

钛合金 TC9 正交车铣加工表面粗糙度研究

潘靖宇¹ 徐九华¹ 傅玉灿¹ 孙涛¹ 张文光²
陈伟² 苏旭斌² 陈雪梅²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 成都飞机工业(集团)有限公司, 成都, 610092)

摘要:首先建立了正交车铣工件已加工表面粗糙度的理论模型,分析了主要切削用量对工件表面粗糙度的影响规律。然后采用单因素试验法,进行了正交车铣 TC9 钛合金的切削试验,研究分析了正交车铣的主要切削用量(如铣刀与工件的转速比、轴向进给量、偏心量等)对已加工表面粗糙度的影响。试验研究表明,已加工表面粗糙度随转速比和偏心量的增加而降低,随轴向进给量的增加而增大;表面粗糙度 Ra 可以控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内,因此正交车铣可以实现回转类零件的精加工。

关键词:正交车铣;钛合金;切削用量;表面粗糙度

中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0720-06

Investigation on Surface Roughness in Orthogonal Turn-Milling of Titanium Alloy

Pan Jingyu¹, Xu Jiuhua¹, Fu Yucan¹, Sun Tao¹
Zhang Wenguang², Chen Wei², Su Xubin², Chen Xuemei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu, 610092, China)

Abstract: A model of the surface roughness in orthogonal turn-milling is established. The relationship between main cutting parameters and the machined surface roughness is analyzed. Turn-milling experiments of Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si (TC9 for short) are carried out with an end milling cutter. The effects of the main cutting parameters in orthogonal turn-milling, such as cutter and workpiece rotary speed ratio, axial feed and eccentric, on surface roughness are studied. The results obtained indicate that the surface roughness decreases with the increase in cutter and workpiece rotary speed ratio and eccentric. However, the tendency of the surface roughness with respect to axial feed is contrary to the last one. Surface quality beneath $Ra < 1 \mu\text{m}$ can be achieved. So high quality surface can be obtained, when the rotationally symmetrical workpieces is processed in orthogonal turn-milling.

Key words: orthogonal turn-milling; titanium alloy; cutting parameters; surface roughness

钛合金由于其具有许多优良的综合物理机械性能,如比强度高,耐热性好,耐腐蚀性强等,被广泛应用于航空、航天、医疗和化学工业等领域。但是,又由于其化学活性大,导热系数小,弹性模量小等特性,给传统的机械加工带来困难^[1]。因此,研究

新的加工方法来解决这个难题显得尤为重要。

车铣复合加工技术是利用铣刀和工件同时旋转的合成运动来实现对工件的切削加工(如图 1 所示),使工件在形状精度、位置精度、表面粗糙度及残余应力等多方面达到使用要求的一种先进切削

加工方法。由于车铣复合加工是断续切削,这样可以使刀具具有充足的冷却时间,从而能降低切削温度,提高刀具寿命^[2-4]。由于其具有以上优点,使得其在加工钛合金等难加工材料时具有一定的优势。

