

# 陶瓷/ 复合材料装甲板防弹机理分析

杨 威

( 中国海鹰机电技术研究院 北京 100074 )

**文 摘** 分析了纺织复合材料和陶瓷的低速冲击性能,并以此为理论基础,剖析陶瓷/ 复合材料装甲板受弹头冲击时的防弹机理,并建立此过程的动态分析模型,讨论和预测复合装甲的损伤和破坏,为复合材料在复合装甲上的应用和防弹能力预测提供理论分析依据。

**关键词** 陶瓷,复合材料,装甲板,防弹,动态分析模型

## Bullet-proof Mechanism of Ceramics/ Composites Combined Armor Panels

Yang Wei

( The Third Design Department ,The Third Academy of CASC Beijing 100074 )

**Abstract** Along with the development of technology , many important components of aircrafts ,astronautics ,water-crafts ,automobiles and weapons are made of composites. In this article , low speed impact properties of textile composites and ceramics are analyzed. On this basis , the bullet-proof mechanism of an armor panel made of the materials impacted by bullet is discussed ,and dynamic analysis model of impact process is then built. This model can be used to predict the damage and crack of a composites armor ,which provide theoretical analysis basis for application of the composites armor and prediction of bullet-proof ability.

**Key words** Ceramics ,Composite ,Armor panel ,Bullet-proof ,Dynamic analysis model

### 1 前言

一些高科技武器有着突防性和生存性差的弱点,尤其是武装直升机、对地攻击机、巡航导弹等飞行器在超低空突防或实施对地攻击时,非常容易遭受地面轻武器的猛烈还击,被轻武器击中而坠毁或丧失战斗力的例子屡见不鲜;地面上的坦克、装甲车辆为了免受枪弹的重创,不断增加装甲的厚度以达到防弹的效果,但此举却带来了明显的负面影响,即增加了质量,降低了车辆的机动性。如何提高武器的突防性能和生存能力,是摆在军事家面前的重要课题。

为适应现代战争的需要,出现了各种各样的复

合式装甲。本文将提出最近几年来处于研究概念阶段的新式轻型装甲——陶瓷/ 复合材料防弹装甲,并较详细地分析其组成材料的防弹机理和防弹性能,为这种材料的实际应用提供一些有限的参考。

### 2 陶瓷/ 复合材料板的冲击特性

陶瓷的硬度非常高,密度较金属材料(如钢材)小很多,耐磨损,耐腐蚀,耐高温。但它是一种脆性材料,受强载荷时容易发生破碎,这给它的应用带来许多困难。

复合材料一般由树脂和增强纤维组成,有着许多优良的特性,如质量轻、高强度、高模量、耐腐蚀、耐疲劳、湿热性能理想等,使其在飞机、导弹、发动

收稿日期:2000 - 04 - 17;修回日期:2000 - 07 - 24

杨威,1976年出生,本科,主要从事飞航导弹结构设计的研究工作

机、船舶等诸多方面被广泛采用。它的最大特点就是 在受力破坏时,能显著的吸收能量<sup>[1]</sup>,这使其应用于防弹材料成为可能。

若在陶瓷板的背面粘合一层纺织复合材料板(如图 1 所示),兼取二者之长,将得到一种性能优越的防弹装甲(以下称靶板),这种防弹装甲可用于攻击机、武装直升机、巡航导弹、坦克等的防护,有效地提高武器生存性能和战斗力。



图 1 陶瓷/复合材料防弹装甲示意图

Fig. 1 A ceramics/composite bullet-proof armor panel

为了得到这种组合材料的抗冲击特性,我们作如下分析。

### 2.1 刚性杆弹垂直冲击陶瓷靶板的简化分析模

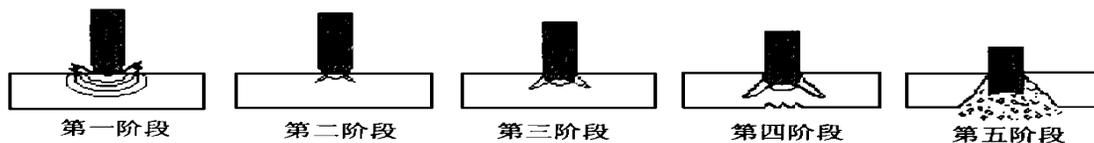


图 2 陶瓷面板的破坏过程示意图

Fig. 2 Damage process of a ceramic panel

### 2.2 复合材料板防弹机理

#### 2.2.1 纤维的冲击响应

为了研究复合材料背板的防弹机理,我们首先考察单根纤维受径向冲击的响应。

假设纤维受到来自径向(垂直于纤维纵轴)的冲击。那么,在冲击的瞬间,压力波<sup>[3]</sup>将沿纤维的纵轴传播开去。压力波到达纤维的末端后又作为拉力波反射回来,连续的波反射加剧了拉应变,纤维所吸收的能量与这个应变成正比。

