此水锤撞击所产生的高压与内爆产生的高压脉冲无法叠加,从而使内爆后的最大压力和能量减少。

Dai Lihui 等^[35]将涂有聚脲弹性体涂层的薄钢板与裸钢板进行了水下爆炸试验,测试在水池中进行,水池的长度 $\times$ 宽度为 2 m $\times$ 2 m,水深 2 m,试验测试装置置于自由水面下 1 m;结果发现,在水下爆炸载荷作用下,裸钢板会发生较大变形,而聚脲弹性体涂层的存在可显著减少钢板的变形;当聚脲弹性体涂层喷涂至钢板前部时,每个板的中心部位均会出现圆形撕裂孔,聚脲弹性体与钢板表面脱粘,但较厚涂层的脱粘区域小于薄涂层;由于在水下环境中,聚脲弹性体涂层的粘结力与刚度均受限,在高应变率载荷作用下,聚脲弹性体涂层会在弹性阶段开裂,因此当聚脲弹性体涂层喷涂至钢板背面时,聚脲弹性体会大面积地破碎并脱落。

水下爆炸是一个多要素耦合的力学过程,在复杂水下环境中,爆炸载荷的能量传播和破坏程度远大于地面环境,但通过聚脲弹性体的加固防护,可大大地减少爆炸冲击载荷对结构造成的破坏,从而保证水下设施和舰船的完整性。

2 建筑构件聚脲弹性体抗爆研究

聚脲弹性体具有质量轻、吸收冲击能量多的优点,对有效提高结构构件的抗爆性能具有显著的应用价值^[36];聚脲弹性体抗爆的试验研究在国内外已经广泛开展,在爆破试验的基础上往往还结合有限元分析模拟对试验结果进行分析验证,得到进一步的数据。

笔者^[37-43]作为国内研究聚脲弹性体技术的先行者,通过对阻尼、聚脲弹性体技术的应用总结,结合喷涂聚脲弹性体材料的工艺优势,率先提出了将约束阻尼理论应用于被防护构件的抗爆性能研究的新思路,合成了 QTECH-T413, QTECH-190, QTECH-420 等新型喷涂阻尼聚脲弹性体复合材料,在近期的罐体防爆、油罐车防撞等试验中,展示出以往传统聚脲弹性体材料所不具备的超高性能。J. S. Davidson 等^[44]利用聚脲弹性体加固砌体墙并进行了 12 次爆破试验,试验结果表明,虽然靠近支撑界面处的聚脲弹性体涂层会出现撕裂现象,但聚脲弹性体加固可有效地提高砌体墙的整体刚度,防止爆炸产生的混凝土碎片飞溅造成的二次伤害。S. N. Raman 等^[45]将聚脲弹性体喷涂到混凝土板的不同位置并进行爆破试验,试验结果发现,聚脲弹性体涂层和混凝土板仅有轻微凸起,表明聚脲弹性体涂层不仅可有效地减少面板挠曲,还能够显著地提高结构承受爆炸载荷的能力。J. H. Ha 等^[46]利用碳纤维增强聚合物、聚脲弹性体及碳

