

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 复合材料低频扭转振动攻丝研究

## Study on Low-Frequency Torsional Vibration Tapping of Composite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 韩凤起 刘 洋 张德远  
北 京 兴 华 机 械 厂 周 琪

**[摘要]** 分析了低频扭转振动攻丝降低攻丝扭矩的机理,进行了干切状态下振动攻丝和连续攻丝的攻丝扭矩和丝锥使用寿命对比试验,并对振动攻丝中切削液的影响进行了试验。结果表明,在干切状态下,振动攻丝能够显著降低攻丝扭矩、提高丝锥使用寿命。

**关键词:** 金属基复合材料 低频扭转振动攻丝 丝锥使用寿命

**[ABSTRACT]** The mechanism of the reduction of tapping torque by low-frequency torsional vibration tapping is analyzed. The experiments are carried out to compare the tapping torque and the service life of vibration tapping with that of continuous tapping without cutting fluid. And the effect of cutting fluids on vibration tapping is studied by experiments, too. It is indicated that not only the tapping torque could be reduced greatly, but also the service life of tap is extended remarkable by vibration tapping.

**Keywords:** Metal matrix composite Low-frequency torsional vibration tapping Service life of tap

颗粒增强的金属基复合材料一般以 SiC、AlN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等为增强相,以铝及其合金、镁等为基体材料,具有比强度高、热稳定性好和线膨胀系数低等优良的物理力学性能,在航空、航天等行业中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。颗粒增强金属基复合材料具有各向同性、价格相对较低等特点,是当前金属基复合材料研究的重点,但基体中含有硬度很高的增强颗粒,使得加工时刀具磨损严重、加工精度低、表面质量差,该材料是一种典型的难加工材料。

难加工材料上的攻丝向来是机械加工中的难题和瓶颈,对复合材料来说尤其困难,目前对颗粒增强金属基复合材料攻丝加工方面的研究比较少。有研究人员采用高速切削工艺或选用金刚石涂层刀具等方法以期解决复合材料的加工问题<sup>[2]</sup>。金刚石涂层硬质合金丝锥非常稀少而且价格昂贵,很难在生产中广泛应用,通

常只能采用高速钢丝锥进行加工。本课题中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 复合材料的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量为 30%,颗粒直径约 0.5 μm,弹性模量 120GPa,采用高速钢丝锥在该材料上攻制 M1.6~M3 的螺纹孔时,由于缺乏能够有效防止丝锥折断的措施,一般是熟练工人手工攻丝,丝锥易折断、使用寿命短,加工效率低、成本高。因此,在现有条件下,改进工艺方法、提高丝锥的使用寿命,是解决 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 攻丝难题的所在。本课题在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 上进行了低频扭转振动攻丝试验,结果表明低频扭转振动攻丝能够显著降低攻丝扭矩,有效提高丝锥使用寿命和螺纹质量,是解决其攻丝难题的有效手段。

### 1 振动攻丝降低攻丝扭矩的机理

#### 1.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 普通攻丝扭矩特点

根据过渡切削过程中的表面形成机理<sup>[3-5]</sup>,由于切削刃圆角的存在,必然造成已加工表面的弹性回复,使刀具后刀面与工件之间产生剧烈摩擦。采用高速钢丝锥在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 上攻丝的过程中,由于基体中含有硬度很高的增强颗粒,丝锥磨损较快,形成较大的钝圆半径,已加工表面的弹性回复量增大,使丝锥后刀面和工件之间的摩擦加剧。在攻丝过程中,攻入底孔内的刀齿逐渐增多,工件与刀齿后刀面的总摩擦面积增大,导致攻丝扭矩迅速增大。因此,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 小螺纹孔攻丝中很容易因攻丝扭矩过大而折断丝锥,丝锥使用寿命较低。

