

# BTA 深孔钻削过程及钻削力分布规律试验研究

师毓华<sup>1</sup>, 郑建明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>武警工程大学; <sup>2</sup>西安理工大学

**摘要:** 搭建了 BTA 钻削试验研究平台和钻削力测试系统, 针对三种典型结构 BTA 钻头切削不同直径圆柱状工件进行试验研究, 分析了 BTA 钻头刀齿的位置分布以及几何尺寸对钻削过程的影响, 研究了三种典型结构 BTA 钻头单位刀齿钻削力沿半径的分布规律。结果表明, 三种典型结构 BTA 钻头单位刀齿钻削力均呈沿半径增大方向递增的非均匀分布趋势, 刀齿位置分布与几何尺寸影响单位刀齿径向力大小, 不影响单位刀齿主切削力与轴向力的大小以及单位刀齿钻削力沿半径的分布规律。

**关键词:** BTA 钻头; 单位刀齿; 钻削力测试; 刀齿钻削力分布

中图分类号: TG52; TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.006

## Experimental Study on Drilling Process and Cutting Force Distribution Laws for BTA Deep Hole Drill

Shi Yuhua, Zheng Jianming

**Abstract:** The influence of the teeth location and geometric dimensions of BTA drill on the drilling process is analyzed, and cutting force distribution laws of unit cutting tooth of three typical BTA drill is studied. It ran experiments on three typical BTA drill cutting the different diameter cylinder workpiece based on the experimental platforms of BTA drilling and cutting force measuring system. The results show that the cutting force components of unit cutting tooth of three typical BTA drill presents the non-uniform distribution law which is increasing with the radius increases. The teeth location and geometric dimensions of BTA drills only affect the radial force of unit tooth, but has negligible impact on the main cutting force and axial force of the unit tooth and the distribution laws of the drilling force of unit tooth along the radius.

**Keywords:** BTA drill; unit cutting tooth; cutting force measuring; cutting force distribution

### 1 引言

在深孔加工过程中, 由于无法直接观察刀具切削和加工过程中的排屑情况, 使深孔加工过程非常复杂<sup>[1]</sup>。国内外对深孔加工的方法、刀具的设计与优化等方面进行了大量研究。目前, 在深孔加工中, 由于 BTA 深孔钻削加工质量好、加工性能稳定、加工范围广, 是应用广泛的深孔加工技术<sup>[2-4]</sup>。BTA 深孔钻头的设计优化及其切削状态的研究对深孔加工技术的发展有着重要作用, BTA 深孔钻削应用自导向加工原理, 刀齿的受力情况直接影响加工过程的稳定性与自导性<sup>[5]</sup>。

由于 BTA 钻头加工过程的特殊性以及钻头受力情况的复杂性, 目前, 国内外对于 BTA 钻头刀齿钻削力的研究较多。C. H. Gao 等<sup>[6]</sup>研究了深孔钻削过程, 分析了 BTA 钻削过程中切屑变形与切削用量和切削力的关系, 结果表明, 切屑变形随进给量的增大而增大, 且轴向力随切屑变形的增大而增大, 为

BTA 深孔钻削切削用量的优化奠定了基础; 文献 [7, 8] 通过对 BTA 钻削过程的试验及理论分析, 研究了导向块在加工过程中的作用、受力及磨损状态, 阐释了 BTA 深孔钻自导向工作方式的原理; D. Biermann 等<sup>[9]</sup>和 Lee Ju Eun 等<sup>[10]</sup>在研究 BTA 钻头刀体结构优化时, 分别通过试验与仿真对 BTA 钻头各刀齿受力分布随切削半径的变化规律进行测试, 结果表明, 刀齿钻削力呈非均匀分布, 试验根据切削刃受力的不同, 对钻头的切削刃、排屑孔和刀体等结构参数进行了优化, 结果表明, 优化后的刀具提高了深孔加工质量和加工效率。

BTA 深孔钻削作为特殊加工方法, 其加工机理以及钻头设计理论还不完善, BTA 钻头刀齿受力分布规律对刀具的受力状态具有重要影响, 本文通过对三种典型结构的 BTA 深孔钻头的钻削试验, 研究 BTA 钻头钻削过程以及 BTA 钻头单位刀齿钻削力沿半径的分布规律, 为 BTA 钻头优化与设计提供理论依据。

