

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.03.010

软固结气压砂轮磨粒磨损研究*

计时鸣,姜文雍,蔡东海,金明生,蔡姚杰,邱毅

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,浙江杭州 310014)

摘要:为解决自由曲面高效光整加工的问题,将软固结气压砂轮光整技术应用到模具加工中。软固结磨粒群在磨削时能受到柔性支撑,其磨削特性既不同于砂带,也不同于游离磨粒,然而气压砂轮有效加工的时间很短,磨损情况较为严重。针对这一情况,开展了软固结磨粒群磨粒的磨损过程及磨损机理分析,通过实验分别对气压砂轮自转速度 ω 、气压砂轮下压量 d 以及磨粒种类等与气压砂轮磨粒磨损之间的关系进行了研究和评价,并对不同种类磨粒的磨损表面进行了观测。研究结果表明:软固结磨粒磨损可以分为初期磨损阶段、正常磨损阶段和严重磨损阶段;磨粒的磨损随着气压砂轮自转速度 ω 和下压量 d 的增大而变得严重,但是当气压砂轮自转速度 ω 增加到某一定的值时,磨粒的磨损反而会下降。

关键词:气压砂轮;磨粒磨损;砂轮自转速度;下压量;磨粒种类

中图分类号:TH117

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)03-0315-05

Research of soft consolidation pneumatic wheel abrasive wear

Ji Shi-ming, Jiang Wen-yong, Cai Dong-hai, Jin Ming-sheng, Cai Yao-jie, Qiu Yi

(Key Lab of Ministry of Education for Province Jointed Mechanical Manufacture & Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems of the efficient finishing processing on the free surface of moulds, the finishing technology with the soft consolidation abrasives pneumatic wheel was investigated. Soft consolidation abrasive can be supported by flexible when grinding, it is different from abrasive belt and the free abrasive. However, the effective processing time of pneumatic wheel is very short; the wear situation is more serious. Aiming at solving this problem, abrasive wear process and grinding mechanism of soft consolidation pneumatic wheel were discussed; the relationship between the influence and the rotation speed ω , the amount of press down d and the types of abrasive wear was established, and the surface forms of different kinds of abrasive wear was observed. The influencing factors of abrasive wear were evaluated on experiments. The results indicate that the soft consolidation of abrasive wear can be divided into the initial wear stage, the normal wear stage and the severe wear stage. Abrasive wear with the increase of grinding wheel rotation speed ω and the amount of press down d becomes serious, but when grinding wheel rotation speed ω is increased to a certain value, the abrasive wear may decline.

Key words: pneumatic wheel; abrasive wear; rotation speed; amount of press down; abrasive types

0 引 言

对于自由曲面的光整加工,刚性研磨工具难以与工件曲面形成良好的面接触,因此,难以形成高效的加工;也难以把握各局部的加工力度和加工时间,因此,加工精密表面不但质量不稳定且加工效率低,浙江工

业大学计时鸣等人^[1-2]提出的软固结磨粒气压砂轮光整加工方法可以解决上述问题。

软固结磨粒群在磨削时能受到弹性支撑,其磨削特性既不同于砂带等固着磨粒,也不同于游离磨粒。软固结磨粒在宏观上不能自由移动,但在微观上由于受到邻近磨粒和粘结剂的弹性支撑,可发生局部微动,

收稿日期:2013-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175471,50575208,51205358);浙江省自然科学基金资助项目(LQ12E05014)

作者简介:计时鸣(1957-),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,主要从事先进加工技术方面的研究。E-mail:jishiming@zjut.edu.cn

能与自由曲面形成较好的仿形接触。

在加工中,磨粒的磨损情况与磨削效率、加工精度、表面质量和生产成本等密切相关^[3]。因此,研究软固结气压砂轮磨粒的磨损有重要意义。本研究开展软固结磨粒群磨粒的磨损过程及磨损机理分析。

1 气压砂轮磨粒磨损的基本形式

磨粒通过高聚物粘结剂,在气压砂轮橡胶基体上构成粘结磨粒混合层,以起到磨削加工作用。本研究通过控制橡胶基体内部气压以及调整混合层厚度和磨粒颗粒来改变弹性模量,使气压砂轮既具备气囊抛光中的柔性仿形能力,又具备刚性砂轮高强度的切削力,从而面对自由曲面和不同加工对象都能形成高效的加工,软固结磨粒气压砂轮示意图如图 1 所示。

