

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.011

典型泡沫铝夹芯材料的枪弹侵彻仿真与实验

牛正一^{1,2}, 安振涛¹, 王维娜²

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 32181 部队, 石家庄 050000)

摘要: 为考察枪弹打击下三明治型泡沫铝夹芯材料的防护性能, 采用仿真分析与实弹打击试验相结合的方法, 研究 7.62 mm 枪弹对不同面板配置泡沫铝夹芯材料的打击效果。结果表明: 增加泡沫铝芯层后, 金属层合材料的抗侵彻性能有大幅提升; 入射、出射面板总厚度一致情况下, 增大入射面板厚度能改善材料整体抗侵彻能力; 入射和出射面板为 Q235 钢且芯层为均质泡沫铝时, 在面板总厚度 8 mm、芯层厚 50 mm 的结构配置下能够有效防护以 735 m/s 速度入射的 7.62 mm 步枪弹。该研究可为泡沫铝夹芯材料在军用装备抗弹防护中的应用提供参考。

关键词: 泡沫铝; 枪弹; 侵彻; 仿真**中图分类号:** TJ410 **文献标志码:** A

Simulation and Experiment of Projectile Penetration of Typical Sandwich Materials with Aluminum Foam Core

Niu Zhengyi^{1,2}, An Zhentao¹, Wang Weina¹

(1. Shijiazhuang Campus of PLA University of Army Engineering, Shijiazhuang 050003, China;

2. No. 32181 Unit of PLA, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Simulation and projectile penetration experiment are used to investigate the protective performance of sandwich aluminum foam under the impact of projectile. The impact of 7.62 mm projectile on aluminum foam sandwich material with different panel configurations is studied. The research result shows that the penetration resistance of laminated metal is greatly improved with the addition of aluminum foam core layer. With a fixed total thickness of incident and outgoing panels, increasing the thickness of incident panel is more conducive to improving the penetration resistance of the whole structure. When the incident and ejected panels are Q235 steel with a total thickness of 8 mm and the core layer is 50 mm thick aluminum foam, the material can effectively protect the penetration of 7.62 mm projectile with a speed of 735 m/s. The research could provide a reference for application of aluminum foam sandwich material in protection of projectile penetration for military equipment.

Keywords: aluminum foam; projectile; penetration; simulation

0 引言

战场环境下, 弹药打击是地面人员、装备安全面临的主要威胁。常规弹药主要依靠战斗部产生的毁伤元实施打击毁伤, 常见毁伤元包括破片、冲击波等^[1]。使用防护材料制作防护包装或构设防护屏障, 是进行弹药毁伤防护的重要措施。泡沫铝因其优异的吸能特性在爆炸防护领域得到广泛应用, 通常与金属、陶瓷、纤维等材料以层状堆叠、空隙填充等方式组合形成复合材料^[2-5], “金属面板+泡沫铝芯层+金属背板”的三明治型夹芯材料是一种典型的泡沫铝复合材料。学者已证明这种泡沫铝夹芯材料在抗冲击波载荷方面具有较好防护效果^[6-7], 并提出诸多应用场景。针对泡沫铝夹芯材料抗侵彻性能的研究大多集中在低速侵彻^[8-11], 较少涉及与战场真实打击环境匹配的高速弹丸侵彻领域。国际上通

常将抗枪弹打击能力作为军用方舱、轻型装甲车辆等地面军用装备的防护性能判定指标^[12], 传统泡沫铝夹芯材料抗侵彻研究条件设定与该防护要求差别较大, 限制了材料由实验室走向现实应用。笔者以 7.62 mm 步枪弹侵彻为打击背景, 采用实弹打击试验与仿真分析相结合的方法, 对三明治型泡沫铝夹芯材料的抗侵彻性能进行了研究, 可为泡沫铝夹芯材料在军用装备抗弹防护的实际应用提供参考。

1 仿真分析

1.1 结构配置

受后期泡沫铝夹芯材料样品制备条件限制, 在查阅文献^[13]的基础上, 对泡沫铝夹芯材料的结构配置方案进行了初步设定: 入射、出射面板选用 Q235 钢, 芯层使用泡沫铝, 固定芯层厚度, 调整入

