

初始投资,投资回报的周期偏长,这也限制了社会资本投入。最后,技术成熟度与应用推广也是影响产业化进程的关键因素,有一些灰渣高值化利用技术仍处在实验室研究阶段,离工业化应用存在一定间距,就算是一些相对成熟的技术,也面临着诸如市场认知度低、应用场景有限等问题,技术服务体系欠佳,欠缺专业的技术支持及解决方案,也对技术的广泛应用造成了制约。

针对上述情况,建议从以下几个方面着手采取对策:一是构建灰渣品质稳定控制体系,依靠原料煤管理、气化工工艺优化等手段,防止灰渣品质波动加剧。二是迅速制定灰渣资源化利用的相关标准,诸如产品标准、检测方法标准、应用规范等,为产业发展给予技术支持。三是加大政策扶持力度,凭借财政补贴、税收优惠等途径,减少企业成本支出,提升灰渣利用的经济上的可行性。四是着重推进技术研发及成果转化,重点攻克阻碍产业化的关键技术瓶颈,完备技术服务体系;五是积极推进宣传推广,增强社会对灰渣资源化利用的认知度及接受度,扩大应用市场。

## 6 产业化应用前景展望

随着绿色发展理念深入人心,环保政策日益收紧,煤气化灰渣实现资源化利用是煤化工产业转型升级的必然走向,航天炉粉煤气化形成的灰渣,作为一种具有独特特性的工业副产物,其资源化利用前景十分广阔,随着技术逐步进步和工艺不断成熟,灰渣的利用途径会日益拓展,利用价值会不断提升。

建材领域,灰渣有望在高性能混凝土、新型墙体材料及道路建设等方面得到更广泛应用,随着绿色建材标准渐次提高及市场需求的递增,以绿色环保原材料存在的灰渣,会展现出日益强大的市场竞争力,凭借技术创新,灰渣建材产品性能将持续增强,应用范围会不断拓展<sup>[5]</sup>。

生态环境领域,灰渣于土壤改良、水环境修复等方面的应用前景值得期待,随着农业可持续发展需求递增以及生

态环境治理力度加大,灰渣作为一种成本低廉、效果良好的改良剂及修复材料,能在农业及环保领域发挥重大作用,依托与生物技术、纳米技术等新兴技术的结合,灰渣的环境修复功能将进一步强化。

高端化工领域,提取利用灰渣中的高价值成分以及制备高功能材料将成为研究热点,伴随材料科学与化工技术的进步,从灰渣中提取有价值元素、用以制备功能性材料的技术会日益成熟,实现对灰渣的高值化利用目标,这不仅可以提升灰渣的经济价值,还可以拓展煤化工产业链,抬高产业附加值。

## 7 结语

灰渣资源化利用产业的拓展还会带动相关产业链协同发展,从灰渣收集起,经运输、处理,到最终产品制造、应用,将形成一套完整的产业体系,造就新的就业机遇以及经济增长点,灰渣资源化利用将进一步促进煤化工产业与建材、农业、环保、新材料等产业深度融合,实现产业结构优化升级。未来得益于技术创新、政策支持和市场驱动的多重作用,航天炉粉煤气化灰渣资源化利用产业就要进入快速发展阶段,依靠建立完善的技术体系、标准体系和市场体系,灰渣将切实达成从“废弃物”到“资源”的转化,为煤化工产业的绿色可持续发展添砖加瓦。

## 参考文献

- [1] 吴超,陶林,宋爱,等.煤气化灰渣的综合利用研究进展[J].广州化工,2025,53(11):26-29.
- [2] 何丽君.煤气化渣资源化利用与规模化处置技术研究现状[J].低碳世界,2025,15(02):1-3.
- [3] 张迎霜,冯俊,莫文龙,等.煤气化灰渣分选技术与资源化利用研究进展[J].金属矿山,2025,(01):97-105.
- [4] 阿拉腾沙嘎,段乐乐.煤气化渣资源化利用的研究进展[J].化工技术与开发,2025,54(03):44-47.
- [5] 王栋,姚彬,张国辉,等.煤气化灰渣资源化利用技术的研究现状[J].应用化工,2024,53(08):1967-1970.

