

## 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展

池海, 王刚, 赵鹏铎, 张磊, 张鹏

引用本文:

池海, 王刚, 赵鹏铎, 等. 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(2): 100–106.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 破片和冲击波复合作用对装甲板毁伤敏感性分析

引用本文: 李峰, 石全, 尤志锋, 等. 破片和冲击波复合作用对装甲板毁伤敏感性分析[J]. [兵器装备工程学报](#), 2019, 40(10): 93–96.

### 2. 超聚能-球缺复合药型罩形成侵彻体的数值模拟

引用本文: 张凯奇, 周春桂, 王志军, 等. 超聚能-球缺复合药型罩形成侵彻体的数值模拟[J]. [兵器装备工程学报](#), 2019, 40(10): 59–62.

### 3. 碳化硼陶瓷粉体制备研究进展

引用本文: 郭在在, 曹剑武, 燕东明, 等. 碳化硼陶瓷粉体制备研究进展[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(12): 278–280.

### 4. 猎雷遥控艇抗爆性能试验方法与风险评估

引用本文: 张臣, 谢君红. 猎雷遥控艇抗爆性能试验方法与风险评估[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(11): 13–16.

### 5. 嵌入式共固化网格阻尼结构复合材料的动力学性能研究

引用本文: 李雪, 梁森, 梁天锡. 嵌入式共固化网格阻尼结构复合材料的动力学性能研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(3): 132–137.

# 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展

池海<sup>1,2</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 赵鹏铎<sup>2</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 海军研究院, 北京 100161)

**摘要:** 基于聚脲复合装甲结构抗爆性能的研究现状, 阐述了近年来关于聚脲弹性体材料的力学性能和聚脲复合装甲结构的抗爆性能的研究情况和尚未解决的问题, 提出未来研究的方向。

**关键词:** 聚脲; 复合装甲结构; 抗爆性能

**本文引用格式:** 池海, 王刚, 赵鹏铎, 等. 聚脲装甲结构抗爆性能研究发展[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 100-106.

**Citation format:** CHI Hai, WANG Gang, ZHAO Pengduo, et al. Research and Development of Explosion Resistance of Polyurea Armored Structures[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 100-106.

中图分类号: TJ410

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)02-0100-07

## Research and Development of Explosion Resistance of Polyurea Armored Structures

CHI Hai<sup>1,2</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, ZHAO Pengduo<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;  
2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

**Abstract:** Based on the research status of explosion resistance of polyurea composite armor structure, this paper summarized the research status of mechanical properties of polyurea elastomer material and explosion resistance of polyurea composite armor structure in recent years, and then summarized the unsolved problems and put forward the direction of future research.

**Key words:** polyurea; composite armor structure; explosion resistance

高爆炸药在空气中爆炸时, 形成了的高温高压气体猛烈地推动周围静止的空气, 产生一系列的压缩波向四周传播, 各个压缩波最终叠加成冲击波<sup>[1]</sup>。爆炸产生的冲击载荷具有很强的毁伤作用, 抗爆能力是武器装备的重要战技指标, 抗爆防护领域一直备受关注。若加厚传统的钢制装甲必定导致武器装备整体质量增加, 大幅降低其机动性, 故防护材料的轻量化是武器装备防护发展的重要方向。

随着科技的进步, 在防护结构中引入新材料是一种提高抗爆防护能力的新手段。上世纪后期, 出现了一种新型的复合材料聚脲弹性体。它是由异氰酸酯与氨基化合物反应生成的一种弹性体物质<sup>[2]</sup>。聚脲弹性体具有柔韧性、耐磨性、

良好的热稳定性且防湿滑、耐老化、防腐蚀; 具有良好的理化性能和喷涂工艺; 与金属和非金属材料基材间具有很强的附着力, 基材经过适当的处理后(一般是喷底漆), 可以对多种材料进行喷涂形成层状结构; 在保持防护性能的基础上, 也解决了其它轻量化材料防护性能单一、不易加工等缺点<sup>[2-6]</sup>。随着喷涂聚脲弹性体技术的发展, 这种材料的优异性能渐渐被材料界和工程界认知。聚脲复合材料以其优点, 具有广泛的应用价值。近年来聚脲复合材料广泛应用在装甲抗爆防护领域, 引起了国内外研究人员的广泛关注, 因此开展聚脲复合装甲结构的抗爆性能研究, 有着十分重要的意义。

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-05-16

作者简介: 池海(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事复合材料抗爆性能研究, E-mail: chyglz@qq.com。

由于聚脲复合材料抗爆机理涉及领域多,问题研究跨学科,单一的研究工作难以解决。本文主要针对国内外聚脲装甲结构抗爆性能的研究工作,对近年来关于聚脲弹性体材料力学性能和聚脲复合装甲结构抗爆性能的研究情况进行了简要综述,并探讨了该问题的研究现状和发展趋势。