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-10-16

作者简介: 牛正一(1985—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事弹药保障领域研究。E-mail: zyniu163@163.com。

射、出射面板厚度进行不同结构配置。具体配置方案见表 1。

表 1 泡沫铝夹芯材料结构配置方案 mm

方案编号	入射面板厚度	泡沫铝厚度	出射面板厚度
1	5	50	2
2	5	50	3
3	4	50	3
4	3	50	4
5	3	50	5
6	5	—	3

1.2 模型与边界条件

1.2.1 几何模型与简化

利用有限元分析工具 ANSYS.Explicit Dynami-cs 进行泡沫铝夹芯材料的仿真分析。根据载荷作用方式,在保证计算效率和求解精度条件下,将泡沫铝夹芯材料简化为 $\Phi 40$ mm 轴对称模型。简化后的有限元模型见图 1。不考虑空气阻力对弹丸飞行的影响,即弹丸入射泡沫铝夹芯材料速度与出膛速度相等。

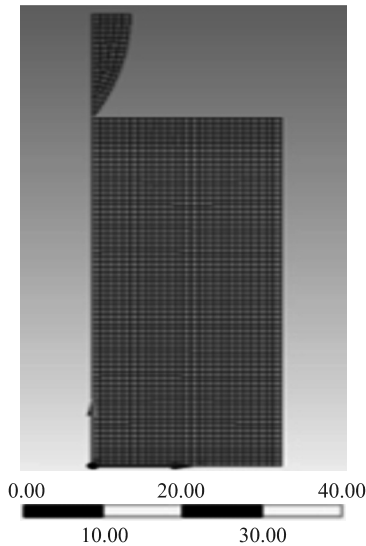


图 1 弹丸侵彻泡沫铝夹芯材料的有限元模型

1.2.2 有限元初始及边界条件

1) 材料状态方程。

由于弹丸初速较高,弹丸和面板以线性多项式状态 Gruneisen 方程描述,定义压缩材料的压力为

$$p = \left[\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right] \right] + (\gamma_0 + a\mu) E. \quad (1)$$

$$p = \left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right] + (\gamma_0 + a\mu) E. \quad (1)$$

膨胀材料的压力为

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu) E. \quad (2)$$

式中: C 是 $\mu_s - \mu_p$ 线的截距, 体积声速; S_1, S_2, S_3 是 $\mu_s - \mu_p$ 曲线斜率的系数; γ_0 是 Gruneisen 系数; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$; a 是 γ_0 的 1 阶体积修正 (体积膨胀量); C, S_1, S_2, S_3, a 和 γ_0 均为输入参数。

式中弹丸和面板的 Gruneisen 参数设置见表 2。

表 2 弹丸和面板的 Gruneisen 参数

零件	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$C / (\text{km/s})$	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
弹丸	20.8	3.98	1.58	0	0	1.6	0.46
面板	7.83	3.98	1.58	0	0	1.6	0.46

泡沫铝芯层以 ISOTROPIC ELASTICITY 线弹性本构描述,其材料参数通过测试试验样品获取,相对密度 15%,孔隙率 85%,孔径 1~4 mm,参数设置见表 3。

表 3 泡沫铝芯层的 Elasticity 参数

零件	$\rho / (\text{g/cm}^3)$	E / MPa	λ
芯层	0.405	3 500	0.2

2) 材料损伤模型。

弹丸和面板采用高压 Steinberg-Guinan 模型,模型定义为:

$$G(p, T) = G_0 + (\partial G / \partial p)_0 \eta^{-1/3} p + (\partial G / \partial T)_0 (T - 300),$$

$$Y(p, T) = Y_0 (1 + \beta \epsilon)^n \left[1 + (\partial Y / \partial p)_0 \eta^{-1/3} p / Y_0 + (\partial G / \partial T)_0 (T - 300) / G_0 \right]. \quad (3)$$