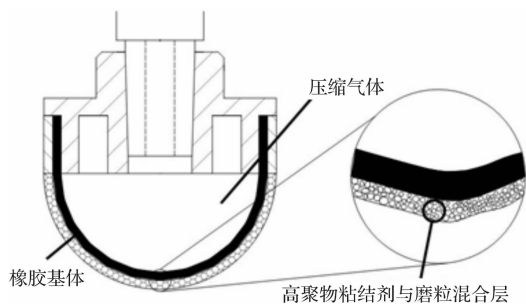


图 1 软固结磨粒气压砂轮示意图

磨粒在正常情况下有 3 种磨损形式^[4]:

(1)堵塞粘附。堵塞粘附是气压砂轮在加工时,磨粒通过磨削区,由于磨削高温和很大接触压力的作用,微细切屑粘附在磨粒上,严重削弱其磨削能力。

(2)脱落。磨粒群通过高聚物粘结剂粘结在气压砂轮上,粘结剂和磨粒结合处成为结合桥。磨削过程中,若磨粒与磨粒之间的结合桥发生断裂,则磨粒将从砂轮上脱落下来,并在原位置留下空穴。磨粒的脱落主要取决于粘结剂的强度。

(3)磨钝。磨削过程中,由于磨粒与被加工材料多次反复地滑擦作用,使磨粒逐渐变钝,形成磨粒小平面或磨粒尖顶部的破断而无切刃。

在这 3 种磨损形式中,堵塞粘附往往和被加工材料的性质有关,而且在加工前期影响较小,在后期影响变大;脱落则受磨削力大小和高聚物粘结剂选择的影响较大;而磨钝磨损则贯穿于整个加工过程之中^[5]。

磨粒钝化又可以分为磨粒的磨耗磨损和破碎磨损。磨耗磨损是因为磨粒与工件之间做相对运动时的摩擦,以及磨粒之间相互挤压产生塑性变形,当施加的外力撤除或消失后磨粒表面不能恢复原状,进而发生磨损,使磨粒逐渐变钝,进而在磨粒上形成磨损小平

面。破碎磨损则是因为磨粒受冲击作用,使作用在磨粒上的应力超过磨粒本身的强度导致磨粒顶尖破碎。这种钝化磨损是逐渐进行的。

虽然磨粒的破碎和脱落将导致加工的精度下降,但是磨粒适当地破碎和脱落却可以更新钝化的磨粒,从而在磨削的过程中不断产生新的磨削刃,因此,一般把这种磨粒破碎脱落称为砂轮的“自锐”作用^[6]。

2 磨损期的划分

磨削过程中随着被磨材料磨除体积的增加,磨粒磨损逐渐增大^[7]。为了寻找磨削过程中砂轮磨损的规律,首先需要了解磨粒高度变化情况。该试验采用间接测量方法^[8],通过测量每次进给工件厚度的实际去除量来判断砂轮磨粒高度的变化情况。

笔者设计的试验参数如表 1 所示,本研究针对激光强化模具表面(537HV)做了多组光整实验,在多次测量后取平均值,其结果如图 2 所示。

表 1 光整实验参数设置

参数	数值
工具转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 400
下压量/mm	2
砂轮倾角/deg	20
加工时间/s	90

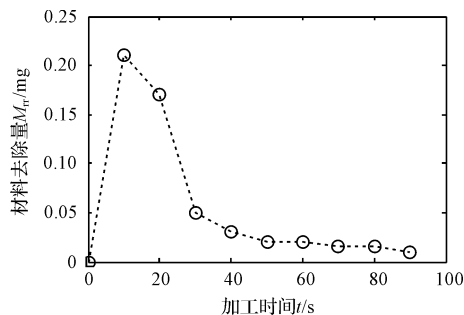


图 2 90 s 时间内材料去除量变化情况

从图 2 中可以看出,在加工前 30 s,工件材料去除量很大,说明磨粒磨损严重。此时,磨粒磨损进入初期磨损阶段。该阶段磨粒磨损的形式主要表现为表层磨粒的破碎和整体脱落。其原因是由于气压砂轮成半球状曲面,表面的磨粒受到高聚物粘结剂的约束较小。加工初始,气压砂轮高速旋转,在和工件表面接触时,由于相对速度相差巨大,磨粒会受到较大的冲击力而产生裂纹,或者由于粘结剂和磨粒之间的结合桥强度不足,磨粒受到的力大于结合桥所能承受的极限,从而造成磨粒破碎和整体脱落。不过,尽管此时表层磨粒磨损较快,但是由于在磨削初期,气压砂轮磨粒刃形锋利,并且参加切削的磨粒数目也较多,虽然磨损率较大,但是该阶段气压砂轮的切削能力和材料切除效率却是最大。

