

丝锥刀具旋转磨粒流去毛刺和钝化抛光技术

高航¹, 郭天博¹, 彭灿¹, 王宣平¹, 李伟秋², 林海生²

(1.大连理工大学 a.机械工程学院 b.精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2.汇专科技集团股份有限公司, 广州 510662)

摘要: **目的** 高效、低成本地消除丝锥、铰刀、钻头、铣刀等金属加工刀具磨削后产生的表面毛刺、亚表面烧伤等加工缺陷, 实现刀具的高效钝化抛光。**方法** 基于磨粒流加工 (AFM) 技术, 提出一种刀具旋转磨粒流抛光 (R-AFM) 原理和方法。通过模拟仿真方法获得优化的刀具运动轨迹, 进一步研发可装夹 40 把刀具的多工位旋转磨粒流高效抛光专用设备; 以高速钢丝锥为研究对象, 选用新研制的 GC 磨料介质作为钝化抛光介质, 采用正交实验设计法, 通过极差分析和方差分析, 探究工件转速、加工时间、磨粒粒径及磨粒质量分数等工艺参数对刃口钝圆半径的影响规律; 再选用正交试验获得的工艺参数组合, 采用自主研制的 WS 和 GC 磨料介质, 分别对丝锥刀具进行钝化抛光试验, 分析 2 种新型磨料介质的钝化抛光特性; 最后, 基于前面的实验结果和理论分析, 优选刀具钝化抛光复合加工的工艺参数, 并验证刀具的钝化抛光效果。**结果** 各工艺参数对刀具刃口钝圆半径的影响程度依次为刀具回转速度、钝化抛光时间、磨粒质量分数和粒度。高硬度的 GC 磨料介质具有材料去除率高、对刃口的钝化能力较强等特点。在保持切削刃锋利度的前提下, 采用低硬度的 WS 磨料介质, 其毛刺去除效果更好。采用优化的工艺参数和自主研制的 WS、GC 磨料介质, 对新加工的丝锥分别进行了 1.5 min 和 1 min 的组合抛光, 加工后丝锥表面的毛刺得以完全去除, 表面磨削烧伤痕迹显著消减, 表面粗糙度 Sa 可从 $0.73\ \mu\text{m}$ 降至 $0.26\ \mu\text{m}$, 刃口圆角半径可控制在企业要求的 $5\ \mu\text{m}$ 以内, 刃口得到了有效修整, 且避免了刀具刃口的“过顿”现象, 抛光效率平均可达 20 支/min。**结论** 旋转磨粒流抛光技术与装备能高效去除刀具表面的毛刺, 有效地改善了刃口加工缺陷, 为复杂结构成型刀具等零件的高质、高效钝化抛光加工提供了一条新途径。

关键词: 丝锥刀具; 旋转磨粒流抛光; 去毛刺; 刃口钝化

中图分类号: TG176; TH164 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0299-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.027

Deburring and Passivation Polishing Technology of Tap Tool with Rotary Abrasive Flow

GAO Hang¹, GUO Tian-bo¹, PENG Can¹, WANG Xuan-ping¹, LI Wei-qi², LIN Hai-sheng²

(1. a. School of Mechanical Engineering, b. Key Laboratory of Precision and Non-traditional Machining Technology under the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China;
2. Conprofe Technology Group Co., Ltd., Guangzhou 510662, China)

ABSTRACT: The work aims to efficiently and cost-effectively eliminate the burr and subsurface burn on the blade surface

收稿日期: 2022-03-22; 修订日期: 2022-04-27

Received: 2022-03-22; **Revised:** 2022-04-27

作者简介: 高航 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高效精密磨削加工技术、光整加工技术等。

Biography: GAO Hang (1962-), Male, Doctor, Professor, Research focus: high efficiency and precision grinding technology, finishing technology et al.

引文格式: 高航, 郭天博, 彭灿, 等. 丝锥刀具旋转磨粒流去毛刺和钝化抛光技术[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 299-307.

GAO Hang, GUO Tian-bo, PENG Can, et al. Deburring and Passivation Polishing Technology of Tap Tool with Rotary Abrasive Flow[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 299-307.

caused by the grinding of metal working tools such as taps, reamers, drills and milling cutters, and to realize the efficient passivation and polishing treatment of the tool. Therefore, based on abrasive flow machining (AFM) technology, the polishing principle and method of tool rotary abrasive flow (R-AFP) was proposed in the paper. The optimized tool trajectory was obtained by simulation method with ADAMS application, and the multi-station rotary abrasive flow high-efficiency polishing machine was developed which can be used to polish 40 tools at the same time. With high-speed steel tap as the research object, a new self-developed GC abrasive medium was selected for passivation and polishing, the orthogonal experimental design method was adopted to explore the influence of processing parameters such as workpiece speed, processing time, abrasive grain size and abrasive grain mass fraction on the radius of the blunt circle of the cutting edge by range analysis and variance analysis. Using the combination of process parameters obtained by orthogonal test, the passivation and polishing test of tap tool was carried out respectively with the self-developed WS and GC abrasive media, and the passivation and polishing characteristics of the two kinds of abrasive media were analyzed. Experimental results showed that the influence degree of each process parameter on the passivation polishing effect of rotary abrasive flow was as follows: rotating speed of tool, passivation polishing time, mass fraction of abrasive grains and abrasive grains' size; the result of variance analysis was consistent with that of range analysis; the optimal combination of technological parameters with the highest edge passivation efficiency was as follows: tool rotating speed 200 r/min, processing time 60 s, abrasive particle mass fraction 50%, abrasive particle size 180[#] in the range of various technological parameters. GC abrasive medium with high hardness had high material removal rate and strong passivation ability to the edge and low hardness. WS abrasive media provided better burr removal while maintaining cutting edge sharpness. Using the optimized process parameters, the new machined taps were polished for 1.5 min and 1min respectively with the self-developed WS and GC abrasive media. The burrs on the surface of the taps were completely removed and the burn marks on the surface of the taps were significantly reduced by twice passivation polishing. Also, the passivated surface roughness was reduced from Sa 0.73 μm to Sa 0.26 μm , the corner radius of the tap edge after passivation polishing can be controlled within 5 μm , the phenomenon of excessive passivation of cutting edge was avoided, and the average polishing efficiency was about 20 sticks/min. In this paper, a creative method of multi-position combined polishing is proposed, the rotary abrasive flow polishing technology can effectively remove the burrs on the tool surface and improve the machining defects of the cutting edge. The newly developed tool passivation polishing machine has better use effect and higher application value. A new way for high-quality and efficient polishing and passivation for complex structural forming tools is presented by the research results.

