

文章编号:1673-9469(2020)03-0026-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2020.03.004

喷涂聚脲弹性体 H 型钢柱抗爆性能研究

赵亚军^{1,2}, 王玉珑¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 力学实验教学示范中心, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为研究聚脲涂层对 H 型钢柱的抗爆效果, 基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 对喷涂聚脲弹性体 H 型钢柱进行抗爆数值分析。研究了 H 型钢柱在爆炸荷载作用下的动态响应, 并分析了不同聚脲厚度对 H 型钢柱的防护作用及其机理。研究结果表明: 当冲击波沿钢柱弱轴方向传播时, 冲击波对钢柱的最大破坏作用出现在柱脚附近腹板中心, 聚脲涂层能够有效提高 H 型钢柱的整体刚度和抗爆能力, 大幅降低钢柱的整体和局部变形, 并减小钢柱吸收的内能。

关键词: 聚脲; H 型钢柱; 爆炸荷载; 数值模拟

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Study on Blast Resistance of H-section Steel Columns of Spray Polyurea

ZHAO Yajun^{1,2}, WANG Yulong¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Mechanics Experiment Teaching Demonstration Center, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to study the anti-explosion effect of polyurea coating on H-section steel columns, the anti-explosion numerical analysis of sprayed polyurea elastomer H-section steel columns was carried out based on ANSYS/LS-DYNA finite element software. The dynamic response of H-section steel columns under explosion was studied. The protective effect of different polyurea thickness on H-section steel columns and its mechanism were analyzed. It is shown that when the shock wave propagates along the weak axis of the steel column, the maximum destructive effect of the shock wave on the steel column appears in the center of the web near the base of the steel column, and the polyurea coating can effectively improve the overall stiffness and anti-explosion ability of the H-section steel columns, greatly reduce the overall and local deformation of the steel column, and reduce the absorbed internal energy of the steel column.

Key words: polyurea; H-section steel columns; blast load; numerical simulation

近年来由恐怖袭击或化学品及燃气泄漏造成的爆炸时有发生, 爆炸荷载对周边建筑物造成极大的损伤。钢柱是钢结构的主要承重构件, 当爆炸荷载作用于钢柱, 可能导致钢柱的损毁, 从而引起整个结构的倒塌, 因此研究钢柱的抗爆性能具有很重要的意义。爆炸荷载对 H 型钢柱的作用较为复杂^[1], 这决定了钢柱的响应特征和破坏模式, 爆炸发生在强轴方向时能表现出更好的抗爆能力^[2-3]。Nassr 等^[4]对宽缘钢柱在不同的爆炸荷载作用下进行了大量的试验研究, 并给出了它们爆炸后的损伤和破坏模式, 爆炸发生在强轴时的稳定性更好。刘赛等^[5]基于数值模拟的方法, 表明

了增加钢柱截面高度比增加截面宽度更能有效提高柱的抗爆能力。田力等^[6]建立了复合爆炸作用下 H 型钢柱的数值模型, 研究发现钢柱的长细比对抗冲击与抗爆性能影响较小, 限制其轴向压力值, 能保证 H 型钢柱的抗冲击与抗爆性能。

为提高结构的抗爆性能, 通常采用增加防护介质厚度、采用复合结构和开发使用新材料等措施, 聚脲^[7-9]是一种具有明显应变率相关大变形行为的超粘弹性材料^[10]。将聚脲喷涂于结构上, 能够提高结构的整体刚度^[11], 防止结构倒塌与破坏^[12]。研究表明当金属作为基底时, 在任何一面涂聚脲都会增加相应的整体切线模量, 从而减小

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51908188)

作者简介: 赵亚军(1979-), 男, 河南汤阴人, 博士研究生, 副教授, 从事新材料及防护结构的研究。

结构横向扩展冲击力^[13],增加金属层的能量吸收能力^[14]。钢板表面涂覆不同厚度聚脲在空爆条件下,钢板中心最大位移随涂层厚度的增加近似呈线性递减趋势^[15],双涂层的抗爆性能更佳^[16]。由于爆炸相关问题的研究较为复杂,目前对于钢柱在爆炸冲击波作用下的防护研究较少,而钢柱作为结构的主要承重构件,提升其抗爆能力显得尤为重要。

本文提出采用喷涂聚脲作为 H 型钢柱的抗爆防护措施,利用数值计算方法,对聚脲加固 H 型钢柱在弱轴方向爆炸荷载作用下的动态响应进行研究,分析钢柱的变形及吸能情况,揭示喷涂聚脲对 H 型钢柱的抗爆防护机理,为钢结构的抗爆设计提供理论依据。