同时,纤维受到径向力的作用而产生偏移,纤维不断的偏移和吸收能量直到弹体被减速而停止或纤维的拉应变超过它的动屈服应变点而破坏。然而,如果冲击速度非常高,则纤维不能足够快地反映出

型<sup>[2]</sup>

我们讨论一种较简单的情况,即刚性弹垂直冲击陶瓷板,并假设在冲击过程中没有热能损失。冲击经历的几个过程如下。

(1) 弹顶破碎成小块。弹头的破碎使得弹靶作用面增加,从而分散了作用于陶瓷板上的载荷。

(2) 在碰击区陶瓷表面产生应力场,使陶瓷表面材料发生细微的裂纹,并从碰击区向外延伸。

(3) 这个张力场跟随着碰击区压缩波阵面前进,深入到陶瓷的内部。使陶瓷发生破碎,产生的粉末从弹丸周围的碰击区飞散出去。

(4) 在陶瓷背面很快产生裂纹,除了某些径向裂纹外,裂纹分布区呈锥形,破坏将在锥内发生。

(5) 断裂锥内的陶瓷在复杂应力下破坏成碎块。

当弹丸冲击陶瓷表面时,大部分动量都分散到破坏锥底的圆面积上,其直径取决于弹丸和陶瓷面板材料的机械性能和几何尺寸。陶瓷面板的破坏过程见图 2。

应变。纤维来不及产生应变而破坏对冲击是非常不利的,因为靶板没有或较少吸收冲击能量。

纤维的破坏形态有三种模式,即为软化、脆性断裂以及有纵向撕裂的塑性变形<sup>[1]</sup>。玻璃纤维和碳纤维是典型的脆性断裂,破坏应变小,不适于做吸能材料。而涤纶纤维在断裂前有某种程度的塑性变形和沿纤维纵轴方向的撕裂,这种纵向撕裂不仅可吸收能量,而且有止裂作用,这正是防弹装甲所需要的。

#### 2.2.2 复合材料板的冲击响应

复合材料板(以下简称背板)的受冲击过程是非常复杂的。这个过程在性质上是三维的,存在着单层内和越过这些面到临近纤维层的相互作用。简单的说,应力波从织物层传到树脂基体,然后再传到

相邻层,应变波反射到纤维的交叉点会引起冲击能量的分散。波在树脂基体中的传播、织物层的分离和织物层的偏移增加了复合材料板吸收能量的能力<sup>[4,5]</sup>。裂纹的形成和扩展以及在由各个织物层分离而引起的偏移大大消耗了冲击能量。

## 2.3 陶瓷/复合材料板受弹击的动态建模

### 2.3.1 动态模型原理

由 2.1 可知,弹体撞击陶瓷板后形成断裂锥,在侵彻陶瓷断裂锥时相互磨蚀,同时陶瓷断裂锥克服自身惯性,被弹体所加速冲击背板,背板弯曲变形从而产生阻力对断裂锥和弹体进行减速,据此可以把整个经过分作三个连续动态阶段进行分析。

弹击靶板的动态模型如图 3 所示,设弹体为圆柱体,质量为  $m_p$ ,陶瓷部分的质量为  $m_c$ ,背板部分的质量为  $m_b$ ,弹径为  $d_p$ ,陶瓷面板厚度为  $h_1$ ,复合材料背板厚度为  $h_2$ ,断裂锥底面直径为  $d_c$ ,参与变形与吸收能量的背板半径为  $c$ 。陶瓷断裂锥直径为  $d_c + 4h_1$ <sup>[2]</sup>,那么背板中位于直径为  $2c$  的圆内参与变形的纤维吸能为:

$$W_t = \sigma_b \cdot d_c \cdot c \cdot h_2 \left( \frac{X_{\max}}{c} \right)^2 \quad (1)$$

