

文章编号: 1006-9941(2010)04-0476-05

# 烟火切割技术研究进展

王鹏, 张靖

(中国人民武装警察部队学院, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 为了促进国内烟火切割技术的发展。比较了美国和中国烟火切割技术的研究历史、现状和发展趋势。结果表明,烟火切割的原理主要包括金属射流原理和化学腐蚀原理,烟火药主要以铝热剂为基础同时添加含卤素的聚合物。切割炬已经可以手持,并可以进行水下切割。切割炬上的喷嘴可以起到使能量集中的作用,切割炬必须具有安全泄压结构。烟火切割技术在抢险救援、弹药销毁等方面有着广泛的应用,在国内大力开展烟火切割技术研究很有必要。

**关键词:** 军事化学与烟火技术;烟火切割;综述

**中图分类号:** TJ5

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.025

## 1 引言

烟火切割技术是一种利用烟火药燃烧产生的高温熔融金属射流来切割金属材料,以实现在无外加能量源的情况下对金属材料实现快速切割的目的。烟火切割技术可用于抢险救援,特别适用于地震、塌方等灾害中,在无外电源的条件下对妨碍救援的金属连接件实施切割。烟火切割器材体积小、重量轻,携带方便、价格便宜可大量装备部队,大大提高抢险救援的工作效率。水下烟火切割器材能实现在水下自动点火并稳定燃烧,所以还可以用于沉船打捞,海上救援等水下抢险救援作业。烟火切割技术采用的是烟火药燃烧产生的熔融金属射流,不爆炸,不与被切金属产生机械摩擦,相对于电锯等机械切割技术具有噪声小的优点,所以可用于无声开锁。全自动电点火的烟火切割炬,可以实现远程有线遥控点火,所以可用于弹药销毁。此外烟火切割技术还可以用于热切管器或制成“切割弹”用于油井钻探。各种烟火切割器已用于水下切割作业(切割水下电缆、钢制构件及沉船打捞,如俄罗斯核潜艇沉没后,就是利用烟火药的水下切割技术打开舱门的)、航空降落伞的快速打开、无人驾驶飞机和宇宙飞船回收系统中的切割装置以及宣传气球绳索的切割等<sup>[1]</sup>。为了进一步促进国内烟火切割技术的发展,简述了美国和中国烟火切割技术的发展现状,认为国内大力开展烟火切割技术的研究,

可以提升抢险救援及弹药销毁等领域装备水平,有利于解决救援队伍装备缺乏问题,提高我国应对地震、塌方、沉船等灾害的能力。

## 2 烟火切割技术的发展与现状

### 2.1 烟火切割技术在美国的发展

#### 2.1.1 烟火药

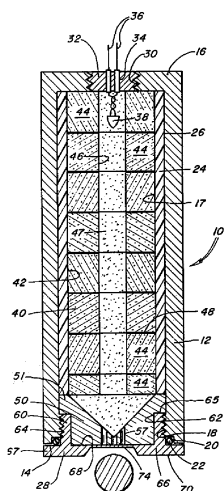
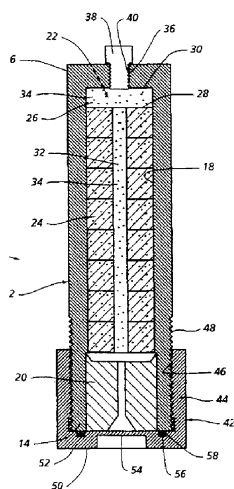
要实现烟火切割,必须先有用于烟火切割的烟火药。最早致力于研究用于烟火切割的烟火药的学者是 Helms。Helms 等<sup>[2]</sup>(1972)发明了一种用于烟火切割的安全型烟火药,该配方由镍粉、金属氧化物、铝粉或镁、镉、铋、铍、硼粉和产气剂组成。三年后,Helms 等<sup>[3]</sup>(1975)改进了烟火药配方,该配方由铝粉、金属氧化物和可燃金属粉,包括铁、铜、银、铋、钨组成,此外还含有氟碳化合物作为产气剂。Helms 等<sup>[4]</sup>(1973)进一步发明了一种能用于水下切割的烟火切割炬,如图 1 所示。此外,Hart 等<sup>[5]</sup>(1994)发明的可用于水下的烟火切割炬,其烟火药也采用了 Helms 的配方,其结构与 Helms 发明的切割炬结构相似,如图 2 所示。