## 1 聚脲弹性体材料的力学性能

要研究聚脲复合材料的抗爆性能,就要提供必要的力学参数,故需要对聚脲弹性体材料进行力学性能的测试。在低应变率(小于  $1.0 \text{ s}^{-1}$ )下,采用万能材料试验机进行材料的准静态力学试验;在高应变率( $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ )下,试验加载过程短,采用霍普金森实验技术。国内外的科研人员通过动静力学试验做了以下研究:

在国内甘云丹等<sup>[7]</sup>利用伺服材料试验机 810MTS 对聚脲的准静态力学性能进行测试,完成以上 3 组应变率下的实验,得到了聚脲在应变率为  $0.1/\text{s}$ 、 $0.01/\text{s}$ 、 $0.001/\text{s}$  时的应力-应变曲线,如图 1。比较三组应力应变曲线可看出由于加载速率不同导致在相同应变下材料的应力不同,且由于加载速率不同,材料的屈服极限随着加载速率增加而增加。采用霍普金森杆装置测试了聚脲材料在不同应变率下的动态压缩力学性能,发现随着对聚脲材料加载速率的提高,材料在准静态和动态压缩的力学性能有了一定的提高。表明聚脲材料具有明显的应变率效应,即在材料加载速率提高的情况下,材料力学性能得到一定的提高。

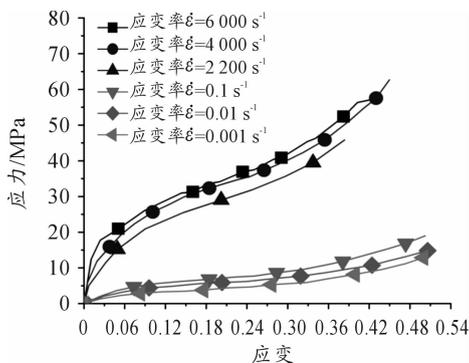


图1 聚脲弹性体在准静态和动态压缩下的应力应变曲线

蔡桂杰等<sup>[8]</sup>利用万能材料试验机 INSTRON5969 对高弹性聚脲材料进行了准静态情况下的压缩试验,利用了霍普金森杆试验机对聚脲材料的动态力学性能进行压缩试验,得到了如图 2 所示的应力应变曲线。实验表明伴随聚脲材料加载速率的不断提高,在材料应变率效应影响下,材料的静态力学性能会有一定程度的提升,同时动态力学性能也会有一定程度的提升。材料的动态加载速率比准静态加载速率要高出一截,这表明聚脲材料具有明显的应变率效应。

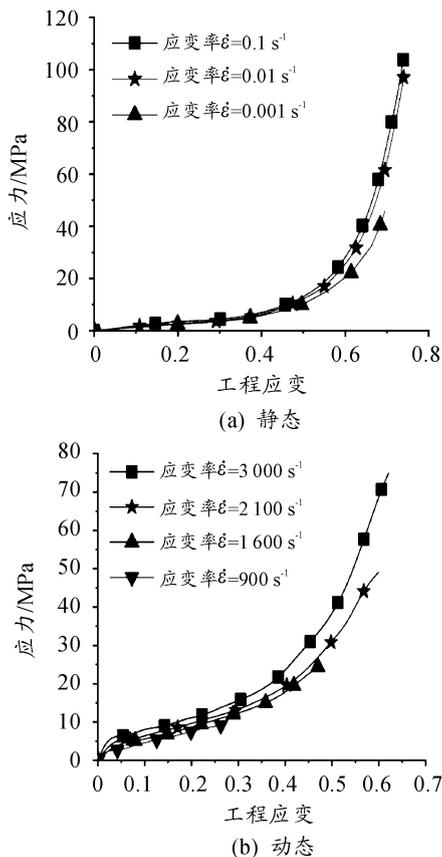


图2 不同应变率下聚脲材料压缩试验应力应变曲线

戴平仁等<sup>[9]</sup>针对高弹性聚脲材料开展了静态压缩和拉伸试验,利用分离式霍普金森杆试验机进行了动态压缩试验,其应力-应变试验曲线如图 3。试验表明聚脲弹性体在静态压缩和拉伸、动态压缩的过程中具有明显的非线性和应变率相关性,并且随着应变的增加,出现弹性-线性硬化现象,刚度随着应变率的增加而增加。在静力学拉伸下,聚脲拉伸速率越快,其断裂伸长率越高。在静态压缩下,当卸载时聚脲弹性体能够快速的恢复变形。在动态压缩下,当应变率为  $500 \text{ s}^{-1}$ 、 $800 \text{ s}^{-1}$  时试样无明显变形;当应变率为  $1500 \text{ s}^{-1}$  时试样中间出现皱纹;当应变率为  $2100 \text{ s}^{-1}$  时试样中心发生裂纹,且试样吸收大量的能量,温度较高。

