

# CrTiAlN 镀层对 M2 基高速钢切削性能的影响 \*

白力静<sup>1,2</sup> 蒋百灵<sup>2</sup> 肖继明<sup>2</sup> 文晓斌<sup>2</sup> 李玉庆<sup>2</sup>

1. 西安交通大学材料学院 西安 710049

2. 西安理工大学材料学院 西安 710049

**摘要** 分析了 CrTiAlN 镀层的组织,研究了 CrTiAlN 镀层对 M2 高速钢刀具切削性能的影响.结果表明:CrTiAlN 镀层提高了 M2 基高速钢刀具的切削性能. CrTiAlN 镀层具有良好的高温稳定性,能避免红硬性不足引起的刀具失效;CrTiAlN 镀层与 M2 基体的结合较强,具有稳定结构,能避免抗压强度下降引起的刀具失效.

**关键词** 材料表面与界面, CrTiAlN 镀层, 切削性能, 热稳定性

**分类号** TG174

**文章编号** 1005-3093(2006)01-0054-05

## The influence of CrTiAlN coating on cutting performance of M2 high speed steel

BAI Lijing<sup>1,2</sup> JIANG Bailing<sup>2\*\*</sup> XIAO Jiming<sup>2</sup> WEN Xiaobin<sup>2</sup> LI Yuqing<sup>2</sup>

1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

2. School of Material Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710049

\* Supported by National High Technology Research and Development Program of China, No.2005AA33H010 and The Great British Co-operation Program of Ministry of Education No.2003AA331060-1. Manuscript received June 29, 2005; in revised form November 14, 2005.

\*\* To whom correspondence should be addressed, Tel(029)82312520, E-mail:jiangbail@vip.163.com

**ABSTRACT** The cutting performance and mechanism for HSS twist drills with CrTiAlN coating were investigated in this paper. The results show that this CrTiAlN coating possessed stable mechanical properties including hardness, adhesion and wear resistance in high temperature due to the well thermal stability in morphology, microstructure and phase etc of coating. Therefore, enough cutting force is ensured for working in the severe cutting condition such as for dry cutting high strength steel.

**KEY WORDS** surface and interface in the materials, CrTiAlN coating, cutting ability, thermal stability

M2 高速钢 (HSS) 是常见的通用型工具钢之一。但是,用它制造的刀具仅能切削硬度 HB250~280 以下的结构钢和铸铁,因为 M2 钢加热时氧化、脱碳现象严重,刀具的红硬性下降太快,塑性变形使刀具失效<sup>[1,2]</sup>。利用物理气相沉积 (PVD) 技术在高速钢刀具表面涂覆硬质镀层,对于改善刀具切削性能和延长刀具寿命十分有效<sup>[3~6]</sup>。本文研究 CrTiAlN 镀层提高 M2 基高速钢刀具切削性能的机理。

### 1 实验方法

为了保证刀具能承受极大的剪应力<sup>[7]</sup>、具有正常的磨损性能<sup>[8,9]</sup>,制备具有成分梯度结构的 Cr-

Cr<sub>x</sub>N-CrTiAlN 的镀层。

采用闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术,使用英国 Teer 公司的 UDP850/4 设备<sup>[10~12]</sup>制备镀层。整个工艺过程包括:表面离子清洗、金属 Cr 打底、Cr-Cr<sub>x</sub>N 界面过渡和制备 CrTiAlN 复合梯度镀层。沉积条件为:真空度 <4×10<sup>-3</sup>Pa,沉积气压:1~1.33×10<sup>-1</sup>Pa,基体温度 <300℃,沉积速率:1 μm/h。镀层中的 Cr、Ti、Al 三种金属含量由每种靶材产生的离子流密度来决定,而靶材的离子流密度则由外加电流大小来控制;采用质量流量控制器来控制 Ar 气流量;用光谱强度监视器 OEM(Optical Emission Method) 监控 Cr 的发射光谱的强度变化,用压电阀动态控制 N<sub>2</sub> 的流量。

钻削实验选用 Z5125 立钻;钻头用相同基体的 M2 高速钢钻头和 CrTiAlN 镀层 M2 钻头,直径为 6 mm;试验在干式无润滑切削条件下进行,以刀具外

\* 国家八六三计划新材料领域 2005AA33H010 和教育部中英国际合作 2003AA331060-1 资助项目。

2005 年 6 月 29 日收到初稿;2005 年 11 月 14 日收到修改稿。

本文联系人:蒋百灵,教授

缘转角处的  $VB_{max}$  值达到 0.35 mm 作为磨钝标准, 确定钻头的切削寿命. 为了尽量排除钻头切削时的分散性, 选取取 3 根钻头取其平均值.