Helms 的烟火药配方中氧化剂采用的是金属氧化物,在他之后其他学者的配方中开始采用硫酸盐作为氧化剂。Schroeder<sup>[6]</sup>(1978)发明了一种喷射式射孔器,其中能产生高温等离子射流烟火药的氧化剂采用的是  $\text{CaSO}_4$ 。Mueller 等<sup>[7]</sup>(1982)发明了一种专门用于金属切割的烟火药配方,其氧化剂采用了  $\text{CaSO}_4$  或  $\text{MgSO}_4$  或  $\text{SrSO}_4$  还原剂为 S、Al 以及氟碳化合物作粘结剂。

收稿日期: 2009-11-02; 修回日期: 2010-01-04

作者简介: 王鹏(1980-),男,博士,讲师,研究方向:烟火技术。

e-mail: wang\_peng@wjxy.edu.cn

图1 Helms发明的烟火切割炬<sup>[4]</sup>Fig. 1 Pyrotechnic cutting torch of Helms<sup>[4]</sup>图2 Hart发明的烟火切割炬<sup>[5]</sup>Fig. 2 Pyrotechnic cutting torch of Hart<sup>[5]</sup>

值得注意的是 Mueller<sup>[7]</sup>认为用于烟火切割,特别是用于弹药销毁的烟火药,应尽量少产生气体,因为他认为气体会造成热量损失。这个观点与其他专利中的观点相反,其他专利中多数专家认为用于烟火切割的烟火药中应包含一定量的含氟产气剂。本人认为 Mueller 的观点在一定程度上是正确的。用于烟火切割的烟火药要形成熔融金属射流必须要产生一定量的气体,但是,过多的气体,特别是  $N_2$  等惰性气体,不但对切割没有帮助,而且还会损失热量,所以烟火药产生的气体最好是  $O_2$  或  $F_2$  等能对被切割材料造成腐蚀效应的气体。

在 Schroeder 和 Mueller 之后,更多的学者沿用了 Helms 的铝热剂配方,即以铝热剂为基础进行改进,例如加入氟碳化合物作为粘结剂或产气剂,从而得到了

新的烟火药。Christopher<sup>[8]</sup>(1984)发明了一种用于热切管器的烟火药。该配方中,金属粉可选用铝、镁、铋、钛,最好采用铝粉;金属氧化物可选用氧化铁、氧化亚铁、氧化铜、三氧化铬,最好采用氧化铁和氧化铜的混合物;产气剂采用聚四氟乙烯。Kennedy 等<sup>[9]</sup>(1984)发明了一种用于烟火切割的烟火药,该配方中除了铝热剂外,还应用了偏二氟乙烯和六氟丙烯共聚物,此外还含有大约 0.6% 的石墨。Halcomb 等<sup>[10]</sup>(1990)研究出一种可以产生高压高速气体的高低温稳定铝热剂配方,该配方由可氧化的金属、氧化剂和高温稳定的产气剂组成。其中,产气剂不采用氟碳化合物,而从金属碳化物和金属氮化物中选取。

Carter 等<sup>[11]</sup>(2003)发明了一种具有高传热速率的铝热剂,该铝热剂包含有强氧化性的金属氧化物,例如  $CuO$ ,可热分解的传热介质  $Cu_2O$  和强还原剂,此外还含有产气剂、粘结剂、稀释剂和过量的氧化剂。在 Carter 的研究中有三点值得注意:

第一、选用铜作为熔融金属射流,铜在反应温度下是气态,比较各项理化参数,铜是作为熔融金属射流的最佳金属。但是 Carter 是利用  $Cu_2O$  的热分解来提供传热介质  $Cu$  的,本人并不同意 Carter 的这种做法,因为  $Cu_2O$  的热分解是吸热反应,其  $Q_p = -1.18 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  这对烟火切割是不利的。