KEY WORDS: tap tool; rotary abrasive flow polishing; deburring; passivation of tool edge

金属切削刀具是实现机械零件加工的关键工具,用于制造金属切削刀具的材料主要包括高速钢、硬质合金、聚晶金刚石等,不同材料的刀具会产生不同程度的加工缺陷。对于丝锥、铰刀、钻头、铣刀等成形加工刀具来说,其锋利刃口(或刀尖)的几何形状、刀具刃口形式和表面质量等都对刀具的加工精度、切削性能 and 使用寿命有着重大影响。

通常采用精密磨削工艺加工成形刀具刃口,在新刃磨的刀具表面经常出现毛刺、磨削烧伤、加工纹理等加工缺陷,如图 1 所示。新刃磨的刀具刃口还会出

现锯齿、微裂纹、微细毛刺等缺陷^[1],用肉眼或普通放大镜可以观察到切削刃上存在较大的毛刺,用高倍显微镜观察此微观缺陷发现其尺寸一般为 5~50 μm ,严重缺陷的尺寸在 0.1 mm 以上^[2-3],如图 2 所示。在切削加工过程中,刀具的刃口缺陷会导致刃口处出现应力集中,从而加剧切削刃的磨损与破坏,降低刀具的使用寿命和被加工工件的表面质量^[4-5]。例如,丝锥刀具刃磨后产生的表面毛刺和过于锋利的刃口是影响工件加工质量和刀具使用寿命的两大主要因素^[6]。

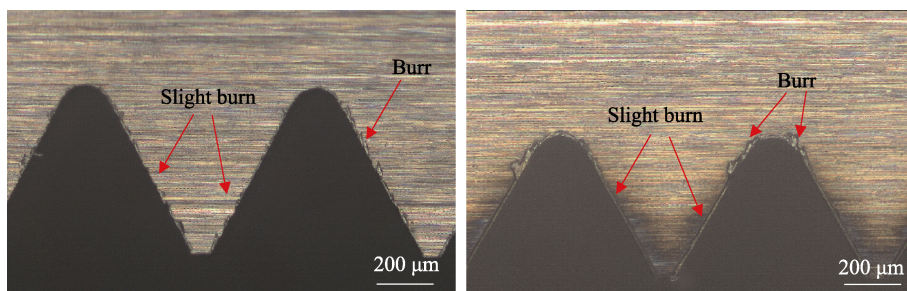


图 1 刃磨后丝锥表面毛刺和表面烧伤
Fig.1 Burrs and burns on the ground surface of tap blades after grinding

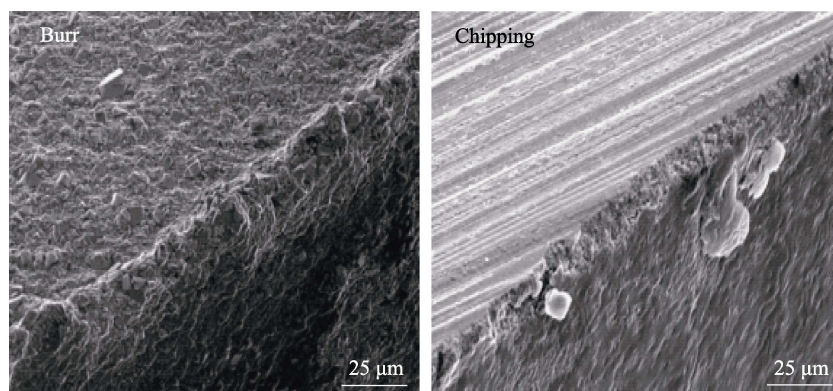


图 2 刀具刃口微观缺陷
Fig.2 Micro defect of cutting edge

通常对刃磨后的刀具采用抛光钝化等光整工艺, 可以修整刃口的几何形貌, 减小刃口的微观缺陷, 降低刀具的表面粗糙度, 消除表面残余应力, 去除表面烧伤, 增强刀具刃口的强度, 提高刀具表面涂层的附着力^[7-10], 使刀具的使用寿命延长 0.5~4 倍^[11]。对于精密丝锥、铰刀、钻头、铣刀等复杂几何形状的成形刀具, 面临着加工可达性差、去毛刺不彻底、刃口钝化量难以把控等难题, 如何实现高质、高效、低成本批量光整加工一直是业内亟待解决的难题。目前, 刀具制造企业针对要求高的成形刀具, 在刀具的去毛刺和刃口钝化方面提出了迫切需求。

针对刀具表面去毛刺和刃口钝化技术, 国内外学者做了许多研究。相关刀具钝化抛光技术和方法包括刀具表面精化处理微细加工技术^[12]、基于分散固体磨粒的刀具抛光方法^[13]、基于气固两相流磨粒刀具钝化法^[14]、磁流变磨粒流加工方法^[15]、刀具柔性磨粒射流抛光法^[16], 以及电解法、喷砂法、振动法、尼龙刷打磨法、立式旋转钝化法和磁力研磨法等^[17-19]。在刀具刃口钝化半径及其评价方面, Zanger^[20]、吕雁文^[21]、王延辰^[22]、万庆丰^[23]等学者对高速钢丝锥、硬质合金铣刀等刀具进行了钝化抛光试验和仿真分析, 认为丝锥钝化后刃口半径在一定范围内具有最佳的切削性能。

目前, 各种常用刀具钝化工艺或方法的最大加工效率仅为 4 支/min^[14,16-17], 能够适应批量生产的低成本、高效优质刀具钝化抛光技术和设备很少, 刀具钝化面临着“保质难保量, 保量难保质”的难题。为此, 文中针对刀具制造企业的迫切需求, 提出并开展了基于旋转磨粒流加工工艺的刀具刃口钝化抛光技术研究。

