

## 超高强度钢靶板穿甲过程中层裂断口形貌分析\*

尹志新<sup>1,2)</sup> 马常祥<sup>1)</sup> 李守新<sup>2)</sup> 刘燕林<sup>3)</sup>

1) 东北大学理学院, 沈阳 110006

2) 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016

3) 五二研究所, 包头 014000

**摘要** 利用扫描电镜(SEM)对靶板层裂破坏崩落块断口形貌进行了分析,结果表明,后崩落块断口可分为三个区域,分别对应裂纹萌生与扩展的不同阶段。中心区域为波浪状拉伸韧窝,这里在熔融状态下受拉应力作用;平坦区为抛物线型韧窝,表明断裂是张开型和滑开型共同作用的过程;侧面为等轴韧窝,说明崩落块最终是被拉应力拉断的。因此层裂过程可分为:开坑挤压及前崩落块的剪切断裂阶段;干涉应力波引起的材料内部裂纹萌生阶段;后崩落块的张开与滑开共同作用的裂纹扩展和弹靶摩擦表面的钝化阶段以及最后的拉伸断裂阶段。整个过程为韧性断裂,这种韧性层裂破坏有时需要比冲塞破坏还要高的能量。

**关键词** 超高强度钢, 穿甲, 层裂, 断口形貌。

**中图分类号** TG135, TG113 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)03-0273-05

## ANALYSIS OF LAYER SPLIT FRACTURE MORPHOLOGY OF ULTRA-HIGH STRENGTH STEEL TARGET UNDER PENETRATION

YIN Zhixin<sup>1,2)</sup>, MA Changxiang<sup>1)</sup>, LI Shouxin<sup>2)</sup>, LIU Yanlin<sup>3)</sup>

1) School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110006

2) Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Science, Shenyang 110016

3) 52 Institute, Baotou 014000

Correspondent: YIN Zhixin, Tel: (024)23843531-55225, E-mail: zhixin13@sina.com

Supported by Major State Basic Research Projects of China (No.G1990650) and National Natural Science Foundation of China (No.59971058)

Manuscript received 2001-06-19, in revised form 2001-10-09

**ABSTRACT** The fracture morphology of the fragments caused by the layer split of the ultra-high strength steel target under penetrating was investigated by scanning electron microscopy. The results show that the fracture morphologies of both front and back fragments are divided into different areas which correspond to the different stages of the initiation and propagation of crack. For back fragment, there are wave-like dimples in its central area, indicating that the tensile stress is responsible for the initiation of the crack. Outside the central area is the flat region consisting of parabola-shape dimples indicating the propagation of the crack resulted from the interaction of opening and shearing. The dimples in the flanks of both front and back fragments are all equal-axis ones suggesting that the fragments are finally broken by tensile stress. The process of the layer split is ductile rupture. The effect of layer split on protective ability of target was briefly discussed.

**KEY WORDS** ultra-high strength steel, penetration, layer split, fracture morphology

自从热兵器产生以来,弹靶碰撞过程及其破坏形式一直是人们关心的热点问题之一。但由于弹靶作用时间极其短暂,所以对这一问题的了解始终以复杂而昂贵的破坏性

实验为主要手段<sup>[1-4]</sup>。对靶板的动力学响应的研究一般是在靶板中安放一定数量电阻应变片以测量弹靶作用瞬间受力情况,其复杂程度可想而知。这种办法所反映的通常是靶板破坏区域整体力学响应,而对作用过程中裂纹的萌生与扩展无法给予直观的描述。本文对超高强度钢靶板在弹丸冲击下发生层裂破坏的崩落块断口形貌进行了扫描电镜(SEM)分析,试图对超高强度钢靶板的层裂破坏机制做出较为直观的描述。

\* 国家九·五重点科技攻关项目(95-YJ-14)、国家重大基础研究项目G1990650及自然科学基金项目59971058资助

收到初稿日期:2001-06-19,收到修改稿日期:2001-10-09

作者简介:尹志新,男,1960年生,满族,博士生

## 1 实验方法

靶板材料采用屈服强度大于 1500 MPa、抗拉强度大于 1700 MPa、延伸率约为 12% 的超高强度钢。将靶板材料制成标准冲击试样在室温下进行冲击实验。对靶板材料的显微组织在透射电子显微镜下观察分析。采用直径为 57 mm 的 30CrMnSi 尖头弹对超高强度钢靶板进行射击, 着靶时弹速为 630—675 m·s<sup>-1</sup>。靶板厚度为 45 mm。收集破片并进行测量取样。采用扫描电子显微镜对冲击断口和破片表面进行形貌分析。