纤维改性聚脲弹性体加固钢筋混凝土板并对其进行了铵油炸药爆破试验,发现聚脲弹性体与碳纤维改性聚脲弹性体的抗爆性能优于碳纤维增强聚合物,其吸能能力可达到碳纤维增强聚合物的 1.6 倍。Wang Junguo 等^[47]通过试验研究与有限元模拟相结合的方式,对砖砌体单墙进行了无加固、迎爆面、背爆面、双面加固等不同的聚脲弹性体加固方式的对比试验,发现背爆面加固不仅能有效地包裹由爆炸载荷所造成的碎片飞溅,且聚脲弹性体加固可有效地提高砖砌体墙的抗爆性能,将墙体在爆炸载荷下的动态响应位移减少 39.3%,且聚脲弹性体的密度越低,墙体抗爆性能的提升越明显。张青艳等^[48]对表面喷涂 3 mm 厚的聚脲弹性体涂层的圆柱形混凝土和无喷涂聚脲弹性体的圆柱形混凝土进行了准静态压缩与动态落锤试验;在准静态压缩载荷作用下,无论有无聚脲弹性体涂层包覆,混凝土的内部破坏形式相近,但是有聚脲弹性体包裹的混凝土在变形达到 20% 时仍然能够承受 10 kN 以上的载荷;而在动态落锤试验中,表面喷涂了 3 mm 厚聚脲弹性体涂层的圆柱形混凝土的吸能效率达到 95% 以上,而无聚脲弹性体涂敷混凝土的吸能效率仅为 25%,由此可知,聚脲弹性体涂层可有效地增强混凝土结构的后期承载力。N. Iqbal 等^[49]在混凝土砖表面喷涂不同厚度的聚脲弹性体涂层,并利用激波管给试件施加爆炸冲击载荷,结果发现,无聚脲弹性体涂敷的混凝土砖块会在 0.35 MPa 的冲击压力下失效,形成杀伤性极大的高速碎片,而混凝土表面的聚脲弹性体涂层可显著减小碎片的产生,且最大可承受 0.62 MPa 的冲击压力;在单向爆炸载荷作用下,聚脲弹性体涂层砌体墙的抗峰值压力大于 0.41 MPa,而非加固砌体墙的抗峰值压力仅为 0.035 MPa。

相较于传统的抗爆防护措施,聚脲弹性体抗爆防护具有施工工艺简单、质量轻、施工周期短、成本低的优点,并且聚脲弹性体能够在爆炸载荷作用下通过变形耗能,减少能量冲击波的扩散。当聚脲弹性体涂敷于建筑结构的背部时,还能够通过其高韧性包裹爆炸碎片,防止碎片飞溅对人体造成的二次伤害,具备更优异的抗爆效果。

3 聚脲弹性体抗爆抗冲击有限元模拟研究

爆破试验本身存在一定的危险性与局限性,而运用 LS-DYNA 有限元软件模拟聚脲弹性体防护结构在爆炸载荷作用下的动态响应,能够安全、有效地分析其抗爆性能。除了 LS-DYNA 之外,还有类似于 AUTODYN, ABAQUS 等不同的分析软件。

3.1 非建筑构件

在复合板的有限元抗爆模拟方面,P. Tran 等^[50]开发了一种有限元模型,模拟多层复合板在爆炸载荷作用下的变形破坏形式,结果发现,将聚脲弹性体喷涂于面板的后部,在改

善面板抗爆性能方面发挥着重要作用;模拟结果显示,只需1 mm厚的聚脲弹性体涂层即可有效地减少因爆炸所造成的分层现象;D. Mohotti等^[51-52]使用LS-DYNA有限元分析软件模拟了铝-聚脲弹性体复合分层板的弹丸穿透试验,模拟结果发现,聚脲弹性体层可显著降低复合板中的弹丸速度,入射速度由原来的945 m/s降低到330 m/s,可降速度615 m/s。戴平仁等^[53]利用有限元模拟软件分析发现,聚脲弹性体作为三明治结构夹芯层时,能够显著降低三明治结构在爆炸载荷作用下的变形程度与背爆面压力;当聚脲弹性体夹层厚度增加至30 mm时,因爆炸载荷产生的位移与背部压力分别降低29.9%与97.2%。Y. Yang等^[54]研究了四种不同排列方式的圆形夹芯结构在爆炸载荷下的动态响应过程,在总共进行的50次数值模拟试验中,发现聚脲弹性体作为夹芯结构的附加隔层时,可显著降低其在爆炸载荷作用下的剪切失效,且应力分布更加平稳,并且聚脲弹性体可以通过其变形吸收能量,提高了夹芯板的抗爆能力。宋彬等^[55]通过有限元仿真技术对无夹层防爆罐、橡胶夹层防爆罐以及聚脲弹性体夹芯防爆罐的抗爆性能进行了对比研究,发现聚脲弹性体的冲击波衰减幅度可达63.4%,且动能转化为内能的效率最高,说明聚脲弹性体夹芯防爆罐具有良好的抵抗变形和吸收能量的特点。廖瑜等^[56]利用ANSYS/LS-DYNA有限元软件,对聚脲弹性体加固与聚脲弹性体-玻璃纤维复合材料加固钢板的抗冲击性能进行了仿真模拟,结果表明,聚脲弹性体涂层加固可有效地减小钢板的峰值动能,而玻璃纤维的加入可进一步增强聚脲弹性体的防护作用,使其吸能效率达到28%以上,且随着聚脲弹性体基体中编织玻璃纤维网格布层数的增加,聚脲弹性体涂层可吸收更多的冲击波能量,提高钢板的整体刚度和抗冲击性能。