1 旋转磨粒流抛光技术与设备

针对丝锥、钻头、铣刀等复杂成形刀具的切削刃沿轴向呈对称分布, 且刃口尺寸很小, 加工可达性差等特点, 笔者基于磨粒流技术^[24], 利用黏弹性磨料介质良好的流变特性对该类刀具进行抛光。基于黏弹性磨料介质的挤压磨粒流抛光材料去除机理如图 3 所示, 黏弹性介质中包裹着磨粒, 在上下活塞的挤压作用下, 介质与工件表面以速度 v 做相对运动。由于磨料介质具有黏弹性, 在压力 F_0 的作用下, 磨粒与工件表面会发生弹性接触, 因而磨粒流加工不会对工件表面产生过大的切削力 F_n , 材料去除多为磨粒的弹性划擦或耕犁作用, 实现了对加工表面的微细研磨和柔性抛光。

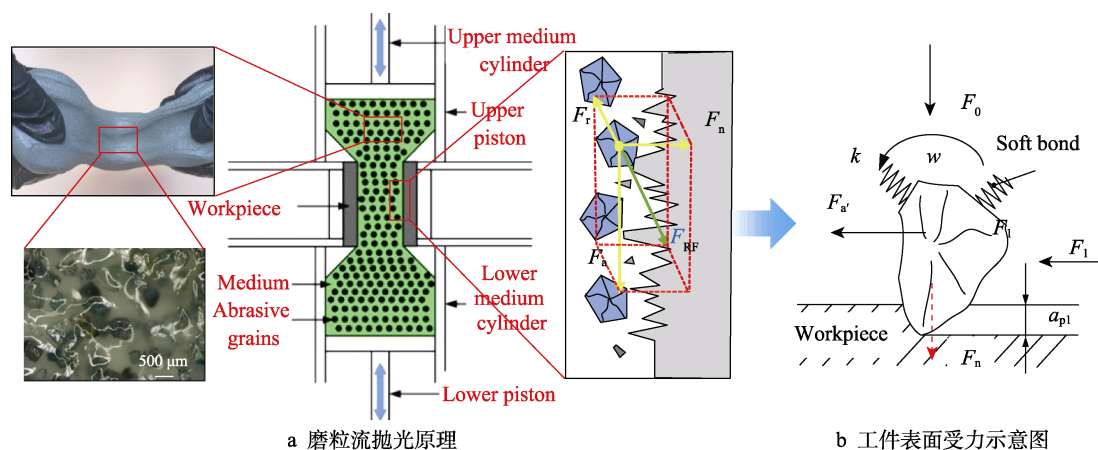


图 3 基于黏弹性磨料介质的磨粒流抛光材料去除机理

Fig.3 Removal mechanism of abrasive flow polishing with viscoelastic abrasive medium: a) abrasive flow polishing process principle; b) diagram of force on workpiece surface

如图 4a 所示, 丝锥等刀具均为细长轴型结构, 且切削刃区域结构复杂。刀具是一种低值消耗品, 迫切需要研制一种低成本、高效率的钝化抛光技术。由于工件、夹具和加工设备等条件的限制, 采用上述挤压磨粒流抛光方法很难实现刀具的高效钝化抛光, 因此, 在传统挤压磨粒流抛光技术的基础上, 提出基于黏弹性磨料介质的旋转磨粒流抛光方法。刀具旋转磨粒流抛光原理如图 4b 所示, 将刀具立式装夹, 并使刀具相对于磨料介质做“自转+公转+上下往复”的组合运动。其中, “自转”是保证回转类刀具抛光周向加工的均匀性, 并提供刀具一个回转速度 ω_1 ; “公转”是确保磨料介质能够与工件紧密贴合, 并能产生一定的抛光压力 F_n , 给刀具提供另一个回转速度 ω_2 ; “上下往复运动 (v)”是为了解决在不同磨料介质深度下轴向各个齿牙抛光不均匀性的问题。如图 4c 所示, 对“自转+公转+上下往复”三者的运动关系进行了 Adams 运动学模拟仿真, 通过优化刀具抛光运动轨迹, 确定了三者组合运动的速度参数, 确保刀具各切削刃均能在磨料介质中完成高质、高效的均

匀抛光。

基于上述工作原理, 研发了如图 5 所示的多工位旋转磨粒流抛光设备。该设备能够同时夹持、抛光 40 把刀具, 通过两级行星传动结构实现了刀具自转加公转的复合运动, 达到了高效钝化和均匀抛光的目的。料筒的上下往复运动可提高刀具沿轴向的抛光均匀性。设计了多个介质料筒, 通过不同料筒内装有不同性能的磨料介质来实现多工位加工, 实现刀具抛光去毛刺和刃口钝化的一体化加工。

2 实验方案与结果分析

2.1 方案设计

为了验证刀具旋转磨粒流抛光技术和设备的加工效果, 选择直槽高速钢丝锥为对象。丝锥的材质为 W6Mo5Cr4V2, 规格型号为 M5×0.8-OH2, 前角和后角分别为 5° 和 8° , 总长度为 58 mm, 螺纹长度为 20.5 mm, 刀柄直径为 5 mm。采用激光共聚焦显微镜 (VKX-1100) 的 50 倍镜观察丝锥刀具抛光钝化前后

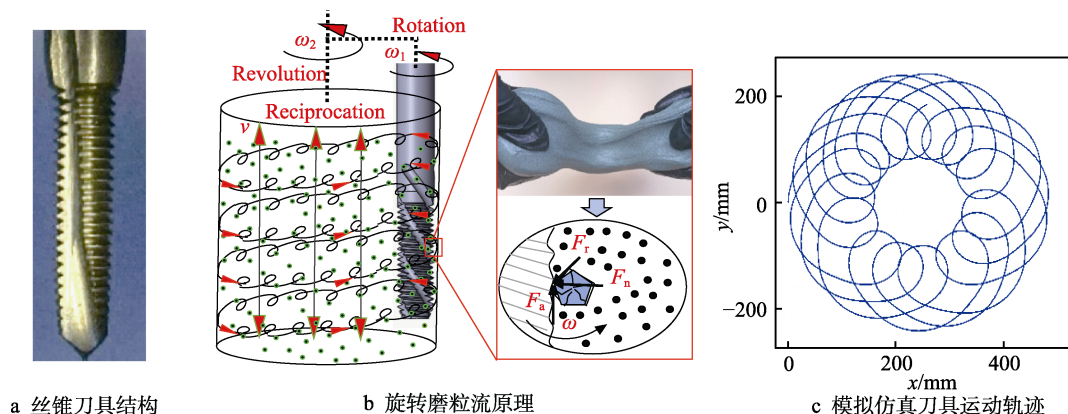


图 4 丝锥刀具旋转磨粒流抛光工作原理

Fig.4 Processing principle of rotary abrasive flow polishing for tap tools: a) structure of tap tools; b) schematic diagram of rotary abrasive flow; c) kinematic simulation of tool path

