高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 31 卷 第 4 期
2017 年 8 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 31, No. 4
Aug., 2017

文章编号：1000-5773(2017)04-0469-09

焊接薄壁弹体侵彻多层钢筋混凝土靶实验研究*

戴湘晖，段 建，周 刚，初 哲，王可慧，古仁红，
李虎伟，杨 慧，李鹏杰，刘恒泽

（西北核技术研究所强动载与效应实验室，陕西西安 710024）

摘要：为研究焊接薄壁侵彻弹体的技术可行性，进行了有限元数值仿真，并参考数值仿真结果设计了一组对比实验，利用 100 mm 口径滑膛炮作为发射平台，开展了焊接薄壁弹体侵彻多层钢筋混凝土靶实验。通过实验对比分析了 4 种不同焊接薄壁弹体的结构响应和靶板破坏情况，优选出了较佳的头部焊接工艺和位置，并对尾部连接方式的强度进行了考核。研究结果可为焊接薄壁弹体的结构设计提供参考。

关键词：焊接侵彻弹；多层钢筋混凝土靶；结构响应

中图分类号：O385 **文献标志码**：A

doi：10.11858/gywlxb.2017.04.016

1 引 言

焊接也称作熔接、镕接，是一种以加热、高温或高压的方式接合金属或其他热塑性材料的制造工艺及技术。在航空、航天、核能等尖端科技领域中，焊接技术始终有极其重要的地位。薄壁弹体一般采用实心棒料车削加工而成，材料浪费严重，加工余量大，加工周期长，成本也较高。对于侵彻能力要求不是很高的弹体，将弹体分段，各段均采用比较经济的方法加工，最后通过焊接将各段连接起来的方法，可以显著降低弹体的加工成本，提高经济效益。在国内外公开发表的文献中，采用该思路进行弹体加工的文献很少，对焊接弹体侵彻混凝土结构的相关研究尚未见诸报道。陈小伟等[1]将弹体分成头部、中部和后部，采用焊接将 3 截断体连接成一个整体，并开展了弹体侵彻钢板实验，对弹体的破坏模式进行了细致的分析，但未详细介绍弹体的焊接方式及工艺；樊兆宝等[2]对真空电子束焊接技术原理及工艺进行了深入研究，并对真空电子束焊接技术在空空导弹弹体加工中的应用进行了详细介绍，但空空导弹基本不承受冲击载荷，对焊接性能的要求不是很高。因此，开展焊接薄壁弹体侵彻多层混凝土实验，并研究焊接工艺和焊接位置对弹体结构强度的影响具有十分重要的意义。

虽然焊接弹体可以大大减少原材料及车削加工费用，缩短弹体的加工周期，但是弹体结构强度也会有所降低，不同焊接工艺和焊接位置对弹体结构性能的影响也不尽相同。本工作采用 LS-DYNA 对弹体侵彻过程开展数值仿真研究，并参考数值仿真结果设计一组对比实验，开展焊接薄壁弹体侵彻 5 层 C45 钢筋混凝土靶实验，分析不同焊接工艺和焊接位置对弹体结构强度的影响，以期为弹体的结构设计提供技术支撑，并验证焊接弹体的技术可行性。

2 焊接弹体设计

焊接弹体由弹头、弹身、弹尾和内部填充物组成，外形为中间大、两头小的腰鼓状结构，具体结构及

* **收稿日期**：2017-01-11；**修回日期**：2017-02-18

作者简介：戴湘晖(1986—)，男，博士研究生，主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail：daixianghui@nint.ac.cn

© 2017 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics

相应尺寸参数如图 1 所示。弹头、弹身和弹尾材料均为 35CrMnSiA，内部填充物为石蜡和细砂混合物。头部焊接位置 A、B 与弹尖距离分别为 175.8、199.3 mm。焊接处径向厚度分别为 5.2 和 4.6 mm，截面积分别为 1 459.7 和 1 340.4 mm^2。从原材料和加工成本考虑，焊接位置 B 是最理想的，此时弹身段的前端和后端内径相同，弹身段采用加工的无缝钢管内径最大，原材料和加工费用均较少；而 A 处壁厚更厚、截面积更大，焊接性能可能更好。