# Comparative Study on Numerical Simulation of Anti-Projectile Penetration Performance between 603 Steel and 4340 Steel

Wanduo Song

School of Equipment Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning, 110159, China

## Abstract

To clarify the application potential of 603 steel and 4340 steel in armor protection, in accordance with the GJB 59.17-1988 specification, the LS-DYNA software was used to establish finite element models for the penetration of 37mm sharp-nosed armor-piercing projectiles and 100mm blunt-nosed armor-piercing projectiles into target plates made of these two steels. Numerical simulations were conducted under two penetration conditions: 0° normal penetration and 30° oblique penetration. By analyzing the variation of projectile velocity and the failure morphology of target plates, the penetration limit strengths of the two steels were obtained, and their anti-penetration performances were compared. The results show that: under all penetration conditions, the anti-projectile performance of 603 steel is superior to that of 4340 steel. Among them, the advantage is the most significant when resisting the normal penetration of 100mm blunt-nosed armor-piercing projectiles, with the penetration limit strength of 603 steel increased by 21.2% compared with 4340 steel; the advantage is the smallest when resisting the 30° oblique penetration of 37mm sharp-nosed armor-piercing projectiles, with an increase of 8.6%. This study provides data support and theoretical reference for the selection and optimization of armor materials.

## Keywords

603 steel; 4340 steel; anti-penetration performance; numerical simulation; penetration limit strength; LS-DYNA

## 603 钢与 4340 钢抗炮弹侵彻性能的数值模拟对比研究

宋万铎

沈阳理工大学装备工程学院, 中国·辽宁 沈阳 110159

## 摘要

为明确 603 钢与 4340 钢的装甲防护应用潜力, 依据 GJB 59.17-1988 规程, 采用 LS-DYNA 构建 37mm 尖头、100mm 钝头穿甲弹侵彻两种钢靶板的有限元模型, 开展 0° 垂直与 30° 斜侵彻模拟。通过分析弹速变化、靶板破坏形态, 获取穿透极限强度并对比抗侵彻性能。结果显示: 所有工况下 603 钢抗弹性能均优于 4340 钢, 其中抗 100mm 钝头穿甲弹垂直侵彻时优势最显著, 穿透极限强度提升 21.2%; 抗 37mm 尖头穿甲弹 30° 斜侵彻时优势最小, 提升 8.6%。本研究为装甲材料选型优化提供数据支撑与理论参考。

## 关键词

603 钢; 4340 钢; 抗侵彻性能; 数值模拟; 穿透极限强度; LS-DYNA

## 1 引言

装甲材料的抗炮弹侵彻性能直接决定装甲装备的战场生存能力<sup>[1]</sup>, 603 钢与 4340 钢作为典型高强度结构钢, 广泛应用于军事装备及防护工程领域。然而, 两者在高速弹丸侵彻载荷下的抗毁伤机制与性能差异缺乏系统量化, 极大限制了装甲防护领域的精准选型与高效应用<sup>[2]</sup>。

现有研究中, 何杨等<sup>[3]</sup>揭示了破片侵彻陶瓷/钢复合装甲的规律及“最易侵彻角”现象, Yu P K 等<sup>[4]</sup>从微观层

面分析了表面等离子硬化对装甲钢抗弹性能的提升机制, 陆文成等<sup>[5]</sup>明确 603 装甲钢抵御 12.7mm 穿甲燃烧弹的主要失效模式为“绝热剪切冲塞”, 李强等<sup>[6]</sup>则指出破片形状是影响侵彻威力的关键因素。但这些研究多聚焦单一材料, 缺乏同工况下 603 钢与 4340 钢的对比分析, 且未系统量化不同弹种、侵彻角度下的性能差异。

