

文章编号:1006-9941(2005)01-0017-05

双聚焦式破片战斗部不同起爆方式的数值模拟研究

魏继锋, 焦清介, 宁建国

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对某结构双聚焦战斗部的爆轰驱动特性进行了仿真研究。利用 DYN3D 有限元程序, 模拟计算了单点、两点和三点起爆方式下的爆轰波传播过程、壳体驱动及破片的飞散特性参数。模拟结果表明, 两点起爆方案得到的两个战斗部聚焦带(-17°、-14°)和(14°、17°)内集中的破片数目最多, 占总破片数的 43.09%, 双聚焦效果最优。

关键词: 爆炸力学; 双聚焦战斗部; 破片; 飞散特性; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3+3

文献标识码: A

1 引言

聚焦型破片战斗部利用爆轰波与壳体曲面间的相互作用, 使爆轰波推动破片向曲面的聚焦带汇集, 形成一条以弹轴为中心且处于平面状态的圆环形破片聚焦带, 随着破片的飞散其各向半径等距扩大。聚焦战斗部对目标的毁伤不同于一般战斗部的杀伤破片, 其破片在空间分布集中, 当目标进入聚焦带被毁伤时, 不是取决于单枚破片的打击, 而是群体效果的总和。产生多枚破片的迭加效应, 在制导误差范围内形成“切割”杀伤作用, 增大了战斗部的威力^[1-3]。

双聚焦战斗部是一种新型结构的聚焦战斗部, 它是在单聚焦的基础上发展起来的。由于单聚焦杀伤战斗部的破片流宽度很窄, 很难达到较高的引战配合效率, 采用双聚焦杀伤战斗部既满足破片大飞散角要求, 又能在小破片质量情况下不降低战斗部威力。国内外对该战斗部的研究均处于起步阶段, 马天宝等^[4]利用有限元程序对双束壳破片聚焦战斗部进行了模拟研究。

在该战斗部的设计中, 最主要的设计指标就是破片的飞散速度和飞散角。在战斗部外形、结构和材料确定的情况下, 起爆方式对破片的参数有比较大的影响。本工作的主要研究内容就是围绕起爆方式对破片参数的影响而展开分析, 为进一步开展该类战斗部的实验研究和工程设计提供了可参考的理论依据。

2 双聚焦战斗部结构

所研究的双聚焦战斗部结构如图 1 所示, 壳体形

体采用对称的双凹鼓形结构。该结构与正常的双聚焦战斗部不同之处在于: 正常结构的圆弧段是完整对称的, 这样两个聚焦带就是平行飞出的, 这就使得整个破片的中心飞散角很小, 影响了对目标的毁伤效果; 因而本结构中外形并不是两个完整的半圆弧段, 而是两端各被切去了一小段, 就是为了增大两个聚焦带的中心飞散角, 同时又不失产生两个较好的聚焦带, 达到聚焦与飞散的最佳综合效果。在该结构中, 壳体和端盖内装填炸药, 球形破片粘附在壳体上。战斗部外形尺寸为: 装药直径 160 mm, 长 200 mm, 壳体厚度为 2 mm, 顶盖和底盖的厚度均为 2 mm, 球形破片直径 5 mm。

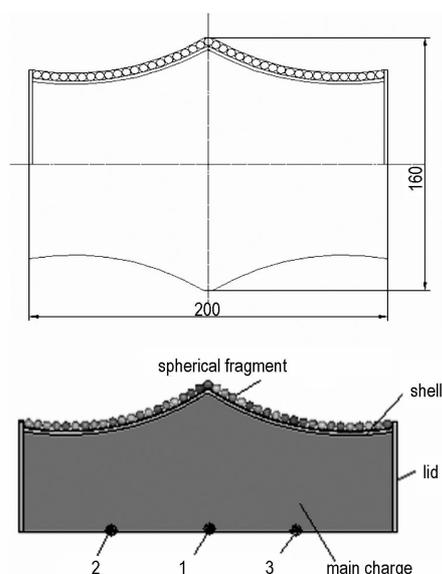


图 1 双聚焦战斗部结构图和有限元模型
(1, 2, 3—均为起爆点)

Fig. 1 Configuration and finite element model simulation of dual focusing fragment warhead

