

三层靶板耗散子弹侵彻自适应FEM-SPH耦合算法仿真

杨少增 刘剑 蔡永根 马长越^{通讯作者}

浙江工商职业技术学院, 浙江 宁波 315012

摘要: 复合装甲因其显著的性能优势, 在多个领域得到广泛应用。通过爆炸焊接技术, 能够将铝合金与陶瓷材料牢固结合并制造反弹装甲。本研究利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元程序对三层 3mm 厚材料 (外侧两层为 7039 铝合金, 中间层为氧化铝陶瓷) 进行数值模拟, 探讨该装甲在刚体侵彻后的动态响应。仿真采用自适应 FEM-SPH 耦合算法, 特别适用于高速冲击工况下引起的网格破碎、飞溅等情况, 具有良好的收敛性。研究的主要目的是评估爆炸焊接工艺对装甲防护性能的影响, 具体目标包括: 1) 探讨不同内应力条件下装甲的抗穿透能力; 2) 分析子弹动能消耗和速度变化规律; 3) 验证自适应 FEM-SPH 耦合算法在处理复杂材料模型中的有效性。仿真结果显示, 随着内应力数值的增加, 子弹的动能消耗显著增加, 最大可达 18.99%。击穿第三层靶板时子弹的速度差异为 29.64%, 表明内应力对子弹动能和速度有显著影响。此外, 装甲的最大变形量从 5.22mm 减少到 3.29mm, 进一步证明了内应力对装甲变形的重要影响。自适应 FEM-SPH 耦合算法能够有效模拟氧化铝陶瓷的破坏过程, 并且在考虑爆炸焊接产生的内应力后, 仿真模型的精度得到了显著提高。

关键词: 爆炸焊接; 三层靶板; 动力学仿真

引言

复合装甲由于其出色的性能优势, 在现代防护装备领域占据了不可或缺的地位。它由金属、陶瓷和纤维复合材料等构成, 这些材料的巧妙结合赋予了复合装甲多项显著特性。

首先, 高强度和高韧性是复合装甲最突出的特点之一。这种装甲能够有效抵御高速弹丸以及爆炸产生的破片冲击, 确保在极端条件下也能提供可靠的保护。其次, 轻量化设计是复合装甲的另一大亮点。通过采用铝合金、陶瓷和纤维复合材料等轻质但强度极高的材料, 不仅能够在重量上大幅减轻, 同时还能保持甚至提升防护效能, 这对于提高车辆的机动性和燃油效率至关重要。此外, 良好的能量吸收能力也是复合装甲的一大特色。其设计能够有效地分散并吸收冲击能量, 比如当受到攻击时, 陶瓷层会破碎以消耗部分能量, 而金属层则负责

阻止任何可能穿透的碎片或弹头。

更进一步, 多层结构设计使得复合装甲的功能更加多样化。每一层都具有特定的功能, 如有的层专门用于分散能量, 有的层则是为了增强整体结构的坚固性。这种设计不仅能提高对多种威胁的适应性, 还大大增强了整体的防护性能。因此, 复合装甲被广泛应用于军事装备中, 例如坦克和装甲车, 它们可以有效抵挡子弹和炮弹碎片的攻击, 极大提升了作战车辆的生存能力。而在警用和民用市场, 复合装甲也被用于制造个人防护装备、防爆盾牌和防弹车辆等, 为公共安全和个人防护提供了强有力的支持。总之, 复合装甲凭借其卓越的性能, 在不同领域的应用前景广阔, 成为现代防护技术的重要组成部分。

对于 ALE 算法^[1]虽然能够较好的处理由于计算过程中网格畸变引起的不收敛的问题, 但是在针对陶瓷类脆性材料计算时, 会出现网格

极端变型和断裂的情况,就需要采用新的算法。鉴于本次研究对象为采用爆炸焊接工艺^[2]制造的三层复合材料,中间层为氧化铝陶瓷材料^[3,4],仿真将采用自适应 FEM-SPH 算法^[5],自适应 FEM-SPH 耦合算法可以根据问题的复杂程度自动调整网格和粒子分布,提高计算效率和精度。尤其是当模型中出现极端变型和断裂问题。在装甲中采用陶瓷^[6-11]等脆性材料的情况,子弹侵彻仿真采用该算法具有更好的效果。