代利辉等<sup>[10]</sup>通过动态拉伸试验发现,应变率在  $600 \text{ s}^{-1}$  到  $1500 \text{ s}^{-1}$  范围内,粘性-超弹性模型更适合描述高应变率下聚脲非线性和速率相关的应力-应变行为。高应变率下聚脲非线性应力-应变行为由多个阶段组成的:初始的线弹性阶段,非线性过渡屈服阶段和硬化失效阶段,且应变率越高,越有利于提高材料在动态载荷下对能量的吸收和耗散。

在国外 J. Yi 等<sup>[11]</sup>开展了聚脲弹性体材料的准静态压缩和动态压缩试验,通过研究不同应变率下材料的应力应变关系,不同应变率下的压缩应力应变关系曲线如图 4。发现在载荷加载下聚脲弹性体发生大变形时的应力-应变曲线表现出明显的滞后性。聚脲弹性体具有很强的非线性和应变

率相关性,并且会经历从低应变率下的橡胶特性向高应变率下的皮革特性转变。S. S. Sarva 等<sup>[12]</sup>采用新的实验技术研究了聚脲弹性体在不同应变率下材料的力学行为特性,精确

描述了聚脲弹性体具有极强的应变率相关性。

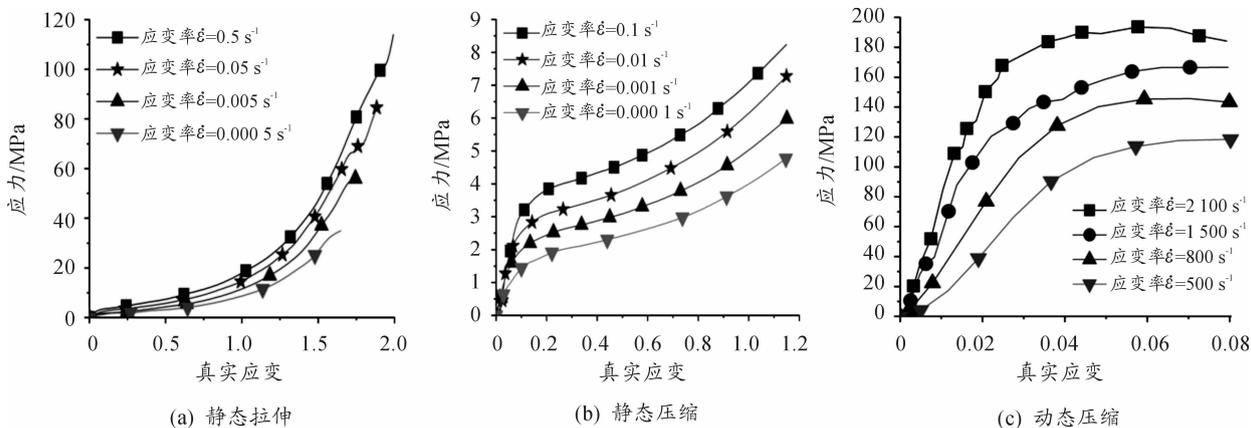


图3 聚脲弹性体在不同条件下的应力-应变曲线

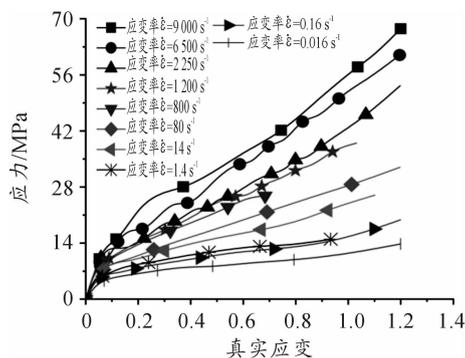


图4 不同应变率下的压缩应力应变关系曲线

J. A. Pathak 等<sup>[13]</sup>分析了聚脲弹性体在低应变率下的拉伸力学性能,发现随着应变率的增加,其强度和刚度增加而破坏应变减小。通过 DSC 分析发现材料的温度效应同其微相分离的结构(如图5)关系很密切。

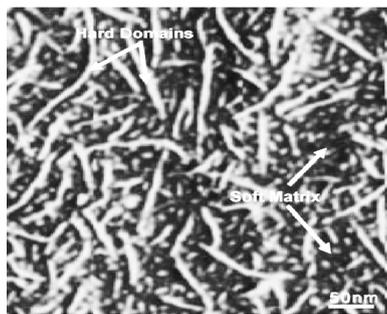


图5 聚脲弹性体微观结构

J. Shim 和 D. Mohr 等<sup>[14-15]</sup>采用改进的霍普金森杆装置,对中等应变率加载下材料的力学性能进行研究,由于输入输出杆中多重波的反射作用,导致应变率不是一个常数,他们据此提出应该采用更长(大于20 m)或更短(小于0.5 m)的压杆才能获得均匀的应变率,并且在试验过程中发现