1 数值计算模型

1.1 数值模型建立

本文对喷涂 0、3、5 mm 聚脲的 H 型钢柱进行了数值模拟,以探究喷涂不同厚度聚脲 H 型钢柱在爆炸荷载作用下的动态响应。如图 1,本文对 3 m 长的 H 型钢柱进行抗爆数值分析,材料选用 Q235 钢,TNT 炸药量为 25 kg,爆心在 H 型钢柱弱轴方向 2 m 处,距地面 1.5 m。

本模型包括:钢柱、聚脲、炸药、空气与地面组成,除地面采用 Shell 单元外,其余均采用 Solid 单元,聚脲、钢柱与钢板网格尺寸为 20 mm,空气域尺寸为 3.9 m×3.02 m×0.2 m,空气与炸药网格尺寸为 40 mm,空气边界采用无反射边界条件,钢柱与地面采用固定约束,并约束柱顶的水平位移。

钢柱及聚脲弹性体采用 LAGRANGE 网格,炸药与空气采用 ALE 网格,通过多物质流固耦合算法定义 ALE 网格和 LAGRANGE 网格之间的相互作用,聚脲材料与钢柱之间采用共节点设置,模拟聚脲与钢柱表面的粘结状态。在钢柱两端添加刚性板,刚性板与钢柱之间采用共节点设置,对钢柱顶端刚性板施加均布面荷载,以准确模拟实际工况中的竖向荷载,根据张秀华等^[17]研究结果,在抗爆分析和设计中钢柱轴压比不宜超过 0.3,本文施加竖向荷载 $F=0.2F_p$, F_p 是钢柱的极限承载力。

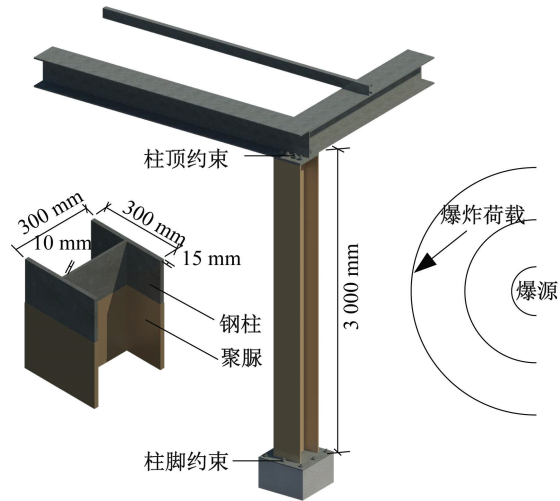


图 1 数值模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical simulation

1.2 模型材料

1.2.1 TNT 炸药与空气

本文所用的 TNT 炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型,结合 JWL 状态方程描述爆炸时产生的高压冲击波,JWL 状态方程的 $P-V$ 关系如下:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V'} \quad (1)$$

所使用的 TNT 炸药及其状态方程参数如表 1:

本文考虑 TNT 炸药在理想空气中爆炸,空气采用 MAT_NULL 模型,结合线性多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述:

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + [C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2] E \quad (2)$$

空气密度为: 1.29 kg/m^3 ; $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$ 。

1.2.2 H 型钢

本文钢柱材料选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型,该模型通过调整 β 来选择各向随动强化或等向强化,基于 Cowper-Symonds 关系考虑高应变率效应:

$$\text{DIF} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (3)$$

表 1 TNT 炸药以及状态方程参数^[18]

Tab. 1 TNT and equation of state parameters^[18]

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	PCJ/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$	V_0
1 630	6 930	19	374	3.23	4.15	0.95	0.3	7	1

用与应变率有关的放大系数表示屈服应力:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}) \quad (4)$$

式中: DIF 是动态增长因子, $\dot{\varepsilon}$ 是材料应变率, σ_0 为初始屈服应力, C 和 P 为 Cowper-Symonds 应变率参数, ε_p^{eff} 为有效塑性应变, E_p 为塑性硬化模量。本文所用的 H 型钢柱主要材料参数见表 2。

表 2 钢的材料参数^[19]

Tab. 2 Material parameters of steel^[19]

$\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E/$ GPa	μ	$\sigma_y/$ MPa	$E_t/$ GPa	$C/$ s^{-1}	P
7 850	210	0.3	240	2	10^5	5