用 HXS-1000 型维氏硬度仪在 500 g 载荷下测定镀层的显微硬度. 用洛氏硬度计和 Teer-ST200 型划痕试验机测定镀层与基体的结合强度. 在 150 kg 载荷的作用下产生压坑, 根据金刚石划针的滑行速度和加载速度计算出试片在划穿时的临界载荷. 实验参数为: 预加载荷 20 N, 加载速度 100 m/min, 滑行速度 100 m/min. 用 Teer-POD-1 型针盘试验机测定镀层的摩擦和磨损性能. 在 20 N 载荷作用下用直径 5 mm WC 球以 100 m/s 的速度在镀层表面上滑动, 磨损率测定时间为 1 h; 摩擦系数测定时间为 4 h. 用 CSPM-2000 扫描探针显微镜观察镀层的表面.

## 2 结果与讨论

CrTiAlN 镀层的硬度 ( $2980HV_{0.01}$ ) 比 M2 高速钢的常温硬度 (HRC63-66) 高, 因此具有较高的耐磨损性能, 磨损率为  $5.47 \times 10^{-16} m^3/Nm$ , 摩擦系数约为 0.6; CrTiAlN 镀层具有成分梯度, 减小了镀层内的应力与界面突变. 同时, 镀层与高速钢基体结合面处是 Cr 层, 然后再逐渐添加 N 元素, 而 Cr 与 Fe 之间有良好的固溶性, 隔离了 N 与铁基体接触, 避免了镀层的脆化现象. 这样的元素选择和分布提高了 CrTiAlN 镀层与 M2 高速钢的结合性, 使结合强度大于 60 N.

镀层中的晶粒均为纳米级 (图 1), 使得镀层表面裂纹的形成与扩展功高, 裂纹不易形成, 即使形成也不易扩展. 因此镀层的韧性也高.

刀具镀层同时具有良好的膜/基结合力、韧性以及硬度, 使镀层具有较高的的磨损性能<sup>[13]</sup>. 与没有镀层的钻头相比, 在钻削 45 钢、30CrMnSi 和 D406A 超高强度钢时, 有 CrTiAlN 镀层的高速钢钻头的寿命分别提高了大约 19、15.2 和 6 倍. 由此可见, 镀层具有良好的切削性能.

刀具的磨损在低温下以机械磨损为主, 在高温下以热磨损为主. 在钻削过程中, 97%~99% 的动力消耗转化为热, 在干切削条件下, 没有切削液的润滑、冷却与排屑等作用, 刀具的热磨损更严重. CrTiAlN 镀层钻头具有良好的抗高温磨损性能. 图 2 为钻削 45 钢和 30CrMnSi 钢时, CrTiAlN 镀层和未镀层钻头主切削刃后刀面  $VB_{max}$  平均值随钻孔数的变化曲线.

图 2 表明, M2 钻头的磨损增长很快, 几乎不经过正常磨损阶段即达到磨钝标准或失效, 而 CrTiAlN 镀层钻头磨损增长较为缓慢, 明显延长了刀具的平稳磨损阶段. 切削硬度与强度越高的材料, 工件材料塑性变形引起的切削热以及对刀具的切削阻力影响越大, 该趋势越明显.

