

2024-T42 铝合金圆管抗球形钢弹侵彻特性研究

王立纲¹ 王日晗² 肖思维² 田璐³ 董勤¹

(1. 中国民用航空飞行学院 广汉分院, 广汉 618307)

(2. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 广汉 618307)

(3. 中国民用航空飞行学院 飞机修理厂, 广汉 618307)

摘要: 针对铝合金圆管在球形钢弹冲击时的抗侵彻性能, 探讨不同半径和壁厚对其弹道极限速度的影响, 从而为圆管的防护设计提供依据。基于 Ansys/Workbench 软件和 Johnson-Cook 材料模型建立了球形钢弹侵彻 2024-T42 铝合金靶板的有限元模型, 并验证了该模型的有效性。此外, 模拟了不同半径、壁厚的铝合金圆管在球形钢弹正向冲击下的响应特性, 并分析了圆管的变形及损伤。结果表明, 铝合金圆管上、下侧管壁抗侵彻能力不同, 上侧上凸结构优于下侧下凹结构。圆管半径越小, 上侧管壁抗侵彻性能越好; 半径相同壁厚增加时, 上、下管壁弹道极限速度近似线性增长。

关键词: 铝合金圆管; 球形钢弹; 侵彻性能; 弹道极限速度; 数值仿真

中图分类号: V214.3 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.06.014

0 引言

2024 系列硬铝合金强度高、耐热性好, 具有较强的断裂韧性和抗疲劳性能^[1], 在航空航天、汽车、船舶等领域应用广泛。在众多吸能结构中, 金属圆管承载力稳定、变形行程长、取材方便, 被视为廉价、可靠、高效、理想的吸能元件^[2-3]。目前, 对金属圆管结构的冲击研究主要分为轴向压缩^[4-6]和侧向撞击两种。程国强等^[7]对两端固支圆管经侧向撞击时的塑性大变形进行了试验研究和理论分析, 提出了线载荷集中作用下载荷与局部凹陷值的关系式以及冲击动能与总体位移的关系式。方子帆等^[8]采用数值仿真的方法, 对两端固支圆管在不同位置经低速横向冲击的变形响应进行了研究。武勇忠等^[9]研究了充液薄壁圆管在平头弹侧向冲击下局部凹陷、穿透和整体变形等损伤。周丽军等^[10]对自由圆管受刚性平头弹体横向冲击时的动力学行为进行了试验研究和计算机仿真。秦庆华等^[11]研究了不同冲击能量下两端固支薄壁圆管的整体变形模式和冲击点附近局部压溃模式的发展过程。穆建春等^[12]通过试验研究了薄壁软钢圆管在 90° 圆锥头弹不同角度冲击下的破裂模式。纪冲等^[13]利用数值仿真方法研究了圆柱壳在不同冲击条件下的变形和破坏模式, 得到了弹体以不同倾角击穿壳壁的最小速度。王猛等^[14]利用有限元软件 Ls-Dyna 3D 对球形弹丸高速正撞击不同直径薄壁钢管的穿孔毁伤特性进行数

值仿真, 发现薄壁钢管遭受小弹丸撞击穿孔后产生碎片云的分布形态受径向直径影响明显。NIKNEJAD 等^[15]^[119-131]引入了一种新的变形理论模型, 基于能量法推导了弹道极限速度的理论公式, 并使用 Ls-Dyna 显式求解器对钝实心圆柱体进入空金属柱的过程进行了数值模拟, 讨论了弹丸直径和质量等几何特征对射孔过程和弹道极限速度的影响。GARA 等^[16]利用 Ls-Dyna 软件采用 Johnson-Cookvisco(J-C) 塑性模型研究了刚性钢圆柱形弹体撞击铝合金靶的抗弹性能。CHENG 等^[17-18]采用直径为 5 mm 的球形钢弹, 在 400 m/s 对 2024-T4 铝合金进行多次弹道冲击, 探究了其动态变形和损伤情况。随着冲击次数的增加, 熔坑直径略有增加, 但熔坑深度和熔坑体积显著增加, 应变累积导致整体显微硬度增加。冲击参数与冲击次数均遵循幂律关系。且与多次撞击相比, 相同总撞击能量的等效单次撞击具有相似的撞击坑参数, 但微观结构不同。RODRIGUEZ-MILLAN 等^[19]采用试验和数值模拟相结合的方法, 研究了 2024-T351 铝合金在冲击载荷下的力学行为。通过现有对圆管侧向冲击文献分析, 发现目前主要是研究平板靶体和弹体形状的影响, 较少涉及圆管尺寸与弹道极限速度的相互关系。