式中:  $\sigma_b$  ——背板材料的抗拉强度;  $X_{\max}$  ——背板的最大位移。另设弹体材料的抗拉强度为  $\sigma_p$ ,弹体密度为  $\rho_p$ ,陶瓷材料的抗压强度为  $\sigma_c$ ,陶瓷材料的密度为  $\rho_c$ 。

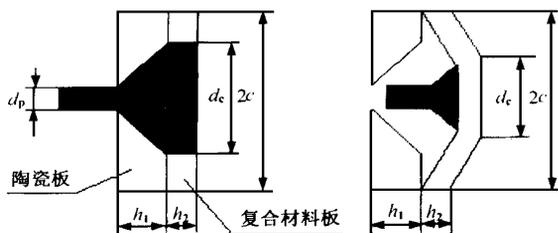


图 3 弹击的动态模型

Fig. 3 Dynamic model of a impact process

设弹体的入射速度为  $v_p$ ,陶瓷的被侵蚀速度为  $v_c$ ,靶板的速度为  $v_t$ ,弹体与陶瓷碰撞的冲击力为  $F_i$ ,背板变形产生的阻力为  $F_t$ ,微小的时间间隔为

$t$ ,弹体截面积为  $S = \frac{1}{4} d_p^2$ ,靶板质量为  $m_t$ ,第三阶段中靶板质量为  $m_{tn}$ 。由于无法得到精确的微积分方程,下面将进行合理的离散化的数学和物理分析。

第一阶段:此时  $F_i > \sigma_p \cdot S$  且  $F_i > \sigma_c \cdot S$ 。

即子弹在高速撞击陶瓷过程中冲击力均大于两种材料自身的抗压强度,弹体与陶瓷均被侵蚀,产生质量损失  $m_p$ 、 $m_c$ ,忽略因变形和摩擦产生的热能损失,根据动量守恒原理可列出此过程的动态平衡方程。

$$(F_i - \sigma_p \cdot S) \cdot t = m_p(v_p - v_c) + 2 m_p \cdot (v_c - v_t) \quad (2)$$

$$(F_i - \sigma_c \cdot S) \cdot t = m_c(v_c - v_t) + 2 m_c \cdot (v_c - v_t) \quad (3)$$

$$[\sigma_p \cdot S + (m_p + m_c)(v_c - v_t)/t] \cdot t = m_p v_t \quad (4)$$

$$(\sigma_c \cdot S - F_t) \cdot t = m_t \cdot v_t \quad (5)$$

$$m_p = \rho_p(v_p - v_c) \cdot t \cdot S \quad (6)$$

$$m_c = \rho_c(v_c - v_t) \cdot t \cdot S \quad (7)$$

由式(1)两边对  $X$  求导得:

$$F_t = 2 \sigma_b d_c h_2 X / c \quad (8)$$

$$m_t = m_c + m_b \quad (9)$$

第二阶段:此时  $F_i > \sigma_c \cdot S$  但  $F_i < \sigma_p \cdot S$ 。

并有  $m_p = 0, v_c = v_p$ 。

由动量守恒定理,同样可得到此过程的动态方程。

第三阶段:此时  $v_p = v_t, m_c = 0, F_i = F_t$

$$\text{设 } m_{tn} = m_p + m_t \quad (10)$$

$$\text{则动态方程为: } F_t \cdot t = -m_{tn} v_t \quad (11)$$

在上述三个阶段中,设复合材料背板的位移为  $X$ ,弹体磨蚀深度为  $Y$ ,陶瓷的侵彻深度为  $Z$ ,则:

$$dX = v_t dt \quad (12)$$

$$dY = (v_p - v_c) dt \quad (13)$$

$$dZ = (v_c - v_t) dt \quad (14)$$

由初始条件:  $v_p, m_p, \rho_p, \sigma_c, m_t, v_t$ , 设定微小的时间间隔为  $t$ ,根据上述三个阶段的动态方程,计算出每  $t$  内的  $m_p, m_c, v_p, v_c, v_t, X, Y, Z$ ,然后对各变化量进行累计、迭加,便可求

出每时刻弹体、陶瓷面板及复合材料背板各自的状态参数。

### 2.3.2 靶板的破坏条件

在本模型中,只要满足如下情况之一,陶瓷/复合材料靶板便破坏( $\epsilon_b$ 为背板的伸长率):