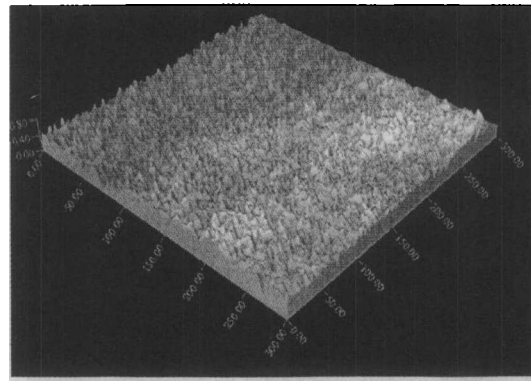


图 1 CrTiAlN 镀层的 AFM 表面形貌

Fig.1 AFM morphology surface of CrTiAlN coating

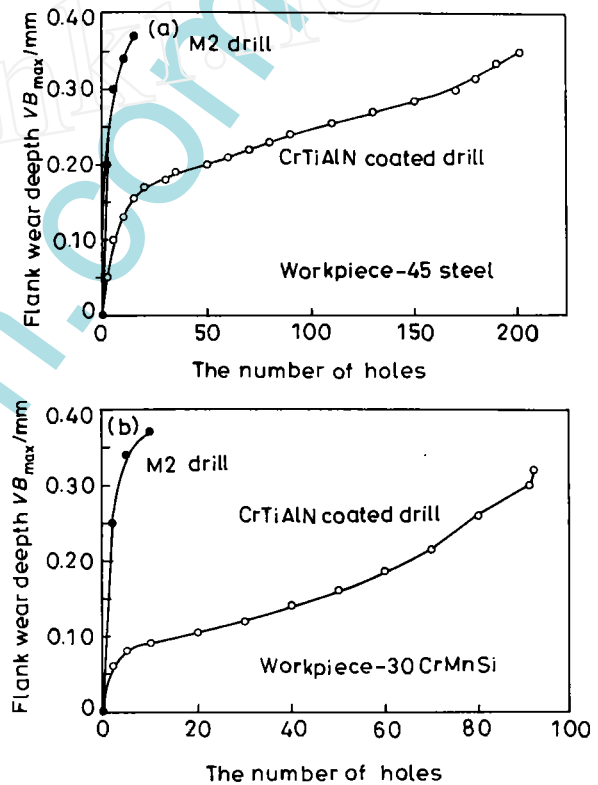


图 2 切削过程中不同钻头的磨损曲线

Fig.2 Variation of flank wear with cutting holes for CrTiAlN and M2 HSS drill

由图 3 可见, 在室温下镀层致密, 均匀性好, 显微组织细小, 断口没有明显的晶界与微裂纹或针孔等缺陷. 在 600 °C, 镀层的形貌基本无变化, 只出现纤维化趋势; 在 800 °C, 镀层的组织为柱状, 断口出现凹凸不平, 但晶粒细小, 尺寸小于 1  $\mu m$  且贯穿整个镀层. 薄膜的重结晶后晶粒越细小, 其热稳定性也越好<sup>[14]</sup>. 除柱状晶界外, 没有穿过镀层截面的裂纹或其它明显的缺陷. 可见镀层在 800 °C 仍然保持着形貌和结构的高致密和稳定性.