因此, 本文基于 Ansys/Workbench 软件和 J-C 材料模型建立球形钢弹正冲击 2024-T42 铝合金圆管有限元模型, 探究圆管半径、厚度与其被破坏时弹体临界速度的关系, 为进一步研究圆管弹道极限速度的影响

收稿日期: 2023-10-05 修回日期: 2023-12-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(ZJ2023-009, J2023-003)

作者简介: 王立纲, 男, 1986 年生, 山东济南人, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为航空器适航与维修; E-mail: wangligang810@126.com。

田璐(通信作者), 女, 1992 年生, 山西太谷人, 硕士, 助理工程师; 主要研究方向为冲击动力学; E-mail: 984149946@qq.com。

引用格式: 王立纲, 王日晗, 肖思维, 等. 2024-T42 铝合金圆管抗球形钢弹侵彻特性研究[J]. 机械强度, 2025, 47(6): 118-123.

WANG Ligang, WANG Rihan, XIAO Siwei, et al. Research on the penetration resistance characteristic of 2024-T42 aluminum alloy tube to spherical steel projectile[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(6): 118-123.

因素及其损伤特性提供依据。

1 有效性验证

采用文献[20]²⁷⁻³³中材料的力学性能参数,球形钢弹和 2024-T42 铝合金材料的力学性能参数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 球形钢弹材料参数

Tab. 1 Material parameters of spherical steel projectile

材料 Material	密度 Density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 Elasticity modulus E/GPa	泊松比 Poisson ratio ν
钢 Steel	7 800	210	0.3

表 2 2024-T42 材料参数

Tab. 2 Material parameters of the 2024-T42

密度 Density $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹性模量 Elasticity modulus E/GPa	泊松比 Poisson ratio ν	熔点温度 Melting temperature T_{mel}/K	屈服强度 Yield strength A/MPa
2 700	71.1	0.3	775	293
应变硬化 系数 Strain hardening coefficient B/MPa	应变硬化 指数 Strain hardening index n	应变率敏感 系数 Strain rate sensitivity coefficient C	温度软化 系数 Temperature softening coefficient M'	应变率 Strain rate ϵ_0/s^{-1}
737	0.58	0.04	1	3×10^{-4}
材料常数 Material constant D_1	应力影响 常数 Stress influence constant D_2	应力影响 常数 Stress influence constant D_3	应变率影响 常数 Strain rate influence constant D_4	温度影响 常数 Temperature influence constant D_5
0.04	0.36	-1.98	0	0

按照文献[20]²⁷⁻³³中结构的尺寸和建模方法,使用 Ansys/Workbench 有限元软件建立弹靶冲击模型,如图 1 所示。其中,球形钢弹直径为 25.4 mm,铝合金靶板尺寸为 250 mm × 250 mm × 5 mm。由于弹体本身未发生明显的大变形,而 2024-T42 铝合金圆管出现了局部破坏,因此弹体采用 Rigid 刚体模型,铝合金圆管采用考虑材料失效和大变形的 J-C 本构和失效模型。此外,为充分考虑铝合金圆管受球形钢弹冲击时,在局部拉伸和压缩状态下材料的体积变化对压力造成的影响,结合使用 Gruneisen 状态方程,其参数如表 3 所示。

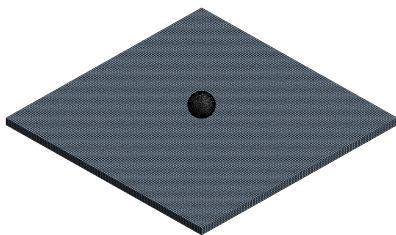


图 1 弹靶有限元模型

Fig. 1 Finite element model of projectile and target

通过 Ansys/Workbench Explicit Dynamics 模拟仿真得到球形钢弹正冲击 5 mm 厚的 2024-T42 铝合金板的弹道极限速度为 172 m/s,文献[15]¹¹⁹⁻¹³¹中弹道

极限速度大小为 151.7 m/s,误差约为 11.8%,验证了该模型的有效性。图 2 为文献[20]²⁷⁻³³的仿真结果与本文的对比。由图 2 可知,使用 Ansys/Workbench Explicit Dynamics 和 Ls-Dyna 能够很好地模拟弹靶冲击过程,两者得到的仿真过程和靶板损伤形式保持一致,进一步验证了模型和参数的有效性。

表 3 Gruneisen 状态方程参数

Tab. 3 State equation parameters of the Gruneisen

弹性波速 Elastic wave velocity $V/(\text{m}/\text{s})$	斜率系数 Slope coefficient S_1	Gruneisen 系数 Gruneisen coefficient γ_0
4 868	1.34	2