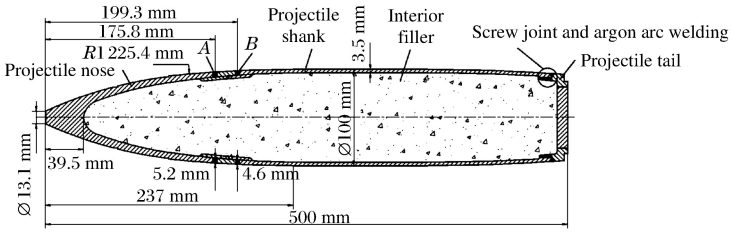

图 1 弹体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of experimental projectile

在众多先进的焊接方法中，真空电子束焊具有能量密度高、穿透能力强、焊缝质量好、热影响狭窄、焊接变形小的优势，且在焊接过程中，不产生任何污染，可以焊接一般方法难以焊接的部位等，其缺点是价格相对较高。二氧化碳气体保护焊（简称 CO_2 焊）是以二氧化碳作为保护气体进行焊接的方法，该方法操作简单，适合自动焊和全方位焊接，并且具有焊接成本低、生产效率高、操作简便、焊缝抗裂性能高、焊后变形小等优点，缺点是强度较低。氩弧焊是使用惰性气体氩气作为保护气体的一种气电保护焊的焊接方法，具有焊缝质量好、焊接变形应力小、焊接范围广等优点。3 种焊接工艺各有其优缺点和适用条件，可用于薄壁弹体上不同部位的焊接[2-3]。焊接位置 A 和 B 分别采用电子束焊和 CO_2 焊两种方式进行焊接；弹身与弹尾之间采用螺纹＋氩弧焊的连接方式或采用封头无缝钢管整体加工而成。

共设计了 4 种类型的焊接弹体，弹体长度为 500 mm，直径为 100 mm，圆柱段壁厚为 3.5 mm，弹体质量 m 及连接情况见表 1，其中弹体Ⅰ和弹体Ⅲ在 A 位置焊接，弹体Ⅱ和弹体Ⅳ在 B 位置焊接。

为了分析弹体母材、电子束焊缝和 CO_2 焊缝力学性能，采用电子束焊和 CO_2 焊进行了平板焊接，并在母材和焊缝处取样随弹体进行热处理，随炉试件热处理检测结果见表 2，其中 $R_{p0.2}$ 和 R_m 分别为屈服强度和拉伸强度，Z 和 A_s 分别为延伸率和断面收缩率，A_{ku2} 为冲击功。由表 2 可知：电子束焊缝的力学性能达到母材的 90％左右；CO_2 焊缝的拉伸强度不到母材及电子束焊缝的一半，但延伸率、断面收缩率及冲击功较电子束焊缝略高。

表 1 实验弹体参数

Table 1 Parameters of experimental projectiles

Projectile type	m/(kg)	Nose connection type	Tail connection type
Projectile Ⅰ	11.33	Electron beam welding	Screw joint and argon arc welding
Projectile Ⅱ	10.80	Electron beam welding	Screw joint and argon arc welding
Projectile Ⅲ	10.38	Carbon dioxide arc welding	Entire machine
Projectile Ⅳ	10.56	Carbon dioxide arc welding	Entire machine

表 2 随炉试件力学性能检测结果

Table 2 Properties of heat treated specimens

Type	$R_{p0.2}$/(MPa)	R_m/(MPa)	Z/(％)	A_s/(％)	A_{ku2}/(J)
35CrMnSiA	1 563	1 917	11.4	42.5	48.3
Electron beam welding line	1 534	1 885	10.4	44.3	35.0
Carbon dioxide arc welding line		825	12	47	42.3

3　仿真分析

采用 LS-DYNA 软件开展薄壁弹体侵彻多层混凝土靶的数值仿真,以更加直观地认识整个侵彻过程,同时为实验设计提供技术支持。

3.1　有限元模型

弹体和靶板尺寸与实验完全一致,由于无法准确给出焊接部位的材料性能参数,弹体采用非焊接结构弹体,如图 2 所示。为提高数值计算效率,采用 1/2 计算模型,弹体和混凝土都采用 8 节点六面体实体单元(SOLID164),用单点积分 Lagrange 算法。对靶板局部进行较密的网格划分,避免由于大量单元失效而对计算结果产生较大误差,提高计算精度和效率。定义弹体与靶板之间的接触为面与面侵蚀接触,在弹体和靶板的对称面处施加对称边界条件,并在靶板边界处施加非反射边界条件。

