

# 1.06 $\mu\text{m}$ 激光直接驱动烧蚀靶内爆压缩特性<sup>\*</sup>

成金秀<sup>†</sup> 郑志坚 陈红素 缪文勇 陈 波 王耀梅 胡 昕

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理实验室, 绵阳 621900)

(2003 年 10 月 13 日收到 2004 年 1 月 16 日收到修改稿)

介绍了直接驱动内爆压缩特性实验研究的实验靶型和测量方法. 在神光 II 激光装置上采用多种高时空分辨和高能谱分辨的组合型诊断设备获取了内爆压缩相关信息, 得到了靶丸辐照均匀性、内爆压缩对称性、径向会聚比、内爆速度以及靶丸球壳平均电子温度, 获得的结果可作为优化靶结构与参数及激光辐照条件的依据. 给出了实验中获得的典型结果, 并对结果进行了简要的分析讨论.

关键词: 激光烧蚀, 直接驱动, 诊断技术

PACC: 5250J, 5240, 5270

## 1. 引 言

在直接驱动和间接驱动 ICF (inertial confinement fusion) 实验中, 实现高度球对称内爆是内爆压缩特性研究的主要目的. 通过对内爆压缩靶丸辐照均匀性、压缩对称性、径向会聚比、内爆时间、内爆速度以及燃料区电子温度和密度等最基本的内爆参数进行精确诊断和研究, 不仅能优化靶的结构与参数及激光辐照条件, 并能提高对内爆动力学有关物理规律的认识, 还能在校验模拟程序提供实验依据.

自 1972 年 Nuckolls 等人发表激光直接驱动靶丸产生球形内爆的理论以来, 美国的 KMS 聚变公司、利弗莫尔实验室、洛斯阿拉莫斯实验室、罗彻斯特大学、日本大阪大学激光工程研究所以及英国的卢瑟福实验室均先后利用 1.06 $\mu\text{m}$ 、0.53 $\mu\text{m}$  及 0.35 $\mu\text{m}$ 、千焦耳的激光进行了直接驱动内爆实验, 研究其内爆动力学特性, 并取得了实质性进展<sup>[1-5]</sup>.

我国在“神光 II”激光装置上首次进行了直接驱动烧蚀靶出中子实验, 在获得  $6.1 \times 10^8$ /发中子产额的情况下得到高达 550 倍的体积压缩和其他内爆相关参数.

## 2. 实验原理和方法

烧蚀内爆要求入射激光功率密度满足  $I \lambda^2 < 10^{15} (\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^2)$ , 以确保经典吸收成为激光吸收的主要机理. 其中  $I$  为入射激光强度,  $\lambda$  为入射激光波长. 通过激光直接照射靶丸外表面, 并将能量沉积在靶表面形成的稀薄等离子体中. 被沉积的绝大部分能量通过电子热传导输运到推进层附近产生烧蚀压, 而烧蚀压驱动烧蚀推进层部分物质, 一方面将一部分物质向低密度区喷射, 同时产生一个向内的压力将剩余物质向心加速, 压缩靶丸使氘氚 (DT) 气体达到较高温度和较高的压缩度, 并引起氘氚聚变反应释放出中子, 其内爆过程可用火箭模型描述<sup>[6]</sup>.

在内爆过程中高温高密度等离子体会辐射大量的 x 射线, 内爆初期的 x 射线发射主要是受激光照射产生的, 后期芯部温度和密度升高后也会发射较强的 x 射线. 对靶丸发射的 x 射线进行时空分辨测量, 可得到靶丸压缩形状随时间的变化过程, 从而获得内爆压缩相关参数. 对壳层和芯部示踪元素 (氘或氚) 辐射的 x 射线进行谱分辨测量, 可得到内爆过程中等离子体状态参数.

实验中我们利用高时空分辨的 MCP (micro-channel plate) 选通 x 射线皮秒分幅相机 (XFC)<sup>[7,8]</sup> 获

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划 (批准号 863-416-3) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: cjx9281@163.com 电话: 0816-2494592.