第二、明确提出烟火药配方应为正氧平衡,燃烧产物中的  $O_2$  可以对被切割金属起到氧化腐蚀作用。

第三、熔融金属的蒸发潜热和结晶潜热是烟火切割的主要热源,也就是说,熔化被切割金属的热量主要来源于铝热剂燃烧生成的熔融金属的熔化潜热和结晶潜热。

值得注意的是下面介绍的两种烟火药配方不是以铝热剂为基础的。Woytek 等<sup>[12]</sup>(1984)发明了一种热切管器,发明中应用  $NF_4BF_4$  等盐燃烧产生的  $F_2$  和  $NF_3$  混合气体来腐蚀金属和岩层。Vladimir 等<sup>[13]</sup>(2004)发明了一种高速化学钻,这种化学钻的套管用聚氯乙烯或聚四氟乙烯制成,在化学钻被点燃后,其中的氯或氟与被切割材料发生化学反应,生成气体产物,从而达到切割的目的。这种化学钻不但可以切割金属材料,而且还能切割非金属材料,如混凝土、岩石和陶器等。其原理是,在有碳存在的条件下,无机氧化物与氯或氟反应生成低沸点易挥发的氯化物或氟化物。这种反应又称为“碳氯化反应”或“碳氟化反应”,这种反应在  $800 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  时开始,在烟火切割的高温下反应速度很快。这是以铝热剂为基础的烟火切割技术所达不到的。

Vladimir<sup>[13]</sup>在文中明确指出以铝热剂为基础的

烟火药的缺点: 铝热剂燃烧产物中的熔渣会包裹或堵塞在被切割材料表面, 阻碍进一步的热量和质量传递。也就是说, 铝热剂燃烧产物中的固态熔渣事实上对被切割材料起到了保护层的作用。本人在实验中也发现了同样的现象, 在进行烟火切割时切割炬喷射出的熔融金属射流冷却后堆积在钢筋表面, 造成所谓“挂渣”现象, 阻碍了切割的进行。所以, 以铝热剂为基础的烟火药不能用在例如钻孔的场合, 也不能切割例如混凝土、花岗岩、陶瓷等非金属材料。所以, 应控制烟火药燃烧产物中的液态熔渣量在一个较低的水平, 然而, 过少的液态熔渣量, 又会影响熔融金属射流的形成。液态熔渣量并没有精确的计算方法, 在确定烟火药配方时应综合考虑两方面影响因素, 结合具体应用场合, 通过实验确定最佳熔渣量, 得到最优烟火药配方。

### 2.1.2 切割炬

烟火切割技术除了烟火药以外, 还必须具有切割炬。将烟火药装填在切割炬中才能实现烟火切割。美国专家发明过很多种不同样式的烟火切割炬, 如 Holzman<sup>[14]</sup> 和 Thompson<sup>[15]</sup> (1973) 发明了手持式烟火切割炬, 如图 4 所示。

Phillips<sup>[16]</sup> (1973) 发明了水陆两用烟火切割炬, 如图 5 所示。

Proctor 等<sup>[17]</sup> (1986) 发明了带喷嘴的烟火切割炬, 如图 6 所示。

Sery 等<sup>[18]</sup> (1991) 发明了带支架的烟火切割炬, 如图 7 所示。

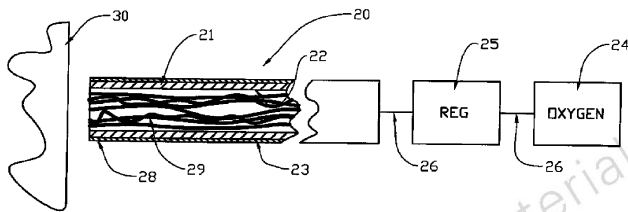


图 3 Vladimir et al. (2004) 发明的高速化学钻<sup>[13]</sup>  
Fig. 3 High-speed chemical drill of Vladimir