## 2 实验结果与分析

材料在室温下的冲击值约为 21 J/cm<sup>2</sup>, 断裂韧性  $K_{Ic}$  为 56 MPa·m<sup>1/2</sup>。扫描电镜分析表明, 常规冲击断口的形貌由解理平面加少量韧窝组成, 显示出了较大的脆性。透射电镜分析表明, 靶板的显微组织主要由板条马氏体 + 少量自回火马氏体 + 少量下贝氏体组成。穿甲实验时靶板发生层裂破坏而产生前、后崩落块。前崩落块为若干大小不等的不规则多面体, 图 1a 为其中一块的照片, 三边尺寸分别为 159, 120 和 86 mm, 平均厚度为 17 mm。它的前面(正对弹丸表面)为原轧制面, 背面为崩落断口, 这里可分为较大的平坦区和较小的侧面。平坦区上分布有放射状条纹, 侧面与平坦区有一夹角。在图 1a 的照片中, 前崩落块的左端为弹靶接触部位。后崩落块为一整块, 其形状为前凹后凸的椭圆盘形, 如图 1b 所示。凹面长轴平

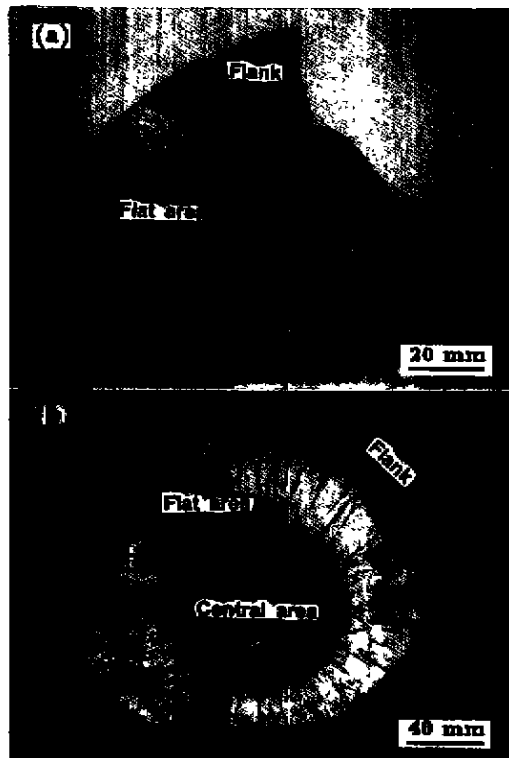


图 1 前、后崩落块的实物照片

Fig.1 The macroscopic morphologies of the front (a) and back fragments (b)

均直径约为 170 mm, 凸面长轴平均直径约为 213 mm, 估计破坏影响区直径约为弹径的 3—4 倍。变形位移 18 mm, 其平均厚度为 34 mm, 相当于靶板厚的 3/4。它的前面为崩落断口, 其中心区域呈蓝色, 有大变形痕迹, 该区域在崩落过程中直接与弹丸头部接触。在中心区域的外围是平坦区, 其形态与前崩落块平坦区相似。侧面与平坦区平均约有 100° 的夹角。背面为原轧制面, 有背凸和微裂纹产生。

扫描电镜分析表明前崩落块的平坦区主要由抛物线型韧窝组成, 其方向均背向弹孔。靠近弹孔韧窝被拉的较长(图 2a), 随着离开弹孔距离的增加抛物线型韧窝的拉长量逐渐变小, 并向等轴韧窝转化, 到达平坦区边缘时, 已全部变成等轴韧窝; 侧面断口均为等轴韧窝(图 2b)。