取具有时间分辨和二维空间分辨的内爆压缩图像,得到了靶丸辐照均匀性、内爆压缩对称性、径向会聚比、内爆速度以及靶丸半径随时间的变化关系.用快时间分辨  $x$  射线条纹相机(XSC)加多针孔成像获取内爆压缩时空信息,并由此得到内爆时间和内爆速度,获得的结果与分幅相机结果互相印证.并采用平面晶体谱仪(PCS)获得靶壳层材料发射的  $x$  射线光谱分布,根据局域热平衡模型建立离子谱线强度比与电子温度的关系,最后得到了靶壳层等离子体平均电子温度.

### 3. 实验条件和布局

实验采用基频光打靶,波长为  $1.06\mu\text{m}$ .为减少超热电子预热,采用长脉冲和离焦方式打靶,以降低入射激光功率密度.脉宽为  $0.8\text{--}1.0\text{ns}$ ,8 路激光总能量为  $2.1\text{--}3.8\text{kJ}$ ,离焦量分别为  $3R, 4R$  和  $5R$ , ( $R$  为靶球半径).当聚集状态为  $5R$  时,8 束激光沿主光轴分别通过靶球外切正方体的 8 个顶点,这种状态可改善激光辐照的均匀性.实验用靶为充 DT 气体的玻璃微球,靶球直径为  $476\text{--}531\mu\text{m}$ ,壁厚  $0.81\text{--}1.0\mu\text{m}$ ,DT 气压为  $0.42\text{--}0.63\text{Mpa}$ .

实验布局见图 1,靶置于靶室中心.XFC 安置在靶室正西的水平法兰孔上,相机时间分辨  $\sim 60\text{ps}$ ,空间分辨  $15\mu\text{m}$ ,谱响应  $0.1\text{--}10\text{keV}$ ,画幅数 12 幅,输出图像用  $2033 \times 2044$  像素的高分辨可见光 CCD 记录.该相机用来获取具有时间分辨和二维空间分辨的内爆压缩图像.

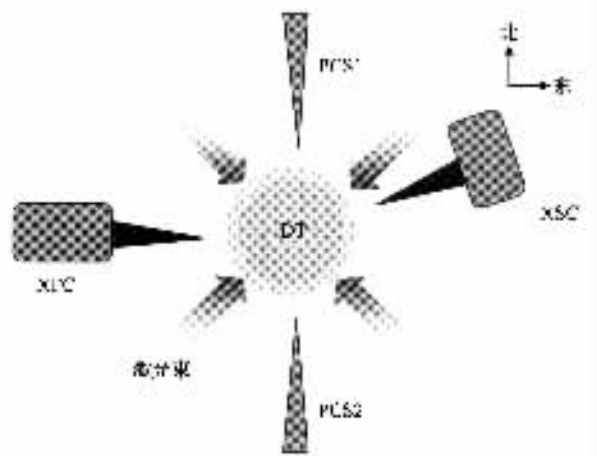


图 1 神光 II 直接驱动内爆压缩实验相机布局图

兰孔上,相机时间分辨  $\sim 6\text{ps}$ ,空间分辨  $\sim 15\mu\text{m}$ ,光阴极谱响应  $0.1\text{--}10\text{keV}$ ,阴极强度均匀性好于  $\pm 7\%$ .采用 5 针孔成像,以确保靶球直径成像到条纹相机狭缝上而被记录.该相机用来获取内爆压缩时空信息.

两台  $x$  射线平晶谱仪(TAP 晶体,晶格常数为  $2.575\text{nm}$ )分别位于靶室正南和正北下方与水平面夹角呈  $55^\circ$ 处,晶体中心距靶  $115\text{mm}$ ,两谱仪均用  $30\mu\text{m}$  厚度的铍膜加  $3\text{--}8\mu\text{m}$  厚度的铝膜为挡光膜,谱线采用已标定过的 5F 软  $x$  射线胶片记录.