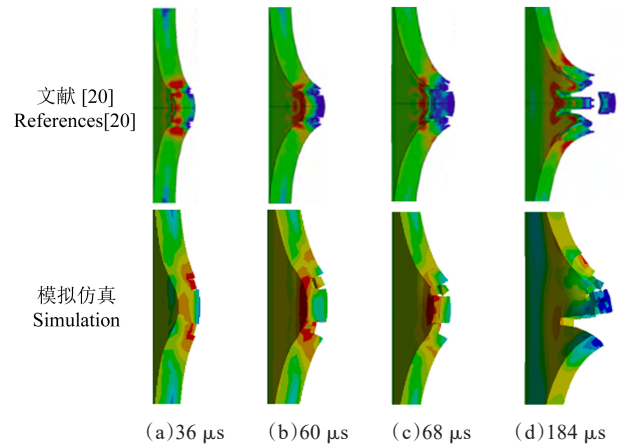


图 2 文献[20]²⁷⁻³³和本文模拟仿真对比

Fig. 2 Comparison of simulation between reference [20]²⁷⁻³³ and the article

2 仿真结果分析

在模型有效性验证的基础上,建立球形钢弹正冲击 2024-T42 铝合金圆管的有限元模型。其中,球形钢弹半径为 12.7 mm;圆管长度 L 为 250 mm;圆管半径 R 的范围为 30~70 mm;圆管壁厚 δ 的范围为 5~9 mm。圆管与钢弹均采用 Solid 六面体单元进行网格划分,圆管网格尺寸为 2 mm,钢弹网格尺寸为 5 mm。

在进行有限元分析时,将静摩擦因数设置为 0.1;动摩擦因数设置为 0.08;二次体积黏性系数为 1.5;线性体积黏性系数为 0.06;沙漏控制系数为 0.1;并在圆管两端加以固定约束。

2.1 弹体冲击铝合金圆管过程

球形钢弹侵彻铝合金圆管的破坏效果随着弹体速度的增加明显增强,其表现为圆管靶件不同的破坏形式。当弹体的初速度较低且小于圆管上表面击穿临界速度 v_{b11} 时,弹体被弹回,弹靶接触处出现局部塑性变形;当弹体初速度增加至圆管上表面击穿临界速度时,弹体将穿透圆管上侧管壁,并继续对下侧管壁产生侵彻作用;当弹体击穿上侧管壁后的剩余速度大于下表面击穿临界速度 v_{b12} 时,下侧管壁被穿透,弹体将贯穿整个圆管。

选取初速度 300 m/s 的弹体侵彻半径为 50 mm、厚度为 5 mm 的圆管为例,以便详细分析球形钢弹对铝合金圆管的冲击特性,其仿真过程如图 3 所示。由图 3 可知,当球形弹体接触铝合金圆管的瞬间,弹体压缩上侧管壁并在接触点处形成圆形局部凹陷;随着球形弹体继续压入管壁,局部凹陷区的范围进一步扩大,上侧管壁几何外形由外凸变为内凹,同时由于弹体对圆管的压缩作用,受到冲击载荷的区域外的圆管结构出现弹性变形,吸收了弹体部分动能;随着侵彻过程进行,局部凹陷区中心向外发生破坏,弹体将上侧管壁击穿,仍然具有较大的剩余速度,将继续作用于下

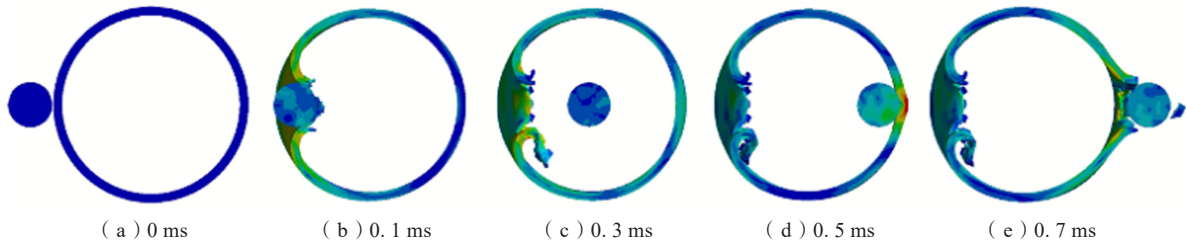


图 3 初速度为 300 m/s 的弹体侵彻圆管的仿真过程

Fig. 3 Process of the projectile penetration circular tubes under initial velocity of 300 m/s

