

精密导电滑环表面微槽车削性能

耿 星 郭东明 金洙吉 张兰芳

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116024)

文 摘 采用超精密车削精密导电滑环导电环的方法,保证了精密导电滑环绝缘环与导电环的同轴度、环间距,使绝缘微槽变形量低于0.10 mm。建立了精密导电滑环的切槽模型,利用仿真分析讨论了主轴转速、进给速率、刀具前角和切削深度对微槽变形量的影响,并对模型进行了试验验证。结果表明:滑环微槽侧面变形量随主轴转速的增大而变大,当转速达到700 r/min时,变形量达到了0.10 mm,超出了滑环的精度要求;滑环微槽变形量随机床进给速率的增大而变大,当进给速率达到1.5 mm/min时,变形量超出了滑环的精度要求;滑环微槽变形量随着前角的增大而减小;滑环微槽变形量随切削深度的增大而变大,切削深度低于0.2 mm时,滑环变形量微乎其微。

关键词 精密导电滑环,导电环,超精密车削,切槽模型

中图分类号: TG659

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.025

Processing Performance of Micro-Groove on Surface of Precision Conductive Slip Ring

GENG Xing GUO Dongming JIN Zhuji ZHANG Lanfang

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract A method of ultra-precision cutting was used to ensure the concentricity, the spacing between the conductive ring and make sure the deformation of the insulated micro-groove less than 0.10 mm. A grooving model of precision conductive slip ring was established to simulate and analyze the impact of spindle speed, feed rate, rake angle and depth of cut on the micro groove deformation, and the model was verified by experiments. The results showed that: the deformation of the slip ring increased with the rise of spindle speed, when the speed reached 700 r/min, the deformation reached 0.10 mm, which was out of the accuracy requirements; the deformation of the slip ring increased with the rise of feed rate, when the feed rate reached 1.5 mm/min, the deformation was out of the accuracy requirements; the deformation of the slip ring decreased with the rise of feed rate; the deformation of the slip ring increased with the rise of the depth of cut. , when the cutting depth was less than 0.2 mm, the deformation became very little.

Key words Precision conductive slip ring, Ultra-precision machining, Ultra-precision turning, Grooving model

0 引言

导电滑环(图1)用于实现两个相对转动的零部件之间的电功率或者电信号的传输,适用于需要无限制的连续或断续旋转,同时又需要从固定位置到旋转位置传送功率或数据的场所,因此在航空、航天、航海、电子等高精尖领域有着非常广泛的应用^[1-3]。随着该领域的不断发展,对导电滑环的尺寸和精度提出了更加苛刻的要求,实现精密导电滑环高精高效加工成为亟待解决的课题。

目前对于小型精密导电滑环的制造方法主要为真空灌注环氧树脂法^[4-7]和积叠式胶粘法^[8]。真空灌注法是将环氧树脂灌注于真空精密模具中,直接成型导电滑环的基体。由于注塑工艺的缺陷,基体易产生热变形、气泡、裂纹等缺陷,不能保证环间距的精度要求。积叠式胶粘法是在两层导电环片之间置入绝缘环胶膜,经过加压融化使导电滑环的绝缘环和导电环胶合。该方法保证了导电环之间良好的绝缘性,但是胶合过程难以保证胶层厚度的均匀性及滑环的同