在钢板的有限元抗爆模拟方面,A. Samiee等^[57]将不同厚度的聚脲弹性体涂层喷涂于圆形钢板的迎爆面与背爆面,模拟了聚脲弹性体涂层的不同加固方式对圆形钢板的爆炸动态响应过程;模拟结果表明,相较于迎爆面涂敷,背爆面涂敷聚脲弹性体可有效地减小爆炸产生的平均有效塑性应变,且随着聚脲弹性体涂层厚度的增加,这种差异变得更加明显;当聚脲弹性体涂层厚度达到4 cm时,背爆面涂敷钢板的有效塑性应变减小25%,显示出更优越的抗爆性能。D. Mohotti等^[58]采用高强度钢的钝圆柱弹射冲击装置以5~15 m/s的速度撞击涂敷了6 mm和12 mm厚聚脲弹性体的铝合金板,利用LS-DYNA对试验进行数值模拟,模拟结果发现,当冲击速度为8.65 m/s时,未涂敷聚脲弹性体的圆形钢板中心变形为13.10 mm,而钢板上涂敷6 mm的聚脲弹性体涂层后,变形减小到9.65 mm,中心挠度降低24%,当涂层厚度增加到12 mm时,中心挠度进一步减小到

7.20 mm,与未涂敷聚脲弹性体钢板相比,总变形减小45%,显示出聚脲弹性体优异的抗冲击吸能性能。Liang Xue等^[59]对弹体侵彻钢板过程的能量耗散进行了数值模拟与试验研究,并就不同的聚脲弹性体加固方式进行分析,结果发现,当聚脲弹性体作为背板时能够消耗弹体大量的动能,试验结果与数值模拟结果相仿。许帅^[60]利用LS-DYNA有限元模拟软件对无聚脲弹性体涂敷铝板、单层聚脲弹性体涂敷铝板(4 mm厚铝板+6 mm厚聚脲)以及三明治复合结构(2 mm厚铝板+6 mm厚聚脲+2 mm厚铝板)进行了尖头子弹的0°角侵彻试验,模拟结果发现,无聚脲弹性体涂敷铝板的弹丸降速幅度达到11.35%,三明治复合结构的弹丸降速幅度达到13.7%,单层涂敷结构的弹丸降速幅度达到21.6%;由模拟结果可知,单层聚脲弹性体涂层结构可有效地减小弹丸的侵彻速度,具备最佳的抗侵彻能力。翟文等^[61]通过LS-DYNA有限元模拟软件对钢板-聚脲弹性体-钢板的三明治复合结构进行了三种不同爆炸情况下的TNT爆炸模拟试验,模拟结果显示,随着钢板厚度的增加,三明治复合板的变形程度显著降低,而聚脲弹性体夹层的存在可有效地抑制三明治复合板弹孔的扩张,减少裂缝与碎片的产生,因此,将钢板与聚脲弹性体有效地结合,不仅能够提高结构的整体爆炸承载力,还能有效地抑制碎片的产生。

通过上述研究发现,有限元分析可准确地对试验进行模拟,从模拟和试验结果可以看出,聚脲弹性体的抗爆抗冲击性能优异,具有广泛的应用前景。

3.2 建筑构件

建筑构件在爆炸载荷作用下的动力学响应过程复杂,试验成本较高,重复性较差;而通过有限元模拟软件则可以较为精准地对整个试验进行研究,确定最适合的试验方案,具有操作性强、实施简单、节约成本等优点。