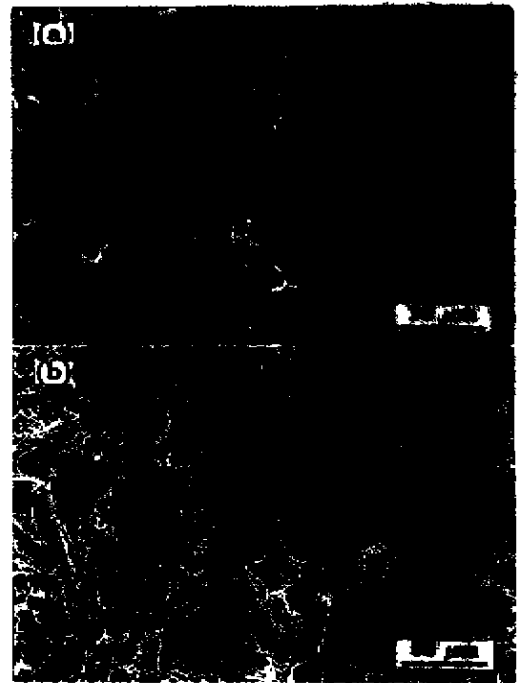


图 2 前崩落块的扫描电镜图象

Fig.2 SEM fracture morphologies of the front fracture (a) elongated dimples nearby the penetrating hole (b) equal-axis dimples in the flank of the shatter mass

后崩落块的中心区由波浪状等轴韧窝组成, 如图 3 所示。从中心区向平坦区过渡时开始出现尺寸极不均匀的抛物线型韧窝; 后崩落块的平坦区主要由抛物线型韧窝组成, 但其方向均指向弹坑, 靠近平坦区的边缘也开始出现等轴韧窝。在中心区和平坦区发现有类似熔滴的物质存在。与后期落块平坦区匹配的靶板上韧窝分布方向有些指向弹孔, 有些背向弹孔。后崩落块的侧面也完全由等轴韧窝组成。对中心区和平坦区中的熔滴状物质进行能谱分析表明, 熔滴状物质成分中的 Cr, Mn, Si, O 含量均高于基体成分, 说明它们是弹、靶熔化后混合凝固的产物。

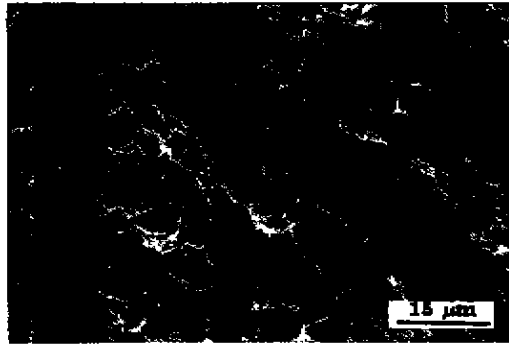


图 3 后崩落块中心区域的波浪状韧窝

Fig.3 wave-like equal-axis dimples in the central area of the back fragment

前、后崩落块断口的扫描电镜分析表明，尽管超高强度钢在室温下的冲击韧性值较低，但在强冲击载荷作用下却表现出良好的韧性，其层裂的整个过程为韧性断裂。根据前、后崩落块断口韧窝形态的演变可推断穿甲时层裂过程如下：首先尖头弹丸在开坑阶段，弹丸周围的靶材在高速运动的弹丸的挤压下将发生横向塑性流动，离开弹丸周围一定距离的靶材会阻止这种流动，因此，弹丸周围靶材此时受压力作用，这种作用的结果将产生一个与弹丸运动方向成  $\beta$  角的力  $\vec{F}$ 。当弹丸进一步深入时，这部分受压的靶材将发生剪切变形，变形部分材料要向约束较小的靶前表面运动，从而在靶板的前表面产生凸起。前崩落块的平坦区就是在这过程中形成的，这是一个滑开型 (II 型) 断裂过程，参见图 4a。随着弹丸的继续深入，参与流动的材料不断增多，弹丸周围靶材的凸起越来越大，造成凸起部分切向拉力  $\sigma$  急剧增大，当凸起达到一定高度时，变形部分的材料将在  $\sigma$  作用下开裂，前崩落块的侧面就是这一过程的断口，图 5a 是这一过程的示意图。