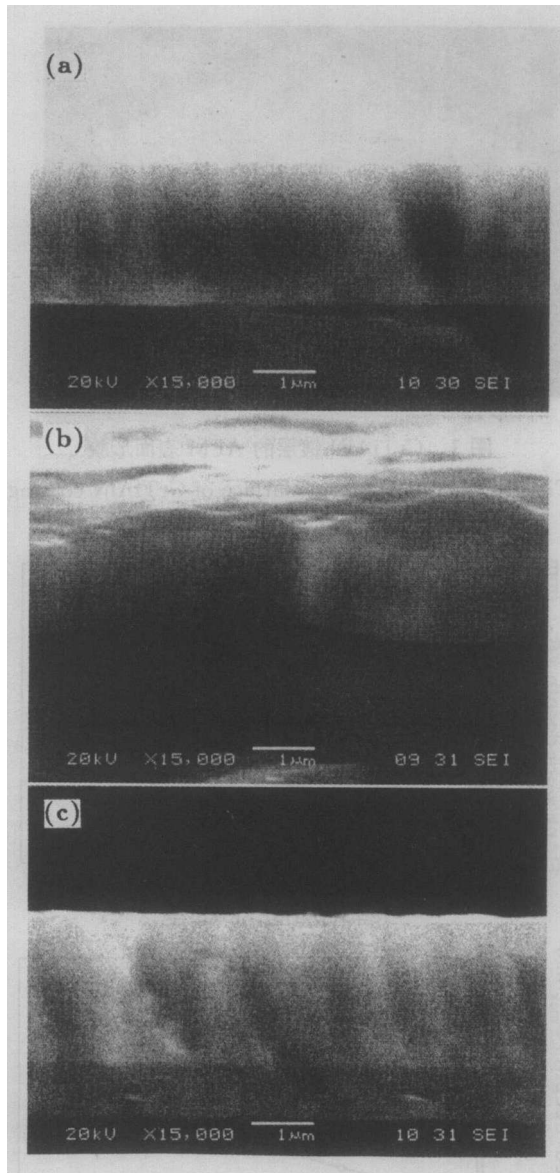


图3 不同温度退火后 CrTiAlN 镀层的断面形貌

Fig.3 Cross-section of CrTiAlN coating after annealing in different temperatures (a) 20 °C; (b) 600 °C; (c) 800 °C

在室温下, CrTiAlN 镀层中晶相主要为金属 Cr 和 Cr<sub>2</sub>N、CrN 以及微量的 TiN(图 4a). 镀层中 Cr<sub>2</sub>N 相具有较好的热和化学稳定性, Cr-Ti-N 体系具有较高的硬度, 且与 CrN 匹配良好<sup>[15]</sup>. Cr 和 CrN 具有比较高的抗氧化性能<sup>[16]</sup>. 更重要的是, 在一定条件下, TiN 和 CrN 共存, 其显微硬度即使在高达 750 °C 时, 可高达 30 GPa<sup>[17]</sup>. 600 °C 时, 镀层基本无相变, Cr<sub>2</sub>N 相减少, 但 CrN 含量的增多(图 4b), 提高了镀层的抗高温氧化性能; 800 °C 时, 镀层仍存在 Cr 及 CrN, 新出现氧化物 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(图 4c) 进一步提高了镀层的抗高温氧化性能. 这表明, 在 M2 高速钢刀具发生软化时, 该镀层不仅具有比较高的高温硬度, 还能抑制刀

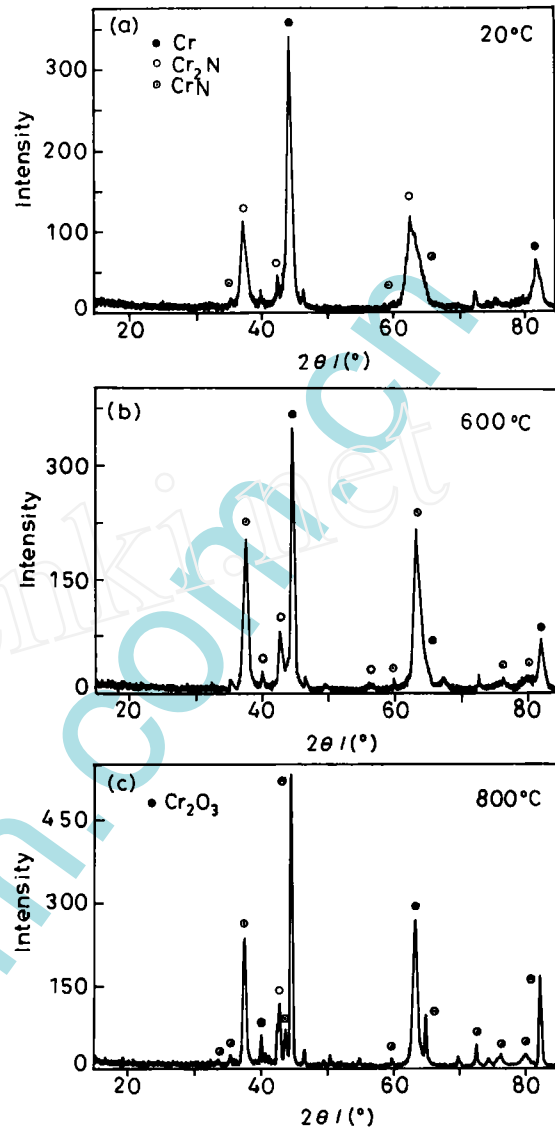


图4 不同温度退火后 CrTiAlN 镀层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of CrTiAlN coating after annealing in different temperatures (a) 20 °C; (b) 600 °C; (c) 800 °C

具的进一步氧化, 保证了刀具的化学稳定性.

从图 5 可知, 镀层复合体系在 600 °C 之前保持良好硬度. 即使在 700 °C 加热 2 h 冷却后, 硬度仍可达到 HRC49.5.