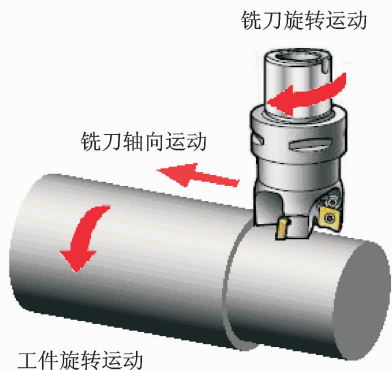


图 1 正交车铣加工示意图

Fig. 1 Orthogonal turn-milling schematic diagram

近年来,国内外学者对车铣复合加工的已加工表面质量进行了许多研究。Choudhury 等人^[5-6]通过试验的方法研究了正交车铣,研究结果表明正交车铣后的表面粗糙度值要小于一般车削。Kopac 等人^[7]用了试验及理论分析的方法,得到了增加刀具转速可以提高加工表面质量以及刀具的振动对粗糙度影响较大的结论。Ekinovic 等人^[8]通过不同材料的正交车铣和传统车削的试验对比,验证了在相同去除率的条件下,正交车铣的加工表面粗糙度要好于传统车削。Lida Zhu 等人^[9]通过运动学仿真分析了影响正交车铣表面粗糙度的各个因素,并结合试验验证了采用偏心加工,同时增加铣刀转速和齿数可以降低工件表面粗糙度。Neagu 等人^[10]从几何关系上分析了正交车铣的运动过程,研究结果表明采用适当的偏心量能改善工件表面质量。综上所述,多年来,国内外学者对正交车铣在表面粗糙度方面进行了较为系统的研究,为该技术的发展奠定了坚实的基础。

航空类零件多是面向特征的复杂结构件,用车铣复合的加工方式可以减少装夹次数,从而提高加工精度和加工效率。因此,近年来,车铣复合加工在航空产品的制造方面得到了越来越广泛的应用,其针对的加工对象大多为难加工材料,如钛合金等。然而,前人对车铣复合加工的研究大多都是针对的铝合金、淬硬钢等材料^[11-12]。所以,针对钛合金等难加工材料的车铣复合加工研究显得十分迫切而必要。对于航空类零件的加工,表面质量是必须要保证的。零件的表面质量决定了其装配精度

和使用寿命,而零件表面粗糙度又是其中相当重要的一个指标。

本文首先将建立几何模型,对正交车铣工件表面粗糙度进行理论分析,得出表面粗糙度的计算公式。然后运用单因素试验法,采用正交车铣的加工方式,对 TC9 钛合金进行表面粗糙度试验,研究各切削用量对表面粗糙度的影响规律,并验证粗糙度计算公式的准确性。

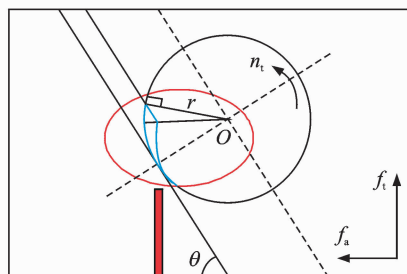
1 表面粗糙度的理论分析

将工件沿轴线展开,如图 2 所示。设铣刀转速为 n_t ,工件转速为 n_w ,轴向进给量为 f_a ,铣刀底刃刃倾角为 φ 。当铣刀每齿切厚达到最大处 h_{max} 时,工件表面最大残留高度为 h_f 。

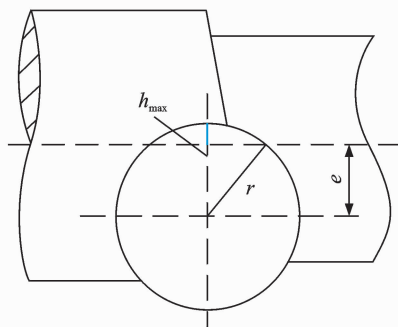
如图 2(a)所示,铣刀每齿最大切厚为

$$h_{max} = r - OB \tag{1}$$

工件表面最大残留高度为



(a) 无偏心



(b) 有偏心

图 2 正交车铣工件表面粗糙度的理论模型

Fig. 2 Model of surface roughness in orthogonal turn-milling

$$h_f = h_{\max} \cdot \tan\varphi \quad (2)$$

由图 2(a)得其他几何关系为

$$\begin{cases} BC = AC - AB \\ AB = f' \\ AC^2 = r^2 - OC^2 \\ OC = r - CD \\ CD = f_a \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中: f' 为铣刀每齿进给量, r 为铣刀半径。

由车铣理论^[3]得

$$\begin{cases} f' = \frac{\sqrt{f_a^2 + f_t^2} \cdot n_w}{n_t \cdot Z} \\ f_t = 2\pi \cdot (R - a_p) \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_t 为切向进给量, Z 为齿数, R 为工件半径, a_p 为切削深度。