当弹丸撞击靶板瞬间，靶内开始产生压应力波并与弹丸同方向传播。这个压应力波在遇到靶板背面时，将发生反射而变为拉应力波，当这两个波相遇而产生的合成波强度大于靶板抗拉强度时就会在靶板内部产生裂纹，如图 4b 所示。由于弹头变圆钝，很难对后面的材料进行剪切，因而巨大的动能只能迫使弹丸推动它前面的材料向前运动从而使靶板产生背凸。这种凸起将带动其周围的靶材向弹丸处发生塑性流动，既在材料内部沿与裂纹平行的方向受剪切应力作用，见图 4c。由于弹丸的向前运动使裂纹张角  $\gamma$  增大，所以在剪切的交界处变形最大，因而已有的微裂纹首先在这里扩展，造成滑开型 (II 型) 断裂，结果在崩落块平坦区及与之相匹配的靶板断口上，形成了方向相反的抛物线型韧窝，见图 5b。随着裂纹扩展的进一步发展，与裂纹表面垂直的拉应力分量不断增大，所以在此过程中也将有张开型断裂即 I 型断裂过程发生，靶板断口平坦区上那些与崩落块上同向的抛物线型韧窝就是这一过程造成的。由此可见，后崩落块上平坦区的形成是 I 型和 II 型混合断裂过程。

随着弹丸继续向前运动，这部分材料的变形越来越大，裂纹的张角  $\gamma$  也越来越大，凸起越来越高，当凸起达到一定高度时，拉应力将是层裂破坏过程的主要应力状态。当拉应力超过靶板的抗拉强度时，会使这部分变形材料被拉断而形成完全拉断断口，即后崩落块的侧面断口，如图 4d 所示。

仔细观察可以看到，图 3 所显示的波浪状等轴韧窝的形态不同于普通的拉伸等轴韧窝，更多地显示出了在熔融状态下被拉断的特征。在弹丸与后崩落块撞击的过程中，弹丸的剩余动能除了大部分用于靶板的变形和断裂以及转变成热能、声能等以外，还有一部分动能传给后崩落块使其获得一定的速度，所以此时弹丸的速度有可能小于后

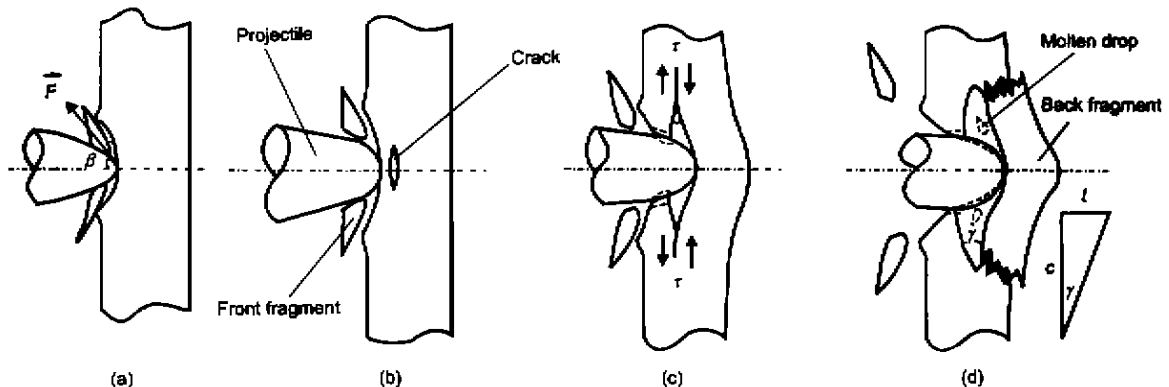


图 4 前、后崩落块形成示意图

Fig.4 The sketch of forming process of the front and back shatter mass

(a) formation of the front fragments (b) formation of the crack in the target material resulting in forming front fragment (c) formation of the flat area in the front fragment (d) formation of the back fragment (The areas surrounded by dot lines indicating the melting areas)