#### 1.2 振动攻丝降低攻丝扭矩的机理

在低频扭转振动攻丝过程中,运动参数主要包括切削量  $L_T$ , 回退量  $L_C$  和主轴转速  $V$ <sup>[5-6]</sup>。如果将螺旋线展开为直线,丝锥切削刃的运动轨迹及重复切削模型如图 1 所示,在每个振动周期中,切削刃从  $a$  点反向回退,到达  $b$  点后正向切削,但在  $bc$  段是对已加工表面的重复切削,当达到  $c$  点后才开始进行新的切削,达到  $d$  点后再次反向回退,依此不断重复,已加工表面的最终被重复切削的次数为  $Q=L_C/L_T+1$ 。在重复切削过程中,已加工表面会被微量切除或磨损,其微观去除量与回弹

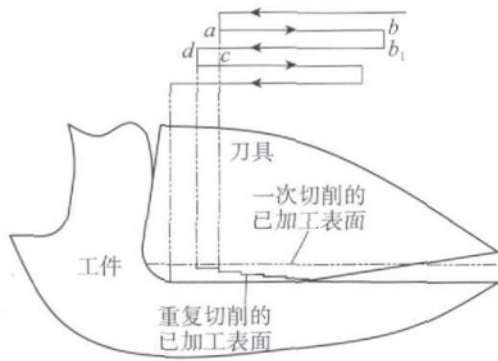


图1 振动攻丝重复切削模型

Fig.1 Repeated cutting model of low-frequency vibration tapping

量成比例<sup>[5]</sup>，设比例系数为 $k$ ，在切削刃的一个振幅范围内，已加工表面某处经重复切削后的回弹量可表示为

$$\delta_i = (1 - k_i) \delta_{i-1} \quad (1 \leq i \leq Q)$$

当重复切削次数 $Q$ 足够大时，在某处已加工表面的重复切削过程中，随着重复切削次数的增加，每次重复切削对已加工表面的去除量逐渐减小，直至几乎不能去除材料而形成最终的已加工表面。因此，重复切削能够最大限度地减少已加工表面的回弹量，从而降低攻丝扭矩。

## 2 试验条件的确定

本课题采用的试验系统如图2所示。计算机通过伺服系统控制主轴进行低频扭转振动，主轴可以轴向自由浮动，在攻丝过程中通过丝锥的自引导实现轴向进给。工件安装在测力仪上，攻丝扭矩信号通过动态电阻应变仪和数据采集卡输入计算机。

本课题采用表1所示的参数进行了连续攻丝和振动攻丝的丝锥使用寿命对比试验。切削液是切削加工

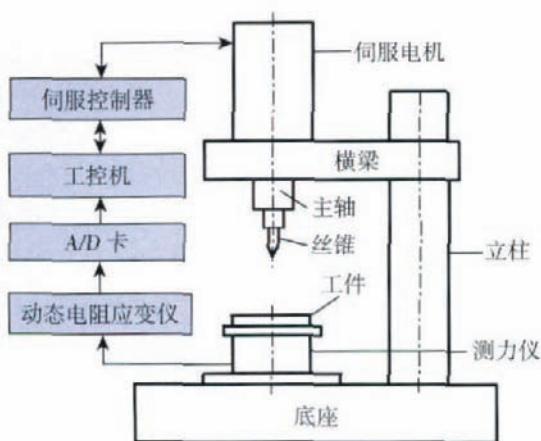


图2 试验系统的构成

Fig.2 Construction of experimental system

表1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p/Al 攻丝试验条件

| 攻丝方式 | 低频扭转振动攻丝   | 普通连续攻丝                |
|------|--|-----------------------|
| 丝锥   | M2.5 高速钢机用丝锥, 单锥   |                       |
| 底孔   | φ 2.1mm, 通孔  |                       |
| 攻丝深度 | 5mm  |                       |
| 攻丝参数 | 转速 $V=450\text{r/min}$ ,<br>切削量 $L_1=1.5^\circ$ , 回退量 $L_0=50^\circ$ | 转速 $V=10\text{r/min}$ |