式中: G_0 为 STP 条件下的剪切模量; $(\partial G / \partial p)_0$ 和 $(\partial G / \partial T)_0$ 分别是 STP 下的剪切模量对应的压力和温度偏导数; $(\partial Y / \partial p)_0$ 为流动应力对于压力的偏导数; $\eta = \rho / \rho_0$ 为材料的压缩比。

弹丸与面板 Steinberg-Guinan 模型参数见表 4。

表 4 弹丸、面板的 Steinberg-Guinan 参数

零件	INI_Y/MPa	MAX_Y/MPa	B	n	$(\partial G / \partial p)_0$	$(\partial G / \partial T)_0 / (\text{MPa} / \text{K})$	$(\partial Y / \partial p)_0$	MEL_T/K	Shear modulus/MPa
弹丸	800	1 200	3	0.5	1.479	-2.26e7	0.032 1	2 036	7.18e4
面板	400	1 500	4	1.5	1.479	-2.26e7	0.032 1	2 036	7.18e4

泡沫铝芯层采用多孔 Crushable Foam 模型,定义为最大主应力对应体积应变的关系式,以拉应力作为截断依据。

3) 边界载荷条件。

弹丸入射速度与出膛速度相同,查阅文献[12]取值为 735 m/s,泡沫铝夹芯材料圆柱面全约束。

4) 有限元网格划分。

分析模型用 Quad 4 单元类型, 共计节点 2 075, 单元 1 900。

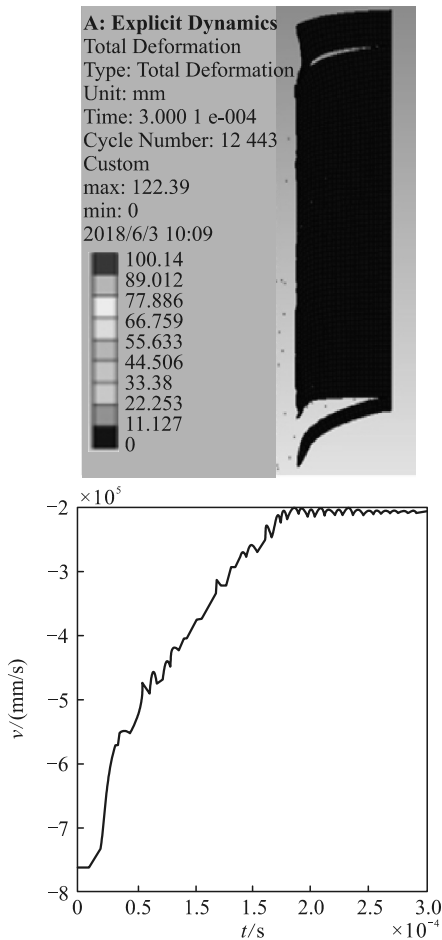
1.3 仿真计算

通过显示动力学计算, 得到枪弹弹丸侵彻泡沫铝夹芯材料的应力、应变状态。选择弹丸在前面板、泡沫铝夹芯层、后面板的出射时刻提取弹丸剩余速度, 具体结果见表 5。

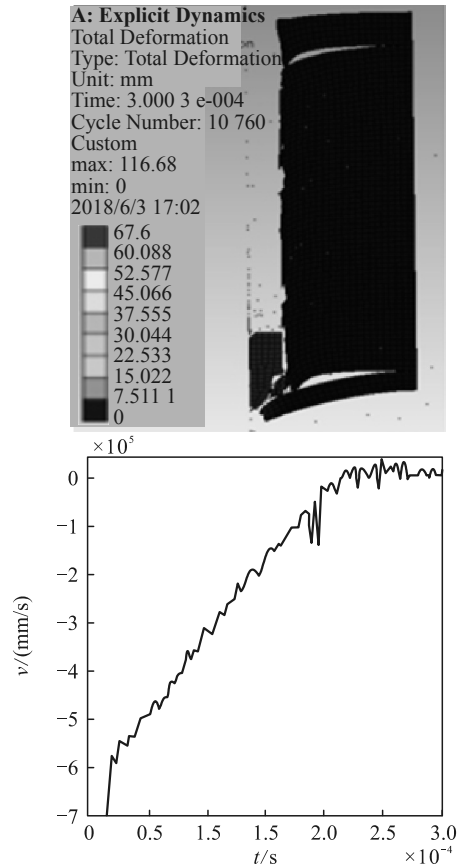
表 5 仿真计算结果

方案编号	弹丸穿透入射面板的剩余速度/(m/s)	弹丸穿透芯层的剩余速度/(m/s)	弹丸穿透出射面板的剩余速度/(m/s)	最大侵彻深度/mm
1	519	316	209	穿透
2	510	299	未穿透	66.7
3	554	377	260	穿透
4	598	453	267	穿透
5	598	447	未穿透	68.3
6	577	—	450	穿透

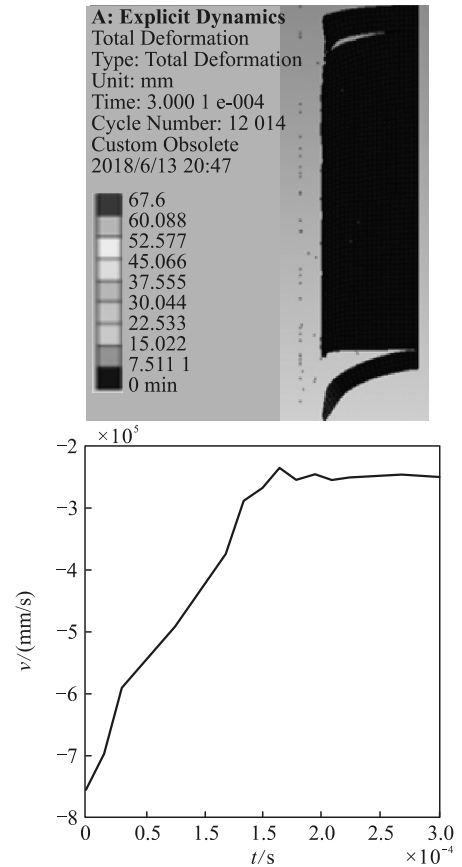
在泡沫铝夹芯材料不同结构配置方案下, 弹丸侵彻末端时刻材料等效应力与变形情况, 以及弹丸侵彻过程中的速度变化情况如图 2。