收稿日期:2014-12-01

作者简介:耿星,1990年出生,硕士研究生,主要从事导电滑环的加工工艺方案研究。E-mail:1012070188@qq.com

轴度。

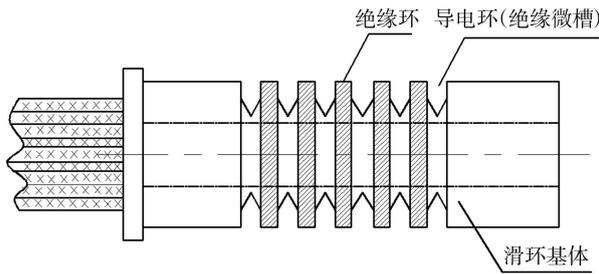


图1 导电滑环示意图

Fig.1 Schematic diagram of conductive slip ring

聚砜树脂具有良好的力学性能^[9-11],室温时的弹性模量为 2.65 GPa,即使在 100℃ 时仍能达到 2.46 GPa;在热塑性工程塑料中具有很高的蠕变性能,在 100℃、21 MPa 环境下经过 1 h 后的蠕动量为 2%。利用单刃成型车刀对聚砜树脂基体的薄壁圆筒进行车削,直接成型导电滑环的绝缘微槽,而后在绝缘微槽内电镀合金制作导电环,进而完成导电滑环的加工。该加工方法满足了导电滑环的环间距及同轴度要求,极大提高了导电滑环的精度。

由于绝缘环壁薄、刚性小,且滑环的绝缘微槽间距仅有 0.44 mm,极易在切削力的作用下产生弯曲变形,难以满足绝缘微槽变形量低于 0.10 mm 的精度要求。本文基于超精密切削车削加工的方法,建立精密导电滑环微槽的车削受力模型,对不同切削工艺参数(主轴转速、进给速率、刀具前角)下滑环基体表面切槽后微槽发生的变形以及相同切削参数下不同槽深的微槽绝缘环变形量进行研究,在保证绝缘环微槽侧面变形量低于 0.10 mm 的条件下,寻找最适宜的切削工艺参数。

1 精密导电滑环受力模型的建立及仿真分析

1.1 精密导电滑环受力模型的建立

精密导电滑环微槽车削受力模型如图 2 所示。导电滑环基体表面所受切削力大小与其剪切面积 $ACBOA$ 有关^[12-13]。其中 AOB 为对称 V 型刃, AB 为等效切削刃。由于切削刃的对称性,切屑将沿着前刀面随刀具的运动而对称流动,在到达剪切面以后发生剪切滑移。

切屑流过的平面 AOB 即前刀面,其与基面间的夹角定义为前角 γ_e 。假定在切屑流出表面内 AO 与 OB 刃上的切屑均有相同的剪切角 ϕ_e ,即切削刃上各点滑移方向相同,且均与图 2 中的 OC 方向相同,V 型槽的切削就能够简化为各种不同切削深度的直角自由切削的集成与叠加,此时的剪切面为两对称三角形 AOC 与其对面。同时假设在切削过程中发生的塑性变形仍然可以看作满足平面塑性应变的理想刚塑

性形体,则依据塑性理论知两剪切面上的剪应力 τ 即为剪切流动应力,而法向应力根据应力平衡可算得 $\sigma_n = \tau$ ^[14]。

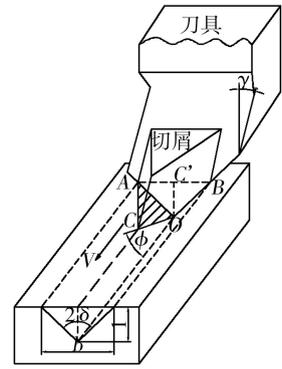


图2 微槽车削受力模型

Fig.2 Micro-groove cutting model

1.1.1 剪切面积的计算

由于成型切槽刀刃的对称性,刀具前角 γ_e 可在对称基面 OCC' 内测量,而轮廓角 2δ 则在垂直于切削速度方向的平面内测量。参照图 3 和图 4,由几何关系可以得到剪切面积:

$$A_s = \sqrt{p(p - OC)(p - AC)(p - AO)} \quad (1)$$

式中, $p = \frac{1}{2}(OC + AC + AO)$

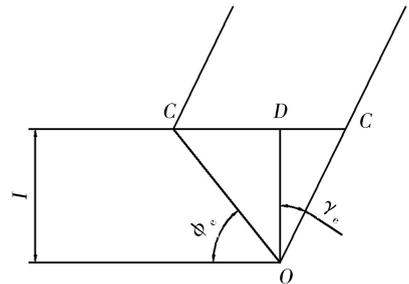


图3 V型槽平面示意图

Fig.3 V-groove schematic plan

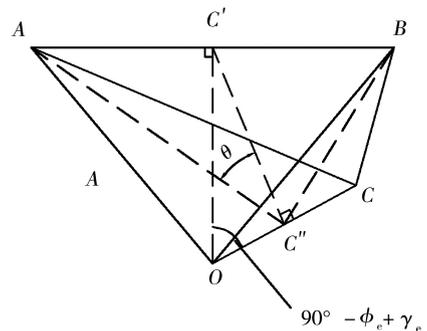


图4 切削部分三维示意图

Fig.4 3D schematic of the cutting part

1.1.2 切削力的计算

假设切削过程中各应力均匀分布,切屑受到 F' 、 F 、 F_x 三个力的作用,其中 F' 与 F 是一对平衡力。 F' 可以分解为两部分:前刀面 AOB 上的摩擦力 R 和正

压力 N , 而 F 可以分解为 F_y 和 F_z 或者 F_n 和 F_s (图 5)。一侧剪切面上的剪切力可以计算为:

$$F_{s(\text{侧})} = \tau \cdot A_s \quad (2)$$

而从单一的剪切面上看, 单一剪切面所受到的轴向力 F_x 与单边的剪切力和法应力组成力学三角形。根据图 5 可以求得:

$$\begin{aligned} F_x' &= \frac{F_s}{2} \cdot \cos\theta = \tau \cdot A_s \cdot \frac{\cos\theta}{2} \\ &= \frac{\tau \cdot \cos\theta}{2} \cdot A_s \end{aligned} \quad (3)$$

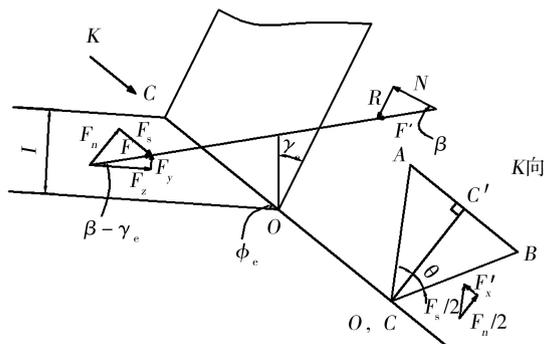


图 5 V 型槽车削的切削力示意图

Fig. 5 Schematic of cutting force when cutting V-groove

1.2 仿真结果及分析

1.2.1 主轴转速的影响

图 6 为本文建立的有限元仿真模型。将刀具设定为刚体, 选取刚体上某点施加切削速度载荷, 对主轴转速与微槽变形量的关系进行仿真。

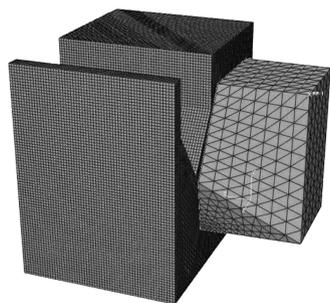


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

图 7 是刀具前角 12° , 切削深度 0.4 mm , 进给速率 1.5 mm/min 时不同转速下微槽变形量的仿真结果。由于仿真模型未被切除的网格发生变形和回弹, 所以微槽变形量会出现一定范围的波动。在切削时间达到 0.016 s 时微槽变形量接近稳定, 反映出微槽的真实变形量。仿真结果表明, 随着主轴转速的增大, 微槽变形量变大, 在 870 r/min 时微槽变形量达到 0.12 mm , 不满足精度要求。