(a) Overall view　　(b) Partial enlarged view

图 2　有限元模型

Fig. 2　Finite element model

3.2　材料模型

混凝土采用 Johnson-Holmquist-Concrete(JHC)材料模型[4],参数取值见表 3,其中 ρ 为密度,f_c 为静态抗压强度,A_c 为内聚力强度,B_p 为压力强化系数,C 为应变率敏感系数,S_{fmax} 为混凝土所能达到的最大强度,G 为剪切模量,D_1 和 D_2 为损伤参数,N 为压力硬化系数,ε_{fmin} 为混凝土的最小塑性应变,T 为混凝土的最大拉伸强度,p_{crush}、μ_{crush} 为弹性阶段的压力阈值及相应的体积应变,μ_{lock}、p_{lock} 为混凝土完全压实时的体积应变及相应的压力,K_1、K_2、K_3 为常数,$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

混凝土的抗压强度很高,抗拉强度只有抗压强度的 1/10 左右,在实际工程运用中主要承受压缩载荷。JHC 材料模型是混凝土压缩损伤本构方程,只考虑材料的压缩破坏,则混凝土单元会产生畸变且不失效,与实际现象严重不符。由于缺少拉伸失效准则,混凝土靶没有产生由于微裂纹扩展贯通形成的成坑、崩落现象。采用压缩失效应变和抗拉强度联合判断混凝土材料是否失效,能够很好地模拟混凝土材料的破坏情况。通过添加 MAT_ADD_EROSION 材料模型,设定其中的抗拉强度的大小,当单元拉应力应变超过设定值后,单元失效。

表 3　混凝土材料参数

Table 3　Parameters of JHC model for reinforced concrete

ρ/(g/cm^3)	f_c/(GPa)	A_c	B_p	C	S_{fmax}	G/(GPa)	D_1	D_2	N
2.4	0.045	0.79	1.60	0.007	7.0	14.86	0.04	1.0	0.61
ε_{fmin}	T	p_{crush}/(GPa)	μ_{crush}	p_{lock}/(GPa)	μ_{lock}	K_1/(GPa)	K_2/(GPa)	K_3/(GPa)	$\dot{\varepsilon}_0$/(s^{-1})
0.01	0.004	0.016	0.001	0.8	0.001	0.085	−0.171	0.208	0.001

弹体材料为高强钢 35CrMnSiA,采用 Johnson-Cook 材料模型,该模型在弹体侵彻、金属爆炸成形和冲击应用广泛。利用 CSS44100 电子万能试验机和 Hopkinson 压杆系统,对 35CrMnSiA 材料在不同应变率、不同温度下的力学性能进行了实验研究。取参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0=0.001\ s^{-1}$、参考温度 $T_r=298\ K$,拟合得到了材料的 Johnson-Cook 本构模型参数,如表 4 所示[5],其中 E 为弹性模量,ν 为泊松比,A_1 为参考应变率下的屈服应力,B_1 为硬化系数,n 为硬化指数,C_1 为应变率敏感系数,m 为温度敏感系数,T_m 为熔点。

表 4 35CrMnSiNiA 材料本构模型参数

Table 4 Parameters of steel 35CrMnSiA for Johnson-Cook constitutive model

ρ/(g/cm^3)	E/(GPa)	ν	A_1/(MPa)	B_1/(MPa)	C_1	n	m	T_m/(K)
7.85	210	0.29	1 280	346	0.015	0.372	1.027	1 775

3.3 仿真结果及分析

通过数值仿真可得弹体以 410 m/s 速度正侵彻 5 层钢筋混凝土靶的过程和速度曲线，分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知：弹体成功穿透了 5 层 C45 钢筋混凝土靶，弹体结构完整且变形较小；弹体姿态未发生明显偏转。说明对于这种非焊接弹体，弹体结构强度是完全满足侵彻要求的。