随着加载压力的增大,应变率效应越加明显。

S. N. Raman 等<sup>[16]</sup>通过低中应变率下的拉伸试验,不同应变率下的拉伸应力应变曲线如图6。发现在高应变率下聚脲弹性体的应力应变行为具有显著的非线性和率相关性,且其弹性模量随着应变率的增加而增加。应变率对材料的弹性模量、剪切模量和屈服强度有一定的影响,且随着应变率的增加,弹性模量和屈服强度增加,而剪切模量则基本不变。

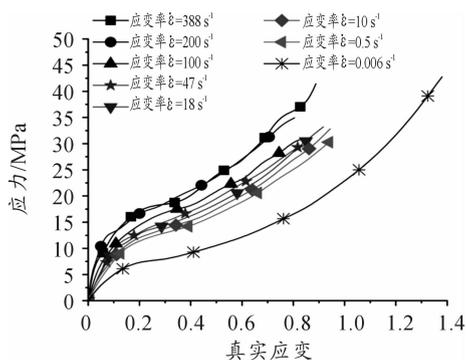


图6 不同应变率下的拉伸应力应变曲线

综合以上动静态力学性能试验研究表明,聚脲弹性体具有优异的力学特性,本构关系呈非线性。在低中不同应变率情况下聚脲弹性体拉压力学性能具有很高相似性。随着应变率增大,聚脲弹性体会从橡胶态向皮革态转变继而向玻璃态演变,其刚度也增大。变形过程中,材料吸收并消耗大量能量,能够迅速恢复原状,表现出较好的自愈性。

## 2 聚脲复合装甲结构抗爆性能

近年来,针对不同类型的聚脲复合装甲结构的抗爆性能,国内外的科研人员基于影响抗爆性能的不同因素,通过对比试验或数值仿真做了以下研究工作:

在国内甘云丹等<sup>[7,17-18]</sup>运用 ANSYS/LS-DYNA 软件,使用定量分析法,数值模拟了以爆距、涂覆方式、涂覆厚度等因素衡量聚脲弹性体涂覆钢板的抗爆性能。模拟的结果(如表1)表明,弹性体涂覆钢板的抗爆性能比未涂覆的钢板的抗爆能力大约提高了24%。弹性体涂覆在钢板的背面要比涂覆在钢板的前面以及前后涂覆的抗爆能力要强。随着弹性体涂覆厚度的增加,钢板的抗爆能力没有得到显著的增强,同时也带来了一些负面的影响因素如:钢板的体积、涂覆后的复合板的成本都有了显著的增加,得出涂覆2 mm厚的弹性体能显著提高钢板的抗爆能力的结论。另外他们对聚脲参数对抗爆性能的敏感性进行了研究,推断出弹性模量和断裂应变是影响聚脲涂覆钢板抗爆性能的重要参数。他们还通过小模型水下爆炸实验研究了弹性体涂覆钢板的抗爆性能,试验结果如图7,通过观察钢板的变形及破坏情况,看到纯钢板破口比涂覆钢板的破口要大,说明了聚脲涂覆钢板抗爆能力比纯钢板抗爆能力要强。

表1 七种工况下的钢板变形及破坏的模拟结果

工况	爆距/cm	钢板厚度/cm	涂层厚度/cm	毁伤程度
1	150	2.00	0.5	边缘撕裂、整体变形较大
2	175	2.00	0.5	边缘局部破坏、变形较大
3	190	2.00	0.5	变形较大但未破坏
4	200	2.06	0	中心破坏
5	225	2.06	0	中心破坏
6	240	2.06	0	中心破坏
7	250	2.06	0	变形较大但未出现破坏



图7 纯钢板与聚脲前后涂覆钢板抗爆性能的试验结果

宋彬等<sup>[19-20]</sup>运用 LS-DYNA 有限元软件对有无夹层及不同聚脲弹性体夹层厚度、不同配置方式(面板背板厚度比)结构的抗爆性能进行研究,冲击波在5种聚脲厚度夹层的衰减情况如图8,通过理论计算与仿真相结合,主要得出下两个方面的结论:①推导了冲击波在弹性体夹层复合结构中的衰减公式,与夹层材料的波阻抗有关;②冲击波在聚脲弹性体夹层中衰减效果明显,衰减幅度达到63.4%,可见聚脲弹性体有较强的消波作用。冲击波在弹性体中的衰减与冲击波在弹性体的传播时间密切相关,传播时间越长,衰减幅度越大。