本研究依据 GJB 59.17-1988 标准, 采用 LS-DYNA 构建 603 钢与 4340 钢靶板抗三种典型穿甲弹侵彻的有限元模型, 通过数值模拟获取不同工况下的抗侵彻参数并对比差异, 为装甲材料选型与防护优化提供依据, 兼具重要理论与工程价值。

【作者简介】宋万铎(2001-), 男, 硕士, 从事爆炸毁伤与弹药工程研究。

## 2 计算模型

依据 GJB 59.17-1988《装甲板抗炮弹性能试验》规程中轧制均质钢装甲板验收试验典型条件,结合弹种-靶板厚度匹配关系,构建两种弹丸-靶板侵彻模型,几何参数如下:

37mm 尖头穿甲弹:结构含风帽、弹体及等效弹带,总质量约 0.8kg,材料为冷拉 35CrMnSiA 钢;直径 37mm,全长 150mm,如图 1 所示;100mm 钝头穿甲弹:结构含风帽、被帽、弹体及等效药柱、引信,总质量约 15.5kg,材料为 35CrMnSiA 钢;直径 100mm,全长 350mm,如图 2 所示;靶板平面尺寸统一为 1000mm×1200mm(规避边缘效应),厚度按弹种确定:抗 37mm 尖头穿甲弹靶板厚 30mm;抗 100mm 钝头穿甲弹靶板厚 80mm。



图 1 37mm 尖头穿甲弹侵彻 30mm 厚均质靶板

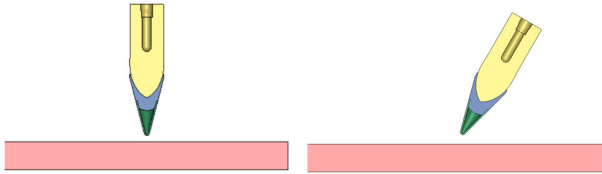


图 2 100mm 钝头穿甲弹侵彻 80mm 厚均质靶板

为保证对比分析的科学性与公平性,靶板材料分别采用 603 钢与 4340 钢,且针对每种材料单独构建有限元模型。模型设计遵循单变量控制原则,除材料属性外,靶板厚度、弹体几何参数、边界条件等所有参数均保持一致,以此排除非目标变量对性能对比结果的干扰。为在缩减计算规模的同时保障结果可靠性,所有模型均采用 1/2 对称建模方法。这一设计的合理性源于弹体与靶板的几何对称性,可确保对称半模型在侵彻过程中的力学响应能准确反映全模型的实际状态。在网格划分方面,采用梯度网格策略以平衡计算精度与效率。针对靶板受弹丸撞击的局部区域(以撞击点为中心、直径 200mm 范围内)进行网格细化,单元尺寸严格控制在 2-5mm。这一细化处理至关重要,因为侵彻过程中该区域会出现高应变率、剧烈塑性变形及材料失效等现象,需足够的网格密度以捕捉剪切冲塞、花瓣式破坏、绝热剪切带等细节特征。对于非撞击区域,网格尺寸适当放大至 10-15mm,在不影响模拟整体精度的前提下有效减少单元总数。边界条件设置上,在 LS-DYNA 软件中对靶板四周施加全固定约束,限制其在水平方向与垂直方向的位移。该设置准确模拟了实际工程中装甲板通过螺栓或焊接固定的安装状态,确保靶板在侵彻过程中不发生刚体运动,与真实工况保持一致。弹丸

初始速度的施加基于如下坐标系定义:以靶板中心为原点,靶板法线方向为 Z 轴正方向。在垂直侵彻( $0^\circ$ )工况中,弹丸初始速度沿 Z 轴正方向施加,与靶板法线方向平行;在  $30^\circ$  角斜侵彻工况中,速度矢量位于 X-Z 平面内,与靶板法线方向(呈  $30^\circ$  夹角穿透极限速度,即实现完全贯穿所需的最小速度的确定采用逐步试算法:从较低初始速度开始,在后续模拟中按控制增量逐步提高速度,通过控制增量确保精度。穿透判据定义为弹丸完全贯穿靶板且剩余速度非零,首次满足该判据时的临界速度即被记录为靶材的穿透极限速度,为抗侵彻性能评估提供量化指标。