## 2 BTA 深孔钻头受力模型

BTA 深孔钻削属于自导向加工方式,其刀头一般设计为 3 个刀齿、2 个导向条、1 或 2 个排屑通道。单边刃 BTA 钻头 3 个刀齿分布于刀头一侧自成一,含 1 个排屑通道。错齿 BTA 钻头 3 个刀齿非对称分布于刀头两侧,含 2 个排屑通道。2 个导向条使钻削力保持平衡,钻头具有自导向功能,BTA 钻头导向条和刀齿的位置分布及几何尺寸对钻头的工作性能与钻削过程稳定性有重要影响。

目前对 BTA 钻头设计和优化主要采用如图 1 所示的受力模型,将钻头的受力简化为:①除了切削过程的走刀抗力和导向块所受的轴向摩擦力外,其余受力均分布在单一平面内;②各刀齿受力均匀分布;③将刀齿的切削力、导向块的正压力与摩擦力均由分布力简化为集中力,与刀齿实际受力状态存在较大误差,而刀齿受力及其分布规律对钻头的设计结果影响较大,因此,建立正确刀齿受力模型是优化设计 BTA 钻头的重要部分。

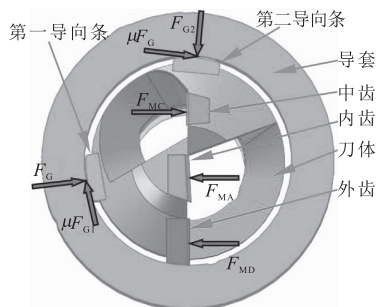


图 1 BTA 钻头受力模型

## 3 BTA 钻头刀齿切削力测试试验方法

在钻削深孔过程中,BTA 钻头受力表现为轴向力和扭矩,是刀齿切削力和导向条受力的综合表现(见图 1),通常钻削过程中无法直接获取刀齿切削力。为获取 BTA 钻头刀齿的钻削力,避免导向块与工件接触,将钻削孔演变为 BTA 钻头钻削半径相差 1mm 的圆柱体(见图 2),测量钻头钻削每个圆柱体时所受钻削力的三向分量(见图 3),将加工相邻半径的圆柱体所得钻削力的三向分量依次相减,获得 BTA 钻头钻削单位宽度环形工件时的刀齿钻削力三向分量。沿半径增大方向给依次相减所得单位宽度的环形工件标记为 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,从而获得单位刀齿钻削力沿半径的分布规律。因钻头钻削过程为平衡状态,通过加工与钻头半径相等的工件所受钻削力的三向分量可得到导向块的受力情

况。通过试验还可获得三种典型结构钻头钻削出的孔底形状,分析了不同钻头各个切削刃的工作情况,对比不同钻头的优缺点。



图 2 半径差为 1mm 的工件

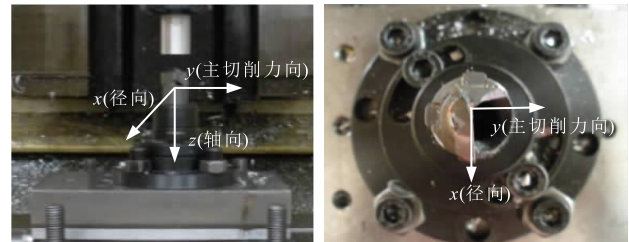


图 3 三向力测量方法

试验装置见图 4,试验原理见图 5。工件安装于机床主轴上,Kistler 9257B 型三向测力仪安装在机床工作台上,分别将三种典型的 BTA 钻头安装在测力仪上,加工不同直径的圆柱工件。利用测力仪测量刀具的三向钻削力,通过电荷放大器和数据采集仪处理数据后,从而获得三种典型 BTA 钻头钻削力及其沿半径方向的分布规律。