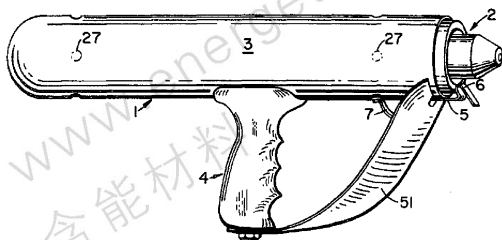


图 4 Holzman 和 Thompson (1973) 发明的手持式烟火切割炬<sup>[14-15]</sup>

Fig. 4 Pyrotechnic cutting torch of Holzman and Thompson

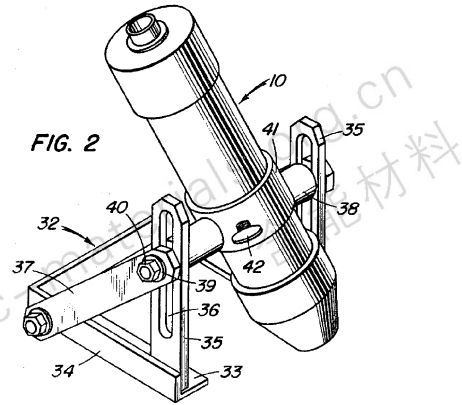


图 5 Phillips (1973) 发明的水陆两用烟火切割炬<sup>[16]</sup>  
Fig. 5 Pyrotechnic cutting torch of Phillips

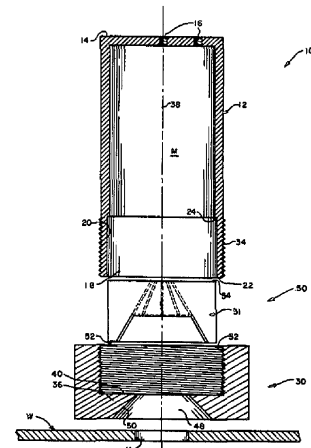


图 6 Proctor et al. (1986) 发明的带喷嘴的烟火切割炬<sup>[17]</sup>  
Fig. 6 Pyrotechnic cutting torch of Proctor

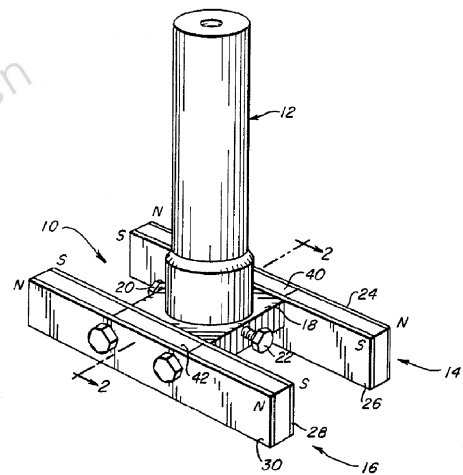


图 7 Sery et al. (1991) 发明的带支架的烟火切割炬<sup>[18]</sup>  
Fig. 7 Pyrotechnic cutting torch of Sery

此外, 还有 Geasland<sup>[19]</sup> 在 1995 年, Faccini 等<sup>[20]</sup> 在 1983 年和 Carter<sup>[21]</sup> 在 2003 年分别发明的便携式烟火切割炬, 其结构相对简单。

前文图中数字表示切割炬中不同部分,原文献有相应注释。由于图中数字较多,篇幅所限,不能一一列举。在原文献中有详细结构图和详细说明,本文仅作简要介绍,读者如想进一步研究,请查阅原文。这些烟火切割炬结构不同,各有特点,主要有以下几方面:

① 切割炬都有管状腔,管状腔中装有烟火药,形成切割炬的主体。

② 管状腔的一端有喷嘴,这是为了形成一定形状的熔融金属射流,同时使能量集中,以便于切割。喷嘴一般以石墨等耐高温材料制成。

③ 喷嘴与被切割材料之间必须保持一定的距离,这是为安全考虑,如果喷嘴紧贴被切材料,则势必造成喷嘴阻塞,造成管状腔内部升压,内部压力过大有爆炸的危险。所以切割炬喷嘴上一般开有泄压槽。

④ 管状腔的另一端装有点火装置,一般为电点火,点燃烟火药。

⑤ 有的切割炬还带有支架,以便达到固定的目的。有的装有手柄可以手持。

⑥ 有的切割炬中药柱分压装药和松装药两部分,两种装药形成同心圆柱,松装药在中间。这种压装药柱心为松装药的结构设计主要是为了可靠点火。

纵观这些不同种类的切割炬,本研究认为在结构上存在的不足主要是:随着烟火药的燃烧,烟火药柱燃烧面离喷嘴的距离越来越远,造成熔融金属射流的出口速度和压力随燃烧进行而减小。为了保证一定的射流出口速度和压力,装药量不能太大,这大大限制了切割炬长时间持续的切割。为了解决这一问题,切割炬必须具有自动推药装置,即随着药柱越烧越短,有一个装置将药柱向喷嘴方向推进,使药柱燃烧面永远保持在喷嘴附近。