收稿日期:2004-06-15; 修回日期:2004-10-12

作者简介:魏继锋(1977-),男,博士研究生,从事火工系统仿真研究。
焦清介(1958-),男,博导,从事火工系统仿真、新起爆技术研究。

3 计算方法选取和模型建立

3.1 建模方法

本模拟中,由于整个战斗部球形破片接近 3000 颗,计算上费时又不必要。因此,在考虑了计算模型的大小和反应模型真实程度的基础上,对战斗部剖切了一个小角度(5°)进行建模,在该角度内排布了一层球形破片,共 41 枚;然后对模型两侧呈循环对称边界,这样就形成了完整的环状战斗部结构(见图 1)。

3.2 算法选择

有限元网格生成工具 TrueGrid 强大的前处理功能可以方便快捷的建立各种形状复杂的战斗部有限元模型,而 DYNA3D 则可有效求解战斗部整个爆炸驱动过程^[5,6]。国内外有关文献证实^[7]:在破片式杀伤战斗部的数值模拟中,对炸药、壳体、端盖和杀伤元素采用 Lagrange 算法可以比较准确模拟从战斗部起爆到壳体破裂的整个爆炸驱动过程。在本计算中,炸药、破片、前后端盖均被剖分成 Lagrange 网格,划分单元总数达到 34000 个。

3.3 材料模型和状态方程

计算中共涉及四种材料:炸药、壳体、端盖、球形破片。

炸药材料采用高能炸药燃烧材料模型和 JWL 状态方程描述。JWL 状态方程精确地描述了在爆炸驱动过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性。本实验采用的主装药为 Comp. B 炸药,密度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,爆速为 $7900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,CJ 压力为 29 GPa,采用的 JWL 状态方程参数见文献[8]。

壳体和端盖均为铝材料,采用 MAT_PLASTIC_KENEMATIC 模型;破片是用钨材料做成,采用 MAT_RIGID 材料模型,保证了破片在壳体驱动过程中不发生损毁。它们的材料参数如密度(ρ),杨氏模量(E),屈服极限(σ_y)和泊松比(ν)见表 1。

表 1 模型材料参数

Table 1 Parameters of material model

material	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	E/GPa	σ_y/GPa	ν
shell	2.7	70.3	0.276	0.33
lid	2.7	70.3	0.276	0.33
fragment	19.2	117		0.22

计算过程中,在单点积分时易产生零能模式,出现计算的数值振荡,故程序中加入了沙漏控制^[9]。

4 模拟结果与分析

4.1 爆轰波传播和破片飞散过程

控制战斗部的起爆方式,就可以控制主装药的爆轰波面形状,通过其与壳体的作用,进而影响到破片的飞散角。图 2 是中心单点(即起爆点 1 作用)、轴向两点(起爆点 2 和 3)和轴向三点(起爆点 1、2、3 同时作用)起爆方式下不同时刻爆轰波的传播及波形形状情况。其中起爆点 2 和起爆点 3 关于起爆点 1 对称,它们的距离不同,产生的爆轰波波形及杀伤参数也不同。

对于单点起爆,爆轰波从起爆点开始以球面波的形式传播。当 $t = 8.4 \mu\text{s}$ 时,爆轰波阵面和金属壳体相遇,界面入射波强度为 29.25 GPa。爆轰波最先与壳体接触处的法向角 α 为 22.56° 。

对两点起爆,爆轰波先各自以球面波传播,当 $t = 6.15 \mu\text{s}$ 时,两爆轰波相遇,发生碰撞,碰撞点的压力骤增为 47 GPa,随后出现了明显的马赫反射现象,球面马赫波不断增长,中央马赫波的平均速度为 $11\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高于初始爆速 $7\,900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,将很快追上侧翼波,驱动壳体中间部分向两侧弯曲变形,有利于形成双聚焦外形;当 $t = 6.9 \mu\text{s}$ 时,两爆轰波与壳体相遇,此时界面压力为 30 GPa,比前者稍高,是由于碰撞使得单束爆轰波非接触处压力都有所上升;最先接触点的法向角 α 为 47.01° ,比单点时大了许多。

三点起爆与两点有些类似,也是爆轰波先相互作用后再与壳体发生作用。当 $t = 3.1 \mu\text{s}$ 时,中间爆轰波与两边波相遇,发生碰撞,碰撞点的压力为 44 GPa;当 $t = 6.9 \mu\text{s}$ 时,爆轰波与壳体相遇,与两点时相同,此时界面压力为 30 GPa,与两点时相等;最先接触点的法向角 α 为 46.06° ,比两点时稍小,但比单点时大。