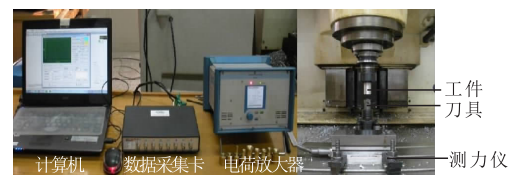


图 4 试验装置

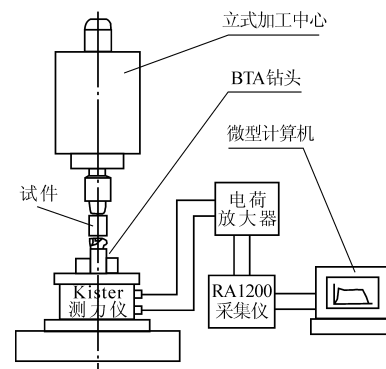


图 5 试验原理

三种 BTA 钻头分别为  $\Phi 17.73$  六型错齿 BTA 钻(见图 6a)、 $\Phi 20$  的五型错齿 BTA 钻(见图 6b)、 $\Phi 20$  的单边刃 BTA 钻(见图 6c)。其中,单边刃钻头是 BTA 钻头的最早形式,其切削刃全部分布在钻头一侧,加工过程所受扭矩和径向力较大。五型 BTA 钻头是基于单边刃钻头将中齿旋转  $175^\circ \sim$

185°,因其三个刀齿分别分布于钻头两侧,故所受的径向力与扭矩均减小。六型错齿钻头是在五型错齿钻头的基础上调整内齿偏角,使其在加工过程中的排屑、切削状态和刀齿受力得到改善。

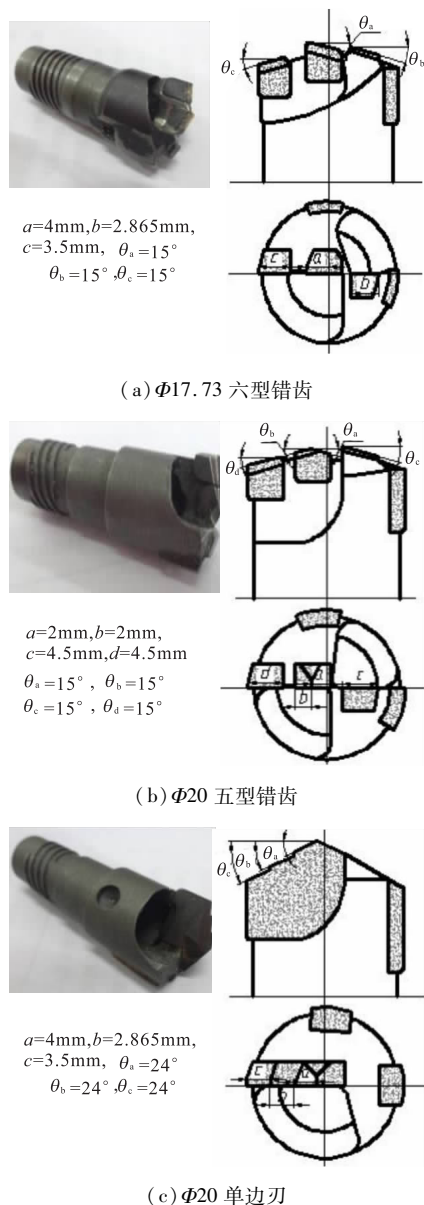


图6 三种 BTA 钻头结构参数

## 4 BTA 钻削过程与分析

### 4.1 三种典型结构钻头切削状态分析

由于三种钻头结构和各个切削刃分布不同,因此三种钻头刀齿参加切削的情况以及刀齿所受切削力大小也不同,对比三种钻头在相同条件下钻削的孔底表面(见图7)。由图7a可知,由于中齿有一定的超前量,使外齿切削宽度小于实际齿宽,中齿全部参加切削。内齿除了过中心部分不参与切削,其余齿均参与切削,使孔中间形成锥形的凸起部分。孔