## 2.2 国内烟火切割技术的研究现状

我国在烟火切割技术研究方面起步较晚,研究较少,也不够系统。台州盛世环境工程有限公司发明了一种利用铝热剂进行切割的热切管器<sup>[22-23]</sup>,其用于热切管器的烟火剂基本上由铝热剂和成气剂所组成,铝热剂70%~95%,成气剂5%~30%。铝热剂是由铝和三氧化二铁所组成,成气剂是高锰酸钾与活性炭、聚四氟乙烯或者硝化棉<sup>[23]</sup>的混合物。易建坤等<sup>[24-26]</sup>应用铁铝高热剂( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$ /添加剂=78/22/7)进行销毁弹药的实验,获得了成功。值得注意的是,易建坤认为高热剂燃烧产生的液态熔渣的量应该越多越好,气态产物的量应该越少越好,燃烧速度应该越慢越好。这个观点与 Mueller 等<sup>[7]</sup>的观点是一致的,但是,与

Vladimir 等<sup>[13]</sup>的观点正好相反。本人认为这是因为易建坤等和 Vladimir 的具体应用不一样。易建坤和 Mueller 将高热剂应用在弹药销毁领域,具体应用时将高热剂安置在要销毁弹药的上方,利用金属熔渣向下流动来熔穿弹壳引燃弹药,所以熔渣就成为传递能量的唯一介质,气态产物在这种应用中是没用的。但 Vladimir 发明的是一种化学钻头,其应用主要是在各种目标材料中进行钻孔,熔渣很容易堵塞钻孔,所以必须使燃烧产物为气态,才能顺利地由钻孔中排出。

## 3 总结与展望

综上所述,烟火切割技术的原理从单纯的高温高热向化学腐蚀方向发展,在烟火药中除铝热剂外越来越多的应用含有卤素,特别是含有氟的产气剂或粘合剂,例如应用最多的聚四氟乙烯。利用氟碳化合物燃烧产生的  $\text{F}_2$  对金属和非金属材料起到氟化腐蚀的作用,使被切割材料与 F 发生“碳氟化反应”生成低沸点易挥发的氟化物,从而实现化学切割。

对比美国和中国烟火切割技术的发展与现状,在国内大力开展烟火切割技术的研究是非常必要的,这将为国内抢险救援装备水平的提升,包括海上救援,以及弹药销毁等领域装备的现代化起到一定的推动作用。大大提高我国应对地震、塌方、沉船等灾害的能力,为最大限度地救援被困人员提供必要的技术保证。

### 参考文献:

- [1] 鸿雁. 花炮科研理论的发展和运用[J]. 花炮科技与市场, 2003(1): 13-16.  
HONG Yan. The development and application of theoretical research on fireworks[J]. *Fireworks Technology and Market*, 2003(1): 13-16.
- [2] Helms Jr, Horace H Rosner, Alexander G. Pyrotechnic composition: US 3695951[P]. October 3, 1972.
- [3] Helms Jr, Horace H Rosner, Alexander G. Pyrotechnic composition: US 3890174[P]. June 17, 1975.
- [4] Helms, Horace H Rosner, Alexander G Spencer, et al. Incendiary cutting torch for underwater use: US 3713636[P]. January 30, 1973.
- [5] George L Hart, Edwin L McCluer, Alexander G Rozner, et al. Pyronol torch: US 5372069[P]. December 13, 1994.
- [6] Schroeder, Fred. Jet perforator device: US 4084078[P]. April 11, 1978.
- [7] Mueller, Kurt F Chang, Marguerite S Farncomb, et al. Metal-cutting pyrotechnic composition: US 4349396[P]. September 14, 1982.
- [8] Christopher, Glenn B. Pyrotechnic compositions for severing conduits: US 4424086[P]. January 3, 1984.
- [9] Kennedy, Katherine L Proctor, Paul W Dow, et al. Pyrotechnic composition for cutting torch: US 4432816[P]. February 21,