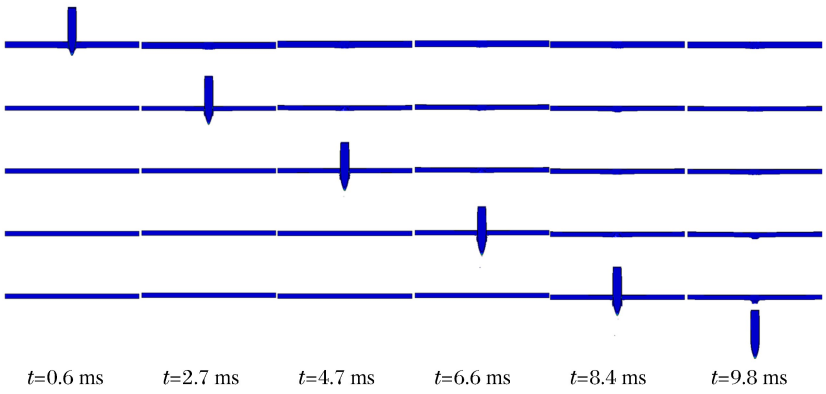

图 3 弹体侵彻多层钢筋混凝土靶的过程

Fig. 3 Process of projectile perforation on the multi-layered reinforced concrete target

从图 4 中可以看出，弹体速度随着时间的增大而不断减小，存在 5 个明显的减速阶段(即 5 段斜向下的曲线)，对应于弹体侵彻各块靶板的过程，在约 9.6 ms 时刻，弹体速度降到最低，约为 350 m/s。说明弹体在 9.6 ms 时穿透了最后一块混凝土靶，剩余速度约为 350 m/s。

通过对数值仿真结果分析可知，非焊接弹体具有足够的结构强度来穿透 5 层 C45 钢筋混凝土靶，且剩余速度较大，因此，在实验设计时需要采取较厚的沙堆对弹体进行软回收。

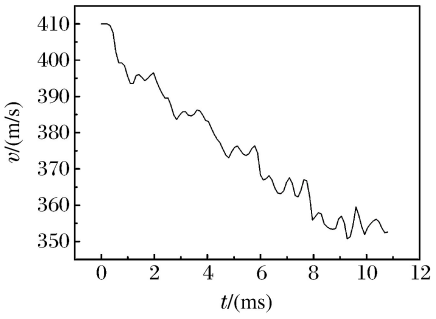

图 4 侵彻过程速度和时间的关系

Fig. 4 Projectile velocity vs. time in the process of perforation

4 实验设计

4.1 发射方案设计

实验采用∅100 mm 滑膛炮满口径发射，整个实验系统包括发射装置、回收装置及测试装置，实验现场布局如图 5 所示。实验弹由∅100 mm 滑膛炮发射后，通过铜丝网靶并撞击 5 层钢筋混凝土靶板，最后由回收仓沙堆对其进行减速并实现软回收。通过铜丝网靶测量撞靶速度，采用高速相机记录弹体飞行及撞靶过程。实验要求弹体撞靶速度范围为 400～420 m/s，通过调节火药装药量来控制撞靶速度。炮口与第一层靶板距离约 10 m，能够保证弹体的有效姿态。

发射弹体由实验弹、适配器和闭气环组成。适配器套在实验弹尾部，对炮管中的实验弹起定心引导作用，其外径与炮管内径一致，以保证实验弹在炮管中保持较正的姿态，材料为超硬铝。闭气环安装在适配器后端，可以起到密闭火药燃气和助推作用，传递高压气体压力，使实验弹获得一定的初速，材料为尼龙 1010 树脂。

