

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.06.001

ZrTiAlN 涂层的残余应力分析

丁泽良, 黄志翔, 陈飞龙, 张诗淼

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用有限元法分析 Q235 A 基 ZrTiAlN 涂层的残余应力, 研究涂层厚度、过渡层对残余应力的影响。结果表明: 层-基界面边缘处存在明显应力集中现象; 涂层内的切向应力和轴向应力主要表现为拉应力, 径向应力则表现为压应力。涂层厚度的变化对层-基界面应力的性质与分布影响很小; 但随着涂层厚度的增加, 界面处的切向应力增大, 径向应力和轴向应力减小。加入过渡层后, 涂层内残余应力明显减小, 其中含有 TiAl/Zr 过渡层的涂层的切向应力、轴向应力和径向应力的最大值分别降低 33%, 25% 和 14%。

关键词: ZrTiAlN 涂层; 有限元分析; 残余应力; 过渡层

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)06-0001-05

Analysis of Residual Stress in ZrTiAlN Coating

Ding Zeliang, Huang Zhixiang, Chen Feilong, Zhang Shimiao

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The residual stress in ZrTiAlN coating on Q235 A substrate was analyzed by finite element method. Effects of coating thickness and interlayer on residual stress were investigated. The results showed that the critical stress concentration occurred at the boundary of the interface between ZrTiAlN coating and Q235 A substrate. The tangential stress and axial stress in ZrTiAlN coating were mainly tensile stress and the radial stress was mainly compressive stress. The change of the coating thickness had little impact on the nature and distribution of interface stress. With the increasing of coating thickness, the tangential stress at the interface increased, while the radial stress and the axial stress decreased. The residual stresses in the coating with interlayer were obviously decreased. The maximum value of the tangential stress, axial stress and radial stress of the coating with TiAl/Zr interlayer were decreased by 33%, 25% and 14%, respectively.

Keywords: ZrTiAlN coating; finite element analysis; residual stress; interlayer

0 引言

采用磁控溅射工艺制备的 TiN, TiAlN, TiAlSiN 等氮化物涂层, 因具有硬度高、抗氧化、耐磨性好等优点, 已在切削刀具、模具、航空等工程领域中获得了广泛应用^[1]。但由于涂层与基体材料的化学相容性、物性参数等相差较大, 使得制备的涂层与基底间易产生较大的残余应力^[2-9]。而过大的残余应力

不仅影响涂层的致密性和性能参数, 且会导致层-基结合失效和涂层剥离^[10-11]。

ZrTiAlN 涂层是一种新型超硬涂层材料, 其出色的高硬度、耐磨性、抗氧化性等特点, 使其成为近年材料学科研究的热点之一^[9,12]。可以查到的文献表明, 国内外关于 ZrTiAlN 涂层残余应力的研究较少, 对其应力分布、影响因素也不甚清楚。因此, 研究

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5019), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2015B565)

作者简介: 丁泽良(1966-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事陶瓷材料和纳米涂层等方面的教学与研究, E-mail: xmcdzl@163.com

ZrTiAlN 涂层残余应力的分布及其影响因素,对涂层的设计与制备有着重要的指导意义。

本文运用有限元软件 ANSYS 13.0 分析磁控溅射工艺制备的 Q235 A 基 ZrTiAlN 涂层的残余应力,研究涂层厚度、过渡层对残余应力的影响。

1 数值模型

采用磁控溅射工艺^[13-15],在 Q235 A 基体上制备 ZrTiAlN 涂层,利用有限元分析软件 ANSYS 13.0,对 ZrTiAlN 涂层内残余应力进行有限元计算与分析。选取轴对称圆柱形模型和 PLANE 42 单元结构。

由于涂层厚度远小于基体尺寸,远离涂层的基体对涂层残余应力影响很小,分析时可以考虑与涂层相近的部分基体的应力分布情况。设 Q235 A 基体的厚度为 50 μm 、直径为 50 μm 、涂层厚度为 1~5 μm ,取试样的 1/4 断面进行有限元分析,几何模型如图 1 所示。图中 H 表示基体的厚度, h 表示涂层厚度。涂层与基体材料的性能参数见表 1。