2.2 圆管半径和厚度对其耗能影响

选取初速度为 300 m/s 的弹体侵彻不同半径和壁厚的圆管,如表 4 所示。其中, v_1 、 v_2 分别为击穿上侧管壁和下侧管壁的剩余速度;“*”表示弹体未击穿上侧管壁,未接触下侧管壁;负数表示弹体反弹。由图 4 可知,当管壁厚度达到 8 mm,弹体在撞击上侧管壁后即反弹,对下侧管壁无损坏,且其反弹速度随着圆筒半径增加逐渐增加,这是由于相同壁厚下半径越大,圆管结构与弹体接触区域抗压强度越弱,吸收更低的弹体动能。此外,圆管壁越厚,抵抗变形和破坏能力越强,弹体撞击后损失的动能越少。即反弹速度随壁厚增加而增大,当壁厚较大时,半径对弹体动能的影响变弱。

表 4 弹体以 300 m/s 的初速度侵彻不同壁厚和半径圆管的剩余速度
Tab. 4 Residual velocities of projectile penetrating circular tubes with different thicknesses and radius under initial velocity of 300 m/s

R/mm	δ /mm									
	5		6		7		8		9	
	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2
30	198.9	111.8	135.7	-37.6	18.2	-16.3	-32.7	*	-41.2	*
40	211.5	122.6	157.8	-35.6	88.3	-27.9	-38.1	*	-44.2	*
50	213.9	130.3	163.3	-34.3	100.5	-31.2	-46.3	*	-47.7	*
60	219.2	135.4	172.7	-29.6	108.4	-33.7	-48.2	*	-49.3	*
70	220.6	139.5	179.5	-19.7	117.6	-33.7	-51.4	*	-51.5	*

由表 4 可知,当壁厚为 6 mm 和 7 mm 时,弹体都击穿了上侧管壁,且都未击穿下侧管壁;随着圆管半径的增加,弹体击穿上侧管壁后的剩余速度逐渐增加,但壁厚为 7 mm 的剩余速度明显低于壁厚为 6 mm 的

侧管壁,将下侧管壁击穿,直至完全贯穿圆管。在弹体贯穿圆管靶板时,上侧管壁为上凸结构,由于弹体对其的压缩作用,上表面管壁发生撕裂,形成向后的花瓣样破坏;下侧管壁为下凹结构,在弹体作用于下侧管壁时,产生向后弯曲的花瓣样破坏且由于剪切作用产生冲塞。通过对有限元模拟的结果进行观察可知,在穿透破坏阶段,弹体穿透管壁的瞬间,弹体对铝合金圆管管壁的压缩作用消失,圆管受到弹体冲击对圆管的压缩作用产生的弹性变形所存储的能量瞬间释放,管壁会出现较大程度的回弹,整个圆管结构出现短时间的持续小幅度振动。

圆筒,这是由于管壁越厚其抗侵彻性能增加,耗能增加,弹体剩余速度降低。

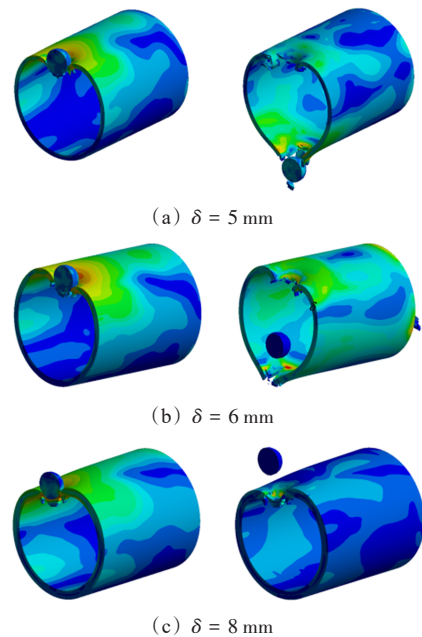


图 4 弹体以 300 m/s 初速度冲击半径 50 mm 圆管的仿真过程

Fig. 4 Process of projectile impacting circular tubes with a radius of 50 mm under initial velocity of 300 m/s

当壁厚为 5 mm 时,弹体将圆管完全击穿,且穿过上侧管壁和下侧管壁的剩余速度都随圆管半径增加逐渐降低,这与圆管半径增加导致区域结构强度和刚度变弱有关。

对于弹体侵彻金属管,NIKNEJAD 等^{[15]119-131}采用能量法推导出弹体击穿首层金属管靶板的剩余速度与弹体初速度、弹靶材料的关系,如式(1)所示。

$$v_{bi1} = \left\{ \left[4m_p v_i^2 - \frac{\pi D^2 t \tau_u (\rho_p c_p \rho_t c_t)^2}{3G_t (\rho_p c_p + \rho_t c_t)^2} - \frac{16\pi D t^2 \tau_u}{(\pi D^2 t \rho_t + 4m_p)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1)$$