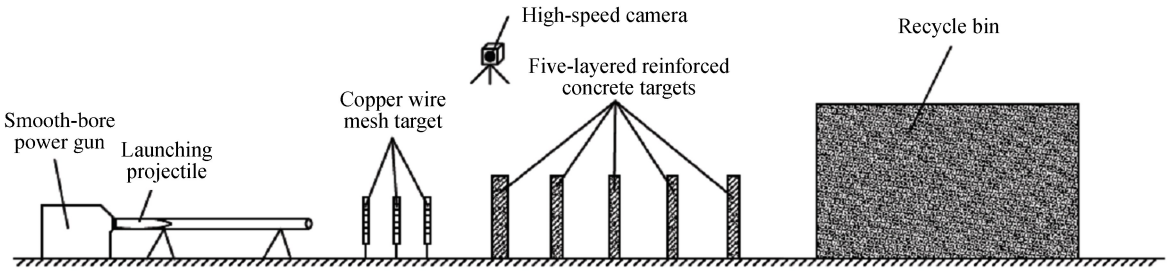

图 5　实验现场布局

Fig. 5　Layout of projectile perforation test

4.2　实验靶板设计

实验目标靶为 5 层钢筋混凝土方形靶板,如图 6 所示。靶板沿着弹体发射方向厚度依次为 70、50、50、50、50 mm,靶板间距均为 0.65 m,采用与地面固接的工字钢靶架进行安装与固定,靶面与炮管轴线垂直。图 7 中,靶面尺寸为 1.5 m×1.5 m,布置两层钢筋网,其中 70 mm 厚靶板钢筋网格为 65 mm×65 mm,钢筋直径为 3 mm;50 mm 厚靶板钢筋网格为 85 mm×85 mm,钢筋直径为 4 mm。靶板抗压强度为 45 MPa,体积配筋率为 0.6%。

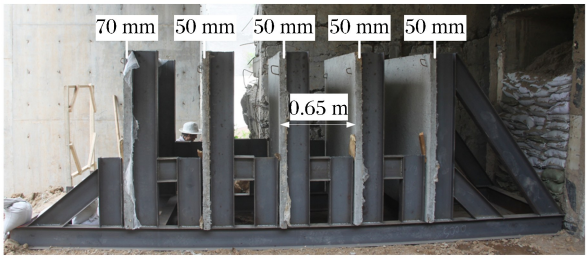

图 6　钢筋混凝土靶板

Fig. 6　Layout of reinforced concrete targets

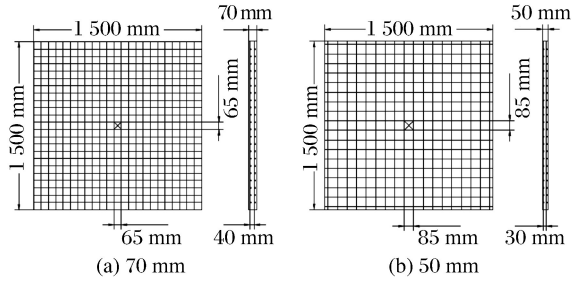

图 7　钢筋混凝土靶板配筋示意图

Fig. 7　Schematic diagrams of reinforced concrete targets

5　实验结果及分析

通过铜丝网靶测速系统得到实验弹的撞靶速度,并使用高速相机拍摄其侵彻过程,如图 8 所示。可以看出:弹体撞靶前姿态较正,但由于靶板周围采取了安全防护措施,光线较暗,侵彻过程拍摄效果不理想。共进行 6 发实验,其中 4 发得到了有效数据,撞靶速度为 400～420 m/s,实验结果见表 5。

图 8　实验侵彻过程

Fig. 8　Photographs of flying projectile by high-speed camera

表 5　实验弹侵彻实验结果

Table 5　Experimental results of projectiles penetrating reinforced targets

Projectile type	v/(m/s)	Penetration results	Recovered projectiles
Projectile Ⅰ	403.5	Perforation of 5-layered targets	Integrity
Projectile Ⅱ	409.8	Perforation of 5-layered targets	Fracture in welding line of nose and tail
Projectile Ⅲ	406.5	Perforation of 5-layered targets	Fracture in welding line of nose
Projectile Ⅳ	418.5	Perforation of 5-layered targets	Fracture in welding line of nose

5.1 弹体结构强度分析

焊接薄壁弹体在垂直侵彻单层高强度钢筋混凝土靶时，在入射波的作用下主要发生压缩变形(以前端为主)。另外，由于应力波的自由面反射，弹体后端将产生反射卸载波(拉伸波)，弹体侵彻过程受反射卸载波和入射波共同作用。侵彻多层高强度钢筋混凝土靶时，弹体结构更容易发生破坏，这是由于在入射波和反射卸载波的反复叠加作用下，弹体结构的薄弱部位会逐渐放大，出现裂纹甚至破坏[6-13]。