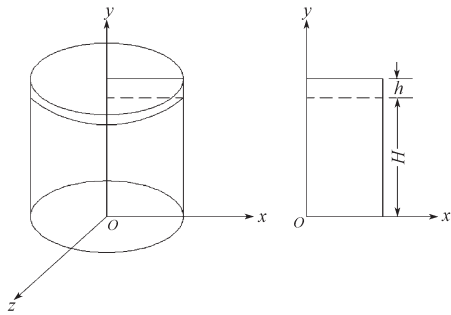


图 1 有限元分析的几何模型

Fig. 1 The geometric model of finite element analysis

表 1 涂层与基体材料的性能参数

Table 1 Property parameters of coating and substrate materials

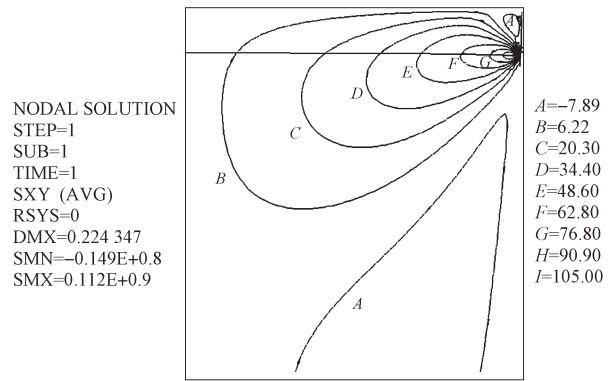
材料	弹性模量 / GPa	线膨胀系数 / $(\times 10^{-6} \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	泊松比	热传导系数 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Q235 A	206	12.0	0.27	45.0
Ti-Al	170	9.5	0.26	15.2
Zr	96	6.5	0.34	16.7
ZrTiAlN	240	6.0	0.23	16.5

2 结果与讨论

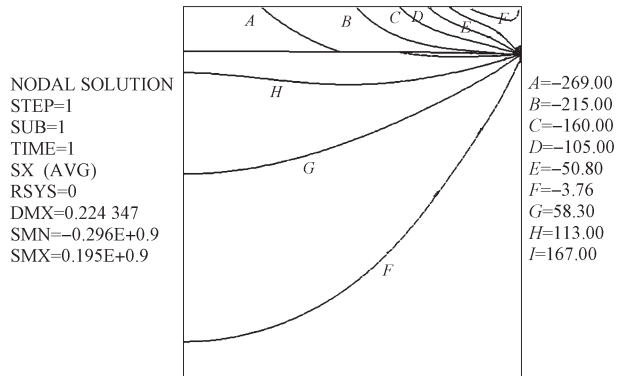
2.1 涂层残余应力的分布

ZrTiAlN 涂层厚度为 3 μm 时,涂层内残余应力的分布云图见图 2。由图可知,3 种应力分量在层-基界面边缘处的应力等值线较密集,出现了明显的应力集中现象。涂层内径向应力主要表现为压应力,且沿径向减小,在涂层边缘达最小值;切向应力表现为拉应力,沿径向增大,在界面边缘处达最大值;轴

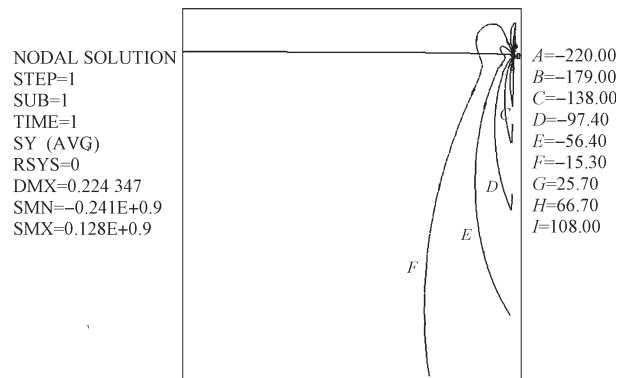
向应力以压应力的形式分布在涂层中,但随着径向尺寸的增大,压应力转化为拉应力,并在涂层外边缘达最大值。拉应力的存在可能导致涂层表面出现微裂纹,并向界面中心区域扩张,最终导致涂层的失效分离^[10];而适当的压应力有助于提高涂层的致密性,但压应力过大会导致界面处起皱、曲翘甚至剥落,不利于层-基之间的结合^[6,16]。