当工件直径较大时, $f_a \ll f_t$, 此时

$$f' \approx \frac{f_t \cdot n_w}{Z \cdot n_t} \quad (5)$$

综上, 由式(1~5)解得, 工件表面最大残留高度为

$$h_f = (r - \tan\varphi \cdot \sqrt{r^2 - \frac{4\pi(R-a_p)}{Z \cdot \lambda} \sqrt{2rf_a - f_a^2} + \frac{4\pi^2(R-a_p)^2}{Z^2 \cdot \lambda^2}}) \quad (6)$$

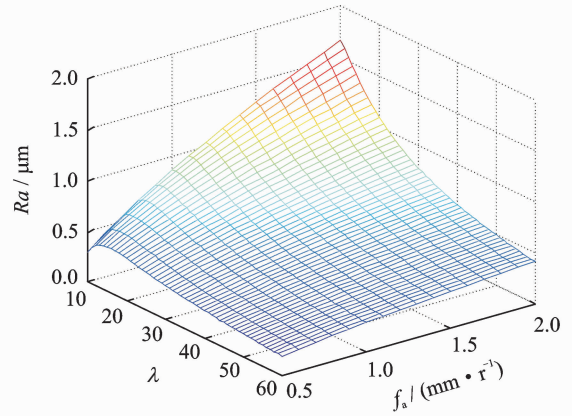
式中: λ 为铣刀与工件的转速比, 即 $\lambda = \frac{n_t}{n_w}$ 。

考虑到偏心加工的情况, 如图 2(b)所示。式(6)可扩展为式(7)

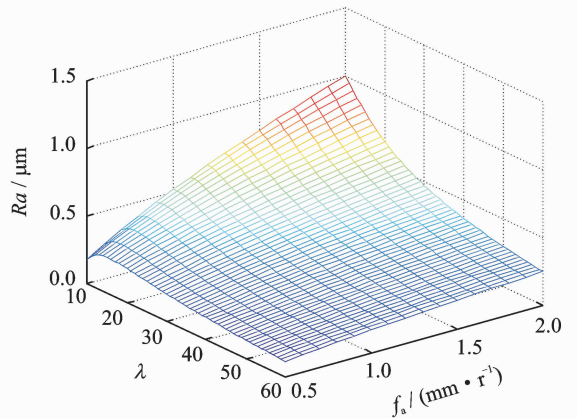
$$h_f = (r - \frac{r-e}{r} \cdot \tan\varphi \cdot \sqrt{r^2 - \frac{4\pi(R-a_p)}{Z \cdot \lambda} \sqrt{2rf_a - f_a^2} + \frac{4\pi^2(R-a_p)^2}{Z^2 \cdot \lambda^2}}) \quad (7)$$

由式(7)可知, 工件表面最大残留高度 h_f 为铣刀与工件的转速比 λ 和偏心量 e 的反比函数, 即随着 λ 和 e 的增加, 工件的表面最大残留高度 h_f 逐渐减小; 工件表面最大残留高度 h_f 是工件轴向进给量 f_a 的正比函数, 即随着 f_a 的增加, 工件的表面最大残留高度 h_f 逐渐增大。在实际加工中, 它的意义是, 为了降低工件的表面粗糙度, 可以增加转速比和偏心量, 或者降低轴向进给量。

由式(7)可知, 当铣刀底刃刃倾角 $\varphi = 0^\circ$ 时, 在理论上工件表面粗糙度 $Ra = 0$ 。然而由于制造和安装误差的存在, 铣刀底刃刃倾角不会恰好为 0° , 因此设刃倾角为 0.05° 。图 3 为在铣刀直径为 50 mm, 工件直径为 100 mm, 切深为 0.5 mm 时, 工件表面粗糙度随着铣刀与工件的转速比和轴向



(a) 偏心量 $e=0$ mm



(b) 偏心量 $e=10$ mm

图 3 切削用量对表面粗糙度的影响

Fig. 3 Effects of cutting parameters on surface roughness

进给量变化的情况。

从图 3(a)中可以看出, 当铣刀与工件的转速比 $\lambda > 20$, 轴向进给量 $f_a < 1.5$ mm/r 时, 在理论上工件的表面粗糙度 $Ra < 1$ μ m。从图 3(b)中可以看出, 在相同的切削用量条件下, 有偏心正交车铣的表面粗糙度要低于无偏心正交车铣的表面粗糙度。