中的重要影响因素，有关文献对金属基复合材料的切削加工中切削液影响进行了研究。D Mester<sup>[7]</sup>等人研究了切削液在加工 Al-Mg-SCu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 时的作用，认为切削液加剧了刀具磨损，原因是切削液使切屑形成区域保持低的温度，使材料保持了高的强度。L Cronjager<sup>[8]</sup>等人的研究表明在颗粒增强金属基复合材料钻削和铣削中，冷却液使刀具寿命降低到干式切削的 1/6。因此，试验中在不使用切削液的条件下进行了普通连续攻丝和振动攻丝的丝锥使用寿命对比。考虑到振动攻丝中丝锥的特殊运动方式有利于提高切削液的润滑效果，在其他难加工材料上能够明显降低攻丝扭矩和提高丝锥使用寿命，因此也分别使用蓖麻油、煤油、水基乳化液进行了振动攻丝的丝锥使用寿命试验。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 振动攻丝与连续攻丝丝锥使用寿命的对比

图3是各种试验条件下的丝锥平均使用寿命对比。使用寿命以丝锥不能继续攻丝为准。从图中可以看出，在干切状态下，振动攻丝的丝锥使用寿命是连续攻丝的2倍左右。

图4、5分别是干切状态下连续攻丝和振动攻丝的其中一只丝锥加工的第4个孔的扭矩波形。从2幅图

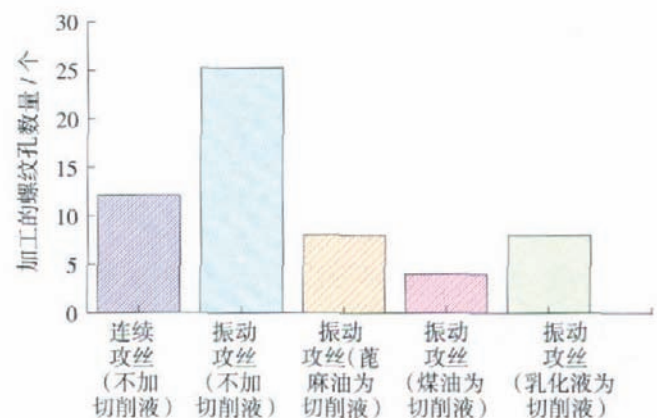


图3 不同条件下的丝锥使用寿命对比

Fig.3 Comparison of service life of tap under different conditions

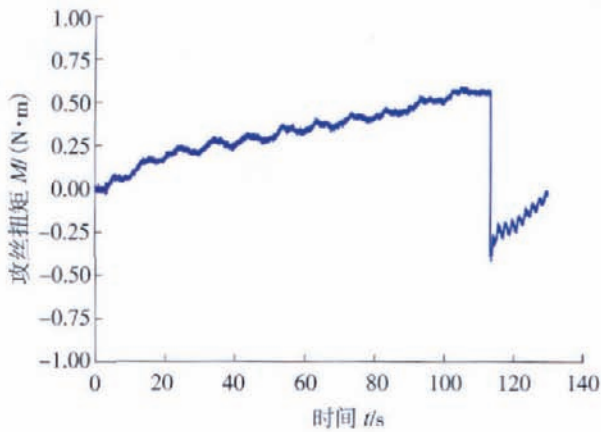


图4 Torque of continuous tapping without cutting fluid

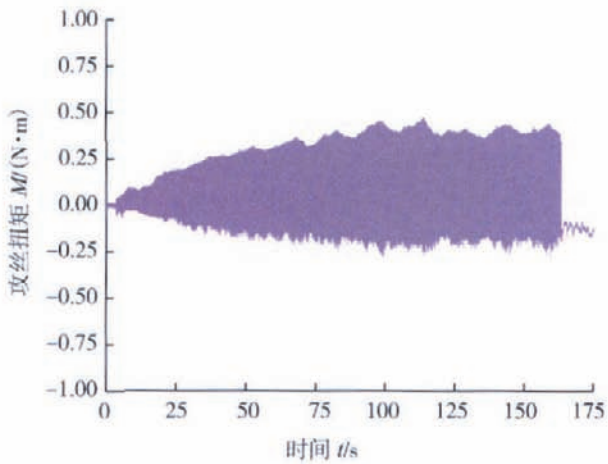