## 3 计算结果与分析

通过 LS-DYNA 有限元软件进行动力学求解时,基于已构建的精细化模型,采用适用于高应变率冲击问题的显式积分算法,并结合材料动态本构模型与失效准则,精确求解两种弹丸在不同侵彻工况(垂直  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  角斜侵彻)下的动力学响应过程。

用 37mm 尖头穿甲弹分别对 30mm 厚的 603 钢板和 4340 钢板进行垂直侵彻,最终得到 603 钢板的击穿强度极限为 895m/s,4340 钢板的击穿强度极限为 795m/s 如图 3、5 所示,图 4、6 为在侵彻过程中速度变化曲线。

用 37mm 尖头穿甲弹分别对 30mm 厚的 603 钢板和 4340 钢板进行  $30^\circ$  斜侵彻,最终得到 603 钢板的击穿强度极限为 950m/s,4340 钢板的击穿强度极限为 875m/s 如图 7、9 所示,图 8、10 为在侵彻过程中速度变化曲线。

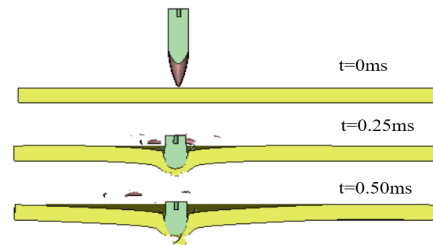


图 3 尖头穿甲弹侵彻 30mm 厚 603 钢过程

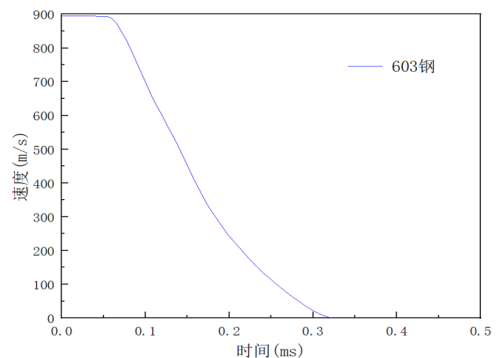


图 4 速度变化曲线

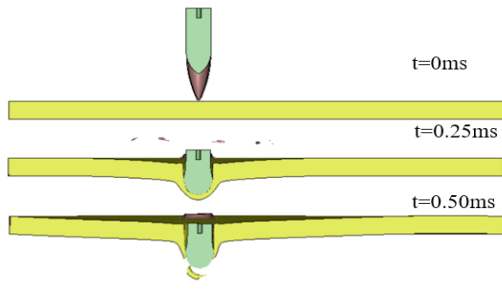


图 5 尖头穿甲弹侵彻 30mm 厚 4340 钢过程