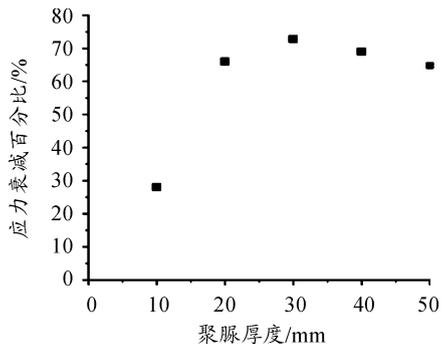


图8 冲击波在5种聚脲厚度夹层的衰减情况

赵延杰等<sup>[21]</sup>通过聚脲涂覆钢板水下爆炸试验研究中发现,在涂层厚度相同时,相对于聚脲喷涂于钢板的迎爆面钢板或双面,涂覆在钢板背爆面时可以起到最好的防护效果,试验结果如图9所示,并发现在钢板厚度保持不变的前提下,背爆面涂覆1倍板厚的涂层,抗爆能力提升大于10%;背爆面涂覆2倍板厚的涂层,抗爆能力提升大于20%;背爆面涂覆3倍板厚的涂层,抗爆能力提升30%~40%。

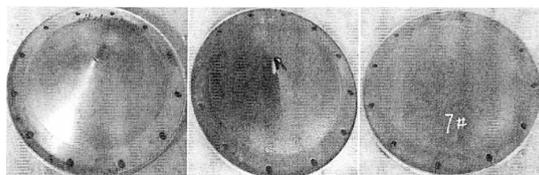


图9 等厚度钢板不同涂覆方式的毁伤试验结果

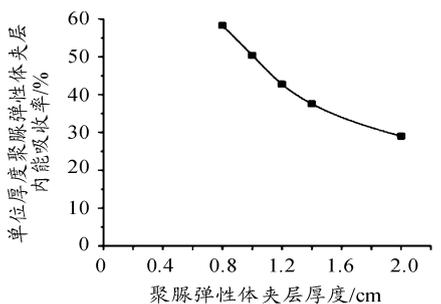
戴平仁等<sup>[9,22-23]</sup>采用数值计算与抗爆试验研究了聚脲弹性体对钢板喷涂加固后的抗爆性能。结果表明:喷涂聚脲弹性体的钢板破坏程度降低,当聚脲作为夹层填充时,靶板吸能最多,且能大幅度衰减冲击波,抗爆性能优于正面喷涂、背面喷涂、双面喷涂。有无底漆对靶板抗爆性能影响较小,在靶板总质量不变的情况下,聚脲涂层越厚,靶板抗爆性能越好。他们还采用数值计算研究了聚脲弹性体对铝蜂窝进行喷涂加固后的抗爆性能,结果表明:喷涂聚脲弹性体的铝蜂窝结构破坏程度降低,当聚脲对铝蜂窝内腔填充时,靶板不仅吸能最多,而且未发生破坏,抗爆性能优于正面喷涂、背面喷涂和双面喷涂。最后得出结论:当聚脲作为夹层填充时,靶板的吸能能力、衰减冲击波的能力最好,且破坏程度最低,抗爆性能最好。

代利辉等<sup>[10]</sup>通过水下爆炸试验研究涂覆有聚脲层薄钢板的保护效果,其试验结果如表2。可以看出相对于纯钢板,无论是涂在板的正面还是背面,聚脲都可为钢基材提供显著的抗爆性,面密度仅很小程度的增加;并且在薄钢板上增加聚脲层厚度有助减少爆炸试验中测试板的变形,这与材料在非线形动力学变形过程中吸收大量能量有着直接的关系。

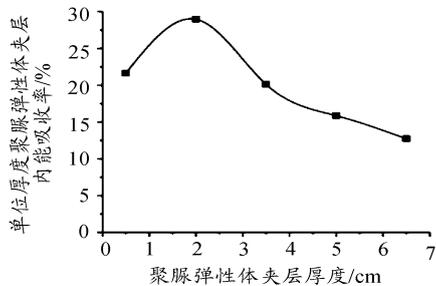
表2 相同爆距水下爆炸试验不同工况的试验结果

序号	聚脲厚度/mm	喷涂面	最大变形量/%	变形量降低度/%	面密度对比/%
1	0	无	113.5 (一条缝)		
2	0	无	三瓣		
B3	4	Front	66.6	41.3	127
B4	4	Back	68.4	39.7	127
B5	2	Back	81.9	27.8	113
B6	2	Front	78.8	30.5	113