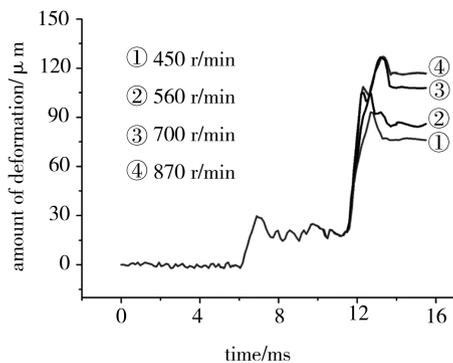


图 7 主轴转速仿真曲线

Fig. 7 Changing trend of simulation of spindle speed

1.2.2 刀具前角的影响

图 8 为主轴转速 750 r/min , 切深 0.4 mm , 进给速率 1.5 mm/min 下不同刀具前角的仿真结果。结果表明, 微槽变形量随着刀具前角的增大而变小, 在 0° 前角时变形量达到最大值, 在 18° 时微槽变形量最小, 切削效果最好。

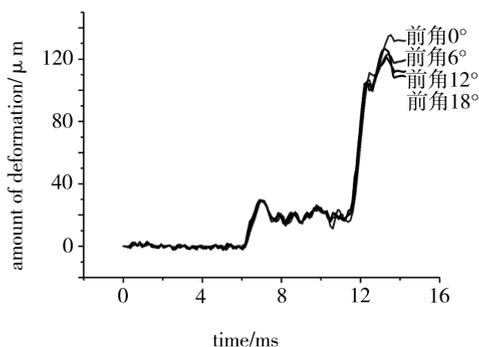


图 8 前角仿真曲线

Fig. 8 Changing trend of simulation of rank angle

1.1.3 切削深度的影响

图 9 是在主轴转速 750 r/min , 刀具前角为 12° , 进给速率 1.5 mm/min 时不同深度微槽变形情况的仿真结果。

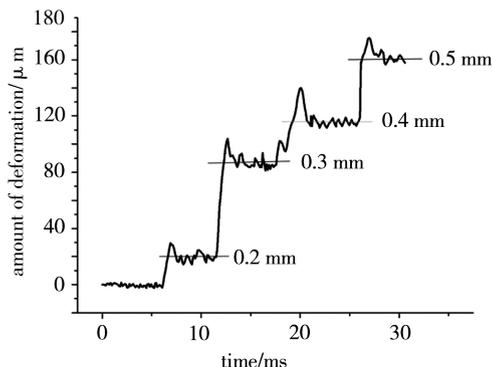


图 9 切削深度仿真曲线

Fig. 9 Changing trend of simulation of cutting depth

结果表明, 切削深度低于 0.2 mm 时, 微槽变形

表 1 试验选用的切削参数值

Tab. 1 Cutting parameters which selected in experiments

主轴转速 /r·min ⁻¹	进给速率 /mm·min ⁻¹	刀具前角 /(°)	切削深度 /mm
450	0.5	0	0.2
560	1	6	0.3
700	1.5	12	0.4
850	2	18	0.5

量接近 0;随着切削深度的增加,微槽出现一定的变形,同时微槽在一个波峰后回落到稳定区域内波动,此稳定值即为微槽的真实变形量;随着切削深度的增大,微槽的变形量变大,在切深达到 0.5 mm 时,微槽变形量达到最大值,但此时已经不能满足滑环的精度要求。

2 试验验证

2.1 试验条件与方法

2.1.1 试验准备

在 $\Phi 9.2 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 的圆柱体聚砜树脂材料上进行,单刃成型刀具材料为高速钢 W18Cr4V,刀具几何参数后角 13° ,前角分别选取 0° 、 6° 、 12° 和 18° 。试验在 CJK6145 型数控车床上进行;使用基恩士 VHX-600E 型超景深显微镜对绝缘环微槽变形量进行检测。

2.1.2 试验方法

在聚砜树脂基体间隔适当距离(保证标准槽不发生变形)完成标准槽的车削(图 10),然后在与标准槽相距 0.44 mm 的位置依次完成槽深自 0.1 mm 依次递增至 0.6 mm 的 6 种深度微槽的车削,使用基恩士 VHX-600E 型超景深显微镜对滑环微槽侧壁的变形量进行测量(图 11)。