主装药起爆后,壳体在爆轰波和爆轰产物的双重作用下,发生膨胀变形,驱动破片向外飞散。破片在飞散过程中形成两束聚焦带。图 3 为战斗部起爆后 $50 \mu\text{s}$ 和 $100 \mu\text{s}$ 破片飞散过程。

4.2 破片飞散初速及飞散角

起爆方式对破片的初速度和破片分布的均匀性有着重要的影响^[10]。对于战斗部起爆,既可以选择从端面起爆,也可以选择中心起爆。由于设计模型是对称的,因此破片飞散初速和飞散角也具有良好的对称性。战斗部的破片飞散角是两端破片飞散方向所形成的张角。对于一定结构的战斗部,只要改变起爆状态,可以在一定程度上改变破片的飞散角。我们将破片从左

到右依次编号为 1,2,⋯,40,41。不同起爆方式下,对破片进行了初始速度和飞散角分析(见图 4 和图 5)。

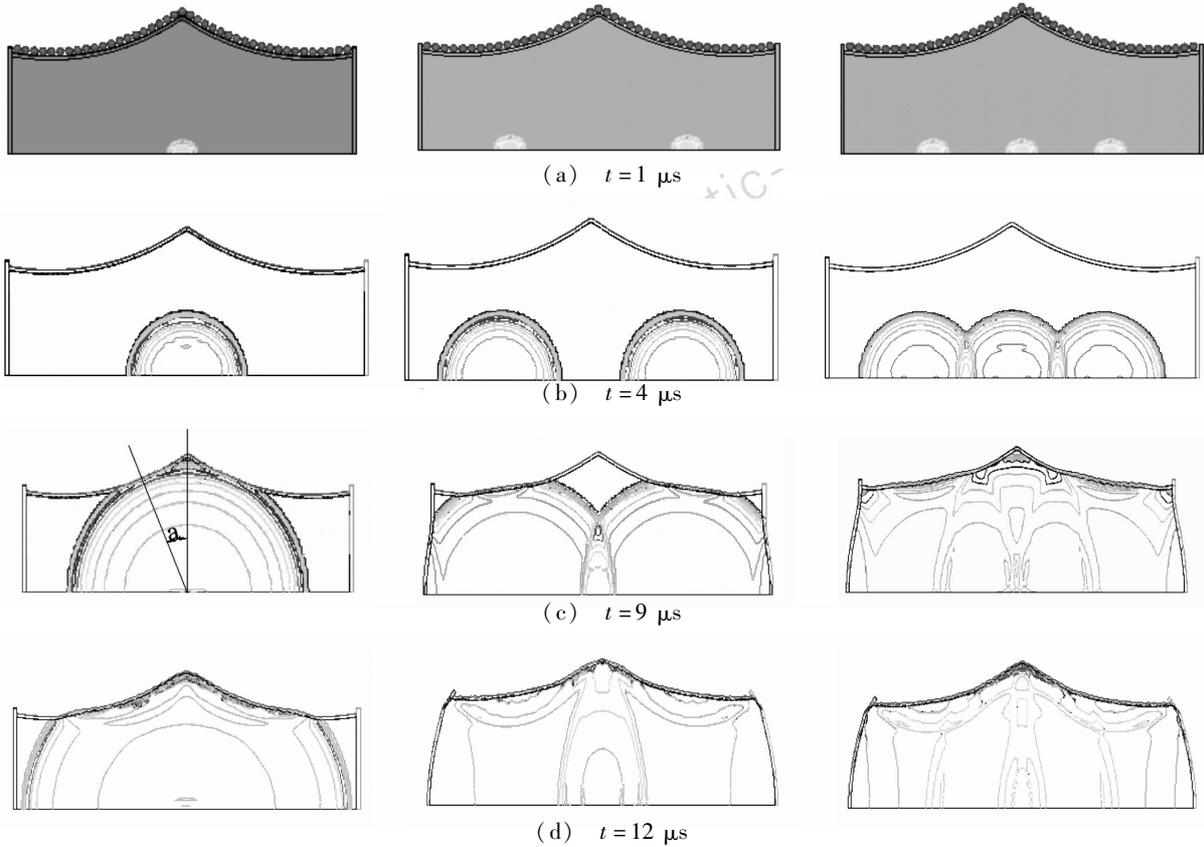


图 2 爆轰波不同时刻的传播情况

Fig. 2 Propagating shapes of detonation wave at different time

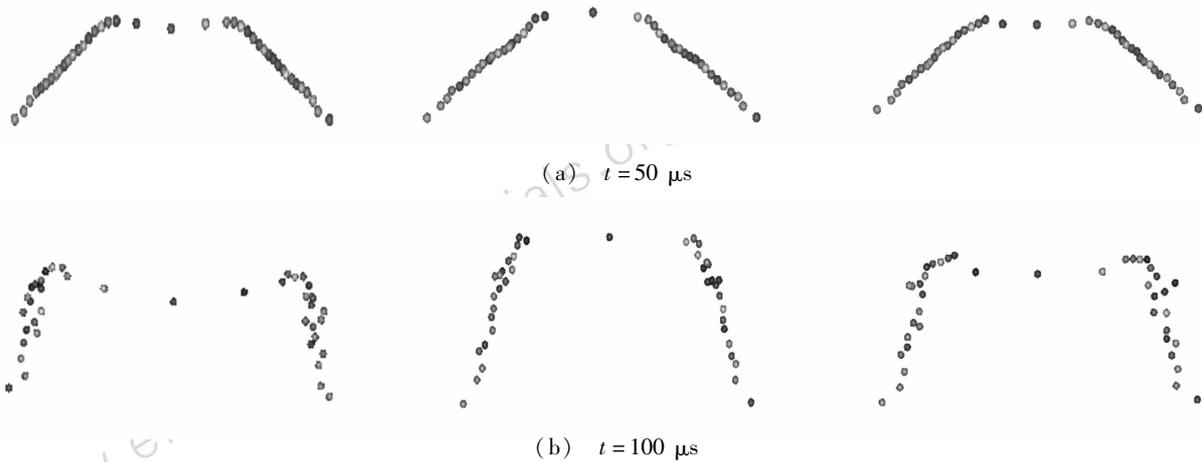


图 3 破片飞散过程图

Fig. 3 Scattering process of fragments

4.3 起爆方式对破片飞散的影响分析

对于单点起爆,从图 4 (a)可以看出,轴向位置不同,破片初速不同;双聚焦战斗部端部和中部速度较低,两个聚焦带位置速度较高,最大约 $1\ 827\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