1.2.3 聚脲

从聚脲弹性体的动态力学性能看, 聚脲材料是一种具有明显应变率效应的超粘弹性体, 选用 MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型来模拟聚脲弹性体。本模型属于弹塑性材料模型, 可定义不同应变率下的应力应变曲线, 能够很好地模拟弹塑性材料的响应过程。图 2 为不同应变率下聚脲弹性体的应力应变曲线。聚脲材料具体参数如表 3:

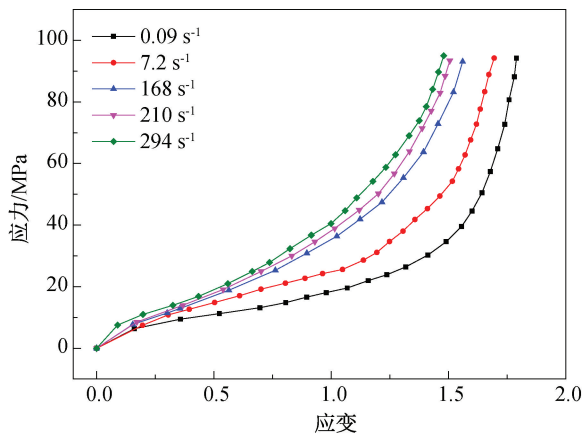


图 2 不同应变率下聚脲应力应变曲线

Fig. 2 Stress strain curve of polyurea under different strain rates

表 3 聚脲材料参数^[20]

Tab. 3 Material parameters of polyurea^[20]

$\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$E/$ MPa	μ	$\sigma_y/$ MPa	F_s
1 020	230	0.4	15.7	0.85

2 模型验证

截至目前国内外很少有喷涂聚脲 H 型钢柱在爆炸荷载作用下的破坏试验, 故本文通过对比涂

覆聚脲的钢板爆炸试验, 验证本文计算模型所采用的耦合算法、材料模型的合理性。

文献[21]中试验工况 2 采用边长为 400 mm 的方形 Q235 钢板, 板厚 1.5 mm, 钢板迎爆面涂覆 4 mm 聚脲层。涂覆聚脲钢板结构固定在两个夹板之间, 采用 40 g 柱形 TNT 炸药, 爆距 50 mm, 聚脲涂覆钢板的实际加载区域为 250 mm×250 mm。由于爆炸载荷和聚脲涂覆钢板结构具有对称性, 所以建立 1/4 模型, 在模型的边界处施加固定约束和对称约束如图 3。

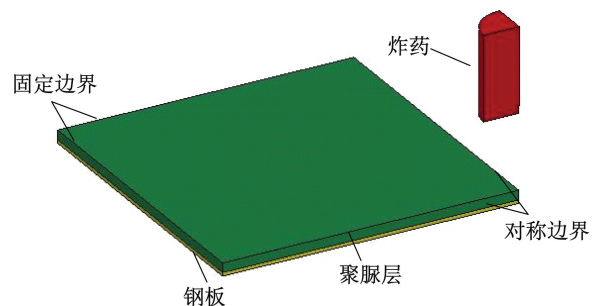
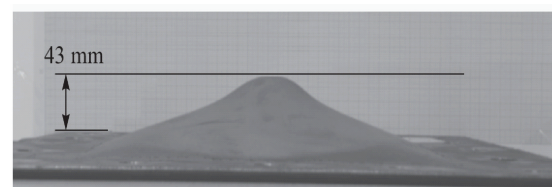


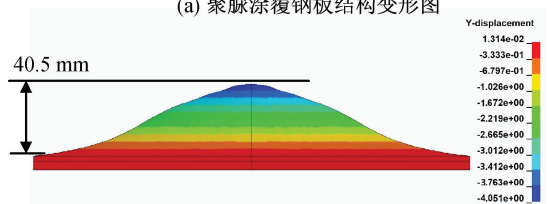
图 3 聚脲涂覆钢板结构与炸药模型

Fig. 3 Structure of polyurea coated steel plate and explosive model

图 4(a) 为文献[21]中工况 2 的靶板变形图, 图 4(b) 为本文数值模拟位移云图。可见, 中心处最大位移的试验结果与仿真结果吻合良好, 验证了本文所采用模型的有效性。