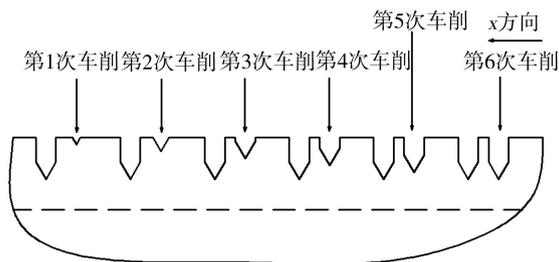


图 10 车削试验示意图

Fig. 10 Schematic of processing test

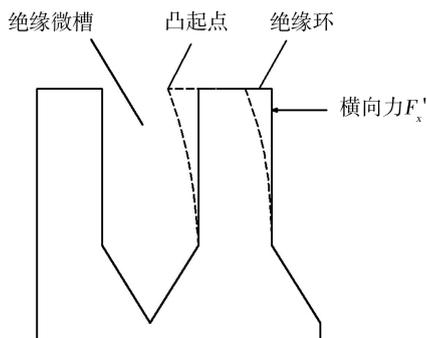


图 11 微槽变形示意图

Fig. 11 Schematic of deformation of micro-groove

试验采用单因素试验法,表 1 为选取的车削参数范围。

2.2 试验结果与分析

图 12 为不同主轴转速下绝缘环微槽变形量的试验与仿真结果的对比。结果表明,微槽的变形量随着主轴转速的增大而变大,仿真结果与试验结果一致。结合微槽切削受力模型分析,在切削过程中横向力 F_x' 是微槽产生变形的直接因素。随着主轴转速的增大,切削速度变大,刀具与工件接触区的剪应力 τ 变大;结合式(3),在剪切面积一定时,横向力 F_x' 的大小与剪应力 τ 成正比。随着剪应力的增大,横向力 F_x' 变大,微槽变形量增加。

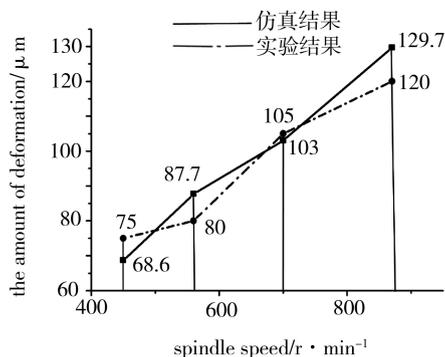


图 12 主轴转速仿真结果与试验结果对比曲线

Fig. 12 Changing trend of the comparison of spindle speed simulation with experimental results

图 13 为不同前角切削滑环基体后微槽的变形量的仿真结果与试验结果对比。

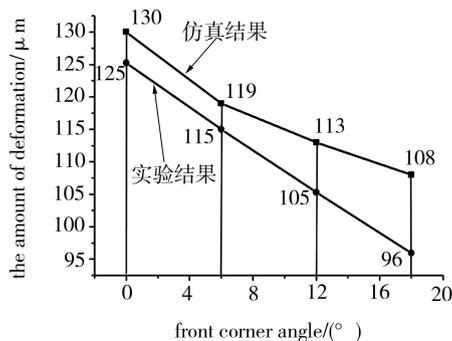


图 13 前角仿真结果与试验结果对比曲线

Fig. 13 Changing trend of comparison of rank angle simulation with experimental results

结果表明,试验所得的滑环微槽变形量趋势与仿真结果基本一致:随着刀具角度的增大,微槽变形量逐渐减小。依据万珍平等^[15]的研究,接触长度的大小与刀具前角呈现一定的线性关系,则刀具前角的大小对于剪应力有重要影响,从而影响轴向力 F_x' 。实际刀具前刀面与切屑的接触长度公式为:

$$l_n = \frac{a_c \sin(\Phi + \beta - \gamma_0)}{\sin\Phi \cos\beta} \quad (4)$$

式中, γ_0 即为刀具前角。由式(4)可以分析出接触长度的大小与刀具前角的大小成反比,前角越大,接触长度越短,剪应力越小,轴向力 F_x' 也随之变小,微槽的变形量逐渐减小。