边部破片由于端部效应,速度偏低,只有最大速度的 65.74%。从图 5 (a)中可以看出,在 $-19^\circ \sim -16^\circ$ 和 $16^\circ \sim 19^\circ$ 之间共集中了 14 枚破片,占总破片数的 34.15%,两聚焦带的中心角(两聚焦带中心线的夹

角)为 35° 。

两起爆点的排布位置对破片的速度和飞散角有较大影响,图 4 和图 5 是模拟的最佳效果对应的结果曲线,其中起爆点 2 与 3 之间的距离为 6 cm。从图 4 (b)可以看出,两点起爆端部破片的初速较单点起爆时要低 9.16%;初速最高可达到 $2\ 004\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,又比单点时最大初速高了 9.69%。从图 5 (b)可以看出,在 $-17^\circ\sim-14^\circ$ 和 $14^\circ\sim17^\circ$ 之间共集中了 18 枚破片,占总破片数的 43.90%,两聚焦带的中心角为 31° 。

三点起爆时,起爆点 2 与 3 关于起爆点 1 对称,它们之间的距离从 4 ~ 10 cm 范围内,破片均可获得最佳飞散效果。图 4 (c)和 5 (c)中,起爆点 2 与 3 之间的距离为 6 cm,端部破片的初速较单点起爆时要低 10.18%;此种方式下,最大初速也比单点时高,最大可达到 $1\ 962\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,比单点时最大初速高 7.39%。图 5 (c)中,在 $-17^\circ\sim-14^\circ$ 和 $14^\circ\sim17^\circ$ 之间共集中了 16 枚破片,占总破片数的 39.02%,两聚焦带的中心角为 31° 。