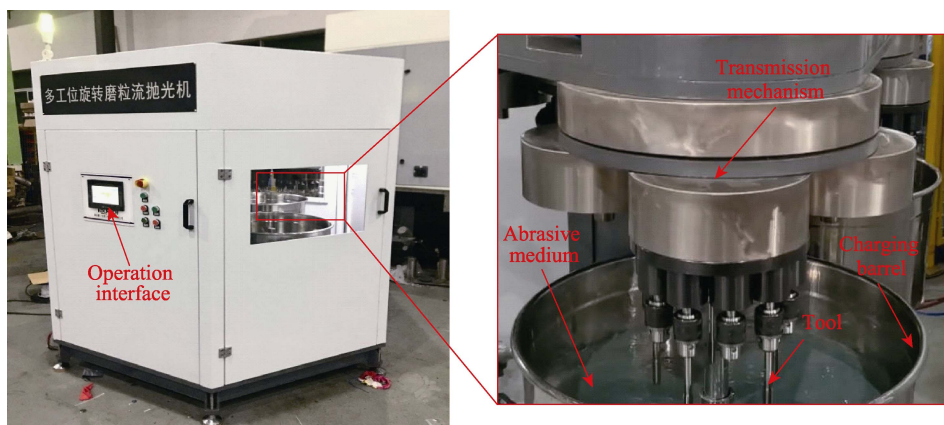


图 5 多工位刀具旋转磨粒流去毛刺和刃口钝化抛光设备

Fig.5 Multi-station rotary abrasive flow polishing machine developed for deburring and edge passivating of tools

的表面毛刺去除情况,用 400 倍镜测量刀具刃口钝圆半径和后刀面表面粗糙度。采用扫描电镜 (SEM-Q45) 的 400 倍镜观察刀具刃口轮廓和微观形貌,定性评价刀具的钝化抛光效果。

为了实现刀具在去毛刺的同时,保证刀刃圆角半径在 5 μm 以内,避免刀具刃口出现“欠抛”或“过顿”等现象,在前期大量实验研究的基础上,优化选配了磨粒硬度较高的 GC 磨料介质和磨粒硬度较低的 WS 磨料介质,用于丝锥的抛光钝化实验,如图 6 所示。

为了探究不同工艺参数对丝锥钝化抛光的影响规律,以 GC 磨料介质为例,设计选用了 $L_{18}(3^5)$ 正交表进行四因素三水平的正交试验。选取机床主轴转速 S (刀具转速)、钝化抛光时间 t (加工时间)、磨粒粒度 M 和磨粒质量分数 w 为试验因素,各因素水平如表 1 所示。在不影响实验正交性的前提下,采用“组合”法优化设计了 18 组试验^[25],每组试验随机测量 3 把丝锥,指定每把丝锥的第 1、3、5 齿为特征齿,取 3 个特征齿钝圆半径的平均值作为该把刀具的钝圆半径,取这 3 把丝锥钝圆半径的平均值作为该组丝锥的钝圆半径,以保证试验的准确性和可靠性。



图 6 2 种磨料介质
Fig.6 Two kinds of abrasive media

表 1 试验设计因素水平
Tab.1 Factor level table of experiment design

Influence factor	Symbol	Level		
		1	2	3
Tool rotating speed /(r·min ⁻¹)	S	100	150	200
Processing time/s	t	30	45	60
Size of abrasive grains	M	120 [#]	180 [#]	240 [#]
Mass fraction of abrasive grains/%	w	40	50	60

2.2 工艺参数对刃口钝圆半径的影响

为了初步探究刃口钝圆半径随不同参数的变化趋势,将正交试验结果经极差分析后,以各试验因素为横坐标,以钝圆半径的平均值为纵坐标,得到了各因素对钝圆半径的影响规律,如图 7 所示。试验结果表明,随着主轴转速的增大,刀具刃口与磨粒的相对速度越大,磨料颗粒的相对动能越大。同时,磨粒与刀具表面的划擦次数增加,使得刀具刃口的材料去除

量增加,刀具刃口钝圆半径明显增加。这是因为刀具与磨料介质的相对运动速度增大,介质的剪切应变率增大,进而引起介质储能模量显著增大,磨料介质表现出较强的“应变率硬化”特性,使得磨粒对刀具的工作压力增大,从而加剧了磨粒的磨抛作用。磨料介质流变特性曲线如图 8 所示。抛光时间越长,刀具刃口与磨粒的碰撞次数越多、相互作用时间越长,进而刀具刃口的材料去除量越大。磨粒粒径太小会降低切削深度和切削力,削弱介质的材料去除能力。磨粒的质量分数过大,会降低磨粒与基体混合的均匀性,从而导致磨料介质对工件表面材料的去除效果变差。由此可见,后续试验需根据加工要求优选工艺参数,以避免出现刀具刃口“过抛”“过顿”或“欠抛”等问题。

为了分析各因素对丝锥刃口钝圆半径影响的显著性水平,应用 Matlab 软件对实验结果进行方差分析^[26],结果如表 2 所示。在方差分析过程中,利用 F 检验来评估各因素对钝圆半径影响程度的显著性,当置信度为 95%时,刀具转速 S 、加工时间 t 和磨粒质量分数 w 的 P 值均小于 0.05,磨粒粒度 M 的 P 值大于 0.05,所以刀具转速、加工时间和磨粒质量分数对钝圆半径的影响显著,而磨粒粒径对钝圆半径的影响不显著。方差分析结果与极差分析结果相吻合,在各工艺参数范围内,刃口钝化效率最高的工艺参数组合为: $S_3t_3w_3M_3$ 。先通过正交试验探究出不同工艺参数对刃口钝圆半径影响的总体趋势,为后续试验探究和参数优选奠定了基础。