2 试验条件及方案

2.1 试验条件

正交车铣 TC9 钛合金表面粗糙度的试验在 MAZAK INTEGRGX200-IVST 车铣复合加工中心上完成。该机床的有关技术参数如下: 车削主轴最大转速: 5 000 r/min; 铣削主轴最大转速: 12 000 r/min; 行程(X/Y/Z): 580/160/1 045 mm。

工件材料为 TC9 钛合金棒料, 直径为 100 mm。试验刀具采用山特维克硬质合金涂层刀片 R245-12 T3 M-PL S30T, 刀具直径为 50 mm, 齿数为 $Z=4$ 。加工方式为正交车铣, 逆铣, 并采用

水乳化液进行冷却。工件表面粗糙度使用 Mahr M1 型便携式粗糙度仪测量。为了使加工过程较为平稳,工件采用一夹一顶的方式装夹,如图 4 所示。

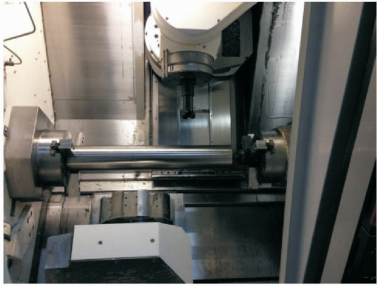


图 4 正交车铣试验设备

Fig. 4 Orthogonal turn-milling equipment

2.2 试验方案

根据现有的车铣理论研究成果,影响正交车铣表面粗糙度的主要因素为:铣刀转速 n_1 、工件转速 n_w 、轴向进给量 f_a 、偏心量 e 、齿数 Z 和刀具直径 D 等。本文选取对钛合金正交车铣工件表面粗糙度影响较大的因素(铣刀与工件的转速比、轴向进给量、偏心量),研究其对表面粗糙度的影响规律。根据上节对表面粗糙度的理论分析,设定单因素试验的参数范围为铣刀与工件的转速比 $\lambda=10\sim60$,轴向进给量 $f_a=0.5\sim2\text{ mm/r}$, $e=0\sim20\text{ mm}$ 和 $a_p=0.5\text{ mm}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 表面粗糙度与转速比的关系

在轴向进给量 $f_a=1.5\text{ mm/r}$ 、偏心量 $e=0\text{ mm}$ 和切削深度 $a_p=0.5\text{ mm}$ 的条件下,取铣刀转速 $n_1=200\sim800\text{ r/min}$,即切削速度为 $31\sim126\text{ m/min}$,工件转速 $n_w=5\sim30\text{ r/min}$ 。通过不同的铣刀、工件转速的配比,使得铣刀与工件的转速比从 10 增加到 60,测量不同转速比下的工件表面粗糙度值,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,当转速比 λ 从 10 逐渐增加到 60 时,工件表面粗糙度的试验值和理论值都呈逐渐降低的趋势,且试验值和理论值贴合较好。试验值均略大于理论值,是由于铣刀片制造与安装误差的存在,以及材料切除过程中的撕裂使得已加工表面不平整,都会增大已加工表面的粗糙度值,但其不会影响粗糙度的变化趋势。当转速比 $\lambda>20$ 时,在理论上工件表面粗糙度 $Ra<1\text{ }\mu\text{m}$,试验值验证了其准确性。

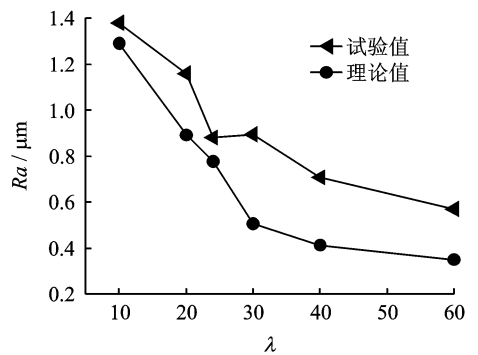


图 5 转速比 λ 对表面粗糙度的影响

Fig. 5 Effects of rotary speed ratio λ on surface roughness

究其原因,随着铣刀与工件转速比的增加,工件表面的残留高度在理论上呈逐渐减小的趋势。同时,由于转速比的增加,铣刀每齿进给量逐渐减小,切削力也随之减小,所以加工过程能保持较为平稳的状态。因此,当转速比逐渐增大时,钛合金材料的加工表面粗糙度值降低。