图 14 是不同切削深度下仿真结果与试验结果的对比情况。

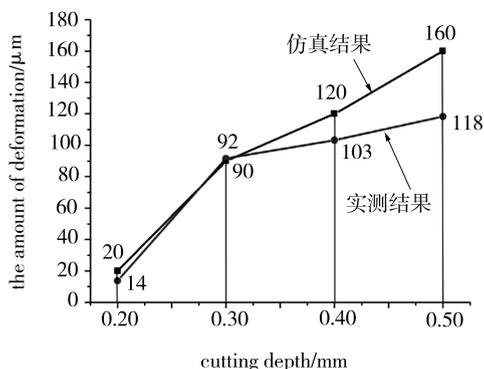


图 14 切削深度仿真与试验结果对比曲线

Fig. 14 Changing trend of comparison of cutting depth simulation with experimental results

结果显示,通过试验得出的不同切削深度下滑环微槽的变形量趋势与仿真结果基本相同:随着切削深度的增加,微槽的变形量逐渐增大。将微槽变形过程看作悬臂梁受力弯曲变形的过程如图 15 所示。

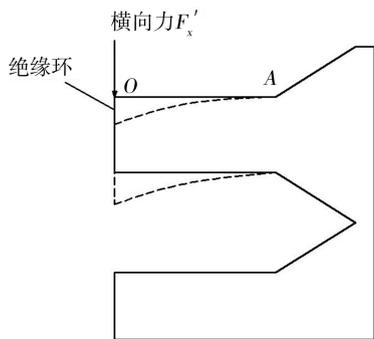


图 15 悬臂梁受力弯曲示意图

Fig. 15 Schematic drawing of cantilever bending force

绝缘微槽的最大挠度与悬臂梁长度 OA 的关系可用公式(5)表示:

$$w_{\max} = \frac{F_x' l^3}{3EI} \quad (5)$$

式中, w_{\max} 是最大挠度; E 、 I 均是材料与材料属性有关的常数; F_x' 为横向力; l 表示 OA , 即近似切削深度。随着切削深度增加, 刀具与工件的接触区剪切面积增大, 横向力 F_x' 变大; 同时 l 增大, 则最大挠度变大, 微槽的变形量变大。

鉴于进给速率无法进行仿真分析, 进给速率的影响以试验为准。图 16 为刀具前角 12° 、切削速度 700 r/min 、切深 0.4 mm 时的进给速率对微槽侧面变形量影响的试验结果。结果显示: 随着进给速率的增大, 微槽的弯曲变形量变大, 而进给速率达到 2 mm/min 以后, 变形量已经不能满足精度要求。结合受力模型分析, 进给速率越大, 则单位切削长度上的切削深度越深, 切削深度与剪切面积 A_s 的关系如图 3 和图 4 所示, 通过分析计算简化剪切面积与切削深度的关系如下:

$$A_s = k \cdot \left(\int_0^l f dl \right)^2 \quad (6)$$

式中, l 指切削长度, k 是与刀具前角、剪切角和 V 型槽夹角相关的常数, f 是进给速率。

结合式(6)分析可知, 在切削长度一定时, 进给速率增大, 剪切面积变大, 依照横向力 F_x' 的公式, 横向力 F_x' 随剪切面积的增大而变大, 引起微槽变形量的增大。