图5 Torque of vibration tapping without cutting fluid

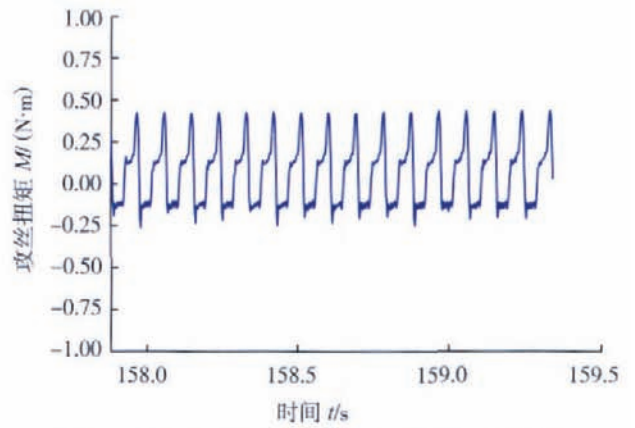


图6 Partial torque waveform of vibration tapping without cutting fluid

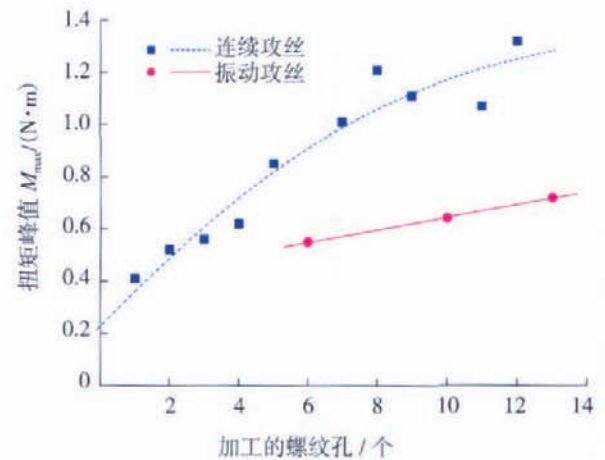


图7 Comparison of torque between continuous and vibration tapping without cutting fluid

中可以看出,在连续攻丝过程中,由于材料的弹性模量较小,已加工表面存在较大的回弹,随着攻丝深度的增加,丝锥与工件之间的摩擦面积增加,造成扭矩不断增大。而在振动攻丝过程中,由于重复切削有效去除了已加工表面的回弹,最大限度的减小了丝锥校正齿与工件的摩擦,所以当丝锥切削部分全部攻入底孔后,扭矩基本不再随攻丝深度的增加而增大。图6为放大后的部分振动攻丝扭矩的波形。

为充分验证振动攻丝去除已加工表面回弹的作用,在其中一只丝锥连续攻丝的寿命试验过程中,穿插进行了振动攻丝,2种攻丝方式的攻丝扭矩比较如图7所示。图中第6、10和13个孔采用振动攻丝,而其余的孔都采用连续攻丝。从图7中可以看出,振动攻丝降低攻丝扭

矩的效果非常显著。

将试验中使用的丝锥在 Nikon 工具显微镜下观察,了解丝锥的磨损状况。经测量,在干切状态下分别加工10个孔后,连续攻丝的丝锥切削部分后刀面的磨损带宽度  $VB$  平均约  $92.3 \mu\text{m}$ ,振动攻丝磨损带宽度  $VB$  平均约  $109.2 \mu\text{m}$ 。可见,在干切状态下,虽然振动攻丝因重复切削增加了总切削路程而增加了刀具磨损,但由于改善了已加工表面对丝锥后刀面的挤压和摩擦状况而降低了丝锥钝化对刃口钝圆和后刀面磨损的敏感性,显著提高了丝锥使用寿命。