图 9(a)为回收所得Ⅰ型实验弹的照片。可以看出：Ⅰ型实验弹整体结构完好，未发生明显塑性变形。卵形头部因与靶板的强动摩擦出现与侵彻方向一致的粗糙擦痕，圆柱段及尾部擦痕不明显，说明在侵彻过程中主要由卵形头部进行开孔并形成弹洞，圆柱段与尾部沿着弹洞依次通过靶板，与靶板接触较少，并且穿靶过程中弹体姿态较正。

图 9(c)和图 9(d)为回收所得Ⅲ型和Ⅳ型实验弹的照片。可以看出：两种回收弹体断裂情况基本一致，弹体从焊接位置处断裂成两段，弹头结构基本保持完整，弹身前端出现不对称褶皱墩粗甚至撕裂的情况。这是因为在穿靶过程中，由于焊接性能不好导致弹头与弹身断裂并分离，弹头依靠卵形结构继续开孔并形成弹洞，弹身姿态可能发生了偏转，甚至有可能与弹头在侵彻方向上发生了一定的错位，在继续穿透剩余的靶板过程中，部分能够沿着弹洞通过，部分与靶板进行了撞击，并完成了对弹洞的进一步扩孔，在此过程中由于承受不对称的过载导致了不对称的结构破坏。

图 9(b)为回收所得Ⅱ型实验弹的照片。可以看出：Ⅱ型实验弹头部断裂情况与Ⅲ、Ⅳ型弹体类似，也是由于焊接性能不好导致；不同在于其尾部焊接处也发生了断裂，弹身后端被压扁。这是因为弹身姿态可能发生了偏转，在穿透剩余的靶板过程中，由于受到较大横向载荷的挤压，尾部连接强度不足以承担弹身的塑性变形，焊缝处断裂，尾盖脱落，装填物外溢，弹身后端塑性变形进一步加剧，出现严重压扁现象。

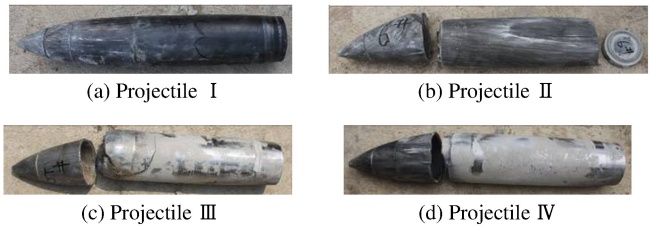

图 9 回收实验弹结构

Fig. 9 Photographs of recovered projectile

通过对以上 4 种类型回收实验弹的分析可知，在约 410 m/s 的着靶速度下，实验弹侵彻 5 层 C45 钢筋混凝土靶板后，仅Ⅰ型实验弹结构完好，其余实验弹结构均发生破坏。通过Ⅰ型和Ⅱ型实验弹对比可以得出，A 位置优于 B 位置，可能是因为 A 位置截面积较 B 位置更大，焊接性能更好；通过Ⅰ型和Ⅲ型弹体对比可以得出，电子束焊性能较 CO_2 焊更好；通过对比Ⅱ型和Ⅲ、Ⅳ型弹体可以得出，尾部采用螺纹＋氩弧焊的连接方式，可靠性不高，需要对该连接方式进行优化。

5.2 靶板宏观破坏情况分析

图 10 为实验后钢筋混凝土靶的破坏情况。可以看出：靶板的前表面形成明显的漏斗坑，弹坑周围未产生大面积的混凝土脱落，靶面无辐射状扩展裂纹，前 4 层靶板弹洞均较圆，弹洞基本位于靶板中心，弹道较正。表 6 给出了靶前漏斗坑的尺寸，其中 d_h 和 d_v 分别为弹洞水平方向和竖直方向尺寸，D_h 和 D_v 为剥落区水平方向和竖直方向尺寸，靶板依次编号为 T1、T2、T3、T4、T5。Ⅰ型实验弹第 5 层靶板弹洞偏椭圆，水平方向尺寸为 140 mm，竖直方向尺寸为 190 mm，说明在侵彻第 5 层靶板过程中弹体姿态在竖直方向发生了偏转，这可能是因为弹体在穿靶过程中撞到了钢筋而导致了轻微的姿态改变；Ⅱ型实验弹第 5 层靶板弹洞呈明显的椭圆状，水平方向尺寸为 150 mm，竖直方向尺寸为 340 mm，弹洞较大且由两个弹洞叠加而成，可以推测出弹体在侵彻第 5 层靶板过程中可能发生了解体；Ⅲ、Ⅳ型实验弹第 5 层靶板破坏现象和Ⅱ型弹体基本类似，不同之处在于弹洞相对要小，说明Ⅲ、Ⅳ型实验弹的断裂情况较Ⅱ型实验弹要好。此外，靶板上椭圆的方向不同，这主要与弹体和靶板钢筋的接触位置有关。实际实验过程中，要保证每发实验弹体的发射状态完全相同是不可能的，因此弹体与靶板钢筋的接触位置不固定，弹体的偏转方向具有一定的随机性。