以上结果表明, 600 °C 之前镀层的微观结构、相组成以及硬度几乎无变化, 使镀层具有稳定的抗热磨损性能.

在切削过程中, 切削温度的上升不仅导致刀具的红硬性下降, 也使工件材料软化而易于加工. 由表 1 可见, 在钻削过程中镀层刀具的切削力始终小于没有镀层的, 说明 CrTiAlN 镀层具有良好的高温稳定性. 如果忽略进给运动所消耗的功, 并假定主运动所消

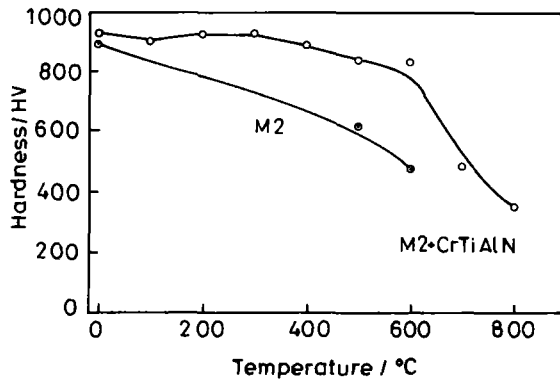


图5 M2+CrTiAlN 复合体系和 M2 高速钢的硬度与退火温度的关系

Fig.5 Hardness of CrTiAlN and uncoated M2 HSS after annealing in different temperatures

表 1 在切削过程中刀具的平均切削力 (/N)

Table 1 Average values of cutting force(/N) for M2 drill and M2 drill with CrTiAlN coating

Cutting tool	Workpiece material		
	45 steel	30CrMnSi	D406A
With coating	1043.5	899.5	642.08
Without coating	1123	1003.67	773.6

耗的功全部转化为热能,则单位时间内产生的切削热  $Q = F_z V$  ( $F_z$ , 主切削力;  $V$ , 切削速度), 那么, 刀具的切削热量与切削力成正比。镀层形貌和相结构表明, 镀层降低刀具切削力和切削热的原因在于 CrTiAlN 镀层具有结构和相的高温稳定性。这提高了刀具的高温磨损性能, 从而提高了刀具的切削寿命。

但是, 从表 1 还可发现, 对于不同的工件材料, 镀层对刀具切削力的影响不同: 对于 45 钢, 切削力下降 7%; 对于 30CrMnSi, 下降 10%; 对于 D406A, 下降 17%。可见, 被加工材料的硬度与强度越高, 镀层的改性作用越小。事实上, 刀具的失效是因为刀尖发生塑性变形而失去正常的切削性能。为了保证刀具的正常切削, 刀具的硬度应该至少比工件材料的高 4.5 倍。随着切削热的增加, 刀具与工件材料之间的硬度差逐渐减小, 最终刀具失去切削能力。CrTiAlN 镀层在高温下稳定的形貌、结构和结合力可以维持镀层刀具的硬度, 使之具有较高的红硬性, 从而保持了对高速钢 (例如 45 钢) 刀具的切削性能。但是, D406A 超高强度钢引起的切削阻力增加最多高达 30%, 切削阻力过大, 镀层良好的热稳定性也只能使切削阻力下降 17%, 这时刀具往往表现为崩刃或断裂等破坏现象。从图 6 可见, 镀层随着刀具基体较大的塑性变形, 在剪切力的作用下撕裂和脱落。