(1)背板的拉伸应变超过其材料自身的断裂应变,即  $Z < h_1, \epsilon_b > \epsilon_{bmax}$ ;

(2)弹体在面板中发生侵彻,即  $Z > h_1$ 。

可见欲使靶板完全阻挡弹体,最佳的靶板设计应使陶瓷面板的厚度足以完全抵御弹体的侵彻,即保证  $Z < h_1$ 。同时背板的伸长率  $\epsilon_b$  小于背板材料的最大伸长率  $\epsilon_{bmax}$ ,即  $\epsilon_b < \epsilon_{bmax}$ 。

## 3 动态模型的运算

以下各数值均为本文算例所选的值。

弹体速度( $v_p$ )为变量;陶瓷面板厚度( $h_1$ )为 12.24 mm;复合材料背板厚度( $h_2$ )为 7.85 mm;弹体质量( $m_p$ )为 0.03 kg;弹体的抗压强度( $Q_p$ )为 3 GPa;陶瓷在非容限下的动态强度( $Q_c$ )为 2 GPa;背板的面密度( $AD_b$ )为 1146.5  $h_2$  kg/m<sup>2</sup>;背板的抗拉强度( $Q_b$ )为 453 MPa;弹体直径( $d_p$ )为 10 mm;背板的断裂伸长率( $\epsilon_{bmax}$ )为 4.9%;时间间隔( $\Delta t$ )为 1  $\mu$ s;循环次数( $n$ )为 100 次。

### 3.1 弹体质量一定时,子弹入射速度对靶板的冲击影响

设初始弹速  $v_{p0} = 650$  m/s,用上述的参数进计算,从运算结果可以看出:

0~17  $\mu$ s 时,发生“第一阶段”,弹体与陶瓷同时磨蚀。

18  $\mu$ s~30  $\mu$ s 时,发生“第二阶段”,弹体只侵蚀陶瓷。

31  $\mu$ s~54  $\mu$ s 时,发生“第三阶段”,弹体与靶板同时减速。

55  $\mu$ s 时,背板的  $\epsilon_b > \epsilon_{bmax}$ ,靶板被击穿。

通过多次改变弹体的初速度  $v_p$ ,可得到击穿靶板的临界速度,即  $v_{pmax} = 435$  m/s,若弹体的初速度低于此值,则弹体将被挡住;否则,靶板将被击穿。计算值与实测值的误差为 14.4%。

(1)击穿( $v_{p0} = 650$  m/s)时,背板的应变与时间的关系曲线(图4)。

(2)弹体质量一定( $m_p = 0.03$  kg)时,入射速度的大小与击穿时间的关系(图5)。

宇航材料工艺 2000年 第5期

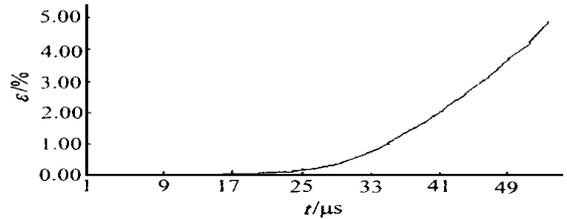


图4 击穿情况下背板的拉应变与时间的关系

Fig. 4 Relations of panel's pull strain with time when panel was staved

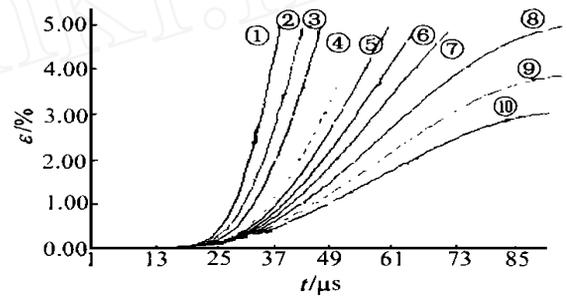


图5 在不同初速条件下背板应变与时间的变化关系

Fig. 5 Relations of bullet's strain with time when panel was staved at different initial velocities

-1 000 m/s; -900 m/s; -800 m/s;  
-650 m/s; -600 m/s; -550 m/s;  
-500 m/s; -450 m/s;  
-400 m/s; -350 m/s.