(a) 聚脲涂覆钢板结构变形图



(b) 聚脲涂覆钢板结构位移云图

图 4 试验与数值模拟对比图

Fig. 4 Comparison between experiment and numerical simulation

3 结果分析

为研究钢柱在实际爆炸场景中 H 钢柱的动态响应, 本文采用以下荷载加载方案(图 5): 准静态阶段应用初级轴向载荷, 对柱顶逐步施加 20% H

型钢柱轴向极限承载力,忽略重力和风荷载;对钢柱施加横向爆炸荷载,并对钢柱进行分析。

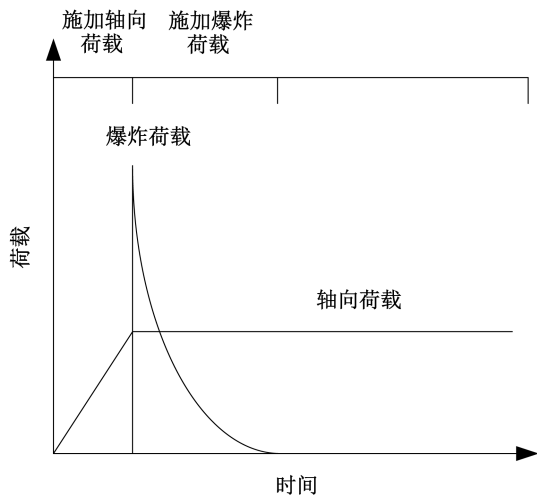


图 5 不同阶段荷载加载的方法

Fig. 5 The loading methods at different stages

3.1 塑性应变

图 6 为爆炸发生在弱轴方向时钢柱等效塑性变形图,当腹板作为迎爆面时,爆炸产生的冲击波达到腹板位置后,在钢柱腹板和翼缘之间的半封闭空间内会形成冲击波涡流,绕弱轴产生大的弯矩,从而使得翼缘和腹板连接处的受力较大。如图 6 所示,迎爆面翼缘部分向钢柱的外侧呈外张的趋势,钢柱背爆面的翼缘部分呈现出向腹板处收缩的趋势。由图可以看出钢柱柱脚 14 cm 处腹板塑性应变较大。

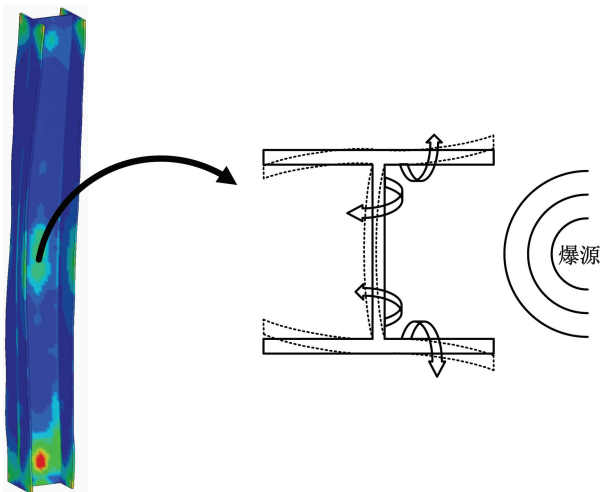


图 6 钢柱塑性应变分析

Fig. 6 Plastic strain analysis of steel column

图 7 为空气中发生爆炸冲击波传播示意图,图中爆炸所产生冲击波在传播到 H 型钢柱之前先与地面发生接触,经过地面的反射产生反射波,反射

波与初始冲击波发生耦合形成马赫波,然后作用于 H 型钢柱腹板。图 8 为不同时刻冲击波传播云图,由图可知冲击波传播至柱脚时,冲击波在钢柱腹板、翼缘和地面之间形成冲击波涡流,使冲击波进一步增强,因此桩脚的压力较其它部位最大。而当爆炸发生在钢柱弱轴方向时,腹板的变形方向为刚度较小的方向,因此钢柱柱脚腹板处破坏最为严重。