a) 切向应力



b) 径向应力



c) 轴向应力

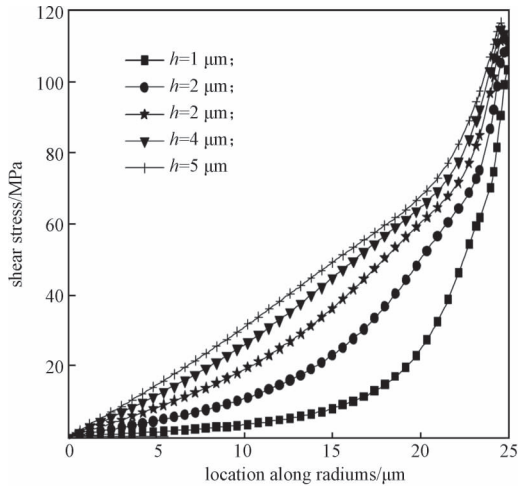
图 2 涂层应力分布云图

Fig. 2 Contour plot of coating stress

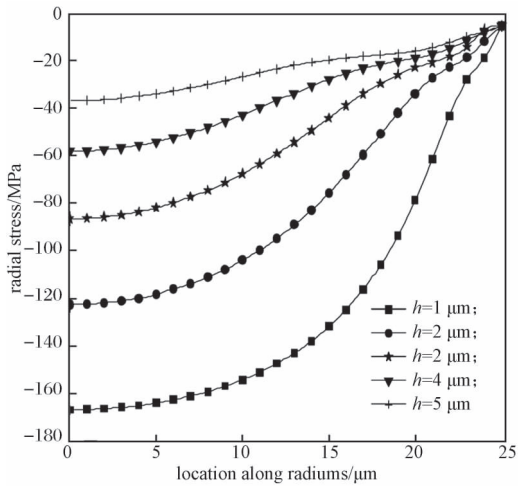
2.2 涂层厚度对层-基界面残余应力的影响

图 3 为不同涂层厚度的层-基界面应力分布曲线。由图可知,改变涂层厚度时,界面应力分量的性质与分布形态没有发生改变,但应力水平发生变

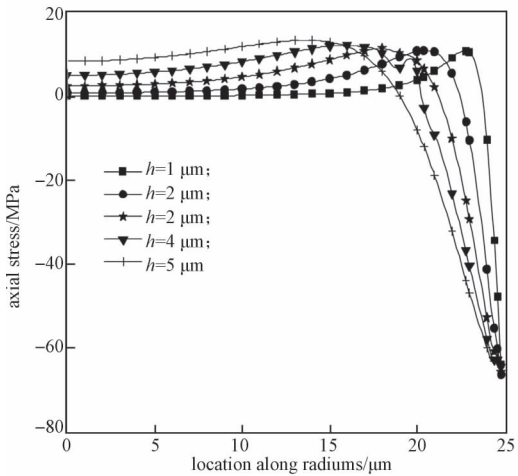
化。随着径向尺寸的增加, 界面切向应力增加, 径向应力减小, 而轴向应力首先以拉应力方式沿径向逐渐增加, 在界面边缘附近迅速转换为压应力, 并在界面边缘处达到最大值。这主要是由于随着涂层厚度的增加, 涂层内部温度梯度变大。



a) 切向应力



b) 径向应力



c) 轴向应力

图3 涂层厚度对界面应力的影响

Fig. 3 Effect of coating thickness on the interface stress

为进一步了解涂层厚度对层-基界面应力最大值的影响程度, 取涂层厚度为 1 μm 时的应力值为基数, 其他涂层厚度的应力值与之相比, 得到图 4 所示的界面应力最大值变化曲线。由图可知, 当厚度由 1 μm 增加到 5 μm 时, 切向应力最大值 τ_{xy0} 增加了 19.4%, 径向应力最大值 σ_{xx0} 减小了 77.8%; 而轴向应力最大值 σ_{yy0} 变化较小, 不到 2%。