### 3.2 弹体入射速度一定时,弹体质量对靶板冲击的影响

仍用上述所选的初始值,取  $v_{p0} = 400$  m/s 经过计算后,同样可得到如下理论图线,分析从略。

(1)背板的拉应变与时间的关系曲线(未击穿)见图6。

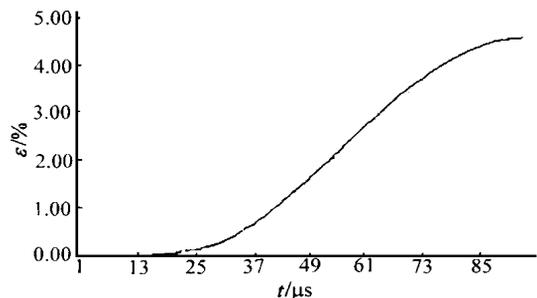


图6 未击穿时背板的拉应变与时间的关系

Fig. 1 Relations of panel's pull strain with time when panel wasn't staved

(2) 弹体质量的大小对击穿时间和背板应变的影响曲线见图 7。

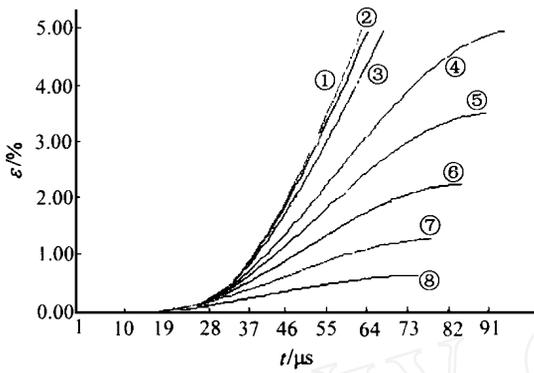


图 7 在不同弹体质量条件下击穿时间与背板应变的关系

Fig. 7 Relations of bullet's quality, pull strain and staying time  
 -0.050 kg; -0.045 kg; -0.040 kg;  
 -0.030 kg; -0.025 kg; -0.020 kg;  
 -0.015 kg; -0.010 kg。

(3) 本例中, 弹体速度、侵彻速度、靶板速度与时间的关系曲线见图 8。

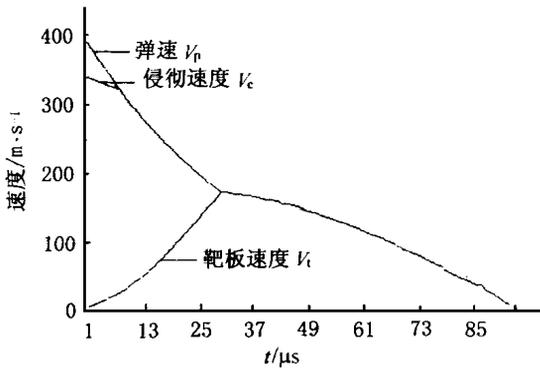


图 8 弹速、侵彻速度、靶板速度与时间的关系

Fig. 8 Relations of bullet's speed, penetration speed and time

### 3.3 陶瓷/复合材料装甲防弹效果预测和设计优化

通过对以上弹靶冲击动态模型的分析, 在计算机模拟的基础上, 得到一系列弹体质量  $m_{p0}$  与对应的击穿临界速度  $v_{p0}$  的数据, 经过计算机处理后, 获得如图 9 所示的一条曲线, 此图线可以作为装甲板设计的参考图线。

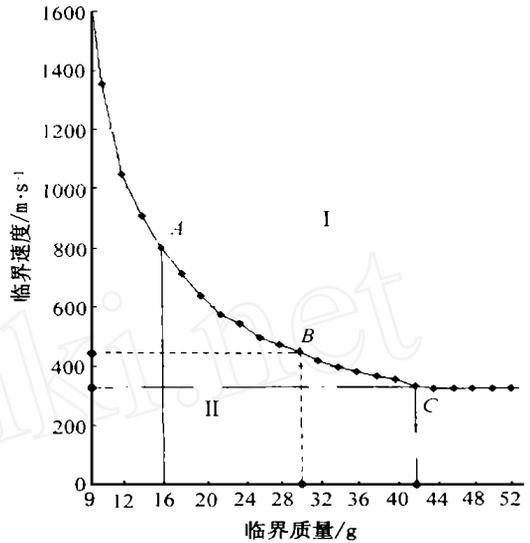


图 9 弹靶优化设计参考曲线

Fig. 9 Optimized reference graph of ballistic target design for ceramics/composites armors

