# 甲基乙烯基磨料流抛光介质的研制及性能分析

曹伟婷[1,2] 文东辉[1,2*] 蔡姚杰[1,2]
1.特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室,杭州,310023
2.浙江工业大学机械工程学院,杭州,310023

**摘要**:以甲基乙烯基硅橡胶为基体,添加二甲基硅油、碳化硅(SiC)磨料等,研制了一种新型磨料流抛光介质,并系统评估其流变性能与加工效果。通过微观形貌分析与流变测试(蠕变柔量、应力松弛、动态模量扫描),主要研究了介质组分对其黏弹性行为的影响,发现提高加工油含量可增强流动性,但过量(大于20%)会导致弹性下降,介质二(30%基体、20%加工油、45%SiC、5%热稳定剂)在宽频范围内(86.9~628 rad/s)表现出弹性主导($G'>G''$),且剪切稀化特性显著,适配高剪切抛光工况。与丁苯橡胶基介质对比,甲基乙烯基抛光介质展现出更优的耐热稳定性、耐磨性及壁面黏附性能。将新型介质用于螺杆抛光加工试验,结果表明:相同参数下,甲基乙烯基抛光介质使螺杆表面粗糙度$Sa$的降幅为89.23%,优于丁苯抛光介质的$Sa$降幅74.71%。

**关键词**:甲基乙烯;抛光介质;磨料流加工;流变性能;表面粗糙度
**中图分类号**:TG580
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

# Development and Performance Analysis of Methyl Vinyl Abrasive Flow Polishing Media

CAO Weiting[1,2] WEN Donghui[1,2*] CAI Yaojie[1,2]
1.Key Laboratory of Special Equipment Manufacturing and Advanced Processing Technology, Ministry of Education/Zhejiang Province, Hangzhou, 310023
2.School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310023

**Abstract**: A novel abrasive flow polishing medium is developed using methyl vinyl silicone rubber as the matrix, with the addition of dimethyl silicone oil, silicon carbide (SiC) abrasives, and other components. The rheological properties and machining performance of the medium are systematically evaluated. Through micro-morphology analysis and rheological testing (including creep compliance, stress relaxation, and dynamic modulus scanning), the effects of the medium components on its viscoelastic behavior are investigated. Increasing the machining oil content enhances the fluidity, but an excessive amount (>20%) leads to a decrease in elasticity. Medium II (30% matrix, 20% machining oil, 45% SiC, and 5% thermal stabilizer) exhibits elasticity-dominant behavior ($G'>G''$) over a wide frequency range (86.9–628 rad/s) and shows significant shear-thinning characteristics, making it suitable for high-shear polishing conditions. Compared with the styrene-butadiene rubber-based medium, the methylvinyl polishing medium demonstrated superior thermal stability, wear resistance, and wall adhesion properties. The new medium is applied to screw polishing machining tests, and the results show that under tidentical parameters, the methyl vinyl polishing medium achieves an 89.23% improvement in surface roughness $Sa$ of the screw, outperforming the 74.71% improvement rate of the styrene-butadiene polishing medium.

**Key words**: methyl vinyl; polishing medium; abrasive flow machining(AFM); rheological property; surface roughness

## 0 引言

磨料流抛光介质是黏弹性聚合物与磨料的混合物,是磨料流加工过程中的关键因素之一,主要由黏弹性聚合物、加工油和磨料组成[1]。聚合物作为载体,具有优越的弹性和低黏性,加工油增加了聚合物的黏性、流动性和柔性。磨料流介质应具有较好的加工性能、稳定的流变特性、良好的耐高温性能、较长的使用寿命等[2]。磨料流加工技术(abrasive flow machining, AFM)的效能高度依赖于黏弹性介质的流变特性与工艺适配性。目前,聚硼硅氧烷、硅橡胶、丁苯橡胶等聚合物基体因其良好的黏弹性而被广泛采用,但其性能局限性逐渐显现[3-5]。AGRAWAL等[6]基于黏弹性理论设计新型黏度计,通过蠕变柔度与体积模量计