而在 30 s ~ 90 s 期间,气压砂轮的材料去除率明显降低,逐渐趋于一个范围值。说明此时光整加工进入第 2 期磨损阶段即正常磨损阶段。在该阶段,粘结剂磨粒混合层起切削作用,磨削在正常稳定状态下进行,磨削力也趋向稳定。尽管仍然有少量的磨粒会破碎,但主要是磨粒的切削钝化。磨粒在经过初期的顶尖破碎、折断或部分脱落以后,其锋利性降低,切削能力也相对减弱,导致材料切除效率变小,但减少不多。

在加工 10 min 后,工件质量不再变化,气压砂轮已无切削效果,磨粒磨损进入第 3 磨损阶段即严重磨损阶段。随着磨削时间的增加,砂轮工作面上钝化磨粒的比例不断变大,而且由于工件切削产生的切屑不断地粘附在磨粒刀刃上,堵塞了磨粒间的孔隙,砂轮工作面的堵塞现象越来越严重,用肉眼可以明显看到砂轮加工表面上形成一层金属薄层或连带油泥的黑亮层,如图 3 所示。加之作用在磨粒上的力急剧增大又加剧上述现象的产生,导致磨粒产生大块碎裂、结合剂破碎及整个磨粒脱落,砂轮磨损加快,砂轮振动增加,磨削噪音加大,甚至导致工件表面粗糙度下降以及表面质量恶化,此时气压砂轮已处于非正常工作状态。因此,在实际光整加工中,一般在达到该阶段之前就需要更换气压砂轮。

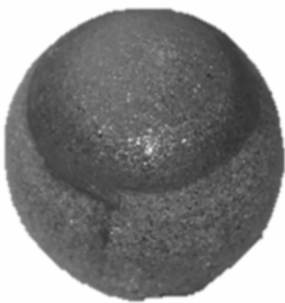


图 3 气压砂轮的黑亮层

经上述分析可知,软固结气压砂轮磨粒的磨损过程大致可分为 3 个磨损期:初期磨损阶段、正常磨损阶段和严重磨损阶段。

3 影响磨损的主要因素

因为软固结磨粒是随机地分布在砂轮上,这使得磨粒的磨损机理非常复杂。影响软固结气压砂轮磨粒群磨损的因素有很多,重点分析气压砂轮自转速度 ω 、下压量 d 及磨粒种类等对气压砂轮磨损过程的影响规律。

3.1 气压砂轮自转速度 ω

在磨削深度恒定不变的情况下,磨粒与工件的接触弧长为一定值,当气压砂轮自转速度 ω 升高时,单

位时间内每个磨粒参加切削的次数增大,导致软固结磨粒的磨损加快。同时,气压砂轮的高速切削不可避免地引起对磨粒切削刃的冲击作用,虽然柔性气压砂轮与工件表面接触过程中产生的弹性非线性变形可缓和冲击作用,但是随着 ω 的增加,会导致软固结磨粒与工件接触区的摩擦加剧,从而使磨损加剧。

为了研究气压砂轮自转速度 ω 对磨粒群磨损的影响,在如表 2 所示的试验参数下,笔者选取气压砂轮多组不同转速,进行光整加工实验,经多次测量后取平均值,其结果绘制成图,砂轮不同转速的材料去除率如图 4 所示。