底表面质量较光滑,试验发现此钻头的切削状态比其他两种钻头稳定;由图7b可知,五型错齿钻头中齿参与切削宽度比六型钻头宽,且超前量较小,内齿参与切削的宽度最小,使孔中间的凸起部分小于六型钻头。可以看出,孔底表面质量较六型钻头的孔底质量差,试验发现此钻头在钻削过程中的振动现象在三种钻头中最明显,受力状态最不稳定;由图7c可知,此钻头三个齿的宽度相等,且中齿和内齿的超前量相等,孔底形成三个宽度相同的环状表面,在孔底中心部,由于刀齿中心部分低于轴线,使孔底中心形成圆芯。虽然工件半径与刀具半径相等,但工件边缘仍有小部分未被切掉,这与钻头外齿切削刃的刃口处理有关。由图7可知,钻头工作的稳定性和孔底表面质量的差异与刀齿几何尺寸、刀齿的材料及刀齿分布等有关。设计 BTA 钻头时,刀齿位置分布、刀齿尺寸和刀齿材料是实现 BTA 钻头在钻削过程中平衡稳定工作的关键。

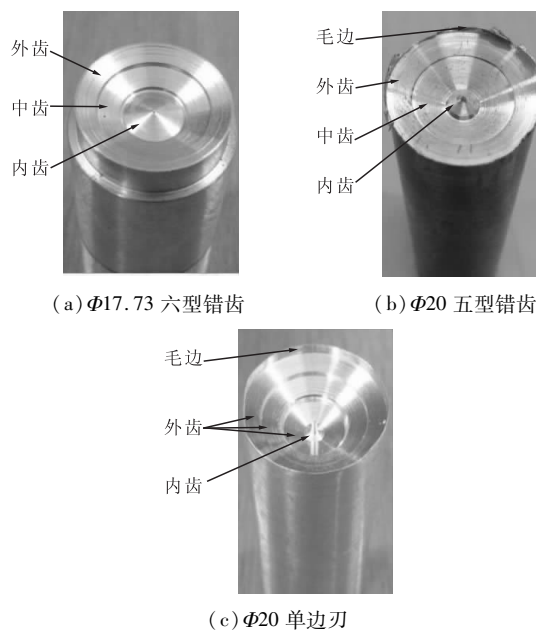


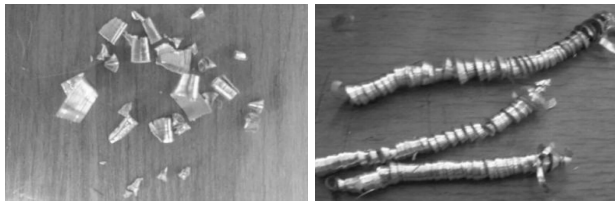
图7 三种 BTA 钻头钻出孔的孔底形状

在相同切削用量下,两种错齿 BTA 钻头钻削切屑形态较好,基本为 C 型断屑(见图8a),单边刃 BTA 钻头钻削的切屑为较长的带状切屑(见图8b),由于在深孔加工过程中,通过钻头中间的排屑孔进行排屑,若切屑较长会引起排屑孔堵塞。经分析可得,切屑大小与钻头切削刃断屑台的几何尺寸设计有关,需通过调整切削刃断屑台的几何尺寸改变切屑类型,改善 BTA 钻削过程中的排屑情况。

### 4.2 不同结构 BTA 钻头单位刀齿钻削力沿半径的分布规律

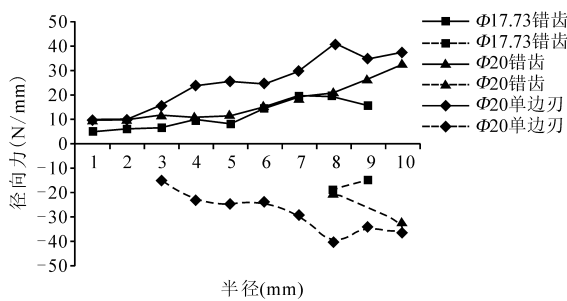
三种结构 BTA 钻头在主轴转速  $n = 800\text{r/min}$ 、

进给量为  $f=0.04\text{mm/r}$  时, 钻削材料为 LY12 铝合金圆柱时, 单位刀齿钻削力沿半径方向的受力分布规律见图9。图中实线为三个方向单位刀齿钻削力的大小趋势, 虚线为切削力的实际方向, 与规定正向相反。