### 4. 实验结果

#### 4.1. 内爆压缩均匀性和对称性

内爆压缩均匀性和对称性由入射激光功率平衡程度和入射激光光束质量以及靶球的制作精度决定.利用分幅相机获得的 12 幅内爆压缩时空分辨像见图 2,图中  $t_0$  为分幅相机开始记录的起始时间,该时间未同入射激光脉冲关联.同一微带两幅像之间的时间间隔为  $47\text{ps}$ .图 2(a)是激光辐照不对称的典型结果,从图中第一条微带( $t_0$  对应的微带)可观察到入射激光主要分布在南北两个半球上,有激光辐照的地方压缩速度快,无激光辐照的地方压缩速度慢,压缩到后期的图像(第三条微带)近似为正交椭圆形.图 2(b)是经过改善激光入射条件后激光对称辐照的典型结果,从图中观测到靶球压缩形状随时间的变化过程十分清晰.在内爆初期,辐照到靶球上的光斑分布十分明显,随着时间的增加,图像分布呈车轮状,压缩后期图像呈正交十字花分布,整个时间序列图像直接反映了内爆压缩中的流体动力学过程.压缩后中心靶球辐射强度大,其直径为  $80\text{--}100\mu\text{m}$ .

#### 4.2. 内爆压缩比

内爆压缩比是燃料的初始体积与燃料压缩到最小体积之比,与其半径收缩比成三次方关系.半径收缩比则定义为压缩前靶丸的初始半径与燃料压缩到最后的热斑半径之比.内爆压缩比主要采用高时空分辨的  $x$  射线皮秒分幅相机和多针孔条纹相机获取.分幅相机在时间分辨的同时具有二维空间分辨能力,是获取内爆压缩比的主要诊断工具.对获得的图像(见图 2)沿各方向进行强度扫描,可方便的得

XSC 安置在东北方向直径为  $200\text{mm}$  的水平法

到内爆对称性和压缩比. 采用单针孔成像的  $x$  射线条纹相机只有一维时间分辨和一维空间分辨, 测量内爆压缩比精度较差. 采用线阵针孔阵列代替单针孔成像可提高测试精度.

分幅相机得到不同发次靶球半径收缩比为 5.2—8.2, 对应的体压比为 140—550 倍. 条纹相机得到靶球半径收缩比为 4.0—5.5 倍. 不同探测器得到同一发数据能相互自治.

4.3. 内爆时间和内爆速度

内爆时间定义为靶球由初始半径压缩到最小半

径所用的时间, 内爆速度则是靶球初始半径与压缩到最小半径之差与内爆时间之比. 条纹相机具有连续的时间分辨, 是测量内爆时间和内爆速度的主要诊断工具. 图 3(a) 示出了 5 针孔  $x$  射线条纹相机成像原理, (b) 是利用 5 针孔  $x$  射线条纹相机获得的烧蚀靶压缩时空分辨像, 水平方向是时间分辨方向, 竖直方向是空间分辨方向. (b) 中第三幅图像空间尺寸最接近靶球直径, 图像从左到右的上下两条斜边是靶球外表面压缩随时间变化径迹, 图像斜率越大, 表明靶球压缩越好, 从图中可观察到靶球明显的压缩过程.