翟文等<sup>[24]</sup>通过对聚脲弹性体填充钢板夹层靶板进行数值计算和试验研究,研究发现:聚脲弹性体在爆炸过程中不仅能吸收大量能量,而且能抑制靶板发生大变形;为提高靶板抗爆能力,防止破片产生,其面板与背板需要有较好的强度与刚度。王小伟等<sup>[25]</sup>利用 LS-DYNA 对聚脲弹性体复合夹层结构在爆炸载荷下的动力响应进行模拟,在厚度或质量固定条件下,聚脲弹性体夹层厚度对复合夹层结构抗爆性能的影响进行研究,单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率与厚度的关系曲线如图 10。研究发现:厚度固定条件下,钢板厚度与聚脲弹性体夹层厚度比为 1.4:1.2:1.4 时,抗爆能力较好;质量固定条件下,钢板厚度与聚脲弹性体夹层厚度比为 0.903:3.5:0.903 时,抗爆性能较好。



(a) 复合夹层结构总厚度固定



(b) 复合夹层结构总质量固定

图 10 单位厚度聚脲弹性体夹层内能吸收率与厚度的关系

赵鹏铎等<sup>[26]</sup>研究了聚脲不同涂覆方式下钢板与箱体结构的抗爆性能。结果表明:等面密度时迎爆面涂覆聚脲不能提高钢板的抗爆性能,且复合结构中涂层越厚,钢板变形越

大;等钢板厚度时涂覆聚脲能够有效提高钢板与箱体结构在外爆与内爆载荷下的抗爆性能,得出背爆面涂覆时效果优于迎爆面涂覆的结论。

在国外早年美国空军研究室提出利用弹性体材料作为抗冲击增强涂覆层的技术<sup>[27]</sup>。美国海军将聚脲喷涂装甲上形成喷涂型装甲“Spmly-on Armor”,使其遭遇爆炸时可提升一倍的防护等级<sup>[28]</sup>,即 3/16 英寸厚度均质钢板喷涂聚脲后,抗爆性能和 3/8 英寸的相同,其试验情况如图 11。可以看出喷涂聚脲弹性体的钢板抗变形能力明显提高。美国陆军研究实验室提出采用聚脲弹性体作为头盔的悬架垫材料,可有效削弱爆炸冲击波,加强对脑部的防护<sup>[29]</sup>。M. Grujicic 等<sup>[30]</sup>把聚脲夹层作为头盔的吸能材料,如图 12,通过数值计算以冲击波超压峰值作为评估聚脲衰减冲击波能力。结果表明弹性体衰减冲击波效果较好,聚脲弹性体涂覆在钢板结构在爆炸冲击作用下可明显提高其变形能力和吸能特性。



图 11 聚脲涂覆钢板复合结构抗爆试验情况

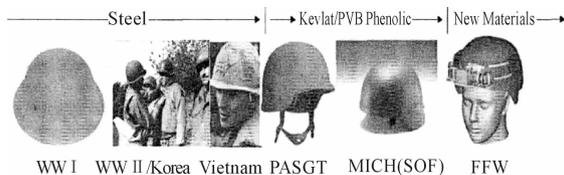


图 12 聚脲头盔

R. J. Dinan 等对<sup>[31]</sup>喷涂聚合物的混凝土墙在爆炸载荷作用下的破坏机制进行分析。通过对单面喷涂墙体进行数次实爆实验并通过高速摄影,发现在开裂处,聚合物产生高应变。研究者认为薄膜结构能增强墙体的抗弯刚度和抵抗力,表明弹性体涂覆在墙的表面能有效增加其抗爆性能。

M. R. Amini 等<sup>[32]</sup>分析单位厚度的能量变化发现:聚脲层作为背板时,由于聚脲材料的粘弹性特性,钢板受到初始加载后,有一部分能量会被聚脲层吸收和弥散掉,因此能够有效减少钢板产生的塑性变形;聚脲层作为面板(冲击侧)时,在爆炸冲击加载下,聚脲层的刚度、硬度会明显增加,使得同钢板之间具有更好的阻抗匹配,因此能够传递的能量越多,促进了钢板的破坏。

K. Ackland 等<sup>[33]</sup>对具有相同面密度但涂覆方式不同的复合结构的进行抗爆性能分析,等面密度不同涂覆方式的毁伤变形情况如图 13。发现聚脲层作为背板时,钢板的破坏和残余变形明显减少,而作为面板(冲击侧)时,钢板的破坏反而得到了增强。