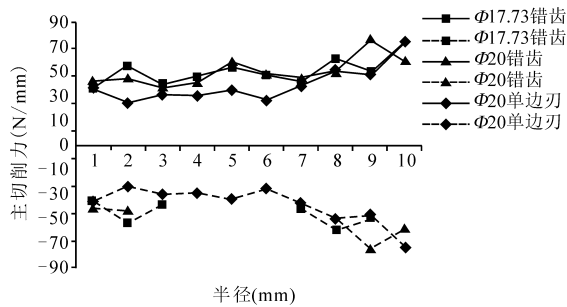


(a) 错齿 BTA 钻头钻出的 C 型断屑 (b) 单边刃 BTA 钻头钻出的带状切屑

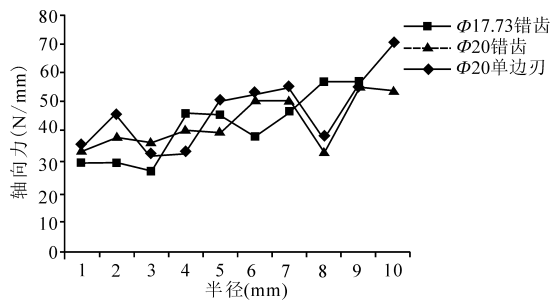
图8 BTA 钻头钻削时的切屑



(a) 径向力沿半径分布规律



(b) 主切削力沿半径分布规律



(c) 轴向力沿半径分布规律

图9 三种不同结构钻头三向分力沿半径分布规律

由图可知, 三种钻头的单位刀齿钻削力沿半径的分布规律基本一致, 单位刀齿钻削力均沿半径增大方向呈增大趋势。径向方向曲率半径不同, 刀齿切削速度也不同, 因此单位刀齿钻削力为非均匀分布状态。三种钻头的单位刀齿主切削力与单位刀齿轴向力的分布规律曲线基本重合, 说明三种钻头的

单位刀齿主切削力与单位刀齿轴向切削力大小基本相等,  $\Phi 20$  的单边刃钻头的单位刀齿径向力明显大于其他两种钻头, 这是因为  $\Phi 20$  单边刃 BTA 钻头的切削刃偏角大于其他两种钻头。

分析不同偏角下单位刀齿三向钻削力可知, 径向单位刀齿切削力与轴向单位刀齿切削力的关系与切削刃的偏角有关。错齿钻头切削刃的偏角均为  $15^\circ$ , 单边刃钻头切削刃的偏角均为  $24^\circ$ 。偏角为  $15^\circ$  时, 径向单位刀齿切削力与轴向单位刀齿切削力比值的均值为  $0.297 \approx \tan 15^\circ$ ; 偏角为  $24^\circ$  时, 径向单位刀齿切削力与轴向单位刀齿切削力的比值的均值为  $0.461 \approx \tan 24^\circ$ , 可得

$$\frac{F_x}{F_z} = \tan \theta \quad (1)$$

式中,  $F_x$  为径向单位刀齿切削力;  $F_z$  为轴向单位刀齿切削力;  $\theta$  为切削刃偏角。

综上可知, 在三种不同结构的 BTA 钻头钻削过程中, 切削刃几何角度的变化仅影响单位刀齿径向力大小, 不会影响钻削力的分布规律。因为外界的一些不可避免的因素对试验结果会产生一定的影响, 所以试验结果曲线有一定波动。

## 5 结语

(1) 搭建了 BTA 钻削力测量试验平台, 将工件安装于机床主轴, 刀具安装于测力仪上, 通过加工等半径差的圆柱体工件得到了 BTA 钻头刀齿的三向力以及分布规律。

(2) 分析了三种不同结构的 BTA 钻头钻削过程, 结果表明, 刀齿的合理分布、切削刃的几何角度直接影响钻削过程的稳定性以及切屑的形状。

(3) BTA 钻头三个方向的单位刀齿钻削力沿钻头的半径方向呈非均匀分布, 均呈沿半径增大方向递增的变化规律, 切削刃几何角度的变化只影响单位刀齿径向力的大小, 几乎不会影响单位主切削力与轴向力的大小以及钻削力沿半径的分布规律。

(4) 三种钻头的单位刀齿主切削力与单位刀齿轴向切削力大小基本相等, 径向单位刀齿切削力与轴向单位刀齿切削力的关系与切削刃的偏角有关。

## 参考文献

- [1] 邱易, 雷勇, 郑建明, 等. 深孔加工工具系统研究现状及趋势分析[J]. 工具技术, 2015, 49(12): 7-12.
- [2] Jih-Hua Chin, Chi-Ti Hsieh, Li-Wei Lee. The shaft behavior of BTA deep hole drilling tool[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1996, 38(5): 461-482.