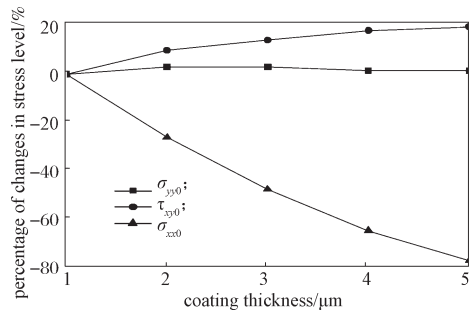
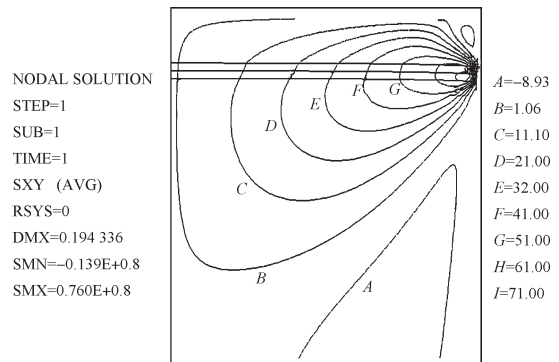


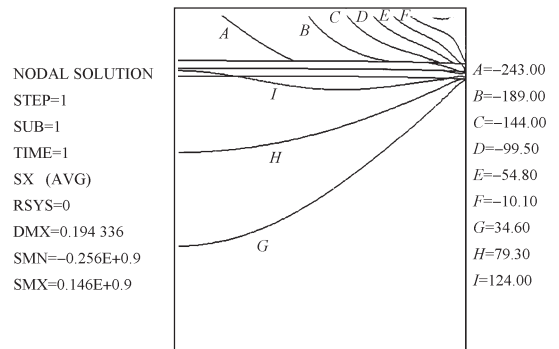
图4 涂层厚度对界面应力最大值的影响
Fig. 4 Effect of coating thickness on maximum interface stress value

2.3 过渡层对残余应力的影响

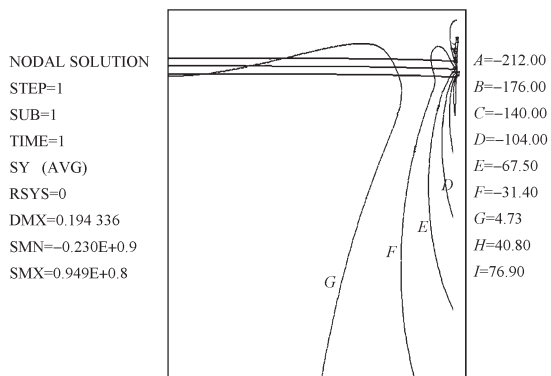
在层-基之间分别增加 Zr, TiAl 和 TiAl/Zr 3 种过渡层, 设 Q235 A 基体、过渡层、ZrTiAlN 涂层的厚度分别为 50 μm, 1 μm 和 3 μm, 研究过渡层对涂层残余应力的影响。图 5 为添加 TiAl/Zr 过渡层后涂层内残余应力的分布情况。



a) 切向应力



b) 径向应力



c) 轴向应力

图5 含有 TiAl/Zr 过渡层的涂层应力分布云图

Fig. 5 Contour plots of coating stress with TiAl/Zr interlayer

图5与图2相比,涂层、过渡层、基体内部残余应力的性质和分布趋势并没有发生变化,界面边缘处的应力集中现象仍然存在;但应力集中的区域由以前的层-基界面边缘处变为涂层-过渡层、过渡层-过渡层、过渡层-基体3个界面边缘处,而且界面应力值有所减小。