- 1984.
- [10] Halcomb, Danny L Mohler, Jonathan H. High- and low-temperature-stable thermite composition for producing high-pressure, high-velocity gases: US 4963203[P]. October 16, 1990.
- [11] Carter Jr, Greg Carter Sr, Greg. Pyrotechnic thermite composition: US 6627013[P]. September 30, 2003.
- [12] Woytek, Andrew J Lileck, John T Steigerwalt, et al. Method and apparatus for perforating or cutting with a solid fueled gas mixture: US 4446920[P]. May 8, 1984.
- [13] Hlavacek Vladimir, Pranda Pavol. High-speed chemical drill: US 20040206451[P]. October 21, 2004.
- [14] Holzman, Allen L. Cutting torch: US 3734476[P]. May 22, 1973.
- [15] James C Thompson. Cutting torch: US 3741135[P]. June 26, 1973.
- [16] Phillips, Ralph O. Pyrojet cutter for underwater or land use: US 3724372[P]. April 3, 1973.
- [17] Pual W Proctor, Robert L Dow. Nozzle for self-contained cutting torches: US 4601761[P]. July 22, 1986.
- [18] Sery, Robert S Rozner, Alexander G Waldron, et al. Apparatus for attaching ordnance to barrier targets: US H865[P]. January 1, 1991.
- [19] Geasland. Thermal cutting bar: US 5472174[P]. December 5, 1995.
- [20] Faccini, Ernest C Wergen, Thomas E. Cutting torch and method: US 4371771[P]. February 1, 1983.
- [21] Carter, Greg JR. Portable metal cutting pyrotechnic torch: US 20030145752[P]. August 7, 2003.
- [22] 阮卜琴, 林西华, 刘晋仁, 等. 热切管器: 中国, CN 2670584Y[P]. 2003: 11-18.  
RUAN Bo-qin, LIN Xi-hua, LIU Jin-ren, et al. Apparatus for severing conduits: China, CN 2670584Y[P]. 2003: 11-18.
- [23] 阮卜琴, 林西华, 刘晋仁, 等. 热切管器的烟火剂及其生产工艺: 中国, CN 1544795A[P]. 2003: 11-15.  
RUAN Bo-qin, LIN Xi-hua, LIU Jin-ren, et al. Pyrotechnic compositions for severing conduits and its manufacturing technique: China, CN 1544795A[P]. 2003: 11-15.
- [24] 易建坤, 贺五一, 吴腾芳, 等. 高热剂在弹药销毁领域应用初探[J]. 工程爆破, 2004, 10(4): 21-25.  
YI Jian-kun, HE Wu-yi, WU Teng-fang, et al. Preliminary investigation into application of thermite in destruction of ammunition [J]. *Engineering Blasting*, 2004, 10(4): 21-25.
- [25] 易建坤, 吴腾芳. 高热剂燃烧法销毁薄壁弹药的试验研究[J]. 火工品, 2005(1): 17-21.  
YI Jian-kun, WU Teng-fang. Experimental study on disposal of thin-shell ammunition by thermite combustion [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2005(1): 17-21.
- [26] 易建坤, 吴腾芳, 贺五一. 用于弹药燃烧销毁的高热剂配方试验研究[J]. 爆破, 2005, 22(1): 107-111.  
YI Jian-kun, WU Teng-fang, HE Wu-yi. Experimental study on the composition of thermite applied in the ammunition disposal [J]. *Blasting*, 2005, 22(1): 107-111.

## Review on Pyrotechnic Cutting Technology

WANG Peng, ZHANG Jing

(The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The research history, current situation and development trends of pyrotechnic cutting technology in the United States and China were introduced. Pyrotechnic cutting principles include metal-jet principle and chemical corrosion principle, Pyrotechnical compounds mainly focus on thermite at the same time adding halogen-containing polymers. Cutting torch already can be held by hand, and could be carried out underwater. The nozzle on cutting torch can concentrate energy, and cutting torches have pressure relief structure for security. Pyrotechnic cutting technology has a wide range of applications in disaster rescue, ammunition destruction and so on.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic technology; pyrotechnic cutting; review

**CLC number:** TJ5

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.025