2.3 磨料介质对钝化抛光效果的影响

通过上述正交试验,探究了各因素对钝圆半径的影响规律。基于正交试验结果,采用刃口钝化效率最高的工艺参数,即刀具转速 200 r/min、钝化加工时间 60 s、磨粒质量分数 60%、磨粒粒度 180[#],分别用 WS 磨料介质和 GC 磨料介质对丝锥进行钝化抛光试验,观测丝锥试验前后表面毛刺情况及抛光后刃口钝圆半径,如图 9 所示。试验结果表明,用 GC 磨料介质抛光后,刃口半径从 1.95 μm 增至 9.20 μm;用 WS 磨料介质抛光后,刃口半径仅从 1.93 μm 增至 2.11 μm。说明坚硬的 GC 磨料介质虽然具有很强的刃口钝化能力,能够有效去除磨削烧伤等加工缺陷,但也导致刀具刃口钝圆半径较大,出现较为严重的“过抛”现象。硬度较低的 WS 磨料介质对磨削烧伤和加工纹理的改善甚微,而其毛刺去除效果较好,还能够保持刀具较锋利的切削刃口。这主要是因为 WS 磨粒的硬度远小于丝锥刀具的硬度,这种“软性”磨粒能用于去除刀具表面的污物和复杂毛刺,但不会对钢材表面形成刻蚀,工件表面材料去除量极小。GC 磨粒的硬度远高于丝锥刀具的硬度,该磨粒能够轻松地对刀具表面材料产生划擦、刻蚀和微切削作用,工件表面材料去除量较大。

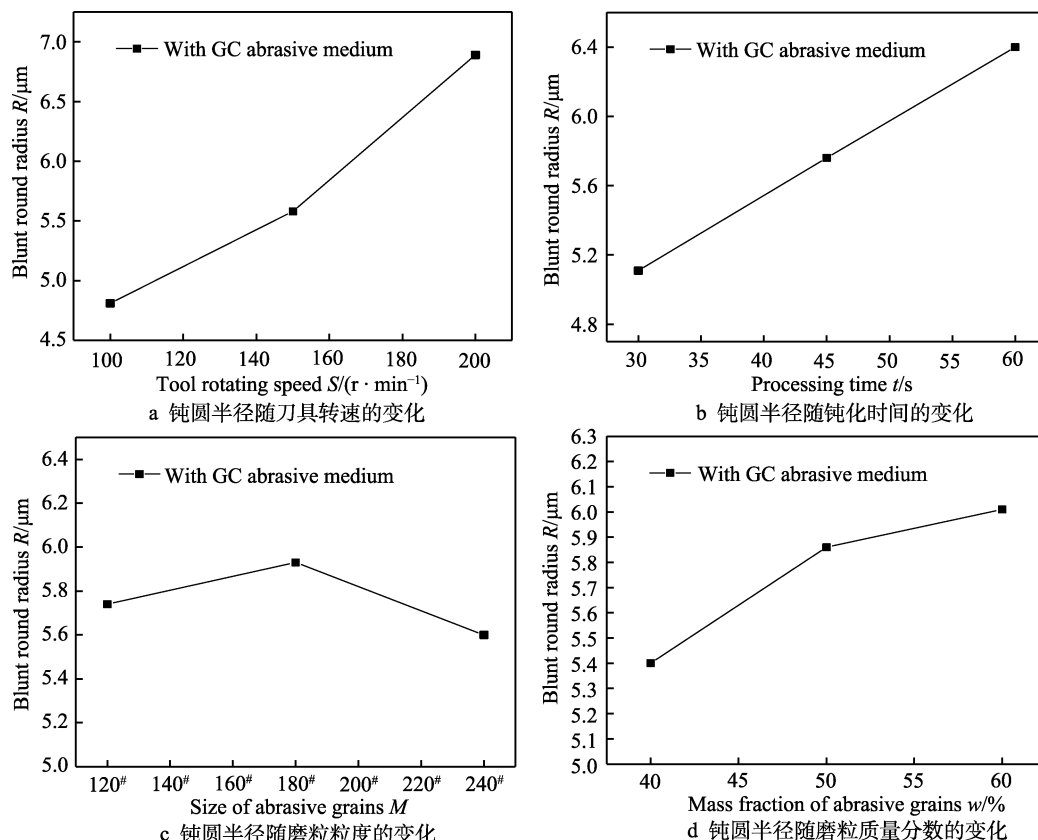


图7 各因素对钝圆半径的影响趋势

Fig.7 Influence trend of various factors on the edge-radius: a) blunt round radius varies with the tool speed; b) blunt round radius varies with processing time; c) blunt round radius varies with size of abrasive grains; d) blunt round radius varies with mass fraction of abrasive grains

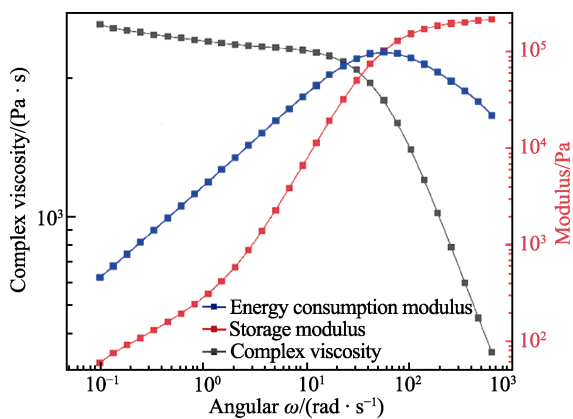


图8 磨料介质流变特性曲线

Fig.8 Rheological characteristic curve of abrasive medium

表2 钝圆半径的方差分析结果
Tab.2 ANOVA results of edge-radius

Variance source	Degrees of freedom	Sum of Squares	Mean Square	Fraction F	Significance P
S	2	13.195	6.597	122.643	0
t	2	4.992	2.496	46.402	0
M	2	0.347	0.174	3.227	0.088
w	2	1.178	0.589	10.950	0.004
Error	9	0.482	0.054		
Total	17	20.194			
$R^2=0.976$					