**收稿日期**:2025-03-17
**基金项目**:浙江省自然科学基金重点项目(LZ25E05002);浙江省尖兵领雁项目(2022C01167)

算其流变行为，验证了聚硼硅氧烷的剪切稀化特性，但未深入探讨其在实际加工中的耐久性。KAR等[5]对比多种橡胶基介质性能，发现丁苯橡胶基介质有较好的热稳定性，且表面粗糙度改善率可达88%，但长期使用后易发生壁面黏附。FANG等[7]进一步指出硅橡胶基介质随温度的升高，黏度显著下降，导致材料去除率降低，加工均匀性变差。此外，WEI等[8]开发的水凝胶基黄原胶（XG）介质虽成本低廉且呈现剪切稀化，但其机械强度与耐磨性难以满足高精度需求。尽管已有研究在磨料流抛光介质的开发和性能优化方面取得了显著进展，但现有介质在耐久性、热稳定性和加工均匀性等方面仍存在不足。

本文基于甲基乙烯基硅胶、加工油和SiC磨料，研制了一种新型磨料流抛光介质，采用扫描电镜（SEM）对所研制的磨料进行了形貌和物理性能表征，通过流变仪（Anton Paar MCR-302）系统研究其静态（蠕变柔量、应力松弛）与动态（储能/损耗模量）流变特性，并结合抛光试验对比分析壁面黏附率、耐热稳定性及表面形貌改善效果，为高稳定性、自适应流变介质的研制提供理论与实验依据。

## 1 磨料流介质制备

### 1.1 聚合物载体

磨料流介质通常采用黏弹性聚合物作为载体介质，常见介质主要有：丁苯橡胶基系列、聚硅硼氧烷基系列、天然橡胶基系列等[9]，本文选用甲基乙烯基硅橡胶作为黏弹性聚合物载体介质，其分子结构如图1所示。甲基乙烯基硅橡胶分子链（硅氧烷和聚硅氧烷）的极性较弱，且分子链不易断裂，故具有较大的拉伸比和较强的壁面滑移性能[10-11]，与其他天然或合成橡胶相比具有耐磨性好、化学稳定性好、撕裂强度和延伸率高、可加工性好、表面不黏等特性。

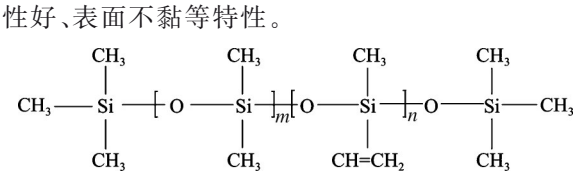



**图1 甲基乙烯基分子链结构**

**Fig.1 Methyl vinyl molecular chain structure**

### 1.2 加工油

加工油又名分散剂，是小分子（低分子量）聚合物，不具有长链特征，在化学上与聚合物相似，加工油容易在高分子量聚合物链之间扩散，使得聚合物分子链之间的二次相互作用减少，如图2所示[12]，从而增加聚合物的流动性，随着加工油含量的增加，聚合物分子间作用力减小（即$F_1>F_2>F_3$，其中$F_1$、$F_2$、$F_3$分别为不含加工油、加工油较少、加工油较多的两个聚合物分子间的分子间力）。

本文选用二甲基硅油作为加工油[13]，并通过改变加工油的质量分数（%）来调控介质的流变性能。二甲基硅油与硅氧烷和聚硅氧烷单体均具有较好的混合相容性，二甲基硅油的扩散使甲基乙烯基硅橡胶分子链被分开，使其具有更好的流动能力、柔韧性和自变形性。

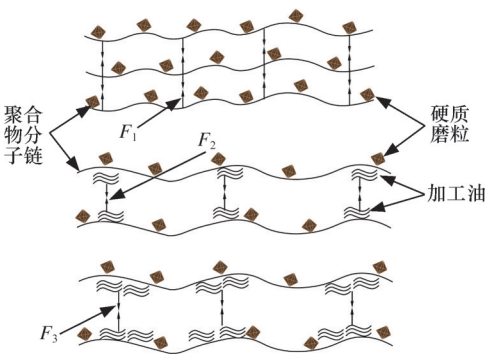



**图2 基体与加工油之间的分子作用力[12]**

**Fig.2 Molecular forces between matrix and processing oil[12]**

### 1.3 磨料

磨料是磨料流抛光介质的基本成分，光整加工过程中依赖磨料的作用力去除工件材料。磨料流加工对磨料的基本要求如下：①具有足够的硬度，以便有效地去除工件表面的材料；②与载体介质和加工油兼容；③磨粒的大小和形状应均匀一致，以确保抛光过程的均匀性和一致性；④具有自锐性，能够在使用过程中保持其锋利度，避免因磨损而失去切削能力，从而维持抛光效率。本文选用碳化硅作为磨料，其物理性能如表1所示。