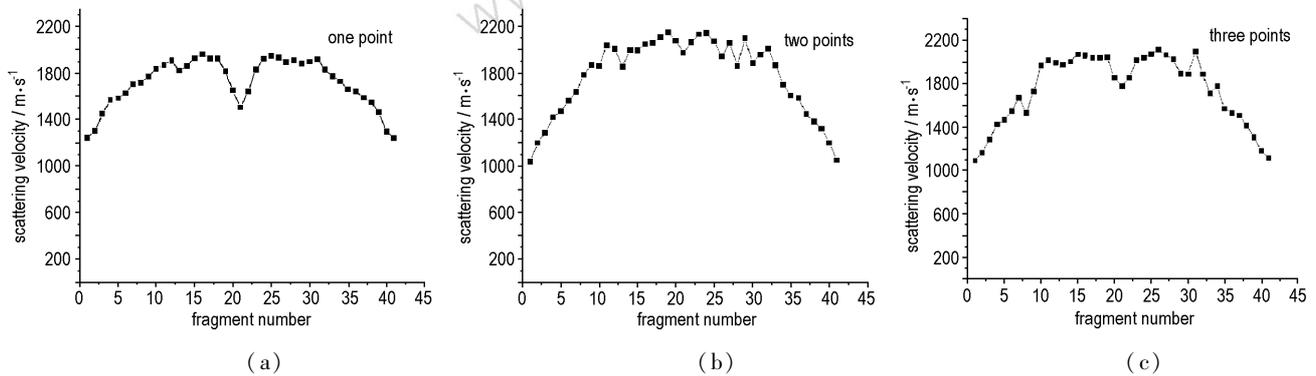


图 4 三种起爆方式下破片初速分布曲线

Fig. 4 Velocity curves of fragments by three detonation modes

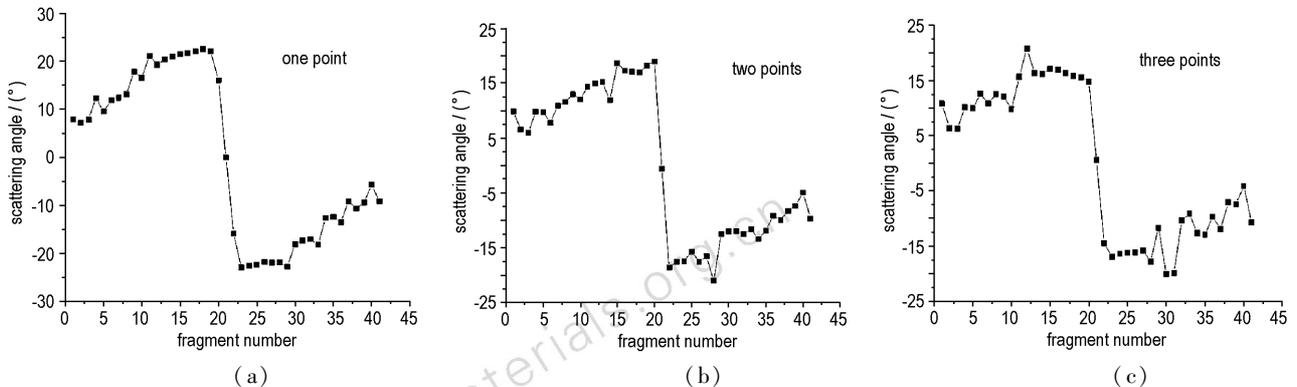


图 5 三种起爆方式下破片飞散角分布曲线

Fig. 5 Scattering angle curves of fragments by three detonation modes

从上述模拟结果可以看出,三种起爆方式都有两个较为明显的聚焦带。从两个聚焦带中的破片数比例来看,轴向两点起爆效果最好,三点起爆次之,单点起爆时最差。在相同聚焦区域内,两点起爆方式下破片的平均速度也最高。从飞散初速和飞散角两方面综合比较来看,轴向两点起爆对于破片的飞散特性效果是最好的。数值模拟的结果对双聚焦战斗部及其起爆系统的设计具有重要指导意义。

5 结 论

(1) 通过对该模型的计算,说明小角度建模方式可以作为整个双聚焦结构的简化形式,较为合理且省时。

(2) 采用不同的起爆方式,得到了对应条件下破片的飞散初速和飞散角。

(3) 通过三种起爆方式的综合比较,表明在本实验结构情况下,轴向两点起爆效果最好,破片初速较

高,在 $-17^\circ \sim -14^\circ$ 和 $14^\circ \sim 17^\circ$ 两个聚焦带中集中的破片数最多,占总破片数的 43.09%,聚焦效果最优。