表 2 实验参数设置

参数	数值
进给速率/(mm · s ⁻¹)	11
下压量/mm	2
砂轮倾角/deg	20
加工时间/s	60

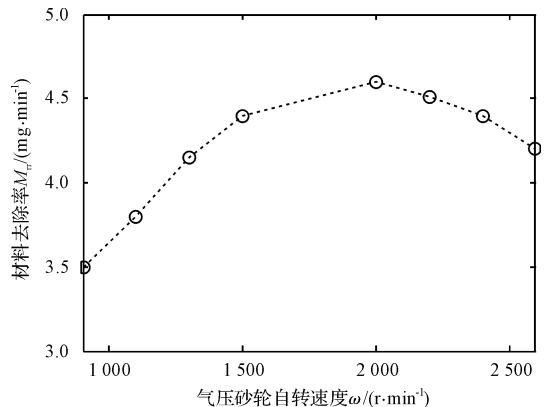


图 4 砂轮不同转速的材料去除率

从图 4 中可以看出,在一定转速范围内,材料去除率随砂轮转速的增加而增加,但砂轮的转速超过 2000 r/min 时,材料去除率却减小。这是由于随着转速的增加,单位时间内经过磨削区的磨粒数目增加,即有效切削刃数增加;随着转速的增加,磨粒刀刃在磨削区的驻留时间缩短,软固结磨粒群由于橡胶基体的弹性支承,导致磨粒不足以切入工件表面,磨粒只能产生滑擦、耕犁等作用^[9],工件表面粗糙度变化很小。两种划痕如图 5 所示,磨粒磨削产生的划痕(呈同心圆分布)比原有的划痕(随机分布)还浅。因此,过高的转速反而会导致材料去除率和磨粒群磨损率的下降。

3.2 下压量 d

有研究表明^[10],当 d 在一定范围内时,下压量 d 基本与压力 p 成线性关系,即使超出这个范围,下压量 d 也与压力 p 成正比关系,说明可以采用控制下压量的方式来实现压力控制。砂轮下压量 d 增加时,压力 p 也增加,导致工件切深增加,磨粒的磨削厚度和磨削

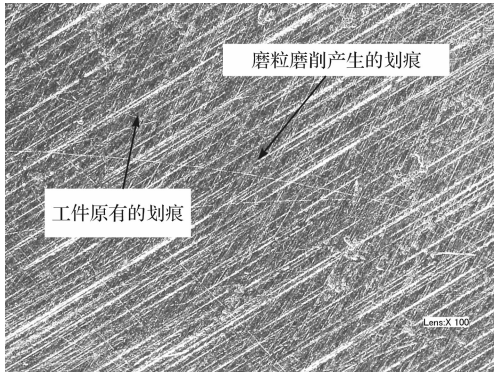


图 5 磨料磨削产生的划痕与工件原有的划痕

力增大,引起高温摩擦,磨钝磨损趋于恶化。另外, p 增大,磨粒切削工件时的接触弧长和摩擦时间增长,磨粒热量增加,使磨损加剧。

为了验证下压量 d 对磨粒群磨粒磨损的影响,本研究选取的实验参数如表 3 所示,并对材料去除率 M_{rr} 即磨粒磨损情况进行分析,实验结果如图 6 所示。

表 3 实验参数设置

参数	数值
进给速率/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	11
砂轮转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 400
砂轮倾角/deg	20
加工时间/s	60

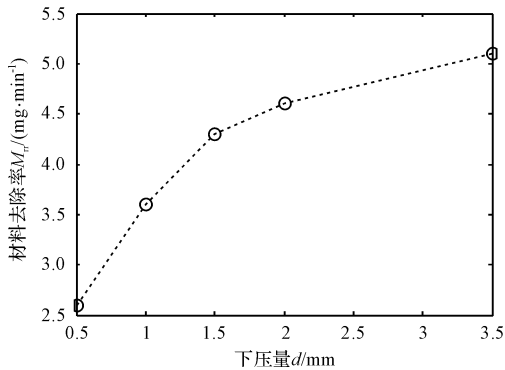


图 6 不同下压量下的材料去除率

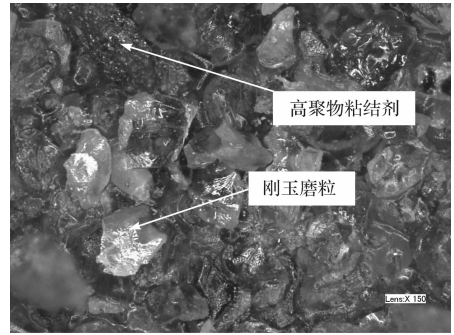
从图 6 中可以看出,随着气压砂轮下压量 d 增加,工件材料去除率增大,磨粒群磨损趋于恶化。