**表1 碳化硅磨料物理性能**

**Tab.1 Physical properties of silicon carbide abrasives**

| 密度/(g·cm$^{-3}$) | 弹性模量/GPa | 显微硬度/HV | 熔点/℃ |
|---|---|---|---|
| 3.22 | 192 | 2840～3320 | 2700 |

### 1.4 磨料流介质的制备

将甲基乙烯基硅橡胶、加工油和碳化硅磨料按比例混合制成磨料流介质，例如50%SiC磨料，34%硅橡胶和16%加工油加入捏合机中进行捏合。具体的制备步骤如下：在常温状态下，将硅橡胶加入捏合机内，然后添加二甲基硅油，以降低其黏度，增加流动性，持续捏合至硅胶完全与硅油融合；再将SiC磨料加入混合物中，继续捏合5 h使SiC磨料均匀分布在硅橡胶和硅油混合物中，研制成新型磨料流介质，如图3所示。

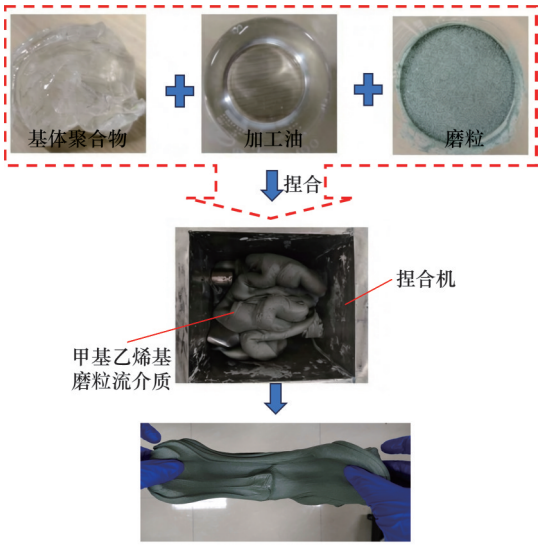



**图3　甲基乙烯基抛光介质成分与制备**

**Fig.3　Preparation and composition of a new polishing medium**

### 1.5　形貌表征

磨粒的尺寸和形状超景深图像如图4所示。可以看出磨粒均匀分散在基体聚合物内部，磨粒与载体之间的相互作用良好，磨粒均匀致密分布，磨料是240号SiC，尺寸在53～63 μm，利于介质流动，载体介质与磨粒紧密贴合。另外，通过分析SEM图像的灰度值可以判断物质的分布深度和层次，如果两种物质的灰度值在界面附近发生变化，可能表明存在渗透[14]。如图5所示，磨粒的周围出现明显界限，这表明界面处高分子基质或加工油

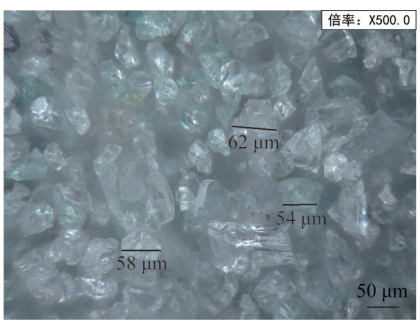



**图4　超景深图**

**Fig.4　Deep focus microscopy image**

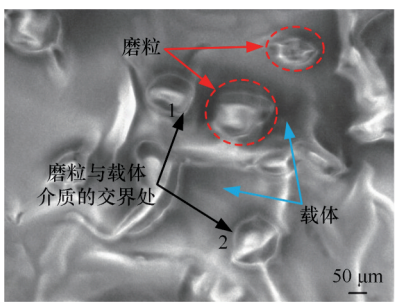



**图5　SEM图**

**Fig.5　SEM image**

与磨粒发生了渗透作用。进一步分析磨粒与节制载体交界处的元素，如图6所示，曲线显示各元素浓度在界面处存在明显波动与梯度变化，表明甲基乙烯基硅橡胶作为载体介质，在将其推过待加工的工件表面时携带SiC磨粒和加工油的效果良好。