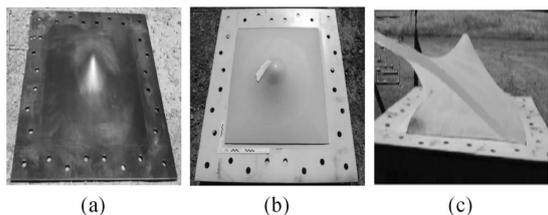


图13 等面密度不同涂覆方式的毁伤变形情况

综合以上对聚脲复合装甲结构抗爆性能的研究表明:聚脲涂覆的复合装甲结构在抗爆过程中消耗大量的能量来减弱冲击波,结构发生大变形是耗能的主要途径,其次是通过材料特性使得冲击波衰减弥散,故能够有效加强防护性能,减小爆炸后钢板的毁伤变形。聚脲涂层的位置以及涂覆厚度的不同对爆炸后钢板变形量有着重要影响。大多数研究证明,等面密度下,按涂覆方式来测评抗爆性能从优到劣依次为背爆面、裸钢板、迎爆面;等钢板厚度条件下,按涂覆方式来测评抗爆性能从优到劣依次为夹心层、背爆面、双面、迎爆面、裸钢板;而对于涂覆厚度,综合各科研人员的研究成果可以判断,当弹性体厚度是钢板厚度5倍至10倍时,吸能效果较好,若弹性体涂覆的厚度比例再增加,钢板的抗爆能力没有得到显著的增强。

### 3 结论

1) 在聚脲复合材料的力学性能方面,目前的研究发现了其非线性的本构关系和低中应变率效应。近年来虽有学者完善其数值计算模型,但在高应变率拉伸领域的研究还不充分,难以完全描述其本构关系和动力学行为。接下来需要据聚脲的力学应变率相关性建立和优化能够表征大应变、滞后性、应变率相关性等方面的数值计算模型,并要定量分析温度效应。

2) 在聚脲复合装甲结构的抗爆防护方面,目前仅仅研究了影响聚脲复合材料抗爆性能的因素,而这些因素对抗爆的作用规律及定量表征,包括冲击波在聚脲材料中的衰减,复合装甲的爆炸冲击响应以及不同温度下聚脲基材间的波阻抗匹配性等等,尚不构成体系,限制了聚脲装甲防护结构的设计应用。今后需要研究药量爆炸参数与装甲结构抗爆之间的表征关系,制定抗爆聚脲复合装甲结构设计方法,即要针对固定聚脲材料的型号,对任意药量设计出合适的聚脲装甲结构,对设计方法进行优化改进,提炼出经验公式,制定设计标准。

### 参考文献:

[1] 杨鑫,石少卿,程鹏飞,等.爆炸冲击波在空气中传播规律的经验公式对比及数值模拟[J].四川建筑,2007(5):71-73.

[2] 黄微波,王宝柱,陈酒姜,等.喷涂聚脲弹性体技术在我国的发展和展望[J].聚氨酯工业,2002(3):6-9.

[3] 李德良.聚脲涂料在新兴领域中的应用[J].现代涂料与涂装,2016,19(10):24-25,30.

[4] 甄建军,李英建,翟文,等.高硬度透明聚氨酯弹性体的合成与性能研究[J].弹性体,2017,27(3):29-32.

[5] 林静,吕平,黄微波,等.聚脲涂层在海工混凝土结构防护中的研究进展[J].涂料工业,2018,48(9):77-81.

[6] 赵庆贵,于明磊,姜言刚,等.聚脲涂料在多领域的应用[J].弹性体,2018,28(6):74-76.

[7] 甘云丹.弹性体涂覆钢板水下爆炸冲击响应特性[D].宁波:宁波大学,2009.

[8] 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.

[9] 戴平仁.聚脲弹性体喷涂加固复合结构抗爆性能研究[D].南京:南京理工大学,2018.

[10] 代利辉,吴成,安丰江,等.水下爆炸载荷作用下聚脲材料对钢结构防护效果研究[J].中国测试,2018,44(10):157-163.

[11] YI J,BOYCE M C,LEE G F, et al. Large deformation rate-dependent stress-strain behavior of polyurea and polyurethanes[J]. Polymer,2006,47(1):319-329.

[12] SARVA S S,DESCHANEL S,BOYCE M C. Stress-strain behavior of a polyuria and a polyurethane from low to high strain rates[J]. Polymer,2007,48(8):2208-2213.

[13] PATHAK J A,TWIGG J N,NUGENT K E, et al. Structure evolution in a polyurea segmented block copolymer because of mechanical deformation[J]. Macromolecules,2008,41(20):7543-7548.

[14] SHIM J,MOHR D. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low, intermediate and high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering,2009,36(9):1116-1127.

[15] SHIM J,MOHR D. Rate dependent finite strain constitutive model of Polyurea[J]. International Journal of Plasticity,2011,27(6):868-886.

[16] RAMAN S N,NGO T,LU J, et al. Experimental investigation on the tensile behavior of polyurea at high strain rates[J]. Materials and Design,2013(50):124-129.