3.3 不同磨粒种类

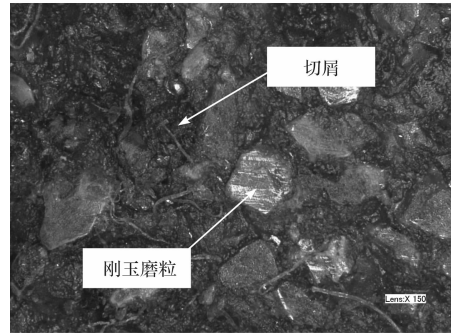
不同种类的磨粒,其在微观结构、抗破碎性和磨损机理方面有较大的差异。目前较为常见的磨粒材料有刚玉、碳化硅、金刚石和立方氮化硼等^[11]。本研究取刚玉和碳化硅这两类较为常用的磨粒为分析对象。

磨削后的刚玉磨粒顶尖部分形状极不规则,并且残留了大量细小的碎片。在磨削过程中, Al_2O_3 刚玉磨粒的顶部会首先钝化成小平面,并且随着磨削过程的持续进行,钝化的小平面逐渐扩展变大,刚玉磨粒群

磨损前后的表面微观对比图如图 7 所示。



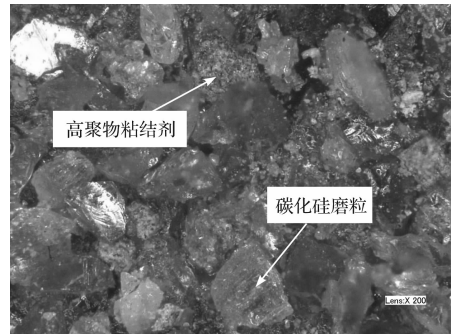
(a) 磨损前的软固结磨粒群



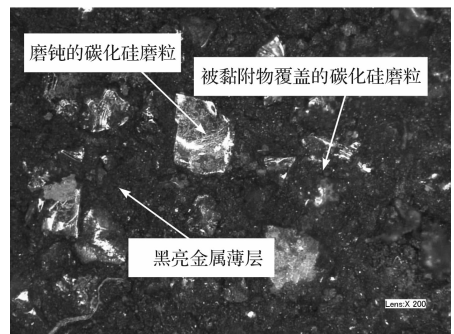
(b) 磨损后的软固结磨粒群

图 7 刚玉磨粒群磨损前后的表面微观对比图

碳化硅磨料在磨削后,磨粒顶部几乎都出现较大的磨损小平面,并且在磨损小平面周围出现有少量的磨粒脱落和破碎现象,还可以发现小平面被黏附物覆盖,碳化硅磨粒群磨损前后的表面微观对比图如图 8 所示,表明碳化硅磨料在磨削过程中出现了较严重的堵塞粘附磨损。



(a) 磨损前的软固结磨粒群



(b) 磨损后的软固结磨粒群

图 8 碳化硅磨粒群磨损前后的表面微观对比图

4 结束语

(1)与砂带磨损只有两个磨损阶段不同,软固结气压砂轮磨粒群在磨削过程具有明显的初期磨损阶段、正常磨损阶段和严重磨损阶段等3个磨损阶段。

(2)软固结磨粒群磨粒磨损受到气压砂轮自转速度 ω 、下压量 d 及磨粒种类等的影响较大。其中,气压砂轮下压量越大,磨粒磨损越严重;随着砂轮自转速度 ω 增加,软固结磨粒的磨损先增大后减小。同时,分析结果表明,不同种类磨粒磨损后的表面微观结构有所差异:刚玉磨粒以磨钝磨损为主,而碳化硅磨粒的堵塞粘附现象比刚玉磨粒严重。

参考文献(References):

- [1] 计时鸣,金明生,张 宪,等.应用于模具自由曲面的新型气囊抛光技术[J].机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [2] 计时鸣,丁洁瑾,金明生,等.软固结气压砂轮的质量评价及试验研究[J].机电工程,2013,30(1):21-25.