1 计算模型

该模型设置为三层装甲,单层的尺寸为 40mm×40mm×3mm,子弹的材料为 4340 钢材,以 500 m/s 的速度垂直侵彻三层金属靶板的中心位置。外侧两层板的材料采用 7039 铝合金,中间板的材料采用氧化铝陶瓷材料。鉴于该装甲为爆炸焊接加工制造,单层之间没有间隙,但在模型中建立接触对,在模拟中可以进行滑动。

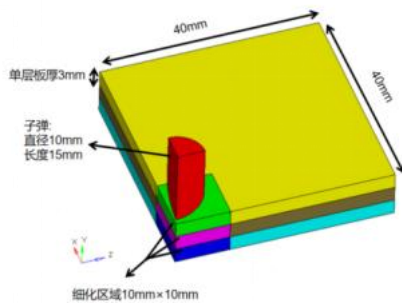


图 1 模型几何参数示意图

爆炸焊接,通过爆炸产生的冲击能量转换为装甲板之间的内应力将材料间进行牢固结合,爆炸焊接工艺原理图见下图 2 所示。不同的爆炸焊接速度,则产生不同的爆炸焊接内应力。为探究不同爆炸焊接速度下,不同内应力(图 3 所示)对于模型结果的影响。由于内应力的测量较为困难,本次研究分别假设 100MPa、200MPa、300MPa、400MPa 和 500MPa 进行仿真研究,来探究装甲间不同内应力对于仿真结果的影响。

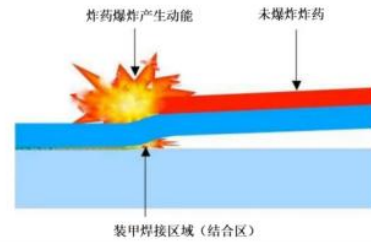


图 2 爆炸焊接工艺过程示意图

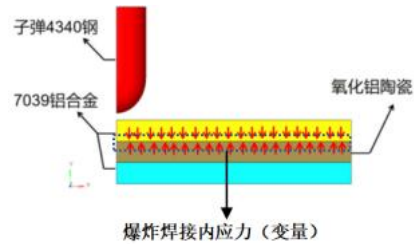


图 3 仿真模型示意图

鉴于模型结构是对称的,为简化模型提

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)$$

升计算效率,取四分之一结构进行计算。并取子弹侵彻装甲区域 10mm×10mm 区域进行细化。对称边界设置对称约束,靶板四周设置固定约束。模型全采用拉格朗日单元,*DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH_ID 关键字分别将细化区域的三层网格中的失效网格单元自动转换为 SPH 粒子。外层铝合金的应力-应变关系遵循 Johnson Cook 本构模型:

本次仿真采用 Johnson Cook 参数如下表 1 所示。

表 1 模型中材料 Johnson Cook 参数表

$\rho/(k \cdot g \cdot m^{-3})$	G/GPa	A	B	C	M	N	β	ϵ_0
3350.0	84.6	0.887	0.29	0.0377	0.53	0.748	1.0	1.0
σ_{max}^f / GPa	HE L/G Pa	P H EL / G Pa	D I	D2	K1 / G Pa	K 2 / G P a	K 3 / G P a	
0.01	3.84	1.84	0.01	-0.325	1.063	0	0	

Johnson-Cook (JC) 本构模型是一种用于描述材料在高应变率、高温条件下塑性行为的经验模型。它特别适用于模拟金属材料在高速冲击或爆炸等极端条件下的响应。JC 模型通过一组特定的参数来描述材料的流动应力随应变、应变率和温度的变化。以下是 JC 模型中主要参数的含义：