M. Ghaderi等^[62]建立了一种用纤维增强聚合物和聚脲弹性体喷涂砌体墙的先进微建模策略,对混凝土中破碎现象的非线性行为进行了模拟,结果表明,聚脲弹性体覆盖层增加了墙体在爆炸载荷下的抗弯能力。蔡桂杰^[63]利用LS-DYNA有限元软件,模拟了聚脲弹性体的不同涂敷方式对钢筋混凝土抗爆性能的影响,其中混凝土的尺寸为65 cm×65 cm×10 cm,炸药质量200 g,在接触爆炸的情况下,对无聚脲弹性体涂敷、迎爆面涂敷以及背爆面涂敷的钢筋混凝土板进行模拟爆炸试验,结果表明,无聚脲弹性体涂敷的钢筋混凝土板爆炸损伤坑最为明显,坑深为6.54 cm,混凝土板面压力峰值最高达到172.6 kPa;迎爆面涂敷聚脲弹性体的混凝土板面压力峰值为89.75 kPa,但板面压力波并未扩散至整体,坑深为4.73 cm;背爆面涂敷聚脲弹性体的钢筋混凝土板的压力峰值最小,只有54.8 kPa,且板面压

力集中在一个较小的区域内,坑深仅为 3.82 cm,通过数值模拟可发现,聚脲弹性体涂层可有效地增强钢筋混凝土板在爆炸载荷下的整体刚度,减少损伤。

黄华等^[64]以 James 的爆炸试验为基础,借助 LS-DYNA 软件,分析了混凝土砌体墙在爆破载荷作用下的破坏机理,以及聚脲弹性体喷涂的聚合物薄片材料的抗爆性能,发现该材料可有效提高混凝土墙的抗爆能力,并合理估计了不同 TNT 当量下的安全防护距离。许三罗等^[65]利用有限元软件 LS-DYNA 对爆炸冲击载荷作用下砌体墙的变形与破坏形式进行了数值模拟,得到了未加固和聚脲弹性体加固砌体墙的变形、破坏形式、跨中挠度与速度等分析结果,计算结果显示,聚脲弹性体与碳纤维布均能有效提高砌体墙的抗爆性能,而碳纤维布加固墙体的跨中挠度低于聚脲弹性体。

有限元分析可快速有效地对爆破试验进行分析模拟,并生成时程曲线、应力-应变曲线等多种数据,为试验研究提供可靠的数据支持。通过数值模拟,还能模拟多种变量下的爆破试验,以便对爆破试验进行最合理有效的优化。

4 结语

在抗爆抗冲击领域,聚脲弹性体不仅能通过其高延展性有效地抵消爆炸冲击波,也能防止碎片飞溅造成的二次伤害。但是,为了应对复杂多变的反恐形势,尚需从以下几个方面开展深入研究:

(1) 聚脲弹性体的抗爆研究主要针对建筑构件等地面设施,也涉及了一些水下设施,但对地下设施的抗爆研究较少,而爆炸物会对地下的密闭空间造成极为严重的破坏和影响,因此,应该加强对地下设施的抗爆研究。

(2) 聚脲弹性体抗爆多用于军用领域,而对民用交通领域的研究较少,今后应将聚脲弹性体运用到诸如汽车、地铁等载客量较大的大众交通工具上,研究爆炸发生时聚脲弹性体的防护性能,减少爆炸碎片对乘客造成的伤害。

(3) 传统聚脲弹性体的单层防护机理和行为已经得到公认,而新型高性能、多层复合聚脲弹性体抗爆机理和行为的研究还处于初级阶段。在 WLF 方程条件下,利用 LS-DYNA 有限元软件对聚脲弹性体复合涂层在爆炸冲击载荷作用下抗爆机理和行为的研究,是今后研究的热点和重点。

(4) 通过有限元软件能够模拟复杂的爆炸情况,但是材料参数的确定往往取决于待研究的工程结构,并且实际的爆破试验会受到多种要素的共同影响,因此进行数值模拟时,要对数值模型进行整体优化以满足材料参数和工程结构的要求,形成确定的体系模型,以应对复杂多样的爆破试验研究。

参考文献

[1] 李洪祥,等.兵器装备工程学报,2016,37(5):129-134.