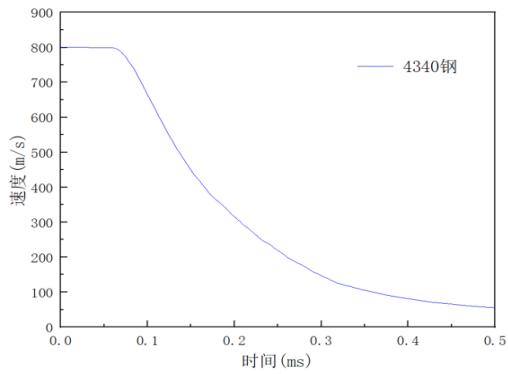


图 6 速度变化曲线

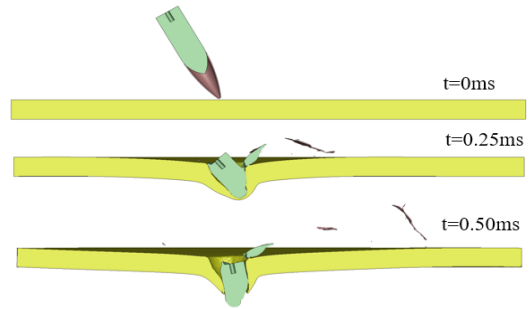


图 9 尖头穿甲弹斜侵彻 30mm 厚 4340 钢过程

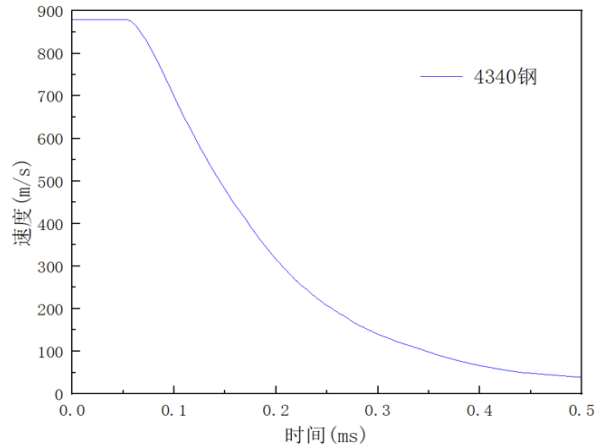


图 10 速度变化曲线

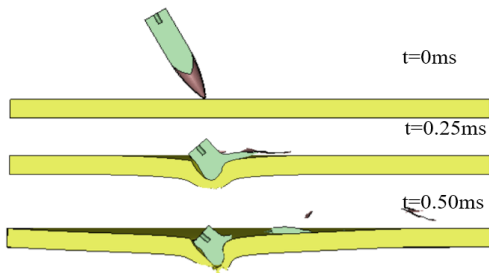


图 7 尖头穿甲弹斜侵彻 30mm 厚 603 钢过程

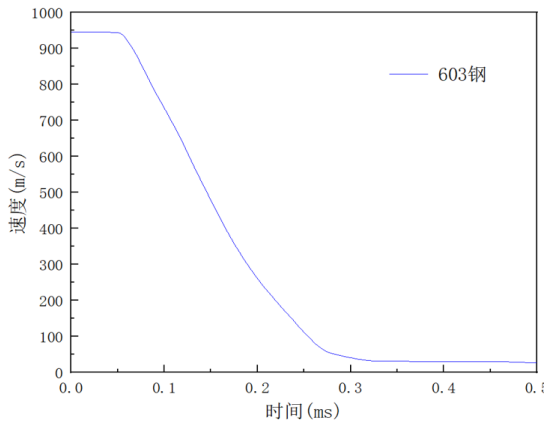


图 8 速度变化曲线

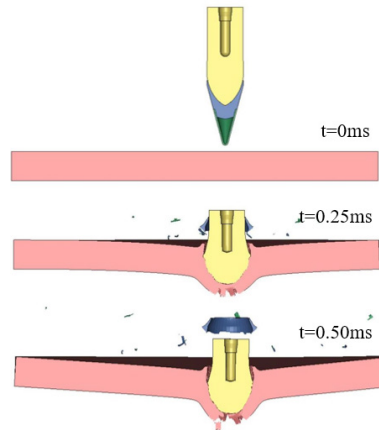


图 11 钝头穿甲弹侵彻 80mm 厚 603 钢过程

用 100mm 钝头穿甲弹分别对 80mm 厚的 603 钢板和 4340 钢板进行垂直侵彻，最终得到 603 钢板的击穿强度极限为 800m/s,4340 钢板的击穿强度极限为 660m/s 如图 11、13 所示，图 12、14 为在侵彻过程中速度变化曲线。

用 100mm 钝头穿甲弹分别对 80mm 厚的 603 钢板和 4340 钢板进行 30° 斜侵彻，最终得到 603 钢板的击穿强度极限为 850m/s,4340 钢板的击穿强度极限为 750m/s 如图 15、17 所示，图 16、18 为在侵彻过程中速度变化曲线。