式中, m_p 为弹体质量; v_i 为弹体初速度; D 为弹体直径; t 为靶板壁厚; ρ_p 、 ρ_t 分别为弹体密度和靶板密度; c_p 、 c_t 分别为弹体和靶板的弹性波速; G_t 为靶板切变模量; τ_u 为静态极限剪切强度。其中

$$c_p = \sqrt{E_p / \rho_p} \quad (2)$$

$$G_t = E_t / [2(1 + \nu_t)] \quad (3)$$

式中, E_p 、 E_t 分别为弹体和靶板的弹性模量; ν_t 为靶板材料泊松比。

当弹体初速度为 300 m/s 时, 将表 5 参数代入式(1), 得到弹体击穿圆管上壁后的剩余速度如表 6 所示。

表 5 弹靶材料参数

Tab. 5 Material parameters of projectile target

材料参数 Material parameter	数值 Value	材料参数 Material parameter	数值 Value
m_p/kg	6.69×10^{-2}	$c_p/(\text{m/s})$	5 187
D/m	2.54×10^{-2}	$c_t/(\text{m/s})$	4 868
$\rho_p/(\text{kg/m}^3)$	7 800	G_t/GPa	27.3
$\rho_t/(\text{kg/m}^3)$	2 700	τ_u/MPa	293

表 6 弹体击穿不同壁厚圆管上壁后剩余速度对比

Tab. 6 Comparison of residual velocities of projectile penetrating the upper wall of circular tubes with different thicknesses

圆管壁厚 Thickness of tube δ/mm	计算速度 Calculation velocity/(m/s)	模拟速度 Simulation velocity/(m/s)	误差 Error/%
5	215	213.9	0.5
6	175.9	163.3	7.7
7	117.5	100.5	16.9
8	—	-46.3	—
9	—	-47.7	—

由表 6 可知, 通过文献[15]¹¹⁹⁻¹³¹中能量法推导出的剩余速度方程在弹体能够击穿靶板的情况下误差均在可接受的范围, 但随着圆管壁厚增加, 误差有显著增加趋势, 且当弹体无法击穿靶板时, 式(1)无法计算弹体反弹后的剩余速度。

2.3 圆管半径对其弹道极限影响

在冲击防护领域, 整个靶板的弹道极限速度 v_{bi} 通常被认为相当于临界穿透速度, 用来表征靶板结构抵抗外物侵彻的性能。选取壁厚为 5 mm, 半径分别为 30、40、50、60、70 mm 的圆管, 研究其弹道极限的关系, 如表 7、图 5 所示。

由图 5 可知, 整个圆管的弹道极限速度随着圆筒半径增加成线性缓慢降低, 即在弹体直径一定时, 圆管半径越大, 圆管曲率越趋近于平板, 上侧管壁隆起抗压缩和下侧管壁凹陷抗拉伸能力越弱, 导致其弹道极限速度有所下降。此外, 圆管上侧管壁的弹道极限

速度明显高于下侧管壁的弹道极限速度, 且圆管半径越小时差异越显著, 这是由于相对于弹体初速度方向, 上侧管壁为上凸结构, 受撞击后向下挤压材料形成轴向反作用力抵抗变形, 而下侧管壁为下凹结构, 主要为拉伸破坏, 铝合金抗压能力要远大于其抗拉能力, 因此弹体击穿上侧管壁需要消耗更多能量。当圆管半径增加时, 其防护能力逐渐变弱, 上凸结构与下凹结构弹道极限差值逐渐减小并趋于恒定, 当半径大于等于 50 mm 时铝合金圆管的弹道极限基本保持恒定。

表 7 不同半径圆管的弹道极限速度

Tab. 7 Ballistic limit speed of circular tubes with different radius

圆管半径 Radius of tube R/mm	上表面击穿临界速度 Upper surface breakdown critical velocity $v_{bi1}/(\text{m/s})$	下表面击穿 临界速度 Lower surface breakdown critical velocity $v_{bi2}/(\text{m/s})$	弹道极限 速度 Ballistic limit velocity $v_{bi}/(\text{m/s})$
30	211	157.8	268
40	196.5	166.5	266
50	185	166.8	265
60	182.8	167.7	261.8
70	181	166.1	260