[17] 甘云丹,宋力,杨黎明.弹性体涂覆钢板抗冲击性能的数值模拟[J].兵工学报,2009,30(S2):15-18.

[18] 甘云丹.聚脲涂覆钢板水下爆炸抗冲击实验研究[C]//第十届全国冲击动力学学术会议论文摘要集.中国力学学会爆炸力学专业委员会冲击动力学专业组、北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,太原:2011:1.

[19] 宋彬.聚脲弹性体夹层防爆罐抗爆性能研究[D].南京:南京理工大学,2016.

- [20] 宋彬,黄正祥,翟文,等. 聚脲弹性体夹芯防爆罐抗爆性能研究[J]. 振动与冲击,2016,35(7):138-144.
- [21] 赵延杰,潘建强,刘建湖. 聚脲涂覆钢板水下爆炸试验研究[C]//第十一届全国爆炸力学学术会议论文集. 中国力学学会爆炸力学专业委员会,珠海:2016.
- [22] 戴平仁,黄正祥,祖旭东,等. 聚脲弹性体“三明治”夹层结构抗爆性能[J]. 工程塑料应用,2017,45(12):70-74.
- [23] 戴平仁,黄正祥,祖旭东,等. 聚脲喷涂铝蜂窝结构抗爆性能数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报,2018(6):1-8.
- [24] 翟文,戴平仁,何金迎,等. 聚脲-钢板夹层结构抗爆性能研究[J]. 兵工自动化,2018,37(10):65-69.
- [25] 王小伟,何金迎,祖旭东,等. 聚脲弹性体复合夹层结构的防爆性能[J]. 工程塑料应用,2017,45(5):63-68.
- [26] 赵鹏铎,张鹏,张磊,等. 聚脲涂覆钢板结构抗爆性能试验研究[J]. 北京理工大学学报,2018,38(2):118-123.
- [27] DANIEL G, LINZELL. State-of-the-Art Technological Developments in Concrete Computational Modeling, Emphasis on Blast Effects [C]//31st annual Airport conference, 17 March 2008.
- [28] AMINI M R, ISAACS J B, NEMAT-NASSER S. Effect of polyurea on the dynamic response of steel plates [C]//Proceeding of the 2006 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, St. Louis, MO. 2006.
- [29] WALSH S M, SCOTT R R, SPAGNUOLO D M. The development of a hybrid thermoplastic ballistic material with application to helmets [C]. ARL-TR-3700, Army Research Laboratory, December 2005.
- [30] GRUJICIC M, BELL W C, PANDURANGAN B, et al. Blast-wave impact-mitigation capability of polyurea when used as helmet suspension-pad material [J]. Materials and Design, 2010, 31(9):4050-5065.
- [31] DINAN R J, FISHER W. Failure mechanisms in unreinforced concrete masonry walls retrofitted with polymer coatings [C]//Proceedings of the 11th international Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, 2003, 12:5-9.
- [32] AMINI M R, SIMON J, NEMAT-NASSER S. Numerical modeling of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments [J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(6):615-627.
- [33] ACKLAND K, ANDERSON C, NGO T. Deformation of polyurea-coated steel plates under localised blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 11(51):13-22.

(责任编辑 周江川)

(上接第 53 页)

- [2] 谢仲生. 压水堆核电站堆芯燃料管理计算及优化[M]. 北京:原子能出版社,2001.
- [3] VAZQUEZ-RODRIGUEZ R, ESPINOSA-PAREDES G, MORALES-SANDOVAL J B, et al. Averaging the neutron diffusion equation [J]. Progress in Nuclear Energy, 2009, 51(3):474-484.
- [4] 谢明亮,于雷,陈玉清. AP1000 核反应堆控制棒价值特性的 MC 模拟[J]. 兵器装备工程学报,2016(3):121-125.
- [5] ESPINOSA-PAREDES G, VAZQUEZ-RODRIGUEZ R. Application of Linear-extended Neutron Diffusion Equation in a Semi-infinite Homogeneous Medium[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(2/3):713-719.
- [6] SAGEV M. Application of Light Water Reactor Core/Reflector Boundary Conditions [J]. Nuclear Science and Engineering, 1985, 90(2):221-230.
- [7] ITAGAKI M, BREBBIA C A. Space-Dependent Core/Reflector Boundary Conditions Generated by Boundary Element Method for Pressurized Water Reactors [J]. Nuclear Science and Engineering, 1991, 107(3):246-264.
- [8] 谢仲生,成红武,梁薇. 反应堆节块计算中一种数值求解边界反射率的方法[J]. 核科学与工程,1997,17(3):220-226.
- [9] 陶文栓. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001:92-98.
- [10] 汤春桃. 中子输运方程特征线解法及嵌入式组件均匀化方法的研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

(责任编辑 周江川)