(a) Target of projectile Ⅰ

(b) Target of projectile Ⅱ

(c) Target of projectile Ⅲ

(d) Target of projectile Ⅳ

图 10　钢筋混凝土靶破坏情况

Fig. 10　Damage of reinforced concrete targets

表 6　靶前漏斗坑尺寸

Table 6　Sizes of craters on the front surface of the reinforced cncrete targets

Proectile type	d_h/(mm)					d_v/(mm)				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Projectile Ⅰ	110	110	110	120	140	110	140	150	205	190
Projectile Ⅱ	130	140	175	125	150	150	170	190	220	340
Projectile Ⅲ	110	110	130	140	220	110	110	130	145	150
Projectile Ⅳ	120	130	165	170	130	130	150	165	200	255
Proectile type	D_h/(mm)					D_v/(mm)				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Projectile Ⅰ	240	190	180	150	190	190	170	190	260	230
Projectile Ⅱ	225	180	190	190	240	235	230	260	300	420
Projectile Ⅲ	230	170	210	180	260	260	190	180	170	240
Projectile Ⅳ	195	200	250	240	195	215	225	240	240	310

对表 6 中数据进行分析发现,随着靶板层数的增加,漏斗坑尺寸(内孔和外孔)总体上也呈增大的趋势;然而,在侵靶过程中,弹体速度是逐渐降低的,若仅考虑弹体速度的影响,漏斗坑外孔尺寸应该呈减小趋势。通过进一步分析可知,该现象产生的原因如下:弹体姿态在侵彻过程中是有偏转的,而且随着靶板层数增加,弹体姿态偏转越来越厉害。

通过靶板破坏情况的分析可知，Ⅰ型实验弹能够贯穿 5 层靶板，但在穿透第 5 层靶板后弹体姿态发生了变化；其余弹体虽然都穿透了 5 层靶板，但在侵彻第 5 层靶过程中弹体均发生了解体，因此可以推测实验弹最大穿透能力应该只有 4 层。

6 结 论

在仿真分析的基础上，对不同连接方式的实验弹侵彻 5 层 C45 钢筋混凝土靶板进行了实验研究，着重分析了不同焊接方式和焊接位置对弹体结构性能的影响。结果表明：电子束焊连接性能较 CO_2 焊更佳，效果更好；在弹体 A 位置进行焊接时，焊接截面积更大，整个弹体的结构性能更好。因此，在进行弹体设计时，优选电子束焊；当在 B 位置进行焊接时，弹体结构强度不能满足要求；综合考虑经济性和焊接性能，焊缝应该选择在 A 位置；另外，弹尾处采取螺纹＋氩弧焊的连接方式可靠性不高，应再进行优化设计适当加强。

References:

[1] 陈小伟，张方举，徐艾民，等. 细长薄壁弹体的屈曲和靶体等效分析 [J]. 爆炸与冲击，2007，27(4)：296-305.
CHEN X W，ZHANG F J，XU A M，et al. Buckling analysis of earth penetrating warhead and equivalent conditions of targets [J]. Explosion and Shock Waves，2007，27(4)：296-305.

[2] 樊兆宝，安绍孔，王英健，等. 真空电子束焊接技术及其在空空导弹弹体加工中的应用 [J]. 航空制造技术，2010(16)：53-56.
FAN Z B，AN S K，WANG Y J，et al. Technology of vacuum electron beam welding and its application in manufacturing of air-to-air missile's body [J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2010(16)：53-56.