- [3] JOURANI A, DURSAPT M, HAMDI H, et al. Effect of the belt grinding on the surface text: modeling of the contact and abrasive wear[J]. **Wear**,2005,259(7/12):1137-1143.
- [4] 黄 云,杨春强,黄 智.304 不锈钢砂带磨削试验研究[J].中国机械工程,2011,22(3):291-295.
- [5] 傅杰才.磨削原理与工艺[M].长沙:湖南大学出版社,1986.
- [6] MEZGHANI S. Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron [J]. **Wear**, 2009,267(1-4):132-144.
- [7] 王新乐,孙玉山.砂轮磨损机理及修整方法研究[J].应用科技,2001,28(2):5-7.
- [8] 徐蔡俊,徐九华,傅玉灿,等.钛合金砂带磨削磨粒磨损研究[J].航空制造技术,2008(16):74-76.
- [9] 刘瑞杰,黄 云,黄 智,等.基于钛合金砂带磨削的磨削率、表面质量及砂带寿命性能试验研究[J].组合机床与自动化加工技术,2010(1):18-21.
- [10] 曾 晰.软固结磨粒气压砂轮设计方法及材料去除特性研究[D].杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.
- [11] 丁洁瑾.软固结磨粒气压砂轮的优化设计及性能试验[D].杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

计时鸣,姜文雍,蔡东海,等.软固结气压砂轮磨粒磨损研究[J].机电工程,2014,31(3):315-319.

Ji Shi-ming, JIANG Wen-yong, CAI Dong-hai, et al. Research of soft consolidation pneumatic wheel abrasive wear[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(3):315-319.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第314页)

理基础上,介绍了影响简支管路所受应力大小的因素,并推导了在外部装置施加振动及内部压力脉动双重因素影响下的应力公式,在不考虑流固耦合振动的情况下进行仿真,得到了寿命与应力之间的关系曲线,清晰地揭示了管路寿命与应力的关系和频率之间的关系,为液压管路选型计算、寿命分析及故障失效原因分析提供了参考。

同时该研究也存在一些不足,试验是在没有考虑流固耦合振动的情况下进行的,对于在流固耦合情况下的寿命与应力关系没有深入地研究,而流固耦合情况又比较复杂,所以下一步准备对整个系统做更加详细地分析,引入耦合因素,使试验结果更加精确。

参考文献(References):

- [1] 曹 源,金先龙,张晓敏,等.基于流固耦合的水力瞬变三维模拟及管壁动态应力分析[J].振动与冲击,2009(11):70-72.
- [2] 丁丽华,刘 勇.振动作用下简支梁内残余应力的影响因素分析[J].机电工程,1995,12(1):29-33.
- [3] 曹 源,金先龙,杜新光.水锤载荷作用下管道变形及动态应力[J].核动力工程,2010(2):33-36.
- [4] QU Yang, XIAO Ping, GAO Feng, et al. Modal analysis of

the aircraft hydraulic-system pipeline[J]. **Journal of Aircraft**,2012,49(4):1168-1174.

- [5] 吴家龙.弹性力学[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [6] 赵孟文,袁朝晖,王鸿辉.高压脉冲试验台设计[J].液压与气动,2009(11):23-25.
- [7] 王 双,邓乾坤,张 斌.高压伺服控制脉冲试验台液压系统设计[J].液压气动与密封,2012(9):21-24.
- [8] 李 军,陈 明.基于虚拟仪器技术的飞机液压脉冲试验系统[J].测试技术,2007(3):77-79.
- [9] 袁朝晖,马 煜.基于PID神经网络的液压脉冲试验系统[J].液压与气动,2010(4):86-88.
- [10] 张 森,孟庆春,张 行.无扩口管路连接件疲劳寿命预估的损伤力学-有限元法[J].航空学报,2009(3):435-443.
- [11] 何慧慧,董金善,丁培丽.基于有限元的齿啮式快开压力容器疲劳分析[J].轻工机械,2013,31(3):61-63.
- [12] 张 行.断裂与损伤力学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [13] 周振龙,程光明.基于简支梁振动的主动控制技术研究[J].机电工程,2011,28(4):418-421.
- [14] HUANG Zhi-cheng, ZHANG Bai-qing, XU Han, et al. Study on the fatigue life of fully-automatic hydraulic press pull rods based on finite element and mechanical materials [J]. **Advanced Materials Research**,2012(58):70-73.

[编辑:张 翔]