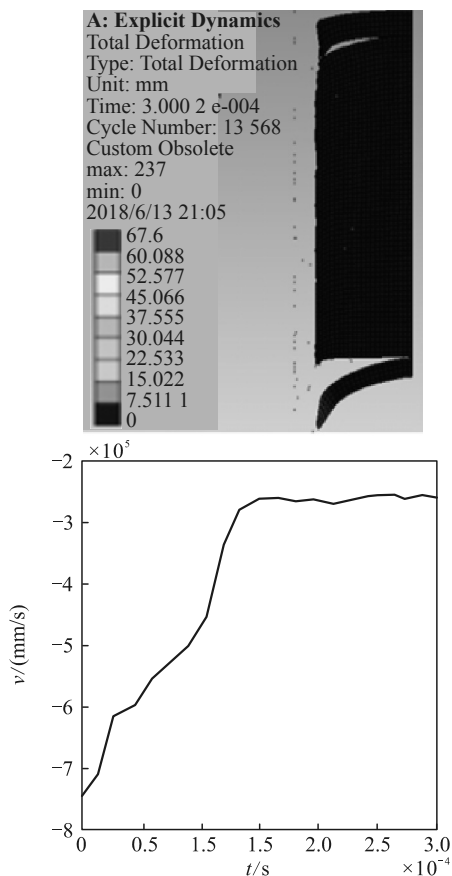
(a) 方案 1: 变形云图与弹丸时间-速度



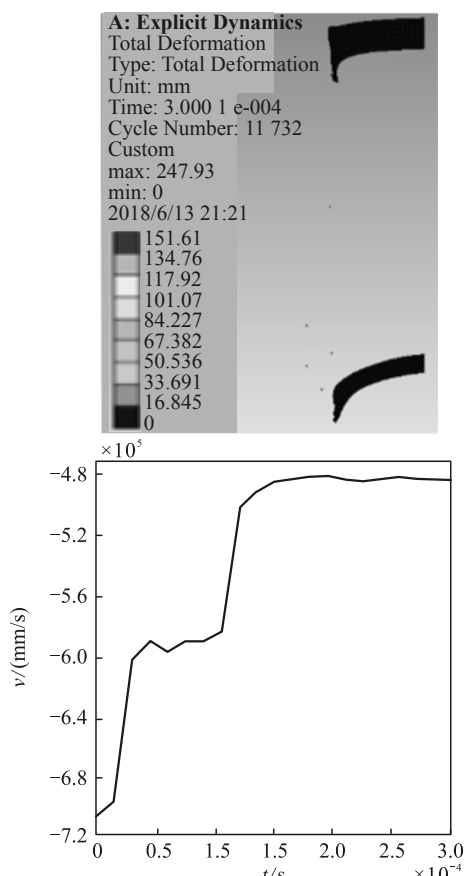
(b) 方案 2: 变形云图与弹丸时间-速度



(c) 方案 3: 变形云图与弹丸时间-速度

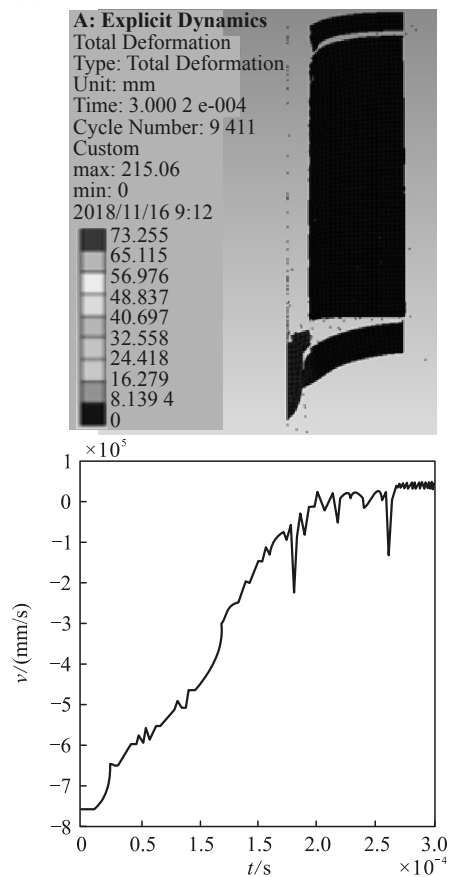


(d) 方案 4: 变形云图与弹丸时间-速度



(f) 方案 6: 变形云图与弹丸时间-速度

图 2 不同配置材料的枪弹侵彻仿真结果



(e) 方案 5: 变形云图与弹丸时间-速度

1.4 结果分析

根据泡沫铝夹芯材料组配方案，分析仿真计算结果可知：

1) 弹丸侵彻泡沫铝夹芯材料时，泡沫铝芯层和入射、出射面板之间均出现了明显的剥离现象，弹丸侵彻路径附近的泡沫铝表现为拉伸撕裂。这与泡沫铝的脆性和较低的拉伸强度有关，验证了单一泡沫铝材料的抗侵彻性能不理想。可考虑通过掺杂等方式改善泡沫铝性能^[14]或增大泡沫铝与复合材料其他部件的连接强度^[15]等措施，增大泡沫铝在弹丸侵彻过程中的变形，以更充分地发挥吸能作用。

2) 在入射、出射面板总厚度相同的情况下，比较方案 1、方案 3 和方案 4，以及方案 2 和方案 5，入射面板厚度减小、出射面板厚度增大，弹丸侵彻夹芯材料后的剩余速度或最终侵彻深度均呈现增大趋势，说明相对出射面板，增大入射面板厚度对提高夹芯材料的抗侵彻性能起到积极的作用。