3.2 表面粗糙度与轴向进给量的关系

通过以上分析可得,当转速比 $\lambda>20$ 时,能得到较低的表面粗糙度值。所以此时在转速比 $\lambda=30$,偏心量 $e=0\text{ mm}$ 和切削深度 $a_p=0.5\text{ mm}$ 的条件下,分别取轴向进给量为 $f_a=0.5, 1, 1.5, 2\text{ mm/r}$,测量不同轴向进给量下的工件表面粗糙度值,得到结果如图 6 所示。

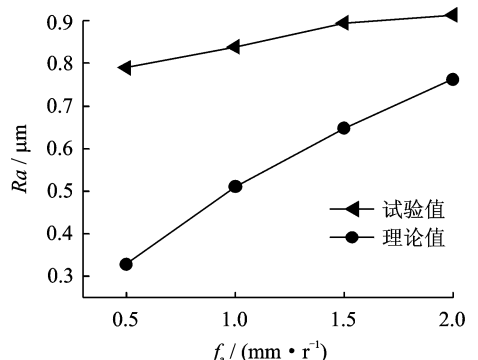


图 6 轴向进给量 f_a 对表面粗糙度的影响

Fig. 6 Effects of axial feed f_a on surface roughness

如图 6 所示,随着轴向进给量 f_a 的增加,工件表面粗糙度的试验值和理论值都呈现逐渐增大的趋势。其原因如下:

(1) 铣刀轴向进给量的增加,意味着铣刀每齿进给量的增大,这就造成已加工表面在轴线方向上产生的微观不平度增大,从而造成了表面粗糙度的增加。

(2)由于本试验所用的刀片底刃修光刃长度为2.05 mm,刃倾角接近为 0° ,而且铣刀与工件的转速比 λ 为整数。所以,当工件旋转一周后,铣刀切削过的已加工表面与前一周铣刀切削的位置在轴向方向上是平行的。以轴向进给量 $f_a=0.5$ mm/r为例,如图7所示。

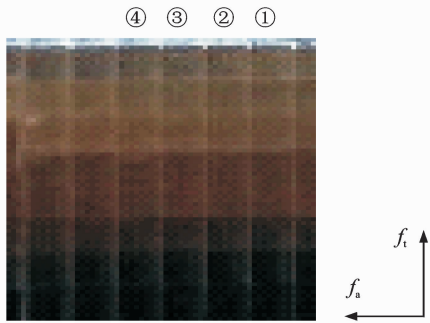


图7 已加工表面图($f_a=0.5$ mm/r)

Fig. 7 Machined surface ($f_a=0.5$ mm/r)

①,②,③,④分别为铣刀在同一轴线上先后进行切削的4刀。可以发现,铣刀的底刃在最右侧的已加工表面上切削了4次。由于钛合金的弹性模量小,已加工表面会有一些的回弹,铣刀重复切过已加工表面,能切除由于工件回弹造成的多余材料。因此,工件表面粗糙度在轴向进给量 $f_a=0.5$ mm/r时最小。当轴向进给量逐渐增加时,已加工表面上重复切削的次数减少,所以粗糙度呈现缓慢上升的趋势。

3.3 表面粗糙度与偏心量的关系

从对表面粗糙度的理论分析可以发现,适当增加偏心量可降低工件表面粗糙度。现拟通过试验验证其变化趋势。

在转速比 $\lambda=30$,轴向进给量 $f_a=1.5$ mm/r和切削深度 $a_p=0.5$ mm的条件下,分别取偏心量为 $e=0,5,10,15,20$ mm,测量不同偏心量下的表面粗糙度值,得到结果如图8所示。