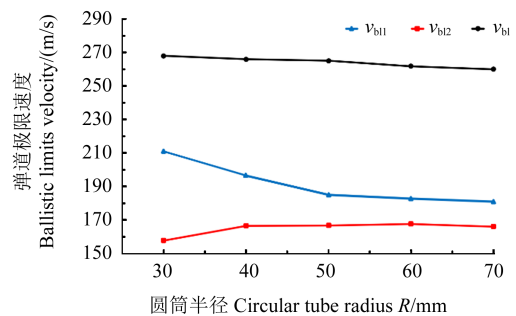


图 5 不同圆管半径的弹道极限速度

Fig. 5 Ballistic limit velocity of circular tubes with different radius

2.4 圆管壁厚对其弹道极限速度的影响

为探究圆管壁厚对其抗侵彻性能的影响, 建立壁厚 δ 为 5~9 mm、半径为 50 mm 的铝合金圆管受球形钢弹撞击模型, 仿真结果如表 8、图 6 所示。

表 8 不同壁厚圆管的弹道极限速度

Tab. 8 Ballistic limit velocity of circular tubes with different thicknesses

圆管壁厚 Thickness of tube δ/mm	上表面击穿 临界速度 Upper surface breakdown critical velocity $v_{bi1}/(\text{m/s})$	下表面击穿 临界速度 Lower surface breakdown critical velocity $v_{bi2}/(\text{m/s})$	弹道极限速度 Ballistic limit velocity $v_{bi}/(\text{m/s})$
5	185	166.8	265
6	236.7	200.9	324.2
7	275	233.1	376.7
8	316.8	262.5	424.5
9	349.9	293.49	463.7

由图 6 可知, 随着铝合金圆管壁厚的增加, 其上、下两侧管壁的弹道极限速度成线性增长, 由于相对于弹体的冲击方向, 上侧管壁为上凸结构, 下侧管壁为

下凹结构,上侧管壁的弹道极限速度大于下侧管壁的弹道极限速度,且随着壁厚的增大,上、下两侧弹道极限速度差值近似线性增加。

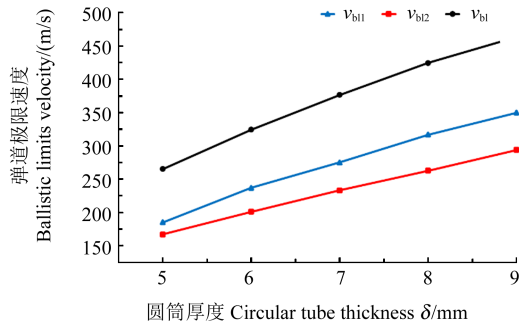


图6 不同圆管壁厚的弹道极限速度

Fig. 6 Ballistic limit velocity of circular tubes with different thicknesses

根据文献[15]¹¹⁹⁻¹³¹中得到的金属管状靶板弹道极限速度方程,如式(4)~式(6)所示,将表5数据代入,得到不同的铝合金圆管弹道极限速度如表9所示。

表9 不同壁厚圆管弹道极限速度的计算值与模拟值对比

Tab. 9 Comparison of ballistic limit velocity of circular tubes with different thicknesses

圆管壁厚 Thickness of tube δ/mm	计算速度 Calculation velocity/(m/s)	模拟速度 Simulation velocity/(m/s)	误差 Error/%
5	260.2	265	1.8
6	330.4	324.2	1.9
7	388.2	376.7	3.1
8	446.3	424.5	5.1
9	505.8	463.7	9.1

$$v_{bl} = \sqrt{M/N} \quad (4)$$

其中,

$$M = \left[\frac{4t(\pi D^2 \rho_t + 4m_p)}{D} - \frac{2\pi D t^2 (\rho_p c_p \rho_t c_t)^2}{3G_t (\rho_p c_p + \rho_t c_t)^2} \right] \tau_u \quad (5)$$

$$N = \frac{(\pi D^2 \rho_t + 4m_p)m_p}{2\pi D^2 t} + \left[\frac{\pi D^2 t (\rho_p c_p \rho_t c_t)^2}{3G_t (\rho_p c_p + \rho_t c_t)^2} - \pi D^2 \rho_t - 8m_p \right] \frac{(\rho_p c_p \rho_t c_t)^2}{24G_t (\rho_p c_p + \rho_t c_t)^2} \quad (6)$$

由表9可知,由文献[15]¹¹⁹⁻¹³¹中提出的金属管状靶板的弹道极限方程计算得到的不同厚度铝合金圆管的弹道极限速度与数值模拟所得到的相对误差均小于10%。由表6和表9中数据可以得出,文献[15]¹¹⁹⁻¹³¹中所提出的矩形截面空心金属管的剩余速度及弹道极限速度计算式对圆形截面的金属管有着较好的适用性。