实验结果表明,用GC磨料介质抛光后,刃口出现了严重的“过顿”现象,无法满足刃口钝圆半径小于5 μm 的工艺要求;用WS磨料介质抛光后,刃口钝化程度非常小,仅起到了去除毛刺的作用,很难对刀具刃口进行有效修整。为了进一步探究刀具转速 S 和加工时间 t 这2个显著性因素对刃口钝圆半径的影响规律,分别在2种介质下对丝锥进行抛光钝化实验,对比刃口钝圆半径的变化情况,结果如图10所示。在图10a中,实验的加工时间为60 s,磨粒质量分数为50%,磨粒粒度为180 $^\#$ 。在图10b中,实验的刀具转速为150 r/min ,磨粒质量分数为50%,磨粒粒度为180 $^\#$ 。实验结果表明,在WS磨料介质中,刀具转速 S 和加工时间 t 对刃口钝圆半径的影响趋势与正交试验分析的结果一致,刀具转速对刃口钝圆半径的促进作用最大,加工时间次之。另外,刀具转速和加工时间对WS磨料介质钝化效果的影响很小,在抛光前后刃口钝圆半径均在1.8~2.2 μm 之间。结合图9的结果可知,该实验验证了磨料介质对钝化抛光效果的影响,即GC磨料介质具有很强的刃口钝化能力,而WS磨料介质的刃口钝化能力很弱,但在保持刃口锋利度的前提下毛刺的去除效果较好。

为了满足丝锥表面毛刺去除干净、刃口钝圆半径不大于5 μm 的工艺要求,充分发挥WS磨料介质抛

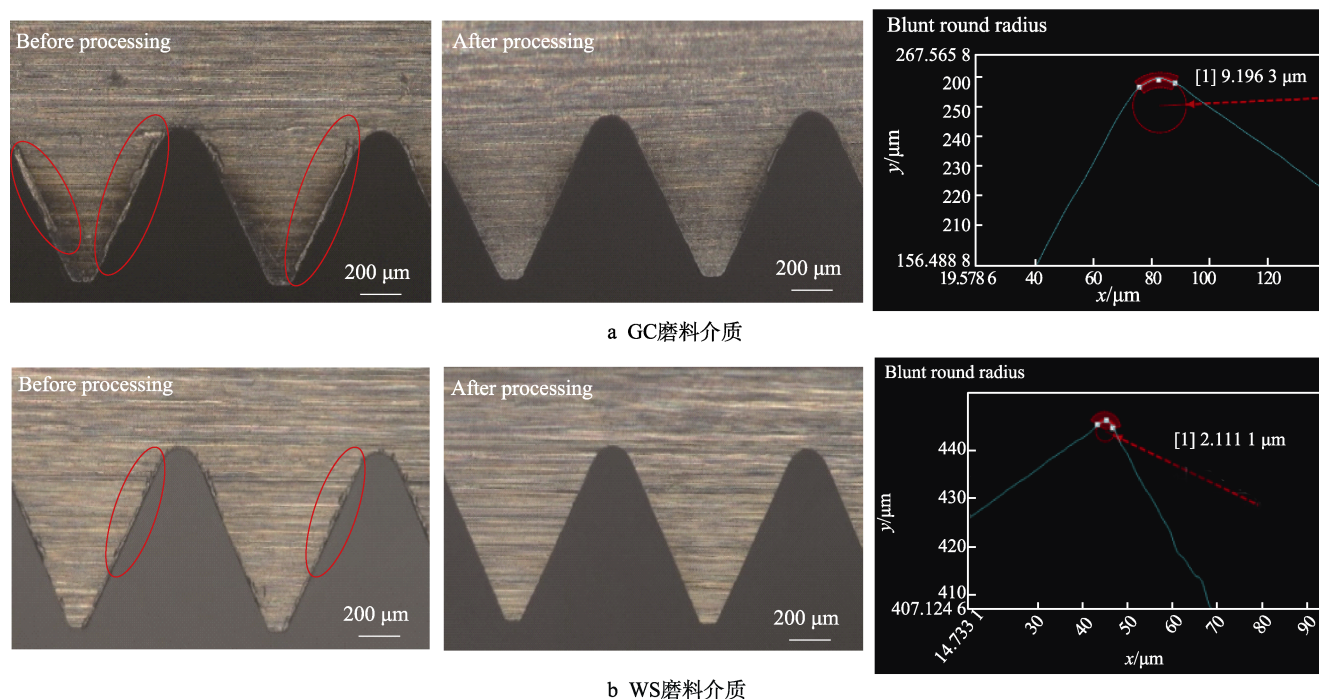


图 9 采用不同磨料介质后抛光去毛刺及刃口钝化效果

Fig.9 Polishing deburring and edge-preparation effect with different abrasive medium: a) polishing with GC abrasive medium; b) polishing with WS abrasive medium

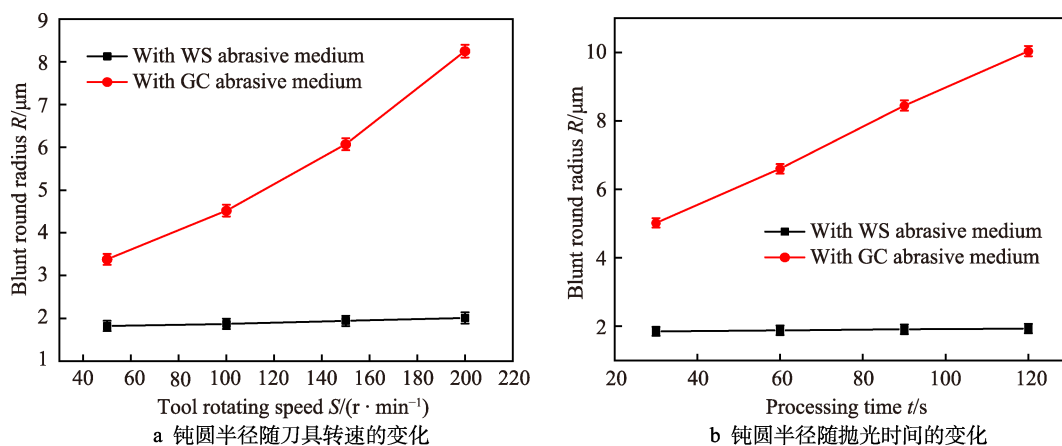


图 10 不同磨料介质下加工参数对刃口钝圆半径的影响

Fig.10 Influence of machining parameters on cutting edge radius under different abrasive media: a) blunt round radius varies with the tool speed; b) blunt round radius varies with polishing time