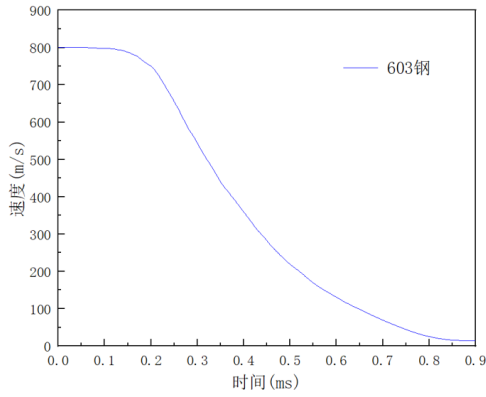


图 12 速度变化曲线

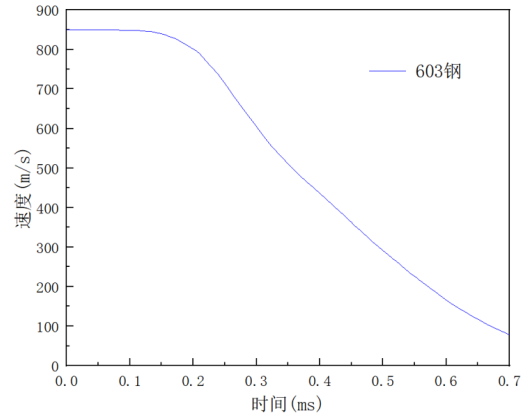


图 16 速度变化曲线

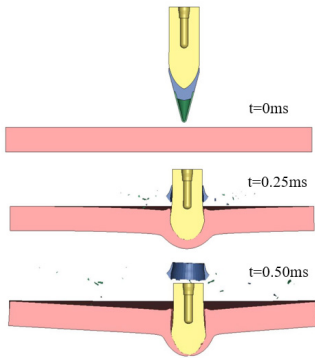


图 13 钝头穿甲弹侵彻 80mm 厚 4340 钢过程

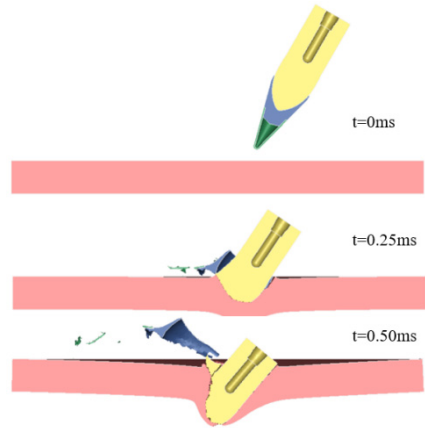


图 17 钝头穿甲弹斜侵彻 80mm 厚 4340 钢过程

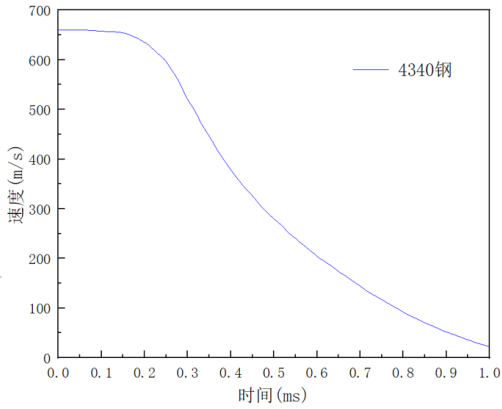


图 14 速度变化曲线

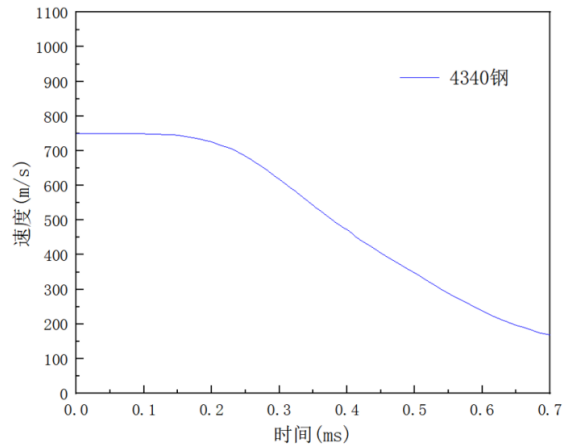


图 18 速度变化曲线

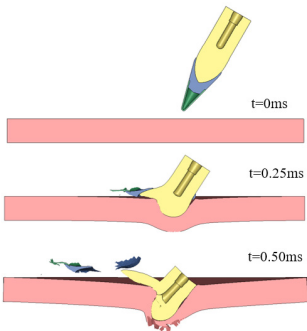


图 15 钝头穿甲弹斜侵彻 80mm 厚 603 钢过程

相同弹丸与靶厚下，两钢种垂直侵彻穿透极限强度均低于 30° 斜侵彻，垂直侵彻动能集中、靶板法向压力大，斜侵彻因切向滑擦分散动能；且 603 钢垂直侵彻性能提升大于斜侵彻，更适防御垂直直射弹药。弹丸口径从 37mm 增至 100mm 时，603 钢相对 4340 钢提升呈波动增强，100mm 钝头弹垂直侵彻提升最大，37mm 尖头弹 30° 斜侵彻最小；因尖头弹靠“穿刺 - 剪切”，钝头弹靠“挤压 - 冲

塞”，603 钢高屈服强度适配钝头弹防御。材料本质差异：603 钢初始屈服强度（1120MPa）比 4340 钢（792MPa）高 41.4%，虽 4340 钢应变硬化系数略高，但高速侵彻中初始屈服强度主导，603 钢可快速抗力延缓靶板变形，4340 钢早入塑性，故 603 钢抗侵彻性能更优。

#### 4 结语

本研究基于 LS-DYNA 软件与 Johnson-Cook 本构模型，开展 603 钢、4340 钢靶板抗 37mm 尖头穿甲弹、100mm 钝头穿甲弹侵彻的数值模拟，分析靶板破坏形态、弹丸速度曲线及穿透极限强度，对比二者抗侵彻性能，主要结论如下：