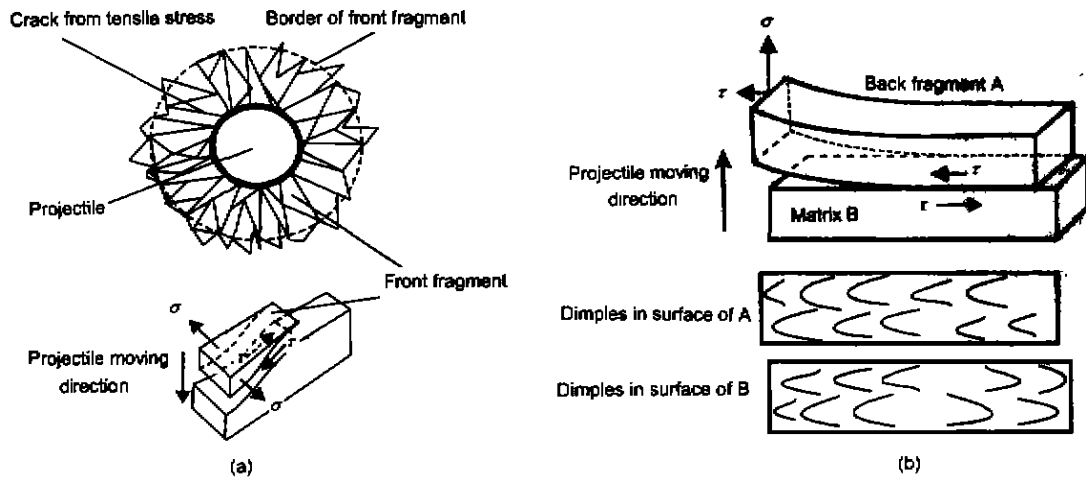


图 5 层裂断面平坦区形成过程示意图

Fig.5 The sketch forming of flat area in fracture surfaces of layering split

(a) formation of the flat area of front fragments (b) formation of the flat area of back fragment (the parabola dimples with same direction in both A and B are resulting from I type fracture and those with inverse direction from II type fracture)

崩落块的速度，因此弹、靶在接触面熔融状态下被拉断而开始分离，形成了后崩落块中心部位的波浪状断面。而弹靶接触表面熔化的弹靶混合液体在惯性力的作用下，仍以较高的速度飞溅到后崩落块上，在后崩落块上留下熔滴状物质，如图 4c, d。

现考虑弹丸侵入到一定深度后，靶板剩余厚度为  $h$  时可能发生的两种情况 (参见图 6):

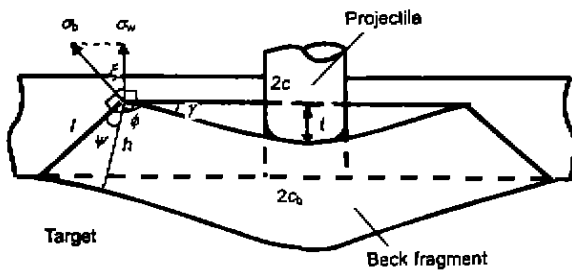


图 6 后崩落块的几何形状

Fig.6 The geometry shape of back fragment

1) 若继续冲塞穿甲，此过程为剪切过程。根据文献 [5] 的分析，所需能量  $w_c$  可估算如下:

令

$$h = \alpha H \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$$

其中  $H$  为靶板的总厚度 (m),  $\alpha$  为表示剩余厚度的因子。冲塞穿甲所需能量为

$$w_c = \frac{1}{2} \pi d \alpha H \tau_b \cdot \alpha H = \frac{1}{4} \pi \sigma_b \alpha^2 d H^2 \quad (1)$$

此处  $\tau_b = \frac{1}{2} \sigma_b$  为剪切断裂时的强度,  $d$  为弹丸直径 (m)。

2) 若产生裂纹，且在张角为  $\gamma$  时产生后崩落块 (层裂过程)，则所需能量估算为:

$$w_b = w_1 + w_t \quad (2)$$

其中  $w_1$  为形成半径为  $c$  裂纹时需要的能量;  $w_t$  为形成崩落块的能量。因断裂为 I, II 型混合断裂过程，则单位面积裂纹能量释放由下式表达 [6]

$$G = \frac{1 - \nu^2}{E} (K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2) \quad (3)$$