3) 比较方案 2 和方案 6 可见：增加泡沫铝芯层后，金属层合材料的抗侵彻性能有了大幅提升，验证了夹芯材料结构形式在抗侵彻方面的有效性。

2 枪弹侵彻实验

2.1 试件与实验条件

受实验条件、加工成本等限制,选择方案 2 的结构配置制作了泡沫铝夹芯材料试件,完成了枪弹侵彻试验。如图 3 所示,将泡沫铝夹芯材料试件以四周约束的方式固定在支架上,使用某型号 7.62 mm 半自动步枪发射子弹,枪口距离试验样板 10 m。重复打击 3 次,观察枪弹对泡沫铝夹芯材料的侵彻情况。

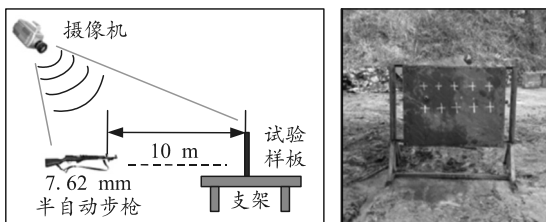


图 3 枪弹侵彻实验设置

2.2 实验结果

射击试验结果见图 4。观察弹丸对试验样板的侵彻情况,3 发弹丸均镶嵌在出射面板中,未穿透试验样板,与仿真结果吻合,验证了采用“Q235 钢+泡沫铝+Q235 钢”的夹芯结构,在两端面板总厚度 8 mm、芯层厚度 50 mm 的配置下,能够对 7.62 mm 枪弹打击进行有效防护。



图 4 枪弹侵彻试验结果

3 结束语

通过仿真计算与实弹实验相结合,研究了不同结构配置泡沫铝夹芯材料在枪弹侵彻作用下的防护效果,验证了泡沫铝夹层对提升单一金属板抗弹性能的有效性,获取了一种可有效防护 7.62 mm 步枪

弹侵彻的材料组成与参数,可为泡沫铝材料在抗弹领域的应用提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 王凤英. 毁伤理论与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 1-37.
- [2] 崔小杰, 张国伟. 泡沫铝材料防护性能的数值模拟[J]. 兵工自动化, 2018, 37(5): 82-84.
- [3] SHIM C S, YUN N R, SHIN D H, et al. Design of protective structures with aluminum foam panels[J]. International Journal of Steel Structures, 2013, 13(1): 1-10.
- [4] 孙丹, 苟瑞君. 陶瓷/泡沫铝/铝合金抗线性射流侵彻性能分析及结构优化[J]. 火工品, 2016, 10(5): 32-36.
- [5] 程涛, 向宇, 李建, 等. 泡沫铝填充多棱管的吸能分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 237-247.
- [6] NU R Y, DONG H S, SUNG W J, et al. Experiments on blast protective systems using aluminum foam panels[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7): 2153-2161.
- [7] 王涛, 宇文力, 秦庆华, 等. 爆炸荷载下泡沫铝夹芯板变形与破坏模式的实验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1456-1463.
- [8] CRUPI V, EPASTO G, GUGLIELMIN O E. Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam[J]. Marine Structures, 2013, 30(1): 74-96.
- [9] HOU W H, ZHU F, LU G X, et al. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core[J]. International Journal of Impact Engineering Marine Structures, 2010, 37(10): 1045-1055.
- [10] 周冰, 李良春, 宋桂飞. 仿真预测泡沫铝弹道极限和弹丸侵彻冲击力[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 10-13.
- [11] 宋延泽, 王志华, 赵隆茂, 等. 撞击载荷下泡沫铝夹芯板的动力响应[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(5): 301-307.
- [12] 王小东, 温浩. 军用防爆防弹方舱防护技术探讨[J]. 专用汽车, 2012(5): 89-91.
- [13] 黄科运, 谢永亮, 巴振伟. 复合材料板抗侵彻能力优化研究[J]. 四川水泥, 2016(9): 113-114.
- [14] 杨旭东, 毕智超, 陈亚军. 泡沫铝基复合材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 12-16.
- [15] 辛亚军, 肖博, 程树良, 等. 开孔泡沫铝-环氧树脂复合夹芯板局压性能试验研究[J]. 材料研究学报, 2016, 30(9): 703-710.