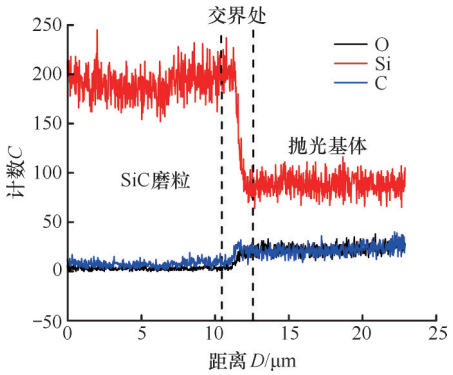



**图6　交界处2的线扫EDS表征**

**Fig.6　Line-scan EDS characterization at interface region 2**

## 2　磨料流抛光介质性能分析

### 2.1　抛光介质的流变性能分析

磨料流加工过程中，工件表面的切削力主要由具有剪切稀化特性的黏弹性介质主导，如图7所示[12]，聚合物的弹性组分通过径向力$F_T$作用于磨粒，促使其不规则尖角压入工件表面；而介质内部由液压产生的轴向力$F_p$则诱导晶格位错及剪切滑移。当其累积超过临界值时，工件表面出现塑性变形（如沟槽与划痕）。当累积应力超过工件材料断裂强度时，部分表层材料被去除。黏性分量在液压驱动的作用下通过轴向力$F_p$将局部塑性变形扩展至整个表面，实现材料的均匀去除。同时，粗糙峰区域因先达到应力临界值而被优先去除，最终降低表面粗糙度。这表明材料去除与表面平整度高度依赖介质流变特性，现采用流变仪（Anton Paar MCR302）对磨料流抛光介质进行振荡模式（耗能和储能模量）、应力扫描测试（蠕变

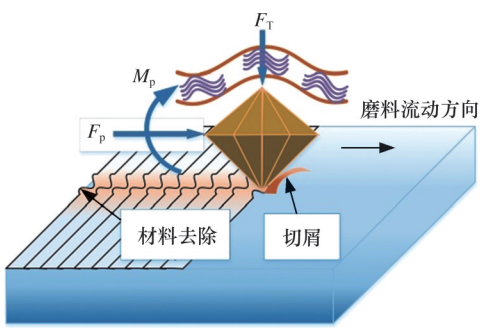



**图7　抛光介质加工机理[12]**

**Fig.7　Material removal mechanism of polishing media[12]**

恢复)和应变扫描测试(应力松弛)的实验,进一步分析介质的流变特性。

由于磨料流抛光介质中的高分子聚合物具有主要的弹性和部分黏性,而加工油具有完全黏性,故本文研制了四种不同组分的甲基乙烯基磨料流抛光介质来进行流变测试,其具体成分如表2所示,通过调控聚合物和加工油的比例改变磨料流抛光介质的流变特性,研究其黏弹性的改变对加工性能的影响。

**表2 不同成分的甲基乙烯基磨料流抛光介质**

**Tab.2 Methyl vinyl abrasive flow polishing media with different compositions**

| 介质 | 介质成分/% | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 基体 | 加工油 | 磨粒SiC | 热稳定剂 |
| 介质一 | 40 | 10 | 45 | 5 |
| 介质二 | 30 | 20 | 45 | 5 |
| 介质三 | 20 | 30 | 45 | 5 |
| 介质四 | 10 | 40 | 45 | 5 |

### 2.1.1 蠕变恢复性能测试

蠕变恢复是材料恢复到原始状态的能力,表现为应变随时间的变化,它根据蠕变柔量来测量磨料流抛光介质的流变行为。磨料介质的黏弹性模型可以用多个Kelvin-Voigt单位的Canonical模型来表达流变行为[15]:

$$J(t)=J_0+J_i(1-\mathrm{e}^{-t/\tau_i}+)\frac{t}{\eta_0}) \tag{1}$$

其中,$G_0$为弹簧的模量,$\eta_0$为阻尼器的黏度,$\sigma$为应力。为了不破坏聚合物结构,蠕变试验应在线性黏弹性(linear viscoelasticity, LVE)应力范围内进行,如图8所示。随着剪切应力的增大,四种介质的耗能模量都有所下降。具体来说,在10~139 Pa的应变范围内,耗能模量基本不变。在恒定的应力作用下,介质的结构可以保持在原始状态,保持强度。本研究采用的恒定应力为64.5 Pa,正好处于LVE应力范围10~139 Pa的中间位置。对介质施加64.5 Pa的恒定应力测试蠕变柔量的变化,结果如图9所示。