式中  $\nu$  为 Poisson 比,  $E$  为弹性模量。于是形成裂纹所需的能量为

$$w_1 = G \cdot \pi c^2 \quad (4)$$

变形部分最后被拉断而形成崩落块所需的能量为

$$\begin{aligned} w_t &= \frac{1}{2} \pi (c + c_b) \cdot l \cdot \sigma_w \cdot t \\ &= \frac{1}{2} \pi (c + c_b) \cdot \frac{h}{\cos \psi} \cdot \sigma_b \cos \xi \cdot c \cdot \tan \gamma \\ &= \frac{1}{2} c (c + c_b) \sigma_b \pi \frac{\alpha H}{\sin \phi} \tan \gamma \cdot \cos (180 - \phi - \gamma) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_w$  为位移方向的力;  $l$  为后崩落块断面侧面边长;  $c_b$  为后崩落块背面半径;  $t$  为后崩落块变形时的位移。

于是，层裂破坏所需能量由下式表达:

$$\begin{aligned} w_b &= G \pi c^2 - \frac{1}{2} c (c + c_b) \sigma_b \pi \cdot \\ &\quad \alpha H \frac{\tan \gamma \cdot \cos (\phi + \gamma)}{\sin \phi} \end{aligned} \quad (6)$$

令

$$R = \frac{w_c}{w_b}$$

如果  $R < 1$ , 则  $w_c < w_b$ , 说明发生层裂破坏需要的能量比冲塞破坏时要大; 反之, 如果  $R > 1$ , 则  $w_c > w_b$ , 说明冲塞破坏需要的能量, 比层裂破坏时还大。

在本实验中, 根据文献 [7] 提供的 I, II 型断裂韧性之间的关系 (即  $K_{IIc} = 0.915K_{Ic}$ ), 以及穿甲实验时所测相关数据 ( $2c=0.17$  m,  $2c_b=0.213$  m,  $t=0.018$  m,  $h=0.034$  m,  $\phi=100^\circ$ ,  $\alpha=0.75$ ), 则弹丸侵彻靶板 1/4 厚度时, 若继续冲塞破坏, 根据式 (1), 所需的能量为  $w_c = 8.66 \times 10^4$  J; 而发生层裂破坏, 根据式 (6), 所需的能量为  $w_b = 1.19 \times 10^5$  J,  $R = 0.73 < 1$ . 说明在这种情况下, 层裂破坏要求弹丸具有较高的能量, 亦即层裂破坏可以消耗较多弹丸能量。

### 3 结论

后崩落块断口可分为三个区域, 分别对应裂纹萌生与扩展的不同阶段: 中心区域为波浪状拉伸韧窝, 表明这里在熔融状态下受拉应力作用; 平坦区为抛物线型韧窝, 证明断裂是张开型和滑开型共同作用的过程; 侧面为等轴韧窝, 表明崩落块最终是被拉应力拉断的。因此层裂过程可分为: 开坑挤压及前崩落块的剪切断裂阶段; 干涉应力波引

起材料内部裂纹萌生阶段; 后崩落块的滑开与张开共同作用的裂纹扩展和弹靶摩擦表面的熔化阶段以及最后的拉伸断裂阶段。其整个过程为韧性断裂。本实验结果表明, 这种韧性层裂破坏有时需要比冲塞破坏还要高的能量。

感谢苏会和高级工程师在扫描电镜观察中给予的帮助

### 参考文献

- [1] Zhao G Z. *Engineering Dynamics of Penetration*. Beijing: Weaponary Industry Press, 1992: 22  
(赵国志. 穿甲工程力学. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 22)
- [2] Backmann M E, Goldsmith W. *Int J Eng Sci*, 1978; 1: 1
- [3] Corbett G G, Reid S, Fohnson W. *Int J Impact Eng*, 1996; 18: 141
- [4] Cslder C W, Goldsmith W. *Int J Solids Struct*, 1971; 7: 863
- [5] Chou P C, Hopkins A K. *Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading*, 1986; 9: 503
- [6] Suresh S, Wang Z G Trans. *Fatigus of Materials*. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 226  
(Suresh S 著, 王中光译. 材料的疲劳. 北京: 国防工业出版社, 1998: 226)
- [7] Deng Z J, Zhou J G eds. *Fracture and Fatigue of Eng Mater*. Beijing: Mechanary Industry Press, 1995: 16  
(邓增杰, 周敬恩编著. 工程材料的断裂与疲劳. 北京: 机械工业出版社, 1995: 16)