3 结论

使用Ansys/Workbench软件,模拟了不同半径、壁厚的铝合金圆管在球形钢弹正冲击下的响应特性,并对圆管的变形及损伤进行了分析,主要结论如下:

1)球形钢弹侵彻铝合金圆管时,主要失效形式为局部剪切破坏和开裂损伤,且伴随花瓣状开裂。

2)圆管上侧管壁的抗侵彻能力高于下侧管壁,这是由于上凸结构抗压缩比下凹结构抗拉伸性能好。

3)圆管结构抗侵彻能力和上、下侧管壁弹道极限速度差值随圆管半径增加而减弱,当圆管半径较大时,上、下侧管壁弹道极限速度趋于稳定。

4)圆管结构抗侵彻能力和上、下侧管壁弹道极限速度差值随圆管壁厚的增加近似成线性增加。

参考文献 (References)

- [1] 吴妍. 2024 铝合金耐腐蚀性能与力学性能研究[D]. 银川:宁夏大学,2022:1-67.
WU Yan. Research on corrosion resistance and mechanical properties of 2024 aluminum alloy [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022:1-67. (In Chinese)
- [2] 王帅,刘伟东,冯荣欣,等. 钢管列缩比模型抗穿甲能力研究[J]. 兵工学报,2010,31(4):477-481.
WANG Shuai, LIU Weidong, FENG Rongxin, et al. Research on protective capability against armor piercing round of a reduced-scale steel tube model [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(4): 477-481. (In Chinese)
- [3] 田镇华,石少卿,崔廉明,等. 钢管在冲击荷载作用下的变形与失效破坏[J]. 后勤工程学院学报,2014,30(4):12-18.
TIAN Zhenhua, SHI Shaoqing, CUI Lianming, et al. Deformation and failure of the steel pipe under impact load [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(4): 12-18. (In Chinese)
- [4] 李金柱,齐凯丽,袁婷,等. 冲击载荷下金属薄壁圆柱壳动态响应特性研究[J]. 北京理工大学学报,2020,40(4):362-368.
LI Jinzhu, QI Kaili, YUAN Ting, et al. Dynamic response of thin-walled cylindrical shells suffering impact loading [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(4): 362-368. (In Chinese)
- [5] 杨喆,魏延鹏,邹金龙,等. 薄壁圆筒冲击屈曲吸能行为的实验与数值模拟研究[J]. 兵工学报,2014,35(增刊2):244-250.
YANG Zhe, WEI Yanpeng, ZOU Jinlong, et al. Experimental and numerical research on the energy absorption behavior of thin-walled tube under impact load [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35 (Suppl. 2): 244-250. (In Chinese)
- [6] 戴向胜,马建敏. 冲击载荷作用下金属圆柱壳能量吸收研究[J]. 振动与冲击,2012,31(6):100-103.
DAI Xiangsheng, MA Jianming. Energy absorbed by a metal tube under axial crush load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(6): 100-103. (In Chinese)
- [7] 程国强,雷建平,张善元. 经受侧向撞击圆管的大变形分析[J]. 固体力学学报,2000,21(1):57-60.
CHENG Guoqiang, LEI Jianping, ZHANG Shanyuan. Large deformation analysis of circular tubes under lateral impact [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2000, 21(1): 57-60. (In Chinese)
- [8] 方子帆,李辉,马振豪. 固支圆管受低速横向冲击变形响应研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2013,35(5):93-97.
FANG Zifan, LI Hui, MA Zhenhao. Research on clamped circular tube deformation response at low speed transverse impact [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2013, 35(5): 93-97. (In Chinese)
- [9] 武勇忠,路国运,雷建平,等. 压力管道受平头弹体侧向冲击破坏