Li Hongxiang, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering,

2016,37(5):129-134.

[2] Wang Yonghui, et al. Thin-Walled Structures, 2016, 108:185-192.

[3] Li Jun, et al. International Journal of Impact Engineering, 2017, 110:242-254.

[4] Qi Chang, et al. Composite Structures, 2017, 180:161-178.

[5] Qu Yandong, et al. Construction and Building Materials, 2017, 156:692-707.

[6] Zheng Cheng, et al. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113:144-160.

[7] Phadnis V A, et al. Materials & Design, 2014, 57:719-727.

[8] Alsayed S H, et al. Construction and Building Materials, 2016, 115:438-451.

[9] Guo Zhanggen, et al. Materials and Structures, 2017, 50(6):doi:10.1617/s11527-017-1107-6.

[10] 郭磊.砌体填充墙抗爆加固系统的研究[D].长沙:湖南大学, 2012.

Guo Lei. Research of blast-retrofit infilled masonry walls[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[11] 黄微波.喷涂聚脲弹性体技术[M].北京:化学工业出版社, 2005:10-13.

Huang Weibo. Spray polyurea elastomer technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:10-13.

[12] 黄微波,等.材料导报,2013,27(6):23-26.

Huang Weibo, et al. Materials Review, 2013, 27(6):23-26.

[13] 黄微波. CN01114996.7[P].2001-05-30.

Huang Weibo. CN01114996.7[P].2001-05-30.

[14] 黄微波,等.高分子材料科学与工程,1992(4):42-44.

Huang Weibo, et al. Polymeric Materials Science and Engineering, 1992(04):42-44.

[15] Huang Weibo, et al. Journal of Protective Coatings & Linings, 2011, 28(12):28-34.

[16] 黄微波,等.上海涂料,2011,49(2):42-47.

Huang Weibo, et al. Shanghai Coatings, 2011, 49(2):42-47.

[17] 黄微波,等.高分子材料科学与工程,1995(2):102-105.

Huang Weibo, et al. Polymeric Materials Science and Engineering, 1995(2):102-105.

[18] 黄微波,等.高分子材料科学与工程,1996(5):137-139.

Huang Weibo, et al. Polymeric Materials Science and Engineering, 1996(5):137-139.

[19] 黄微波.上海涂料,2009,47(5):1-4.

Huang Weibo. Shanghai Coatings, 2009, 47(5):1-4.

[20] 黄微波,等.现代涂料与涂装,2012,15(8):11-15.

Huang Weibo, et al. Modern Paint & Finishing, 2012, 15(8):11-15.

[21] 黄阳洋,等.兵器装备工程学报,2018,39(4):57-60.

Huang Yangyang, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(4):57-60.

[22] Saba N, et al. Construction and Building Materials, 2016, 106:149-159.