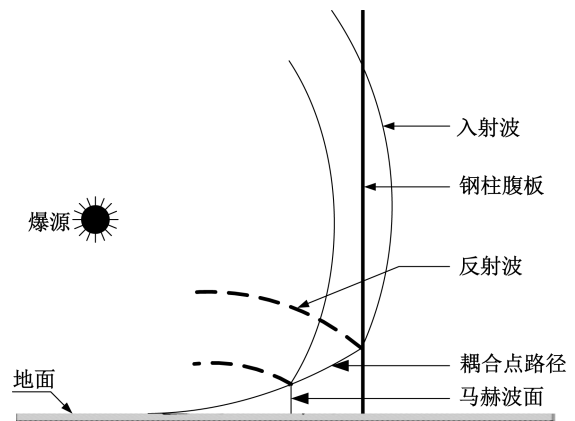


图 7 爆炸冲击波传播示意图

Fig. 7 Schematic diagram of propagation of shock wave

图 9 为柱中腹板与翼缘连接点塑性应变时程曲线,图 10 为柱角 14 cm 处腹板的塑性应变时程曲线,由图可知,其塑性应变曲线均呈现出多阶段上升趋势,是因为爆炸冲击波作用于钢柱时,在腹板与翼缘间的多次反射,钢柱各部件间歇受到荷载作用所致。由图 9 可以看出,未喷涂聚脲时腹板与翼缘连接点的塑性应变要比喷涂聚脲时 H 型钢柱腹板与翼缘连接点的塑性应变高很多,比较最大塑性应变可以得到喷涂 3、5 mm 聚脲的塑性应变分别是未喷涂聚脲的 34.22%、19.52%。由图 10 可以看出,对钢柱喷涂 3、5 mm 聚脲时,钢柱柱脚腹板处塑性应变分别是 0.118、0.112,分别是未喷涂聚脲 H 型钢柱柱角腹板处塑性应变的 80.8%、76.7%。

当爆炸发生在弱轴方向时,聚脲材料能够有效地减小 H 型钢柱柱中翼缘和腹板连接处的变形,并在一定程度上减小柱脚腹板处的变形,提高钢柱的刚度。本文建议在加固 H 型钢柱时,应对柱角腹板处重点加固,以降低柱角破坏的可能,使钢柱在弱轴方向具有更好的抗爆能力。