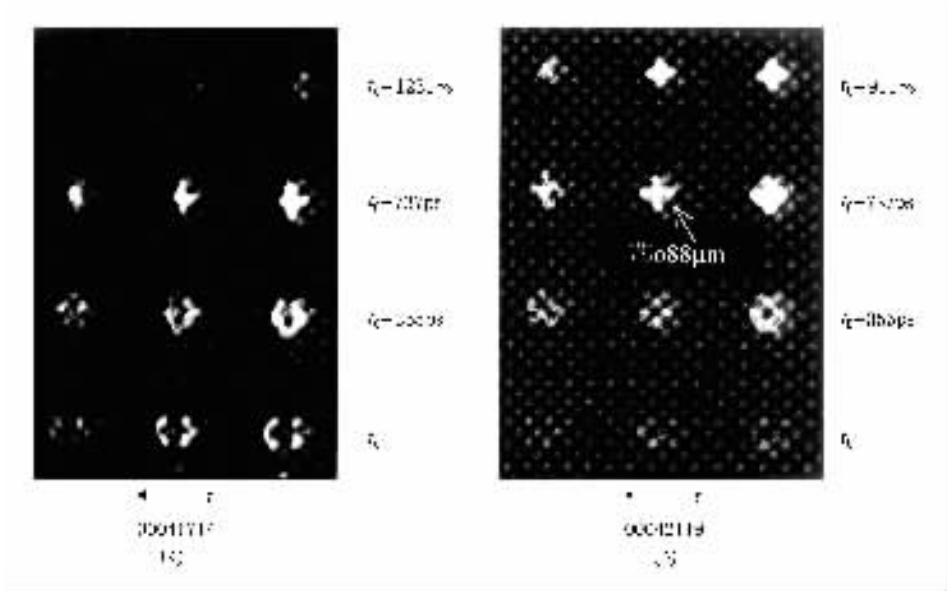


图 2 烧蚀靶 12 幅内爆压缩时空分辨像

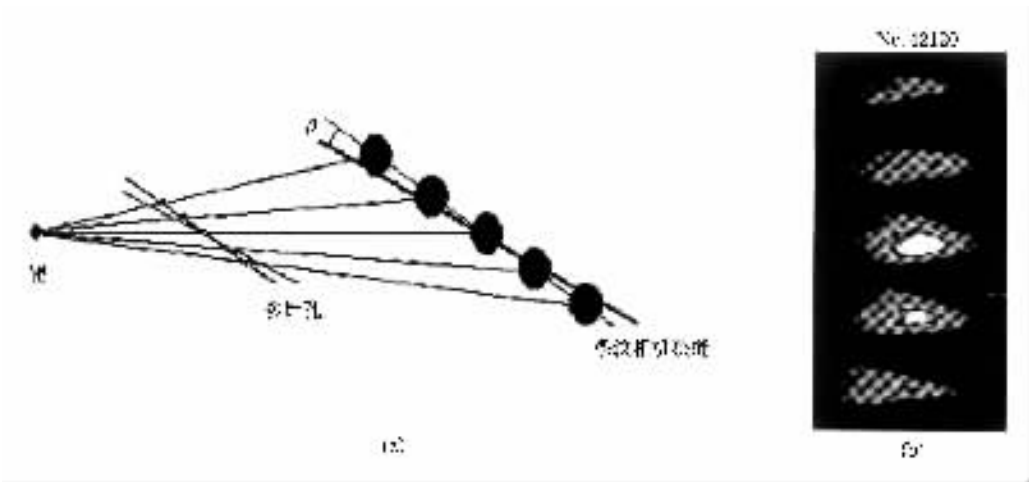


图 3 多针孔条纹相机成像原理和靶球压缩时空分辨像

用条纹相机测到不同发次内爆时间为 1.0—1.5ns, 平均内爆速度为  $(1.3—2.9) \times 10^7$  cm/s (压缩

图像斜率为靶球的内爆速度). 分幅相机测到不同发次平均内爆速度为  $(1.4—2.6) \times 10^7$  cm/s. 两种相机

测到的同一发次内爆速度基本一致.

4.4. 壳层等离子体平均电子温度

电子温度诊断谱线选择类氢离子  $1s-2p$  或  $1s-3p$  跃迁及类氦离子  $1s^2-1s2p$  或  $1s^2-1s3p$  跃迁线, 波长范围  $0.522-0.665\text{nm}$ . 图 4 是采用平面晶体谱仪获得的壳层材料发射的  $x$  射线光谱分布. 用黑密度计对记录谱线进行扫描, 得到所测谱线的黑密度值, 然后进行 5F 软  $x$  射线胶片的响应特性修正和挡光膜对  $x$  射线的吸收予以补偿, 即可以得到谱线的强度分布 (见图 5(a)). 在计算相对谱强度时, 对出现重叠峰的谱线进行了剥离处理.

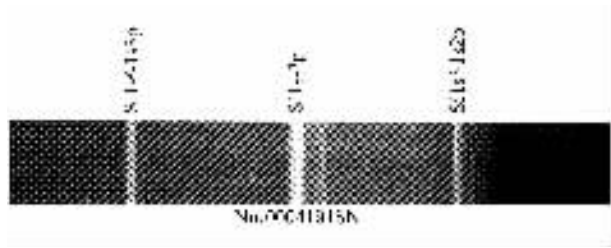


图 4 壳层材料发射的  $x$  射线光谱分布

为了由测量的谱线强度确定等离子体电子温度, 需要建立线强比随电子温度的变化关系. 设核电荷为  $Z$ ,  $r$  阶电离的离子从  $n$  能级到  $m$  能级自发辐射跃迁谱线强度为  $I_{nm}^r$ ,  $s$  阶电离的离子从  $q$  能级到  $p$  能级自发辐射跃迁线强度为  $I_{qp}^s$ . 在等离子体光性薄条件下, 两条谱线强度比为

$$R = I_{nm}^r / I_{qp}^s = \frac{\lambda_{qp}^s A_{nm}^r N_n^r}{\lambda_{nm}^r A_{qp}^s N_q^s}, \tag{1}$$