对于标准口径的子弹, 其弹体直径是一定的, 因此, 所设计的装甲是否能有效防弹, 只决定于弹体的质量和速度。另外, 由于在实际作战中, 装甲板可能被倾斜入射的子弹击中, 因为弹体这时的垂直分速度比弹速小, 装甲的防弹效果要好一些。

图中曲线的意义在于对装甲防弹效果的预测, 当已知某种轻武器的弹体射速和质量同时位于 ABC 曲线的上部 区时, 本装甲将被击穿, 此时, 应在不过多增加装甲质量的前提下, 针对这种武器设法提高防弹装甲中陶瓷板的厚度或改善复合材料板中增强纤维的体积分数; 当弹体的速度和质量同时落在 ABC 曲线的下部 区时, 此装甲能有效防弹。应用此计算程序, 可以设计出针对不同子弹的合理的装甲板, 实现装甲的优化设计。

对于武装直升机和攻击机而言, 在遭受地面炮火 (尤其是小口径轻武器) 袭击时, 采用此种防弹装甲进行防护是比较有利的。因为此装甲的质量较金属装甲轻许多, 可提高机动性能, 防弹效果也较好。

此曲线是在前述的材料参数数据下计算绘制的, 对于性质和规格不同的陶瓷和复合材料, 此曲线将有所不同, 这可以通过调整程序的参数来实现。

## 4 结论

(1) 陶瓷板若要具备破碎弹体和磨蚀弹体的功能,则要求:a. 陶瓷有高的抗压强度和硬度,以使撞击时弹体在挤压应力的作用下变形破损;b. 陶瓷破坏时应能形成倒圆锥,以使锥底与复合材料板的接触面积增大,减小压强。

(2) 陶瓷/复合材料防弹装甲的破坏除了与自身的性质有关外,还与弹体的入射速度和质量有关。

(3) 复合材料板应能有效支撑陶瓷,以减少陶瓷抗弯差的影响,延长破坏时间。

(4) 复合材料板除了有合适的刚度支撑陶瓷面板外,应具有较大的变形以吸收剩余能量。复合材料的纤维层交织点多和层间正常分离均有利于剩余能量的吸收。

(5) 背板应具有较大的拉伸应变,这就要求复合材料的纤维体积分数适当,以使它的拉伸性能提高。

(6) 靶板陶瓷层的厚度和复合材料层的厚度均对冲击破坏有影响。它们厚度的选择应有利于装甲的质量、体积和有效利用率。

致谢 本文的编写得到了耿福胜研究员、成传贤教授、燕瑛教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- 1 乔生儒. 复合材料细观力学性能. 西北工业大学出版社, 1997: 63 ~ 80
- 2 赵国志. 穿甲工程力学. 兵器工业出版社, 1992: 164 ~ 167
- 3 钱伟长等. 弹性力学. 1980: 382 ~ 407
- 4 孙玉慧, 吴长春, 黄传奇. 编织结构复合材料力学性能分析. 航空学报, 1997
- 5 燕瑛, 丁逸强. 二维三维纺织结构复合材料弹性性能的研究. 航空学报, 1996

---

## 化工新型材料月刊

### NEW CHEMICAL MATERIALS

《化工新型材料》创刊于 1973 年,由中国化工信息中心主办。主要报道国内外新近发展和正在开发的,具有某些优异性能或特种功能的先进化工材料的研究开发、技术创新、生产制造、加工应用和市场动向等,以及部分传统合成材料的功能化和高性能化等等。

本刊读者对象为有关科技人员、决策管理人员、大专院校师生,近几年来本刊尤其得到众多科技型中小企业有关人员的青睐。

本刊为月刊,大 16 开本,国内外公开发行,刊号:ISSN1006—3536,CN11—2357/TQ。2001 年每册 10 元,全年订价 120 元。邮发代号:82—816,全国各地邮局均可订阅,也可直接向编辑部订阅。

**追踪行业最新动态 展示技术创新成果 给您带来无限商机**

编辑部地址:北京市安定门外小关街 53 号

电话:(010) 64437113;64444093

传真:(010) 64444086

邮编:100029

开户行:北京工商银行和平里分里处

户名:中国化工信息中心

帐号:891136—69

欢迎订阅 欢迎来稿 欢迎刊登广告