由图8可知,随着偏心量的增加工件表面粗糙度的试验值和理论值都呈现逐渐减小的趋势。这主要是由于随着偏心量的增加,已加工表面的轴向侧母线形状和工件表面纹理方向将发生改变,使得沿轴线方向的表面微观形貌发生变化,从而影响测得的表面粗糙度值。

4 结 论

本文首先建立了正交车铣工件表面粗糙度的理论模型,据此推导了表面粗糙度的计算公式。最

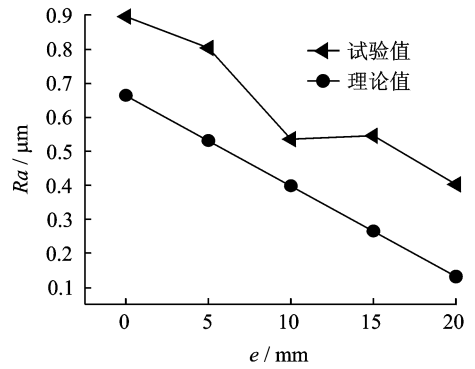


图8 偏心量 e 对表面粗糙度的影响

Fig. 8 Effects of eccentricity e on surface roughness

后通过单因素试验验证并分析了各切削用量对表面粗糙度的影响规律。具体结论如下:

(1)通过对正交车铣加工表面粗糙度的理论分析,预测了表面粗糙度在不同切削用量下的变化趋势,并通过试验验证了其准确性。

(2)对于正交车铣而言,提高铣刀与工件的转速比、适当增加偏心量,或者降低轴向进给量,可以减小工件表面粗糙度。

(3)试验验证了在转速比 $\lambda>20$,轴向进给量 $f_a<1.5$ mm/r的范围内,表面粗糙度可以控制在 $1\ \mu\text{m}$ 以下。因此,正交车铣可以实现钛合金回转类零件的精加工,从理论上讲可以替代普通车削。

参考文献:

- [1] 张喜燕,赵永庆,白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005:137-189.
Zhang Xiyan, Zhao Yongqing, Bai Chenguang. Titanium alloy and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:137-189.
- [2] 贾春德,姜增辉. 车铣原理[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2004:1-10.
Jia Chunde, Jiang Zenghui. Theory of turn-milling [M]. Second Edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2004:1-10.
- [3] Schulz H, Spur G. High speed turn-milling—A new precision manufacturing technology for the machining of rotationally symmetrical workpieces [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1990, 39 (1): 107-109.
- [4] Schulz H, Kneisel T. Turn-milling of hardened steel—An alternative to turning [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1994, 43(1): 93-96.
- [5] Choudhury S K, Bajpai J B. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish [J].

- Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(3):487-493.
- [6] Choudhury S K, Mangnilkar K S. Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical work pieces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000,99(1):120-128.
- [7] Kopac J, Pogacnik M. Theory and practice of achieving quality surface in turn milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997,37(5):709-715.
- [8] Ekinovic S, Begovic E, Silajdzija A. Comparison of machined surface quality obtained by high-speed machining and conventional turning[J]. Machining Science and Technology, 2007,11(4):531-551.
- [9] Zhu Lida, Li Haonan, Wang Wanshan. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9/10/11/12): 2279-2292.
- [10] Neagu C, Gheorghe M, Dumitrescu A. Fundamentals on face milling processing of straight shafts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3):337-344.
- [11] 金成哲,贾春德. 正交车铣高强度钢的刀具耐用度及磨损机理研究[J]. 工具技术,2005,39(9):16-18.
Jin Chengzhe, Jia Chunde. Research on tool life and tool wear mechanics of high strength steel with orthogonal turn-milling[J]. Tool Technology, 2005,39(9):16-18.
- [12] 黄树涛,贾春德,姜增辉. 干式高速车铣时金属陶瓷刀具磨损机理研究[J]. 制造技术与机床,2001(3):35-36.
Jin Chengzhe, Jia Chunde, Jiang Zenghui. Research on wearing mechanism of ceramic tool in high speed dry turn-milling[J]. Manufacturing Technology and Machine, 2001(3):35-36.