A-初始屈服应力。这是材料在零应变率和室温下的初始屈服强度

B-硬化常数。这个参数与材料的塑性硬化有关，反映了随着塑性应变增加，材料流动应力增大的程度。

n-硬化指数。这是一个无量纲的参数，用来描述材料硬化速率的快慢。n 的值决定了流动应力随塑性应变增长的速度。

C-应变率敏感系数。这也是一个无量纲的参数，用来表示流动应力对应变率变化的敏感程度。较高的 C 值表明材料的流动应力随应变率的增加而显著增大。

m-热软化指数。同样是无量纲的参数，它

描述了温度对材料流动应力的影响。随着温度的升高，材料的流动应力会下降，m 值越大，这种下降的趋势越明显。

内层氧化铝陶瓷材料，当陶瓷出现微裂纹损伤破坏时，在压缩载荷的作用下呈现出渐进损伤状态，而这种大压强、高应变率条件下的脆性材料失效建模普遍采用损伤演化的 Johnson-Holmquist (JH-2) 材料模型，其中 JH-2 模型的强度模型为：

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*)$$

损伤材料的归一化等效应力为：

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$$

完全断裂损伤材料的归一化等效应力为：

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)$$

表 2 模型中陶瓷 Johnson-Holmquist 参数

材料	A/M Pa	B/MP a	C	n	m
4340 钢板	792	510	0.26	0.014	1.03
7039 铝合 金板	337	343	0.41	0.010	1.00

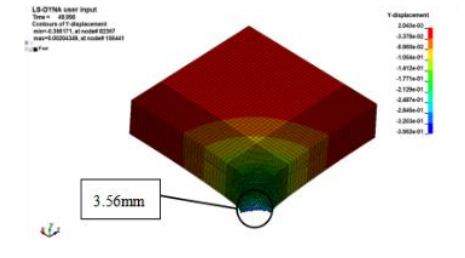
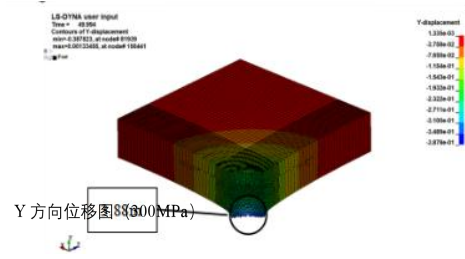
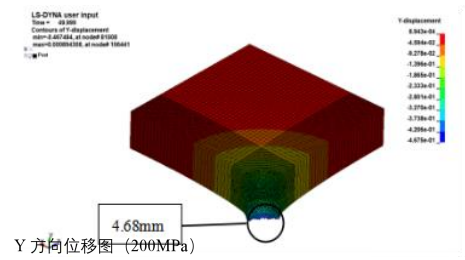
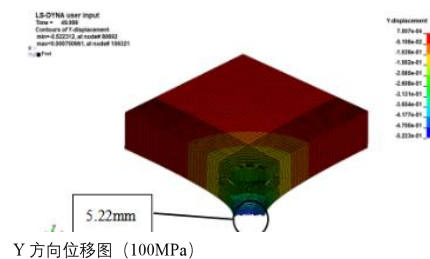
2 结果与讨论

在现代装甲设计中，相对于中间有间隙的双层装甲系统，通过爆炸焊接工艺制造的三层装甲展示了更高的防护性能和结构稳定性。这种三层装甲通常由外层金属、中间陶瓷层以及内层金属构成，其中间层材料如氧化铝陶瓷等脆性材料在抵御高速弹丸侵彻方面表现出了优异的特性。为了准确模拟这类复杂材料的行为，仿真模型的选择至关重要。在 Ansys Lsdyna 中，Johnson-Holmquist (JH-2) 材料模型因其能够有效描述陶瓷材料在高应变率下的破坏行为而被选用，其适用性在这个背景下显得尤为突出。