### 3.2 切削液对振动攻丝效果的影响

从图3可以看出,如果在振动攻丝过程中添加蓖麻油、煤油、水基乳化液作为切削液,丝锥使用寿命反而低

于连续攻丝。图 8 是以蓖麻油为切削液的其中一只丝锥振动攻丝第 4 个孔的部分扭矩波形。对比图 8 和图 4 可以看出,当添加蓖麻油后,振动攻丝的峰值扭矩比连续攻丝扭矩大很多,而且回退时的摩擦扭矩和切削时的峰值扭矩基本相等,而图 6 表明在干切状态下振动攻丝回退摩擦扭矩远远小于切削峰值扭矩。

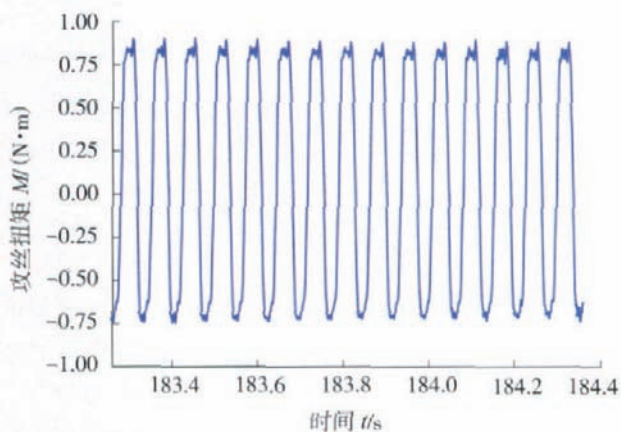


图 8 蓖麻油作为切削液的振动攻丝扭矩波形  
Fig.8 Torque waveform of vibration tapping with cutting fluid of castor oil

从上述试验结果和扭矩特点可以看出,采用蓖麻油作切削液后,摩擦扭矩增加、磨损速度加快,产生上述现象的原因如下:

(1)  $Al_2O_3/p/Al$  在振动攻丝过程中产生的切屑是如图 9 所示的非常小的粉末,而且重复切削过程中也产生很多微细粉末,这些粉末混合在蓖麻油中,使蓖麻油变得像墨一样黑,严重影响了蓖麻油的润滑效果,所以攻丝过程中摩擦扭矩很大。

(2) 在丝锥正反向旋转的过程中,混合在蓖麻油中的粉末状切屑和重复切削产生的微细粉末被挤到丝锥后

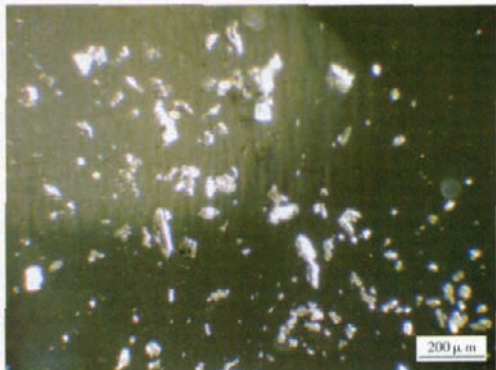


图 9  $Al_2O_3/p/Al$  振动攻丝切屑照片  
Fig.9 Chips of  $Al_2O_3/p/Al$  in vibration tapping with cutting fluid of castor oil

刀面和工件之间,由于其中含有大量硬度很高的  $Al_2O_3$  颗粒,造成丝锥的严重磨损,降低了丝锥使用寿命。

(3) 另外,  $Al_2O_3/p/Al$  复合材料中含有 30% 的  $Al_2O_3$  颗粒,是一种典型的磨料型材料。将工件假设为砂轮,丝锥假设为被刃磨的工件。在干切状态下,重复切削过程中产生的铝粉粘附在已加工表面和丝锥后刀面,相当于砂轮被铝材堵塞,  $Al_2O_3$  磨粒不能充分暴露,磨削能力下降,使丝锥磨损降低;当加入切削液后,铝粉游离到液体中,磨粒能充分暴露,磨削能力强,使丝锥磨损加剧。