3.2 变形

图 11 为喷涂不同厚度聚脲的 H 型钢柱在等量爆炸荷载作用下的变形图。炸药在柱中位置起爆,由于柱脚与柱顶的约束情况,因此钢柱的中心

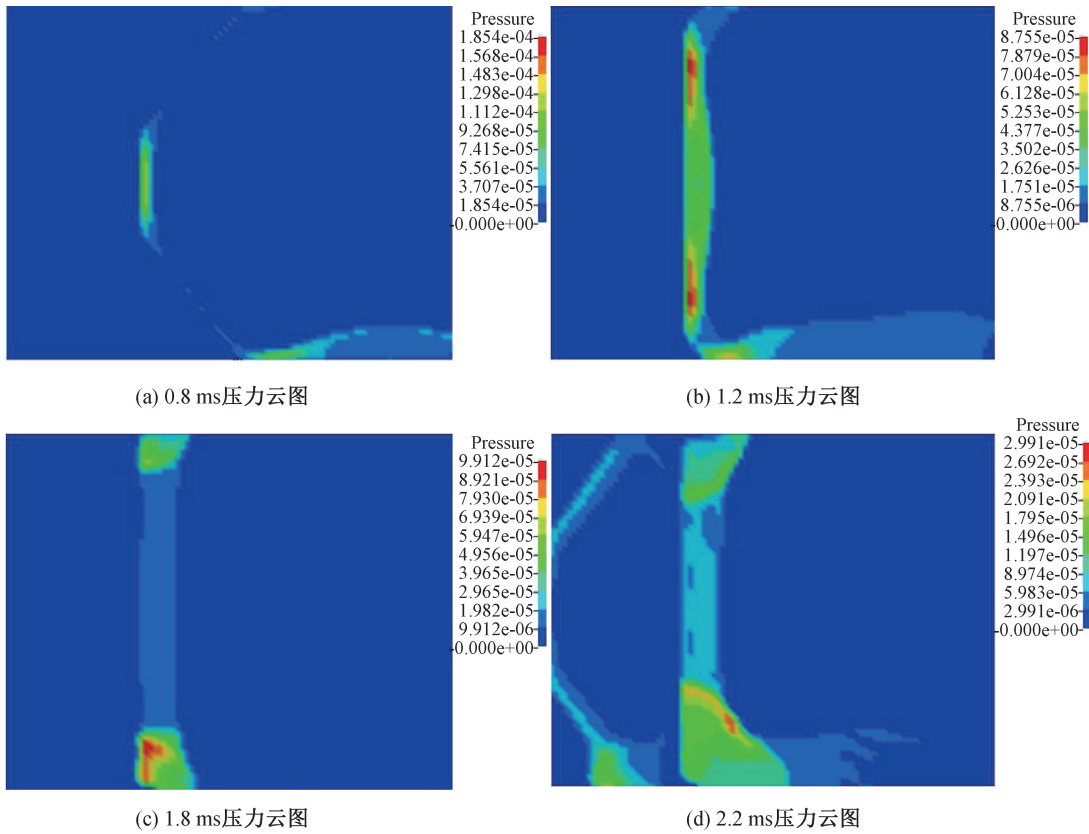


图8 冲击波压力传播图

Fig. 8 Shock wave pressure propagation diagram

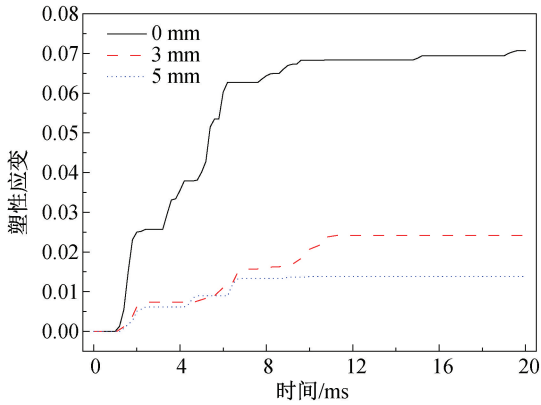


图9 腹板与翼缘连接点塑性应变时程曲线

Fig. 9 Time history curve of plastic strain at the connection

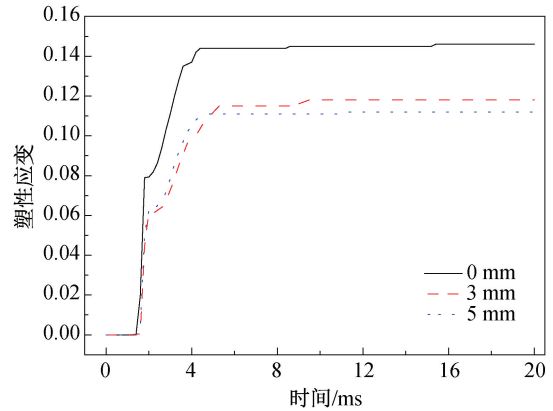


图10 柱脚腹板处塑性应变

Fig. 10 Plastic strain at the web of the column foot point between web and flange

区域位移最大,且柱中翼缘部分均呈现向外扩张的趋势,随着聚脲涂层的加入,柱中翼缘向外扩张的幅度逐渐变小。图12为喷涂不同厚度聚脲H型钢柱柱中翼缘位移峰值图,由图可以看出,未喷涂聚脲时钢柱翼缘位移峰值为9.04 cm,喷涂聚脲后的翼缘位移峰值依次为:5.96、5.59 cm,分别减小了未喷涂聚脲时钢柱翼缘位移峰值的34%、38.2%。可以看出,当爆炸发生在弱轴时,聚脲的加入可以明显地降低H型钢柱翼缘位移,随聚脲厚度的增加其位移减小的趋势逐渐平缓。

图13为H型钢柱柱中横向位移时程曲线,由图可知,未喷涂聚脲的H型钢柱在8.4 ms时达到最大位移峰值为13.2 cm,随后H型钢柱进入塑性阶段。随着聚脲厚度的增加,冲击波达到钢柱时经过聚脲层被衰减,导致喷涂了聚脲的钢柱位移达到峰值的时间有所延迟,位移峰值依次是未喷涂聚脲钢柱位移峰值的90.8%、82.5%,随着聚脲厚度的增加,各钢柱柱中横向位移峰值近似呈线性递减的趋势减小。H型钢柱的柱中横向位移峰

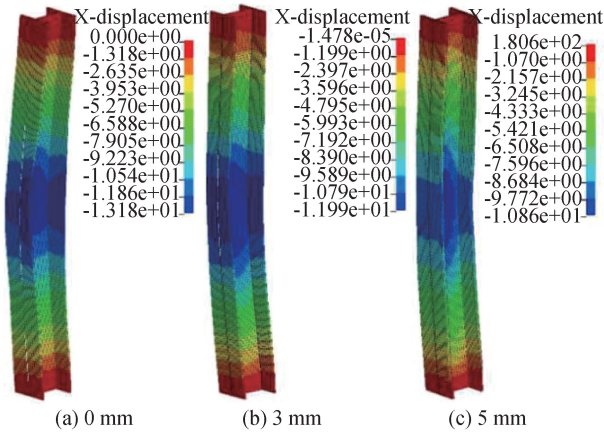


图 11 喷涂不同厚度聚脲的 H 型钢柱位移云图

Fig. 11 Displacement cloud of H- section steel column sprayed with polyurea of different thickness