式中  $\lambda$  为跃迁波长.  $A$  为跃迁概率,  $N_n^r$  和  $N_q^s$  分别为  $n$  和  $q$  激发能级上的离子数. 在局域热动平衡 (LTE) 条件下, 激发态离子满足 Boltzmann 分布, 因此

$$R(Te) = \frac{\lambda_{qp}^s A_{nm}^r g_n^s g_1^r N_1^r}{\lambda_{nm}^r A_{qp}^s g_q^s g_1^r N_1^s} \exp\left(\frac{E_m^r - E_{1q}^s}{kTe}\right). \tag{2}$$

采用全相对论多组态 Dirac-Fock 方法计算所需原子参数, 通过求解 Saha 方程, 可得到不同电离态基态离子分布  $N_1^r / N_1^s$ , 并根据局域热动平衡模型建立了离子谱线强度比与电子温度关系 (见图 5(b)). 最后得到了靶壳层等离子体平均电子温度见表 1.

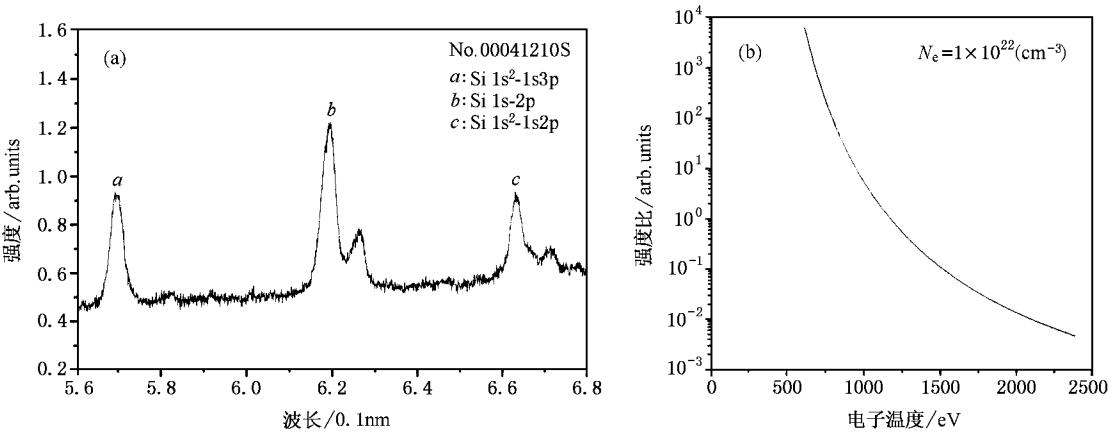


图 5 谱线的强度分布 (a) 和  $\text{Si } 1s^2-1s2p(1p)$  与  $1s-2p$  线强比 (b) 随电子温度的变化

| 表 1 神光 II 首轮内爆压缩实验结果 |          |          |       |            |          |          |                           |     |       |     |         |
|----------------------|----------|----------|-------|------------|----------|----------|---------------------------|-----|-------|-----|---------|
| 打靶<br>编号             | 靶球<br>直径 | 靶壳<br>厚度 | DT 气压 | 靶面激<br>光能量 | 脉冲<br>宽度 | 内爆<br>时间 | 速度/(10 <sup>7</sup> cm/s) |     | 半径收缩比 |     | 电子温度/eV |
|                      | /μm      | /μm      | /MPa  | /J         | /ps      | /ps      | XFC                       | XSC | XFC   | XSC |         |
| 41714                | 502      | 0.90     | 0.55  | 3084       | 793      | 963      | 2.7                       |     | 6.1   |     |         |
| 42017                | 531      | 0.84     | 0.53  | 3683       | 926      |          |                           |     | 8.2   |     | 1437    |
| 42018                | 493      | 0.90     | 0.49  | 2231       | 889      | 1321     | 1.5                       | 1.3 | 6.0   |     | 1325    |
| 42119                | 505      | 0.93     | 0.62  | 2210       | 864      |          | 2.6                       | 2.9 | 5.7   | 5.6 |         |
| 42120                | 508      | 0.90     | 0.50  | 2063       | 866      | 1021     | 1.7                       | 1.4 | 5.2   | 5.0 | 1336    |
| 42121                | 476      | 0.90     | 0.48  | 3656       | 939      |          | 2.6                       |     | 5.3   |     |         |
| 42122                | 511      | 0.90     | 0.42  | 3694       | 925      | 1539     | 1.4                       | 1.5 | 6.4   |     | 1298    |