光去毛刺的优势和 GC 磨料介质刃口钝化的能力, 先采用 WS 磨料介质对丝锥进行抛光去毛刺处理, 再用 GC 磨料介质对丝锥刃口进行抛光钝化处理。为了避免因转速过大, 抛光介质的流变性能下降的问题, 在用 WS 磨料介质抛光去毛刺时采用优选工艺参数: 刀具转速 150 r/min、加工时间 90 s。为了保证刃口钝圆半径不大于 5 μm 的工艺要求, 同时考虑节约加工时间和材料成本, 在用 GC 磨料介质刃口钝化时采用优选工艺参数: 刀具转速 100 r/min、加工时间 60 s。

基于以上实验, 采用研制的多工位旋转磨粒流

抛光设备进行多工序复合钝化抛光效果验证试验, 即先用 WS 磨料介质钝化抛光 1.5 min, 再用 GC 磨料介质钝化抛光 1 min, 结果如图 11 所示。经钝化抛光复合加工后的丝锥刀具, 其后刀面粗糙度 Sa 从 0.73 μm 降至 0.26 μm , 钝圆半径从加工前的 1.89 μm 增至加工后的 4.75 μm , 刃口部位的锯齿、豁牙、崩边、微裂纹等缺陷得到明显改善, 丝锥后刀面的磨削纹理基本消除, 切削刃表面质量和刃口的修整效果较理想, 获得了丝锥表面无毛刺、表面粗糙度低于 0.4 μm 、刃口钝圆半径小于 5 μm 的理想钝化抛光效果。

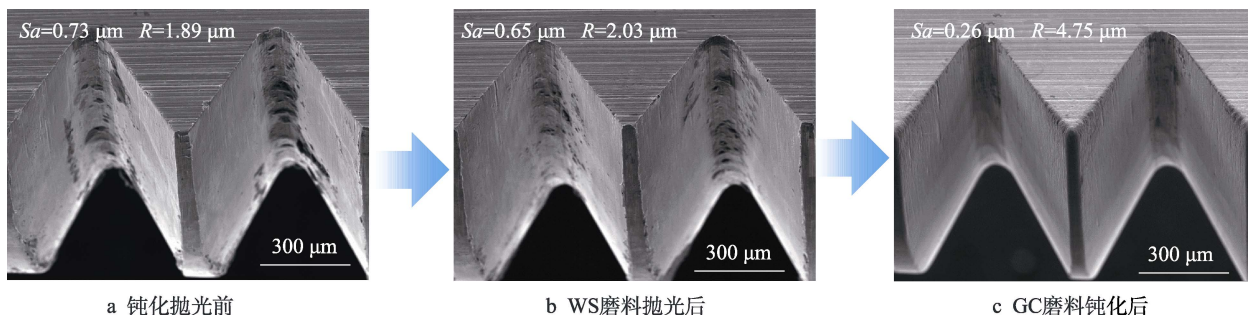


图 11 钝化抛光复合加工前后丝锥刃口微观形貌

Fig.11 Micro-morphology of tap edge before and after passivation and polishing composite machining: a) before passivation polishing; b) after polishing with WS abrasive medium; c) after passivation with GC abrasive medium

3 结论

1) 针对丝锥、铰刀、钻头、铣刀等金属加工成形刀具精密磨削产生的刀刃表面存在微细毛刺、锯齿、微裂纹、亚表面磨削烧伤等加工缺陷问题,为了降低刀具生产成本,提高刀具质量和加工效率,提出了一种基于磨粒流技术的刀具旋转钝化抛光原理和方法,并研制了能够同时装夹 40 把刀具的多工位旋转磨粒流高效抛光专用设备,平均抛光效率达到 20 支/min,加工效率比其他工艺方法高出 5 倍以上。

2) 实验结果表明,工艺参数对刀具钝圆半径的影响程度依次为工件回转转速>钝化抛光时间>磨粒质量分数>磨粒粒度;高硬度的 GC 磨料介质的材料去除率较高,刃口钝化能力较强,但也容易出现刃口“过顿”现象;低硬度的 WS 磨料介质,虽然其材料去除率较低,但去毛刺效果较好。在用 WS 磨料介质抛光去毛刺时,优选的工艺参数为刀具转速 150 r/min、加工时间 90 s;在用 GC 磨料介质刃口钝化时,优选的工艺参数为刀具转速 100 r/min、加工时间 60 s。

3) 在研制的多工位旋转磨粒流抛光设备上,采用优选的工艺参数,顺序使用 WS 磨料介质抛光 1.5 min、GC 磨料介质钝化抛光 1 min 后,丝锥表面毛刺得以完全去除,表面磨削烧伤痕迹显著消减,表面粗糙度 Sa 可从加工前的 $0.73\ \mu\text{m}$ 降至加工后的 $0.26\ \mu\text{m}$,经复合抛光后,可将丝锥刃口圆角半径控制在要求的 $5\ \mu\text{m}$ 以内。

参考文献:

- [1] DENKENA B, BIERMANN D. Cutting Edge Geometries[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 631-653.
- [2] XIE L J, SCHMIDT J, SCHMIDT C, et al. 2D FEM Estimate of Tool Wear in Turning Operation[J]. Wear, 2005, 258(10): 1479-1490.
- [3] 夏雪. 刀具刃口钝化技术及方法的研究[J]. 装备制造技术, 2014(10): 204-205.
XIA Xue. Cutting Tool Edge Passivation Technology and Method of Research[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(10): 204-205.
- [4] 刘永宏. 高速钢丝锥刀齿切削刃的电解强化技术的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 2-5.
LIU Yong-hong. Experimental Research on the Enhanced Cutting Edges of hss Taps with the Method of Electrolysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 2-5.
- [5] 张亚博, 白清顺, 何欣, 等. CVD 金刚石刀具微铣削 AA356 铝合金的磨损分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1): 44-50.
ZHANG Ya-bo, BAI Qing-shun, HE Xin, et al. Wear Analysis of CVD Diamond Tool in Micro-Milling AA356 Aluminum Alloy[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(1): 44-50.
- [6] LE D, LEE J M, KIM S J, et al. Burr Analysis in Microgrooving[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5): 569-577.
- [7] 石文天, 侯岩军, 刘玉德, 等. 微切削毛刺形成机理及研究进展综述[J]. 中国机械工程, 2019, 30(23): 2809-2819.
SHI Wen-tian, HOU Yan-jun, LIU Yu-de, et al. Overview on Formation Mechanism and Research Progresses of Burrs in Micro Cutting[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(23): 2809-2819.
- [8] 袁巨龙, 毛美姣, 李敏, 等. 硬质合金刀具材料化学机械抛光机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 260-267.
YUAN Ju-long, MAO Mei-jiao, LI Min, et al. Chemical and Mechanical Polishing Mechanism of Cemented Carbide Tool Material[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 260-267.
- [9] 范其香, 林静, 王铁钢. 刀具涂层材料的最新研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 1-19.
FAN Qi-xiang, LIN Jing, WANG Tie-gang. The Latest Research Progress of Tool Coating Materials[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 1-19.
- [10] 贾秀杰, 李剑峰, 孙杰. 刀具钝化对切削力及表面粗糙度的影响[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1430-1434.
JIA Xiu-jie, LI Jian-feng, SUN Jie. Influence of Cutting Tool Blade Passivation on Cutting Force and Surface Roughness[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7): 1430-1434.
- [11] 刘献礼, 李雪冰, 丁明娜, 等. 面向智能制造的刀具全生命周期智能管控技术[J]. 机械工程学报, 2021,

- 57(10): 196-219.
LIU Xian-li, LI Xue-bing, DING Ming-na, et al. Intelligent Management and Control Technology of Cutting Tool Life-Cycle for Intelligent Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 196-219.
- [12] 唐永亮. 硬质合金刀具旋转磨粒流精化处理机理及其应用技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019: 2-12.
TANG Yong-liang. Research on Mechanism and Application Technology of Rotary Abrasive Flow Refining for Cemented Carbide Tools[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019: 2-12.
- [13] UHLMANN E, OBERSCHMIDT D, LÖWENSTEIN A, et al. Influence of Cutting Edge Preparation on the Performance of Micro Milling Tools[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 214-217.
- [14] 赵雪峰, 李辉, 杨勇, 等. 基于气固两相流磨粒的刀具钝化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(6): 127-130.
ZHAO Xue-feng, LI Hui, YANG Yong, et al. Research on Edge Preparation Based on Gas-Solid Two-Phase Flow Abrasive Particles[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(6): 127-130.
- [15] DAS M, JAIN V K, GHOSH DASTIDAR P S. Nanofinishing of Flat Workpieces Using rotary-Magnetorheological Abrasive Flow Finishing (R-MRAFF) Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(1): 405-420.
- [16] 师润平, 韩彦良, 韩春钰. 精切刀具柔性磨粒射流抛光(钝化)工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2021(4): 69-73.
SHI Run-ping, HAN Yan-liang, HAN Chun-yu. Study on Flexible Abrasive Jet Polishing (passivation) Process of Fine Cutting Tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(4): 69-73.
- [17] ZHUANG Ke-jia, FU Chang-ni, WENG Jian, et al. Cutting Edge Microgeometries in Metal Cutting: A Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(7): 2045-2092.
- [18] WANG Wan-ting, BIERMANN D, ABMUTH R, et al. Effects on Tool Performance of Cutting Edge Prepared by Pressurized Air Wet Abrasive Jet Machining (PAWA-JM)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116456.
- [19] BOGDAN B M, SABIN P M, STEFAN S, et al. Unconventional Technologies in Preparation of Microgeometry Edges on Cutting Tools[J]. Romanian Association of Nonconventional Technologies, 2013(12):10-16.
- [20] GERSTENMEYER M, ORT B L, ZANGER F, et al. Influence of the Cutting Edge Microgeometry on the Surface Integrity during Mechanical Surface Modification by Complementary Machining[J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 55-60.
- [21] 吕雁文, 闫献国, 冯志阳, 等. 刃口钝化对高速钢丝锥耐磨性及寿命的影响[J]. 工具技术, 2015, 49(9): 9-13.
LYU Yan-wen, YAN Xian-guo, FENG Zhi-yang, et al. Edge Passive Influence on High Speed Steel Tap Wear Resistance and Life[J]. Tool Engineering, 2015, 49(9): 9-13.
- [22] 王延辰, 闫献国, 王旭强. 刃口钝化丝锥切削刃的三维建模及有限元分析[J]. 工具技术, 2012, 46(4): 46-48.
WANG Yan-chen, YAN Xian-guo, WANG Xu-qiang. Tap's Cutting Edge's Three-Dimensional Modeling and Finite Element Analysis[J]. Tool Engineering, 2012, 46(4): 46-48.
- [23] 万庆丰, 雷玉勇, 杨涵, 等. 基于 ABAQUS 刀具刃口钝化的有限元分析[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 63-66.
WAN Qing-feng, LEI Yu-yong, YANG Han, et al. Finite Element Analysis of Tool Edge Roundness Based on ABAQUS[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2014, 33(2): 63-66.
- [24] 孙树峰, 计时鸣, 谭大鹏. 低黏度液-固两相磨粒流湍流调控与结构化表面光整加工技术研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(19): 2349-2353.
SUN Shu-feng, JI Shi-ming, TAN Da-peng. Research on Turbulence Regulation of Low Viscosity Liquid-Solid Two-Phase Abrasive Flow and Finishing Technology of Structural Surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(19): 2349-2353.
- [25] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 125-226.
WANG Yan, SUI Si-lian. Experimental Design and MATLAB Data Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 125-226.
- [26] 柯明峰, 吕冰海, 邵蓝樱, 等. 硬质合金刀片前刀面的剪切增稠抛光实验研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 220-228.
KE Ming-feng, LYU Bing-hai, SHAO Lan-ying, et al. Experimental Study on Shearing Thickening Polishing of Rake Surface of Cemented Carbide Inserts[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 220-228.

责任编辑: 彭颀