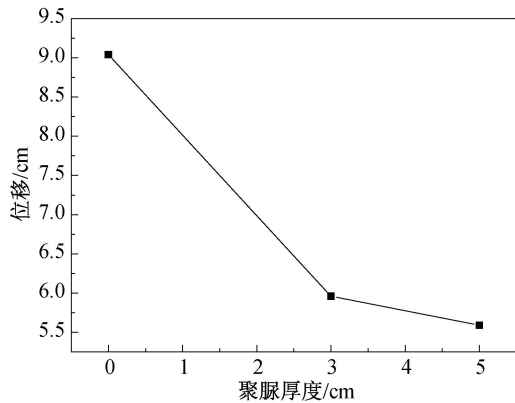


图 12 不同厚度聚脲翼缘峰值位移

Fig. 12 Peak displacement of polyurea flanges with

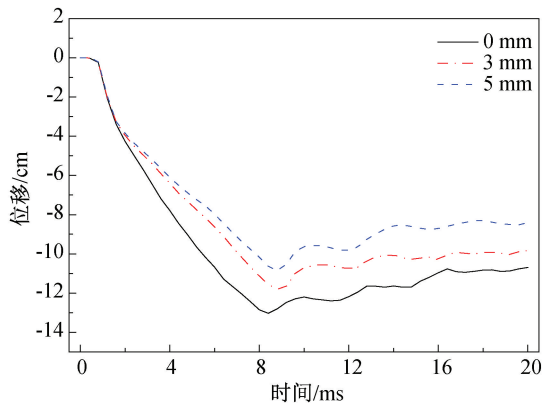


图 13 跨中位移时程曲线

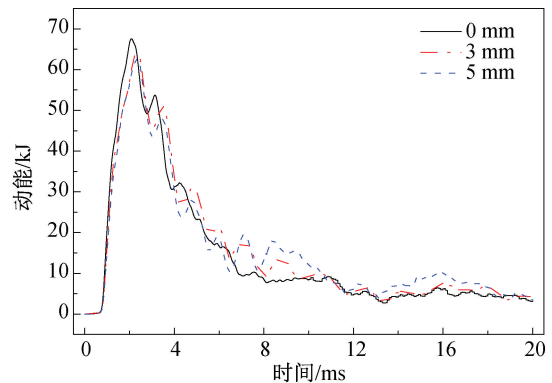
Fig. 13 Displacement time history curve of mid-span different thickness

值降低,是因为聚脲涂层使 H 型钢柱的整体切线模量增强。以上分析说明,喷涂了聚脲弹性体后的 H 型钢柱,能明显降低爆炸发生在弱轴时 H 型钢柱的柱中位移。

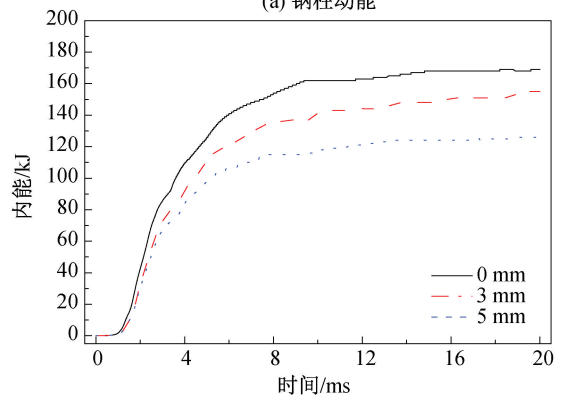
3.3 能量吸收

结构通过变形来消耗并衰减冲击波,转化为自身的动能与内能。图 14 为 H 型钢柱的动能和内能时程曲线,由图 14(a)可以看出:冲击波接触到钢柱后,其动能近乎呈线性增长的趋势迅速上升,在达到 35 kJ 时,喷涂了聚脲的钢柱增长趋势变缓,是因为聚脲的存在,冲击波先作用于聚脲,部分能量被聚脲吸收。随着喷涂聚脲弹性体厚度的增加,钢柱的动能峰值依次为:67.5、64、62.6 kJ。在动能下降段可以看到,动能时程曲线出现多个峰值,且喷涂聚脲的钢柱各个峰值均有一定的延迟,是因为冲击波在翼缘与腹板之间的多次反射作用。

吸能能力是研究爆炸荷载作用下结构构件性能的重要参数,从图 14(b)可以明显看出,未喷涂聚脲的 H 型钢柱的内能为 169 kJ,明显高于喷涂了聚脲 H 型钢柱的内能,其中分别喷涂 3、5 mm 聚脲 H 型钢柱的内能是未喷涂聚脲钢柱的 91.66%、74.56%,这是因为聚脲提高了 H 型钢柱的整体刚度,聚脲涂层在抗爆冲击过程中的拉伸变形、粘弹性以及由弹性向塑性转变,耗散了一部分能量,使得钢柱所吸收的能量较低。