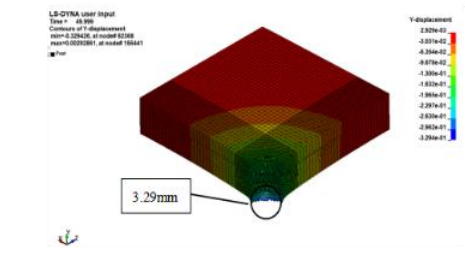
爆炸焊接是一种独特的工艺，它利用炸药爆炸产生的冲击动能将不同材料牢固地结合

在一起,从而在装甲各层之间形成稳定的内应力。这些内应力不仅增强了装甲的整体强度,还提高了其抗冲击能力。然而,由于实际测试条件的限制,精确测量这些内应力的具体数值非常困难。因此,在本次研究中,我们采用 Load_Segment_Set 卡片技术对不同装甲间的应力进行施加,以探索这些内应力对子弹速度及靶板耗散动能的影响。

通过一系列仿真实验发现,随着装甲间内应力的增加,子弹的速度显著降低,同时靶板耗散的动能显著增加。这表明,装甲在承受冲击时能够更有效地吸收和分散能量,从而提高防弹性能。具体而言,当内应力从 100MPa 增加到 500MPa 时,子弹动能的耗散比例分别增加了 29.64%和 18.99%,显示出内应力对提升装甲防护能力的重要作用。仿真结果进一步证实了内应力在增强装甲性能方面的关键作用。较高的内应力不仅减少了子弹穿透的可能性,还大大降低了子弹对后方结构的潜在威胁。因此,在设计和评估此类装甲系统时,必须仔细考虑并优化内应力参数,以确保装甲具备最佳的防护效果。在涉及爆炸焊接工艺的三层装甲仿真中,合理设置和控制装甲间的内应力对于提高仿真精度和装甲防护性能的重要性。通过精确模拟内应力对子弹速度和靶板耗散动能的影响,研究人员能够更好地理解装甲材料在极端条件下的响应机制,并为开发更加高效、可靠的防护装备提供坚实的理论基础和技术支持。这一研究成果不仅推动了装甲材料科学的发展,也为未来防护技术的进步提供了宝贵的参考。



Y 方向位移图 (400MPa)



Y 方向位移图 (500MPa)

图 4 击穿装甲后不同内应力下位移结果图

根据图 4 中的位移仿真结果图,可以观察到装甲在被击穿过程中,网格发生破损,由于陶瓷材料的本身延展性较差,在击穿过程中以网格以碎裂的方式破坏;通过击穿后的装甲的 Y 方向最大变形量的数值可以发现,随着内应力数值的增加,装甲变形量从最大的 5.22mm 逐步减少到 3.29mm。说明内应力对于装甲的变形有很大影响,内应力值越大,装甲变形量越小。

表 3 不同板间内应力下的子弹残余速度和耗

散动能百分比

应力 /MPa	弹体 初速度 (m/s)	击穿第一层板		击穿第二层板		击穿第三层板	
		历时/ μ s	残余速度/ $m \cdot s^{-1}$	历时/ μ s	残余速度/ $m \cdot s^{-1}$	历时/ μ s	残余速度/ $m \cdot s^{-1}$
100	500	10.0	445.0	19.9	389.0	39.9	307.0
200		10.0	442.0	19.9	378.0	39.9	279.0
300		10.0	440.0	19.9	371.0	39.9	261.0
400		10.0	437.0	19.9	362.0	39.9	236.0
500		10.0	433.0	19.9	356.0	39.9	216.0

结合表 3 和图 5 的结果,可以发现,子弹击穿各层装甲的时间差异不大,但是随着内应力的提升,子弹在击穿各装甲后的速度有较为明显的降低,在击穿第三层装甲后,弹体速度由 307.0m/s 降低到 216.0m/s 且靶板弹体耗散动能也从 62.2%降低到 81.2%。

3 结论

在 Ansys Lsdyna 中,自适性 FEM-SPH (有限元法-光滑粒子流体动力学) 耦合算法被广泛应用以模拟复杂材料的动态行为,尤其是在多层装甲的破坏过程研究中显示出独特的优