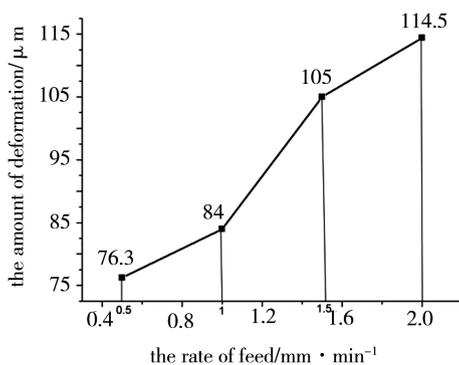


图 16 进给速率试验曲线

Fig. 16 Changing trend of the feed rate

3 结论

针对传统精密导电滑环加工方法的缺陷, 提出了超精密车削加工的方法对滑环基体进行导电环的车削加工, 同时建立了对称 V 型微槽的切削受力模型, 结合模型对影响车削加工过程中微槽变形量的工艺宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 4 期

参数进行了有限元仿真,并对仿真结果进行了验证。结果表明:微槽的变形量随着主轴转速的增大而变大,在主轴转速大于 870 r/min 之后,微槽的变形量已经无法满足精度要求;微槽的变形量随着进给速率的增大而变大;微槽变形量随着刀具前角的增大而变小,在 18°时变形量最小;切削深度在小于 0.2 mm 的切深下,微槽基本不变形;高于 0.2 mm 以后,微槽的变形量随着切削深度的增大而变大。

参考文献

[1] 杨铁立,高冬梅,李峥. XX-44 型精密导电滑环的研制[S]. 2005 年惯性器件材料与工艺学术研讨暨技术交流会, 2005

[2] 陈世文,汤友三,于海平. 三轴惯导测试台精密导电滑环组件的研制[J]. 中国惯性技术学报,1991(4):93-98

[3] Brown, W I L. Sdorf D K, Ksner W. Testing and evaluation of metal fiber brush operation on slip rings and commutators [J]. IEEE Trans. Compon., Packag Technol., 2008(2):485-494

[4] 邹近智. 64 点导电环塑料组环座注射模的加工技术 [J]. 上海航天,1995(4):55-58

[5] 于瑞芳,杜淑芳. 小型灌注滑环[J]. 电子机械工程, 1990(2):46-51

[6] 王政章. 电沉积微型导电环的制造工艺[J]. 航空工艺技术,1980(7):29-32

[7] 冯永祥. 提高导电滑环灌胶质量的方法和措施[J]. 粘接,1933,14(2):25-26

[8] 郭景会,孙丽,孙方金. 积叠式导电滑环的研制[J]. 航天工艺,2000(3):8-10

[9] 刘际泽. 期刊文摘[J]. 塑料,2006(3):73-75

[10] Courtney T H. Mechanical behavior of materials[M]. Beijing:China Machine Press,2003

[11] 庞海燕,王清远,曾祥国,等. 聚矾树脂的应变率效应及其断裂模式[J]. 机械工程材料,2008,32(9):64-66

[12] 许小村,刘世臣,赵伯颖,等. 对称 V 型槽切削的切削力研究[J]. 哈尔滨科学技术大学学报,1996,20(4):27-31

[13] LUK W K. The mechanics of symmetrical vee form tool cutting[J]. Inc. J. Mech. Tool, Des. Res., 1969(9):51-53

[14] 肖继明,侯晓莉,张波,等. 高硅氧玻璃纤维/酚醛树脂复合材料切削力的试验研究[J]. 宇航材料工艺,2009,39(3):64-67

[15] 万珍平,刘亚俊,叶邦彦,等. 金属切削加工中刀-屑紧密型接触长度的研究[J]. 工具技术,2002,36(4):9-11

(编辑 李洪泉)



《宇航材料工艺》投稿说明

《宇航材料工艺》官网 <http://www.yhclgy.com>,投稿一律实行在线投稿。新投稿作者请先登录期刊网站,在线注册,注册成功后,登录期刊网站按提示要求进行投稿。投稿成功后请及时将“稿件的保密审查证明”和“论文著作权转让书”快递到编辑部(快递地址:北京市丰台区南大红门路 1 号,吴坚老师收,电话:18710253180),编辑部在接收到证明材料后方送专家外审。

谢谢合作与支持!

· 本刊编辑部 ·