- [23] Grujicic M, et al. International Journal of Structural Integrity, 2016, 7(4):517–552.
- [24] Mcshane G J, et al. International Journal of Solids & Structures, 2008, 45(16):4407–4426.
- [25] Tchantchou F, et al. Journal of Neurotrauma, 2018, 35(10):1192–1203.
- [26] Lotfi S, et al. Structural Engineering and Mechanics, 2018, 65(5):587–600.
- [27] Bogoslovov R B, et al. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): doi:10.1063/1.2745212.
- [28] Gardner N, et al. Experimental Mechanics, 2012, 52(2):119–133.
- [29] 赵鹏铎,等. 北京理工大学学报, 2018, 38(2):118–123.
Zhao Pengduo, et al. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(2):118–123.
- [30] 邓希旻,等. 兵工学报, 2017, 38(S1):60–65.
Deng Ximin, et al. Acta Armamentarii, 2017, 38(S1):60–65.
- [31] 贺红鹰,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(5):89–92.
He Hongying, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(5):89–92.
- [32] 黄阳洋. 聚脲涂层复合结构抗破片侵彻机理研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
Huang Yangyang. Study on mechanism of anti-fragment penetration of polyurea coated composite structure [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [33] 顾承庆,等. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(6):47–51.
Gu Chengqing, et al. Hydropower and Pumped Storage, 2016, 2(6):47–51.
- [34] Matos H, et al. Mechanics of Materials, 2018, 116:169–179.
- [35] Dai Lihui, et al. Advances in Materials Science & Engineering, 2018, 2018:1–7.
- [36] 王小伟,等. 工程塑料应用, 2017, 45(5):63–68.
Wang Xiaowei, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5):63–68.
- [37] 黄微波,等. 新型建筑材料, 2012, 39(12):66–69.
Huang Weibo, et al. New Building Materials, 2012, 39(12):66–69.
- [38] Huang Weibo, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 50(2):277–283.
- [39] 黄微波,等. 材料开发与应用, 2014, 29(4):82–85.
Huang Weibo, et al. Development and Application of Materials, 2014, 29(4):82–85.
- [40] 张志超,等. 环保科技, 2017, 23(6):56–60.
Zhang Zhichao, et al. Environmental Protection and Technology, 2017, 23(6):56–60.
- [41] 吕平,等. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(3):261–264.
Lyu Ping, et al. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(3):261–264.
- [42] 黄微波. CN91105484.7[P].1991-08-14.
Huang Weibo. CN91105484.7 [P].1991-08-14.
- [43] 黄微波. CN93107379.0[P].1993-06-26.
Huang Weibo. CN93107379.0[P].1993-06-26.
- [44] Davidson J S, et al. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(8):1194–1205.
- [45] Raman S N, et al. Advances in Materials Science and Engineering, 2012, 2012:1–8.
- [46] Ha J H, et al. Composite Structures, 2011, 93(8):2070–2082.
- [47] Wang Junguo, et al. Composites Part B:Engineering, 2017, 128:174–181.
- [48] 张青艳,等. 工程力学, 2016, 33(4):205–209.
Zhang Qingyan, et al. Engineering Mechanics, 2016, 33(4):205–209.
- [49] Iqbal N, et al. Construction and Building Materials, 2018, 175:682–690.
- [50] Tran P, et al. Composite Structures, 2016, 153:108–122.
- [51] Mohotti D, et al. Materials and Design, 2015, 82:1–17.
- [52] Mohotti D, et al. Materials and Design, 2013, 52:1–16.
- [53] 戴平仁,等. 工程塑料应用, 2017, 45(12):70–74.
Dai Pingren, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):70–74.
- [54] Yang Y, et al. Engineering Structures, 2011, 33(10):2781–2793.
- [55] 宋彬,等. 振动与冲击, 2016, 35(7):138–144.
Song Bin, et al. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(7):138–144.
- [56] 廖瑜,等. 兵工学报, 2018, 39(10):1988–1996.
Liao Yu, et al. Acta Armamentarii, 2018, 39(10):1988–1996.
- [57] Samiee A, et al. Mechanics of Materials, 2013, 64(9):1–10.
- [58] Mohotti D, et al. Materials and Design, 2014, 56:696–713.
- [59] Xue Liang, et al. Mechanics of Materials, 2010, 42(11):981–1003.
- [60] 许帅. 聚脲弹性体复合结构抗冲击防护性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
Xu Shuai. The impact resistance study of polyurea composite structures [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [61] 翟文,等. 兵工自动化, 2018, 37(10):65–69.
Zhai Wen, et al. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(10):65–69.
- [62] Ghaderi M, et al. Cumhuriyet Science Journalc, 2015, 36(4):462–477.
- [63] 蔡桂杰. 弹性体涂覆钢筋混凝土板抗爆作用设计方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
Cai Guijie. The design method of the reinforced concrete plate coated polyurea under the action of explosion [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [64] 黄华,等. 振动与冲击, 2013, 32(19):131–138.
Huang Hua, et al. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(19):131–138.
- [65] 许三罗,等. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 11(3):306–311.
Xu Sanluo, et al. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(3):306–311.