## 5. 结 论

本次实验得到不同发次烧蚀靶半径收缩比为 5.2—8.2, 体压比为 140—550 倍, 内爆时间为 1.0—1.5 ns, 平均内爆速度为  $(1.3—2.9) \times 10^7$  cm/s, 靶壳层等离子体平均电子温度 1.3—1.4 keV. 同一物理量采用多种方法同时诊断, 数据能相互自治.

实验观测到靶丸压缩的均匀性不理想. 由于烧蚀靶是靠激光烧蚀靶丸外表面使推进层向外喷射物质的同时产生一个向内的压力压缩靶丸使之内爆, 其内爆的均匀性主要取决于激光辐照的均匀性和靶球结构的均匀性. 靶球结构的不均匀性可在制靶过程中加以控制, 而激光辐照的均匀性主要受限于激

光输出束数. 神光 II 激光装置输出激光只有 8 束, 要均匀辐照靶球有一定的难度, 特别是对靶球直径较大 ( $\sim 500 \mu\text{m}$ ) 的烧蚀靶来说难度会更大. 通过改变入射激光离焦方式, 在受激光束数限制的情况下获得了较理想的对称压缩图像.

本次实验采用了国际上先进的 MCP 选通 x 射线皮秒分幅技术和多针孔条纹成像技术获取了内爆压缩相关信息, 得到了较好的实验结果, 为研究内爆物理过程和改善激光辐照条件建立了较好的诊断技术和实验方法.

本工作得到北京应用物理和计算研究所罗平庆、张永慧等研究员的关心和支持, 神光 II 激光装置运行人员和制靶组成员的大力协作, 在此一并致谢.

- [1] Soures J, McCrory R L and Boehly T 1991 *Laser and Particle Beams* **11** 317
- [2] McCrory R L, Soures J, Verdon C and Boehly T 1993 *Plasma Physics and Control*, Nucl. Fusion Research 1992 (IAEA, Vienna), **3** 31
- [3] Kacenjar S, et al 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 463
- [4] Richardson M C et al 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 2048

- [5] Lane S M, High-Yield, direct-drive Implosions. UCRL-50021-86, 3-3
- [6] Manheimer W M and Colombant D G 1982 *Phys. Fluids* **25** 1644
- [7] Cheng J X et al 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 596 (in Chinese) [成金秀等 1999 强激光与粒子束 **11** 596]
- [8] Cheng J X et al 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 282 (in Chinese) [成金秀等 2000 物理学报 **49** 282]

## Implosion compression characteristic of direct-driven ablation target with 1.06 $\mu\text{m}$ laser<sup>\*</sup>

Cheng Jin-Xiu Zhen Zhi-Jian Chen Hong-Su Miao Wen-Yong Chen Bo Wang Yao-Mei Hu Xin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineerin Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 13 October 2003 ; revised manuscript received 16 January 2004)

### Abstract

This paper describes the diagnostic techniques and experimental methods used for investigating the properties of implosion compression in direct drive. Several diagnostic techniques with fine time, space and spectrum resolution are employed to obtain the information concerning implosion, such as radiation uniformity on the capsule, compression symmetry, volume compression ratio, implosion time, implosion velocity and average electron temperature of the capsule shell. Some of the typical results measured in the experiments are presented and a simple discussion is also given.

**Keywords:** laser ablation, direct drive, diagnostics techniques

**PACC:** 5250J, 5240, 5270

<sup>\*</sup> Project supported by the National High-Technology Development Program of China (Grant No. 863 - 416 - 3).