(a) 钢柱动能



(b) 钢柱内能

图 14 钢柱动能和内能时程曲线

Fig. 14 Time history curve of kinetic energy and internal energy of steel column

4 结论

1) 爆炸发生在弱轴柱中方向 2 m 处时, 由于各方向冲击波及反射波的耦合作用, 钢柱的最大塑性应变发生于柱脚附近。

2) 喷涂聚脲可显著提高钢柱的整体刚度和抗爆能力, 能够约束腹板与翼缘连接处的变形, 并大幅减小柱脚附近最大塑性应变, 且涂层越厚, 提高效果越明显, 但呈现非线性增长, 随厚度增加, 提高程度减缓。

3) 聚脲弹性体可在爆炸中吸收冲击波的能量, 从而延缓钢柱的变形及动能峰值出现时间, 并大幅降低峰值, 使钢柱本身受到冲击作用较为平缓, 从而实现对钢柱的保护, 5 mm 的聚脲涂层可减小 17.5% 的钢柱横向位移和 25.7% 的内能。

参考文献:

- [1] 杨涛春, 陆勇, 李国强, 等. 工字形钢柱的爆炸作用分布特征与计算研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(05): 27-38.
- [2] DENNY J W, CLUBLEY S K. Long-duration Blast Loading & Response of Steel Column Sections at Different Angles of Incidence[J]. Engineering Structures, 2019, 178: 331-342.
- [3] 张宇. 爆炸荷载作用下高强 H 型钢柱的动力响应及稳定性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [4] NASSR A A, RAZAQPUR A G, TAIT M J, et al. Dynamic Response of Steel Columns Subjected to Blast Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(7): 04014036.
- [5] 刘赛, 赵金城. 室内爆炸荷载作用下钢柱动力响应的参数分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(04): 72-77.
- [6] 田力, 毛祖杰. 汽车撞击与爆炸复合作用下 H 型钢柱损伤效应分析[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2019, 52(07): 709-718.
- [7] 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(01): 148-153.
- [8] 冯加和, 董奇, 张刘成, 等. 聚脲弹性体在爆炸防护中的研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(04): 277-290.
- [9] 王成禹, 栗志杰, 柳占立, 等. 聚脲材料的动力学实验研究与本构模型[A]. 北京力学学会. 北京力学学会第

二十四届学术年会会议论文集[C]//北京: 北京力学学会, 2018: 2.

- [10] XUE L, MOCK Jr W, BELYTSCHKO T. Penetration of DH-36 Steel Plates with and without Polyurea Coating[J]. Mechanics of Materials, 2010, 42(11): 981-1003.
- [11] ACKLAND K, ANDERSON C, NGO T D. Deformation of Polyurea-coated Steel Plates under Localised Blast Loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 51: 13-22.
- [12] WANG J, REN H, WU X, et al. Blast Response of Polymer-retrofitted Masonry Unit Walls[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 128: 174-181.
- [13] GILLER C B, GAMACHE R M, WAHL K J, et al. Coating/substrate Interaction in Elastomer-steel Bilayer Armor[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 50(20): 2853-2859.
- [14] MCSHANE G J, STEWART C, ARONSON M T, et al. Dynamic Rupture of Polymer - metal Bilayer Plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(16): 4407-4426.
- [15] 王殿玺, 郭香华, 张庆明. 聚脲涂覆钢板在爆炸载荷作用下的动态响应[J]. 高压物理学报, 2019, 33(02): 86-93.
- [16] SAMIEE A, AMIRKHZI A V, NEMAT-NASSER S. Numerical Study of the Effect of Polyurea on the Performance of Steel Plates under Blast Loads[J]. Mechanics of Materials, 2013, 64: 1-10.
- [17] 张秀华, 张宇, 段忠东, 等. 爆炸荷载作用下钢柱的动力响应与影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(01): 73-77+84.
- [18] 刘新让, 田晓耕, 卢天健, 等. 泡沫铝夹芯圆筒抗爆性能研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23): 166-173.
- [19] LIU X, TIAN X, LU T J, et al. Blast Resistance of Sandwich-walled Hollow Cylinders with Graded Metallic Foam Cores[J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2485-2493.
- [20] 王军国. 喷涂聚脲加固粘土砖砌体抗动载性能试验研究及数值分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [21] 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(02): 118-123.

(责任编辑 王利君)