[3] 赵 勇，王 伟. 30CrMnSiNi2A 钢环形密闭零件的电子束焊工艺研究 [J]. 新技术新工艺，2015(11)：6-8.
ZHAO Y，WANG W. Research on the welding of 30CrMnSiNi2A steel ring-shaped parts [J]. New Technology & New Process，2015(11)：6-8.

[4] HOLMQUIST T J，JOHNSON G R，COOK W H. A computational constitutive model for concrete subject to lame stains，high strain rate and high pressures [C]//Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics，1993：591-600.

[5] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual [M]. California：Livermore Software Technology Corporation，2003.

[6] 戴湘晖，李 明，赵 南，等. 弹丸斜侵彻钢筋混凝土极限壁厚实验研究 [J]. 北京理工大学学报，2015，35(增刊 2)：22-25.
DAI X H，LI M，ZHAO N，et al. Experimental study on the limit wall thickness of projectiles oblique impacting reinforced concrete target [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology，2015，35(Suppl 2)：22-25.

[7] 陈小伟. 动能深侵彻弹的力学设计(Ⅰ)：侵彻/穿甲理论和弹体壁厚分析 [J]. 爆炸与冲击，2005，25(6)：499-505.
CHEN X W. Mechanics of structural design of EPW(Ⅰ)：the penetration/perforation theory and the analysis on the cartridge of projectile [J]. Explosion and Shock Waves，2005，25(6)：499-505.

[8] 段 建，周 刚，田春雨，等. 半穿甲弹设计及穿甲实验研究 [J]. 实验力学，2011，26(4)：383-390.
DUAN J，ZHOU G，TIAN C Y，et al. Design and penetration performance of a semi-armor-piercing penetrator [J]. Journal of Experimental Mechanics，2011，26(4)：383-390.

[9] ZHAO J，CHEN X W，JIN F N，et al. Depth of penetration of high-speed penetrator with including the effect of mass abrasion [J]. Int J Impact Eng，2010，37(9)：971-979.

[10] FREW D J，FORRESTAL M J，CARGILE J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth [J]. Int J Impact Eng，2006，32(10)：1584-1594.

[11] 古仁红，钟方平，李 明. 薄壁弹体斜侵彻混凝土的结构响应研究 [J]. 兵工学报，2012，33(1)：313-317.
GU R H，ZHONG F P，LI M. Research on structure response of thin-wall projectile oblique penetration into concrete [J]. Acta Armamentarii，2012，33(1)：313-317.

[12] BEN-DOR G，DUBINSKY A，ELPERIN T. Estimation of perforation thickness for concrete shield against high-

speed impact [J]. Nucl Eng Des,2010,240(5):1022-1027.

[13] 段　建,杨黔龙,周　刚,等. 串联随进战斗部侵彻混凝土靶实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2007,27(4):364-369.
DUAN J,YANG Q L,ZHOU G,et al. Experimental studies of a tandem follow-through warhead penetrating concrete target [J]. Explosion and Shock Waves,2007,27(4):364-369.

Welding Thin-Walled Projectiles for Penetrating Multi-Layered Reinforced Concrete Targets

DAI Xiang-Hui,DUAN Jian,ZHOU Gang,CHU Zhe,WANG Ke-Hui,
GU Ren-Hong,LI Hu-Wei,YANG Hui,LI Peng-Jie,LIU Heng-Ze

(*Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect,Northwest Institute of Nuclear Technology,Xi'an* 710024,*China*)

Abstract: To appraise the technical feasibility of welding thin-walled projectile for penetrating multi-layered reinforced concrete targets,we used the finite element method to simulate the penetration process and designed a set of comparative tests based on the simulation results. The welded thin-walled projectiles were launched from a 100-mm-diameter,smooth-bore powder gun,impacting the multi-layered reinforced concrete targets. A comparative analysis of the structural response characteristics for four projectiles and the damaging effects on the targets were conducted,the optimal techniques and location on the projectile head for the welding were determined,and the joint strength of the projectile tail was measured. These results can serve as reference for the structural design of welded thin-walled projectiles.

Key words: welding projectile; multi-layered reinforced concrete targets; structural response