# 喷砂对 TiAlN 涂层组织结构及切削性能的影响

姜涛

厦门金鹭特种合金有限公司

**摘要:** 采用阴极电弧蒸发沉积法在 WC-Co 硬质合金表面制备 TiAlN 涂层,利用不同喷砂时间和压力对涂层表面进行处理,通过 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和 CSM 纳米硬度计测定处理前后的涂层内应力、物相、表面形貌、纳米硬度等性能指标,研究不同喷砂时间和压力对涂层组织结构和力学性能的影响,同时通过对比不同喷砂时间和压力处理后的样品在铣削 P20 钢材的性能和磨损机理,得出随着喷砂时间和压力的增大,涂层表面液滴逐渐被去除,表面粗糙度减小从而使表面光洁度提升,调整涂层内应力状态,性能明显提升,其中钢件铣削加工最优涂层残余应力范围为  $-5.3 \sim -5.7$  GPa。

**关键词:** TiAlN 涂层;纳米硬度;力学性能;钢件铣削

**中图分类号:** TG335.86;TH161.14 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.007

## Effect of Micro-blasting on Microstructure Mechanical Properties and Cutting Performance of TiAlN Coatings

Jiang Tao

**Abstract:** TiAlN coating deposited on WC-Co substrate is prepared by cathodic arc evaporation deposition, meanwhile the coating is treated with different micro-blasting pressure and time. The properties including residual stress, coating phase, surface morphology, nano-hardness (H) are measured by X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM), CSM nano-hardness tester. The effect of different blasting pressure and time on coating microstructure and mechanical properties is studied. The performance and wear mechanism of coated inserts with different treatment in P20 steel milling performance are compared. It can be found that the droplets on the coating surface have been removed after blasting treatment thus leading to surface roughness decreased and the improvement of surface smoothness. Residual stress of coating has been adjusted at the same time. The optimum residual stress range on P20 steel milling is between  $-5.3 \sim -5.7$  GPa.

**Keywords:** TiAlN coating; nano-hardness; mechanical property; steel milling

### 1 引言

PVD TiAlN 涂层具有高硬度、优异的热稳定性和抗氧化能力,作为加工模具涂层被广泛应用于工

业生产中<sup>[1]</sup>。涂层后处理可有效调节涂层表面应力并提高切削工具寿命。喷砂作为 PVD 涂层的后处理方法,能快速并均匀地调节涂层表面物理特性及涂层应力状态<sup>[2]</sup>。

许多学者对喷砂后处理对于刀具性能的影响进

收稿日期: 2019 年 11 月

- [3] 超猛,张弓,王映品,等. 深孔加工技术的研究综述及发展趋势[J]. 机床与液压,2015,43(11):173-177.
- [4] 王鹏飞,肖继明,郑建明,等. 深孔加工中 BTA 钻分屑形式及钻削过程[J]. 工具技术,2019,53(4):86-90.
- [5] Dirk Biermann, Alexei Sacharow, Klaus Wohlgenuth. Simulation of the BTA deep-hole drilling process[J]. Prod. Eng. Res. Devel., 2009, (3):339-346.
- [6] C H Gao, K Cheng, D Kirkwood. The investigation on the machining process of BTA deep holedrilling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 107(1):222-227.
- [7] Sinisa Kojic. A Theoretical and experimental investigation of the BTA deep hole tool support in the machining zone[D]. Canada: Concordia University, 1997.
- [8] R Richardson, R Bhatti. A review of research into the role of

guide pads in BTA deep-hole machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 110(1):61-69.

[9] D Biermann, M Kersting, N Kessler. Process adapted structure optimization of deep-hole drilling tools[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):89-92.

[10] Lee Ju Eun, Gozen B Arda, Ozdoganlar O Burak. Modeling and experimentation of bone drilling forces[J]. Journal of Biomechanics, 2012, 45(6):1076-1083.

第一作者:师毓华,讲师,武警工程大学装备管理与保障学院,710086 西安市

First Author: Shi Yuhua, Lecturer, School of Equipment Management and Support, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China