全工况下 603 钢抗弹性能均优于 4340 钢，穿透极限强度提升 8.6%-21.2%，更适应高防护需求的装甲装备领域；

工况与弹丸影响：垂直侵彻时 603 钢性能提升比斜侵彻大（差值 4.0%-7.9%）；弹丸口径增大，603 钢优势渐增，抗 100mm 钝头弹垂直侵彻提升最大（21.2%），抗 37mm 尖头弹 30° 斜侵彻提升最小（8.6%）；

性能差异核心：603 钢初始屈服强度远高于 4340 钢，虽 4340 钢应变硬化系数略高，但初始屈服强度主导抗侵彻性能，高屈服强度可延缓靶板高速冲击下的塑性变形与破坏，提升抗弹能力。

#### 参考文献

- [1] 李曼琳,朱瑶,韩炜隆.不同壁厚异形靶板抗侵彻性能研究[J].装备制造技术,2025,(02):27-29.DOI:CNKI:SUN:GXJX.0.2025-02-006.
- [2] 高颂.(2019).新型陶瓷复合装甲抗14.5mm穿甲燃烧弹侵彻性能研究(硕士学位论文,国防科技大学).硕士
- [3] 何杨.(2022).某先进装甲运兵车装甲抗侵彻能力研究(硕士学位论文,南京理工大学).硕士.
- [4] Yu P K ,Wang F ,Chen G R , et al.Study on the Surface Plasma Hardening Treatment and Anti-Penetration Mechanism of Armor Steel[J].Advanced Materials Research,2013,2384(690-693):2141-2144.DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.2141.
- [5] 陆文成,褚庆国,王晓东,等.12.7mm穿燃弹侵彻603装甲钢行为研究[J].兵器材料科学与工程,2023,46(04):8-14.DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20230712.001.
- [6] 李强,马常祥,董丽娜,等.弹头侵彻高强装甲钢运动规律及弹坑周围塑性切应变分布[J].东北大学学报,1997,(03):40-43.DOI:CNKI:SUN:DBDX.0.1997-03-008.