势。本研究聚焦于基于 Johnson Cook 模型的金属材料 and Johnson-Holmquist (JH-2) 模型的陶瓷类材料,尤其是氧化铝陶瓷在三层装甲结构中的破坏特性。

鉴于爆炸焊接工艺的特点,该工艺过程中产生的内应力对仿真结果有着显著影响。因此,在构建仿真模型时,特别考虑了这一因素,通过引入内应力参数来提高模型的准确性。具体而言,通过调整不同的内应力数值进行了一系列子弹侵彻仿真实验。实验结果显示,尽管击穿各层装甲所需的时间差异不大,但装甲的最大变形量从 5.22mm 减少到了 3.29mm,表明内应力对装甲的变形有显著抑制作用。进一步分析发现,在 100MPa 和 500MPa 的内应力条件下,子弹的速度以及靶板耗散的动能存在明显差异。随着内应力的增加,速度和动能损耗也随之增大,分别达到了 29.64%和 18.99%的变化率。这说明内应力不仅影响装甲的变形,还显著改变了子弹的侵彻效率及其能量损失模式。

由此得出结论,在进行涉及爆炸焊接工艺的侵彻仿真时,必须合理设定内应力参数。忽略或错误估计这些参数可能导致仿真结果与实际情况产生较大偏差,从而影响研究结论的有效性和可靠性。研究人员需要充分认识到装甲内应力对于仿真结果的巨大影响,并在实验设计阶段就对其进行精确控制,以确保最终获得的数据具有较高的准确性和实用性。这不仅有助于更深入地理解装甲材料在极端条件下的响应机制,也为优化装甲设计提供了重要的理论依据和技术支持。

参考文献

- [1] 常向阳,王自力. 爆炸成型弹丸侵彻钢靶的 ALE 算法[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2004,5(3):70-73.
- [2] 朱桂春,刘中枢,梁国峰,等. 不锈钢 06Cr18Ni11Ti 与铸钢 20Mn 的爆炸焊接研究[J/OL]. 爆

破,1-16[2024-11-03].

[3]赵宇. 基于 SPH 方法爆炸焊接板材的数值模拟研究[D]. 安徽理工大学,2024.

[4]张文斌,杨海娟,刘翠荣,等. 爆炸焊接 N6/45#复合板的数值模拟与实验分析(英文)[J]. 稀有金属材料与工程,2024,53(06):152-160.

[5]杜忠华,赵国志,王晓鸣,等. 双层陶瓷复合靶板抗弹性的研究[J]. 航空学报,2002,(02):147-150.

[6]秦溶蔓,朱波,乔琨,等. 复合结构碳纤维防弹板的防弹性能仿真[J]. 工程科学学报,2021,43(10):134-135.

[7]申志强,蒋志刚,曾首义,等. 穿甲子弹偏心入射陶瓷/钢复合靶板试验[J]. 国防科技大学学报,2007,(06):34-38.

[8]潘林,陈叶娣,黄敏高,等. 基于 CAE 技术的便携式无人机干扰设备壳体注射模开发及应用[J]. 模具制造,2025,25(03):20-22.

[9]张见升,景建斌,孙浩,等. 爆炸荷载下预应力 T 型梁毁伤效应数值仿真分析[J]. 兵工学报,2024,45(S2):193-198.

[10]陈斌,李亚,张绍伦,等. 爆炸焊接制备 C276/Q345R 复合板及其热处理研究[J]. 铁合金,2025,56(01):29-35.

[11]周嘉楠,罗宁,梁汉良,等. TC4/Al 6063/Al 7075 爆炸焊接复合板的微观结构分析:多尺度模拟与实验研究(英文)[J]. 稀有金属材料与工程,2025,54(01):27-38.

基金项目:浙江省教育厅一般科研项目(Y202351814)、浙江工商职业技术学院科研年度项目(KYND202203、KYND202420)、浙江工商职业技术学院科研创新团队项目(KYTD202101)

作者简介:杨少增(1991-),男,汉族,山东德州人,讲师,研究方向为模具设计、电火花加工、爆炸焊接等方面。