煤油和水基乳化液的流动性比蓖麻油强,冲刷切屑的效果较更好,但振动攻丝的振动频率的为 20Hz,丝锥运动速度很高,仍不能避免切屑被挤入丝锥的后刀面,而且冲刷作用的增强也使  $Al_2O_3$  颗粒更易暴露出来,增强了磨削能力,所以丝锥磨损较快,使用寿命较低,上述 2 种切削液的润滑性能较差,攻丝中的摩擦系数较大,不利于充分降低摩擦扭矩。以煤油和水基乳化液作为切削液的振动攻丝扭矩波形与图 8 具有相同的特点。

### 3.3 振动攻丝与连续攻丝螺纹质量对比

在试验过程中,利用螺纹塞规对所加工的螺纹质量进行了检验。在连续攻丝过程中,随着丝锥的磨损,已加工表面的回弹量增加,使得所加工的螺纹直径逐渐减小,通规不能顺利通过,经检验统计,连续攻丝加工出的螺纹孔约有 60% 不合格。

在干切状态下,采用振动攻丝加工的所有螺纹孔检验时通规可以全部通过,但当丝锥磨损到一定程度,振动攻丝的峰值扭矩超过  $1\sim 1.2N\cdot m$  后,在检验时会因螺纹入口处止规旋入深度超过 1mm (超过 2 倍螺距) 而不合格。在产生上述现象之前,一般一只丝锥干切状态下可加工 25 个左右的合格螺纹孔。

## 4 结论

通过以上试验结果和分析,对振动攻丝在  $Al_2O_3/p/Al$  复合材料的应用,可得到以下结论:

(1) 在干切状态下,低频扭转振动攻丝通过重复切削降低了已加工表面的弹性回复,一方面减小了丝锥后刀面和工件之间的摩擦,降低了丝锥钝化对刃口钝圆和后刀面磨损的敏感性,另一方面保证了螺纹质量,从而延长了丝锥的使用寿命。

(2) 因加入切削液后  $Al_2O_3$  颗粒对丝锥的磨削作用增强,且振动攻丝产生的粉末状切屑在扭转振动过程中被挤压在丝锥后刀面和工件间加剧丝锥磨损,故在  $Al_2O_3/p/Al$  复合材料低频扭转振动攻丝中不宜使用切削液。

(下转第 91 页)

假设准则层对目标层的判断矩阵为  $A$ , 专家  $i$  对  $j$  准则的方案层的残缺判断矩阵为  $B_{ij}(i=1,2,3,j=1,2,\dots,5)$ , 分别如表 3~6 所示。权重的计算由上述公式求得。

表 3 判断矩阵  $A$ 

| $A$   | $c_1$ | $c_2$ | $c_3$ | $c_4$ | $c_5$ | 权重      |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| $c_1$ | 1     | 1/3   | 1/5   | 1/7   | 1/9   | 0.033 3 |
| $c_2$ | 3     | 1     | 1/3   | 1/5   | 1/7   | 0.063 4 |
| $c_3$ | 5     | 3     | 1     | 1/3   | 1/5   | 0.128 9 |
| $c_4$ | 7     | 5     | 3     | 1     | 1/3   | 0.261 5 |
| $c_5$ | 9     | 7     | 5     | 3     | 1     | 0.512 8 |

表 4 专家 1 给出的对应价格水平的判断矩阵  $B_{1j}$ 

| $B_{1j}$ | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | 权重      |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| $s_1$    | 1     | 0     | 1/3   | 0.428 6 |
| $s_2$    | 0     | 1     | 1     | 0.428 6 |
| $s_3$    | 3     | 3     | 1     | 0.142 9 |

表 5 专家 2 给出的对应价格水平的判断矩阵  $B_{2j}$ 

| $B_{2j}$ | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | 权重      |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| $s_1$    | 1     | 1/5   | 1/7   | 0.066 8 |
| $s_2$    | 5     | 1     | 1/5   | 0.218 5 |
| $s_3$    | 7     | 5     | 1     | 0.714 7 |