加入不同过渡层后涂层内各应力最大值的对比如图6所示。

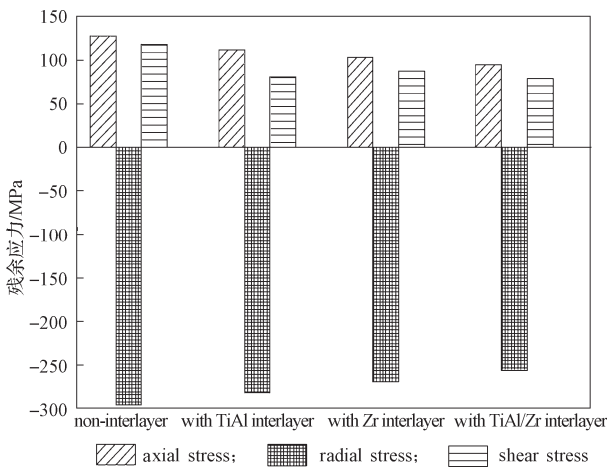


图6 含有不同过渡层的涂层残余应力最大值对比

Fig. 6 The contrast of maximum coating residual stress values with different interlayers

由图6可知,加入过渡层后,涂层内残余应力明显减小,其中含 TiAl/Zr 双层过渡层的涂层内残余应力最小。与无过渡层的涂层相比,加入 TiAl/Zr 过渡层后,涂层内残余应力最大值降幅最大,其中切向应力由 118 MPa 降低至 79 MPa,降幅为 33%;轴向应力由 128 MPa 降低至 95 MPa,降幅为 25%;径向应力由 296 MPa 降低至 256 MPa,降幅为 14%。由表1可知,Zr, TiAl 和 TiAl/Zr 等材料的热膨胀系数介于基体 Q235 A 与涂层 ZrTiAlN 之间,它们的加入能

使涂层体系的物性参数呈梯度变化,有效降低因物性参数差异导致的界面应力和涂层内残余应力,其中添加 TiAl/Zr 双层过渡层的涂层体系中,相邻两层材料之间的物性参数差异更小,从而使涂层体系内部的残余应力更小。

3 结论

采用 ANSYS 13.0 软件分析了 ZrTiAlN 涂层厚度以及 TiAl, Zr 和 TiAl/Zr 3 种过渡层对 Q235A 基 ZrTiAlN 涂层残余应力的影响,可得如下结论:

1) ZrTiAlN 涂层内径向应力主要表现为压应力,并沿径向减小;切向应力以拉应力存在,沿径向增大;轴向应力表现为较小的拉应力,但随着半径的增大,拉应力迅速转化为压应力。3 种应力在界面边缘处均出现较大的应力集中现象。

2) 涂层厚度对残余应力的性质与分布形态影响较小,但会影响应力极值。当涂层厚度由 1 μm 增加到 5 μm 时,界面切向应力最大值 τ_{xy0} 增大了 19.4%,径向应力最大值 σ_{xx0} 减小了 77.8%,而轴向应力 σ_{yy0} 最大值变化小于 2%。

3) 加入过渡层后,残余应力明显减小。TiAl, Zr 和 TiAl/Zr 3 种过渡层中,加入 TiAl/Zr 双层过渡层后,涂层内残余应力最大值的降幅最大,其中切向应力降低了 33%,轴向应力和径向应力分别降低了 25% 和 14%。

参考文献:

- [1] 颜培. ZrTiN 梯度涂层刀具的制备及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
Yan Pei. Fundamental Research on Preparation and Properties of ZrTiN Gradient Coated Tools[J]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [2] Chawla V, Jayaranthan R, Chandra R. Finite Element Analysis of Thermal Stress in Magnetron Sputtered Ti Coating[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200 (1): 205-211.
- [3] Haider J, Rahman M, Corcoran B, et al. Simulation of Thermal Stress in Magnetron Sputtered Thin Coating by Finite Element Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168 (1): 36-1.
- [4] 弓满锋, 乔生儒, 卢国锋, 等. 高速钢上 TiN 涂层残余应力的曲率测试和有限元分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (6): 100-106.
Gong Manfeng, Qiao Shengru, Lu Guofeng, et al. Curvature Testing and Finite Element Analysis for the Residual Stresses in TiN Coatings on High Speed Steel[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2010, 46(6): 100-106.
- [5] Ng H W, Gan Z. A Finite Element Analysis Technique for Predicting as-Sprayed Residual Stresses Generated by The Plasma Spray Coating Process[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41(13): 1235-1254.
- [6] Ali R, Sebastiani M, Bemporad E. Influence of Ti-TiN Multilayer PVD-Coatings Design on Residual Stresses and Adhesion[J]. Materials and Design, 2015, 75: 47-56.
- [7] 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 功能梯度 Al_2O_3 涂层残余热应力分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 26-32. Liu Hongbing, Tao Jie, Zhang Pinze, et al. Simulation of Residual Stress in Functionally Gradient Al_2O_3 Coatings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 26-32.
- [8] 韩志勇, 张华, 王志平. 热障涂层残余应力的拉曼光谱测量及数值分析[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 369-374. Han Zhiyong, Zhang Hua, Wang Zhiping. Study of Residual Stress of Thermal Barrier Coatings by Raman Spectroscopy and Numerical Analysis[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 369-374.
- [9] Abadias G, Saladukhin I A, Uglov V V, et al. Thermal Stability and Oxidation Behavior of Quaternary TiZrAlN Magnetron Sputtered Thin Films: Influence of the Pristine Microstructure[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 237: 187-195.
- [10] Tsui Y C, Clyne T W. An Analytical Model for Predicting Residual Stresses in Progressively Deposited Coatings Part 1: Planar geometry[J]. Thin Solid Films, 1997, 306(1): 23-33.
- [11] Saladukhin I A, Abadias G, Michel A, et al. Influence of Al Content on the Phase Formation, Growth Stress and Mechanical Properties of TiZrAlN Coatings[J]. Thin Solid Films, 2013, 538: 32-41.
- [12] 黄自谦, 贺跃辉, 蔡海涛, 等. TiAlN 涂层的热残余应力分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(6): 897-902. Huang Ziqian, He Yuehui, Cai Haitao, et al. Thermal Residual Stress Analysis of TiAlN Coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(6): 897-902.
- [13] 丁泽良, 董运超, 林长生. MgO 过渡层对 PET 基 SiO_2 薄膜结合强度的影响[J]. 包装学报, 2015, 7(2): 16-20. Ding Zeliang, Dong Yunchao, Lin Changsheng. Effects of MgO Interlayer on Adhesion Strength of PET Substrate SiO_2 Film[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 16-20.
- [14] 丁泽良, 林长生, 董运超, 等. 基材清洗工艺对 SiO_2 /PET 膜基结合强度的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 44-47. Ding Zeliang, Lin Changsheng, Dong Yunchao, et al. Effect of the Substrate Cleaning Process on the Adhesion Strength of SiO_2 /PET Coating-Substrate System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 44-47.
- [15] 丁泽良, 孙敏, 王文韬. 溅射工艺参数对 SiO_2 /PET 包装膜结合强度的影响[J]. 包装学报, 2013, 5(2): 26-29. Ding Zeliang, Sun Min, Wang Wentao. Effect of Process Parameters on the Adhesion Strength of SiO_2 /PET Packaging Films by Magnetron Sputtering[J]. Packaging Journal, 2013, 5(2): 26-29.
- [16] 张显程, 徐滨士, 王海斗, 等. ZrO_2 /NiCoCrAlY 功能梯度涂层残余应力分析[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(2): 86-89, 93. Zhang Xiangcheng, Xu Binshi, Wang Haidou, et al. Analysis on the Residual Stress in Functionally Gradient ZrO_2 /NiCoCrAlY Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(2): 86-89, 93.

(责任编辑: 邓光辉)