- 的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(1): 6-9.
- WU Yongzhong, LU Guoyun, LEI Jianping, et al. Experimental research on failure of pressure pipelines impacted by blunt projectiles[J]. Science Technology and Engineer, 2003, 3(1): 6-9. (In Chinese)
- [10] 周丽军, 孙奇涵, 门长峰, 等. 自由圆管在横向冲击载荷下的动力学行为研究[J]. 天津工程师范学院学报, 2005, 15(3): 15-20.
- ZHOU Lijun, SUN Qihan, MEN Changfeng, et al. Research on dynamic behavior of free-free tubes impacted laterally[J]. Journal of Tianjin University of Technology and Education, 2005, 15(3): 15-20. (In Chinese)
- [11] 秦庆华, 路国运, 雷建平, 等. 薄壁圆管侧向冲击动力响应的仿真分析[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 513-516.
- QIN Qinghua, LU Guoyun, LEI Jianping, et al. Computer simulation on response of circular tubes under lateral impact[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(5): 513-516. (In Chinese)
- [12] 穆建春, 张铁光. 薄壁金属圆管在钝圆锥头弹体正冲击及斜冲击下破裂的实验研究[J]. 固体力学学报, 2000, 21(1): 49-56.
- MU Jianchun, ZHANG Tieguang. Rupture of thin metal tubes by normal and oblique impact of blunt conical-nosed missiles: experiments[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2000, 21(1): 49-56. (In Chinese)
- [13] 纪冲, 龙源, 方向, 等. 钢质圆柱壳在侧向局部冲击荷载下的变形及失效破坏[J]. 振动与冲击, 2013, 32(15): 121-125.
- JI Chong, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Dynamic response and perforation failure of cylindrical shell subjected to lateral local impulsive loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(15): 121-125. (In Chinese)
- [14] 王猛, 张立俊, 唐恩凌. 薄壁管壳高速正撞击穿孔特性的数值研究[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3876-3884.
- WANG Meng, ZHANG Lijiao, TANG Enling. Numerical investigation on characteristics of perforation for thin cylinder pipes by normal impact at high velocity [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(12): 3876-3884. (In Chinese)
- [15] NIKNEJAD A, ZAREEI A. Ballistic limit velocity of empty rectangular metal columns under a blunt projectile penetration[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2016, 13(1): 119-131.
- [16] GARA N, RAMACHANDRAN V, RENGASWAMY J. Analytical and FEM analyses of high-speed impact behaviour of Al₂₀₂₄ alloy [J]. Aerospace, 2021, 8(10): 281.
- [17] CHENG J C, ZHAO S P, FAN D, et al. Multiple ballistic impacts on 2024-T4 aluminum alloy by spheres: experiments and modelling [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 94: 164-174.
- [18] CHENG J C, ZHANG S, LIU Q, et al. Ballistic impact experiments and modeling on impact cratering, deformation and damage of 2024-T4 aluminum alloy [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 224: 107312.
- [19] RODRIGUEZ-MILLAN M, GARCIA-GONZALEZ D, RUSINEK A, et al. Perforation mechanics of 2024 aluminium protective plates subjected to impact by different nose shapes of projectiles[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123: 1-10.
- [20] 张宇, 王彬文, 刘小川, 等. 2024-T42 铝板抗球形钢弹侵彻特性研究[J]. 强度与环境, 2019, 46(3): 27-33.
- ZHANG Yu, WANG Binwen, LIU Xiaochuan, et al. The ballistic performance of 2024-T42 aluminum plate subjected to impact by spherical projectile [J]. Structure & Environment Engineering, 2019, 46(3): 27-33. (In Chinese)

Research on the penetration resistance characteristic of 2024-T42 aluminum alloy tube to spherical steel projectile

WANG Ligang¹ WANG Rihan² XIAO Siwei² TIAN Lu³ DONG Qin¹

(1. Guanghai College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghai 618307, China)

(2. Aeronautical Engineering College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghai 618307, China)

(3. Aircraft Repair & Overhaul Plant, Civil Aviation Flight University of China, Guanghai 618307, China)

Abstract: To explore the penetration resistance of aluminum alloy tubes under spherical steel projectile impact, focusing on the effects of varying tube radii and wall thicknesses on ballistic limit velocity, providing a foundation for tube protection design. A finite element model of spherical steel projectile penetration into 2024-T42 aluminum alloy targets was established using Ansys/Workbench software and the Johnson-Cook material model, which was then verified. Simulations of the response characteristics of aluminum alloy tubes with different radii and wall thicknesses under normal impact of spherical steel projectiles were conducted, along with an analysis of tube deformation and damage. The study found that the penetration resistance of the upper and lower walls of aluminum alloy tubes differs, with the upper convex structure outperforming the lower concave structure. A smaller tube radius enhances the penetration resistance of the upper wall, while for tubes of the same radius, increasing the wall thickness leads to a roughly linear increase in the ballistic limit velocity of both upper and lower walls.

Key words: Aluminum alloy circular tubes; Spherical steel projectile; Penetration performance; Ballistic limit velocity; Numerical simulation

Corresponding author: Tian Lu, E-mail: 984149946@qq.com

Fund: Fundamental Research Funds for the Central University (ZJ2023-009, J2023-003)

Received: 2023-10-05 Revised: 2023-12-28