表 6 专家 3 给出的对应价格水平的判断矩阵  $B_{3j}$ 

| $B_{3j}$ | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | 权重      |
|----------|-------|-------|-------|---------|
| $s_1$    | 1     | 1/5   | 1/5   | 0.085 6 |
| $s_2$    | 5     | 1     | 1/3   | 0.296 9 |
| $s_3$    | 5     | 3     | 1     | 0.617 5 |

用加权几何平均综合排序向量法求解 3 个专家的综合权重向量时,需确定专家的权重,这里,权重可以由 ERP 系统中维护测评人以及测评人权重模块中的获得权重功能直接获得。对专家 1、2、3 分别取 0.2、0.4、0.4。

根据表 3~6 中数据,结合公式(7)求出的 3 个专家对价格水平准则的权重如下所示:

$$w_{s_1} = (0.121\ 8, 0.321\ 8, 0.556\ 4)^T。$$

根据上述求解信息不完备群组决策权重的方法,得出其他准则(如交货数量及时性、交货时间及时性、合格率和服务水平)的群组决策权重如下:

$$w_{s_2} = (0.108\ 7, 0.174\ 0, 0.717\ 3)^T,$$

$$w_{s_3} = (0.063\ 1, 0.269\ 5, 0.667\ 4)^T,$$

$$w_{s_4} = (0.067\ 0, 0.200\ 1, 0.773\ 0)^T,$$

$$w_{s_5} = (0.074\ 7, 0.207\ 4, 0.717\ 8)^T。$$

用加权和的方法求出方案层相对于总目标层的权重为:

$$w = (0.074\ 9, 0.215\ 2, 0.709\ 8)^T。$$

根据权重大小可得: 供应商  $s_3 >$  供应商  $s_2 >$  供应商  $s_1$ , 即供应商  $s_3$  为优选方案。

### 3 结束语

基于改进 AHP 算法的供应商评价模型的研究及其在企业中的实际应用,说明了改进的 AHP 算法是一种有效的量化方法,解决了群组决策下判断矩阵缺损的排序问题,可以更加合理有效地进行供应商评价。

### 参 考 文 献

- [1] 宴明春, 邵菁. 混合 AHP 法在 ERP 系统供应商评价模型中的应用. 计算机工程, 2007, 33(13): 90-92, 98.
- [2] 代雯, 陈云翔, 向玲. 不确定多属性决策中的一种模糊赋权方法. 数学的实践与认识, 2007, 37(15): 60-64.
- [3] 梵治平, 潘德惠. 不确定判断矩阵权重计算的一种实用方法. 系统工程, 1996, 14(2): 57-61.
- [4] 边馥萍, 候文华, 梁冯珍. 数学模型方法与算法. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [5] 张良欣, 徐岩山, 王晓林. 信息不完备群组决策问题的 ANP 算法. 海军工程大学学报. 2006, 18(1): 42-46.
- [6] 唐焕文, 贺明峰. 数学模型引论. 北京: 高等教育出版社, 2005.

(责编 良辰)

(上接第 87 页)

### 参 考 文 献

- [1] 李德溥, 姚英学, 袁哲俊. 颗粒增强金属基复合材料的特种加工研究现状. 机械制造, 2006, 44(506): 64-68.
- [2] 许幸新, 刘传绍, 赵波. 超声振动钻削 SiC 颗粒增强铝基复合材料时的切削力研究. 工具技术, 2007, 41(1): 49-52.
- [3] 严宗达. 塑性力学基础. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [4] 马丁 J.B. 塑性力学基础及一般结果. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [5] 张德远. 难加工材料加工与监测技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1993.
- [6] 陈志同. 扭转振动机构学及振动攻丝技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.
- [7] Mester D, Cronjger L. Bohren in faserver startem aluminium nur moglich schneiden aus hartmetal loder PKD. Germany Maschinen-mark, 1989, 23(23): 28-32.
- [8] Cronjager L. Machining of fible and particle-reinforced aluminum. Ann.CIRP. 1992, 41(1): 63-66. (责编 淡蓝)