参考文献:

- [1] 肖川,郭梓熙. 破片聚焦型战斗部性能因素分析[A]. 无人飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会第四次学术会议文集[C], 1995. 81-85.
- [2] 何广军,高福利. 多束破片聚焦式杀伤战斗部引战配合研究方法初探[J]. 现代引信,1998,(2): 6-10.
- [3] 肖川,陶孟军,刘惠玲. 聚焦破片对空中目标的毁伤[A]. 无人飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会第五届学术年会文集[C],1997. 79-85.
- [4] 马天宝,孙远翔,宁建国,等. 双束聚焦式破片杀伤战斗部的数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报,2003,(4): 146-149.
- [5] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore Software Technology Corporation. California,2001.
- [6] Hallquist J O. Theoretical manual for DYNA3D[R]. LLNL Report UCID-19401,1982.
- [7] Richard M Lloyd. Conventional Warhead System Physics and Engineering Design[M]. Progress in Astronautics and Aeronautics,1998.
- [8] Dobratz B M. LLNL Explosive Handbook[R]. LLNL Report UCRL-52997,1981.
- [9] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS/LS-DYNA 算法基础和使用方法[M]. 北京理工大学 ANSYS/LS-DYNA 中国技术支持中心, 1999.
- [10] 张志鸿,周申生. 防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M]. 北京: 宇航出版社,1994. 292.

Numerical Investigation of Different Initiation Modes for Dual-focusing Fragment Warhead

WEI Ji-feng, JIAO Qing-jie, NING Jian-guo

(State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Detonation drive characteristics were studied for a certain dual-focusing fragment warhead in this paper. Using DYNA3D finite element codes, key technical problems such as propagation of detonation wave, case deforming driven by detonation, scattering characteristics of fragment are numerically simulated. The simulation results show that more fragments are concentrated in two focusing regions (-17° , -14°) and (14° , 17°), by two initiation points. The concentrated number of fragments is 43.09% of all ones. Simulation results obtained can be used for the initiation system of focusing fragment warhead in engineering practice.

Key words: explosion mechanics; dual-focusing fragment warhead; fragment; scattering characteristics; numerical simulation

读者·作者·编者

三大全文电子期刊数据库简介

目前,国内最享有声誉和拥有最多用户群的全文数据库主要有三个,他们是中文科技期刊数据库、中国学术期刊数据库和万方数字化期刊群。

中文科技期刊数据库是由科技部西南信息中心重庆维普资讯有限公司于1989年开发的,最初只是中文科技期刊篇名数据库,直到1999年才推出了与其配套的“中文科技期刊数据库(全文版)”(VIP),收录的期刊分为:自然科学、工程技术、农业科学、医药卫生、经济管理、教育科学和图书情报七大门类,数据可回溯到1989年。据有关文献称,VIP收录期刊约8700余种,其中35%是非公开出版的期刊。其网址为:www.cqvip.com vip.hein.gov.cn

中国学术期刊全文数据库(CAJ)是由清华同方光盘有限公司、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社和清华大学光盘国家工程研究中心共同研制开发的,是我国第一个综合性中文期刊全文数据库,于1996年底推出,数据可回溯到1994年,收录的期刊分为:理工A(数理科学)、理工B(化学、化工、能源与材料)、理工B(工业技术)、电子技术与信息科学、农业、医药卫生、文史哲、政治经济与法律、教育与社会科学综合九个专辑。其收录期刊约5300余种,全部为公开出版的期刊。其网址为:www.cnki.net

万方数字化期刊群(VFD)是由北京万方数据股份有限公司与中国科学信息研究所合作于1998年开始研制运作的,收录的期刊分为:基础科学、工业技术、农业科学、医药卫生、人文社会科学五大门类。其收录期刊约2600余种,绝大部分是科技部科技论文统计源的核心期刊。其网址为:www.periodicals.net.cn www.wanfangdata.com.cn

任何一个数据库都不能达到100%的查全率,在一个数据库中找不到所需的全部信息时,可借助于另外的数据库。本刊已加入了国内这三个最负盛名的数据库,所支付的稿费包括了刊物内容上网服务的报酬,如作者不同意将论文编入这些数据库,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。