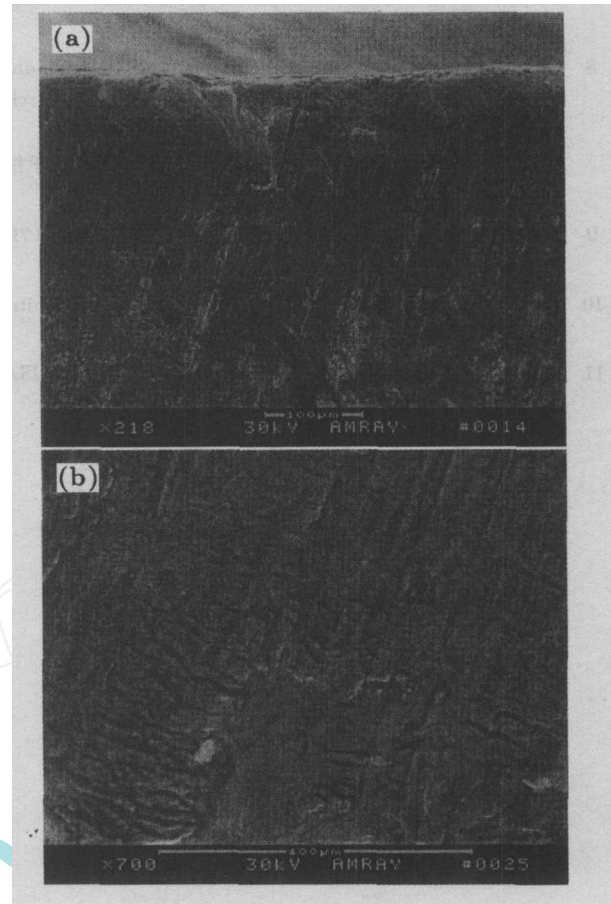


图6 镀层刀具失效的 SEM 照片

Fig.6 SEM micrograph of coated drills failure (a) crack in the cutting edge; (b) coating breaking down owing to the drills distortion

### 3 结 论

CrTiAlN 梯度镀层能显著提高刀具的切削能力, 镀层的高硬度和稳定的相结构保持了镀层刀具的红硬性, 良好的结合强度和韧性保证了镀层的抗磨损能力。CrTiAlN 镀层能避免由切削热使刀具硬度下降引起的刀具失效。切削硬材料、高强度钢和超高强度钢时, CrTiAlN 镀层能使其切削寿命分别提高 19 倍、15.2 倍和 6 倍。

### 参 考 文 献

- 1 B.Mills, Journal of Materials Processing Technology, **56**, 16(1996)
- 2 C.Kwietniewski, W.Fontana, C.Moraes, A.da S.Rocha, T.Hirsch, A.Reguly, Surface and Coatings Technology, **179**, 27(2004)
- 3 V.Derfingler, H.Brandel, H.Zimmermann, Surface and Coatings Technology, **113**, 286(1999)
- 4 F.Klocke, T.Krieg, Annals of the CIRP, **48**, 515(1999)
- 5 Andreas N. Panckow, Jorg Steffenhagen, Friedhelm Lierath, Surface and Coatings Technology, **163**, 128(2003)
- 6 S.G.Harris, A.C.Vlasveld, E.D.Doyle, P.J.Dolder, Surface and Coatings Technology, **133~134**, 383(2000)

- 7 Sture Hogmark, Staffan Jacobson, Mats Larsson, *Wear*, **246**, 20(2000)
- 8 ZHU Zuming, GUO Yanfeng, SHI Nanlin, ZHU Guiqiu, FENG Jiwei, *Chinese Journal of Materials Research*, **16**(1), 67(2002)  
(朱祖铭, 郭延风, 石南林, 朱桂秋, 冯纪伟, 材料研究学报, **16**(1), 67(2002))
- 9 Z.-H.Jin, *Surface and Coatings Technology*, **179**, 210(2004)
- 10 Dennis G. Teer, *Magnetron Sputter Ion Plating*, United Kingdom, 3rd Feb. 1993, GB2258343
- 11 Dennis G. Teer, *Magnetron Sputter Ion Plating*, USA, 17th Sept. 1996, USA5556519
- 12 Dennis G. Teer, *Magnetron Sputter Ion Plating*, Europe, 7th Jan. 1993, EP0521045
- 13 H.K&Tonshoff, A.Mohlfeld, *Surface and Coatings Technology*, **93**, 88(1997)
- 14 ZHAO Hongyu, FAN Qiulin, SONG Lixin, SHI Erwei, HU Xingfang, *Journal of Inorganic Materials*, **10**(1), 9(2004)  
(赵红雨, 范秋林, 宋力昕, 施尔畏, 胡行方, 无机材料学报, **10**(1), 9(2004))
- 15 Allan Mathews, *Surface and Coatings Technology*, **115**, 222(1999)
- 16 H.Schulz, E.Bergmann, *Surface and Coatings Technology*, **50**, 53(1991)
- 17 X.T.Zeng, S.Zhang, C.Q.Sun, *Thin Solid Films*, **424**, 99(2003)

www.cnki.net  
www.spm.com.cn