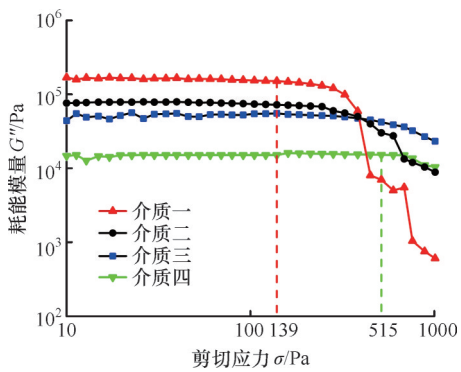



**图8 四种介质基于振荡扫描测试的线性黏弹性区间试验(应力)**

**Fig.8 Determination of linear viscoelastic region for four media via oscillatory stress sweep tests**

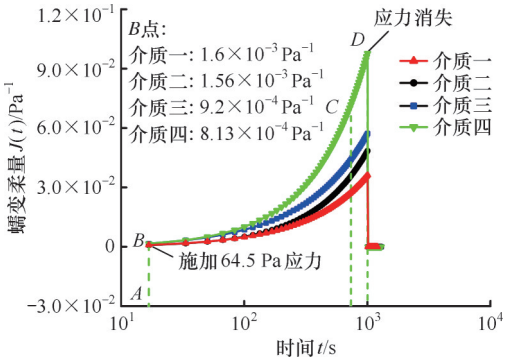



**图9 蠕变柔量随时间的变化**

**Fig.9 Time-dependent variation of creep compliance**

蠕变柔量曲线中,$A$-$B$为瞬时弹性响应($t\to 0$),初始$J(t)$值反映材料的瞬时弹性模量$E_0$,$E_0=1/J(0)$。介质一的初始$J(t)$值最高,表明其弹性模量最低,材料较软;介质四的初始$J(t)$最低,弹性模量最高,材料最硬。随着时间推移,分子链滑移或位错运动导致黏性流动,蠕变柔量$J(t)$逐渐增大,$B$-$C$是与时间相关的延迟黏弹性区域。$C$-$D$是牛顿柔量的线性区域,代表黏性流动,由阻尼器中介质的黏度来模拟,这种黏度可以通过$C$-$D$的线性部分的回归来确定,$C$-$D$区域斜率的倒数即阻尼器的黏度。同时表明,在相同时间下,介质四的蠕变柔量最大,变形能力最强;介质一的蠕变柔量相对较小,变形能力较弱。当应力消失时,四种介质的蠕变柔量急剧下降至0,表明侧支链的纠缠度很低,很难形成网络结构,否则,在解除应力后,蠕变柔量保持在一定的值,这也进一步证明线性分子链存在,且四种不同组分的介质都有良好的蠕变恢复能力。

### 2.1.2 应力松弛

应力松弛是在不改变聚集状态的情况下,介质从非平衡状态向平衡状态移动的过渡过程[15]。松弛模量$G(t)$是材料在恒定应变下应力随时间衰减的度量,通常用于描述黏弹性材料的应力松弛行为。在数学上,松弛模量为应力和应变比值。一般来说,为避免破坏聚合物结构,应变应定义为线性黏弹性应变范围内的中间值。如图10所示,四种介质的线性黏弹性应变范围为0.01%~3.67%。对四种介质施加1.83%的恒定应变,随着时间从0.01 s增至1000 s,测量其松弛模量,如图11所示。聚合物分子在瞬时(0.01~1 s)受到应变快速扩散导致松弛模量的急剧降低,由于状态从非平衡到平衡的转变,松弛模量以非线性的

方式逐渐减小到零，从而引起线性分子链从拉伸状态缩回到原始状态所产生的弹性波快速运动。随着聚合物分子的不断扩散，四种介质逐渐达到平衡状态，表明材料内部有稳定的交联结构，能够维持部分弹性。如图11所示，介质一和介质二的松弛时间较长（为1000 s），介质三和介质四的松弛时间较短，较长的松弛时间使介质在加工工件时会保持持续的应力和拉伸状态，从而增强磨料和加工表面之间的相互作用，提高加工效果。

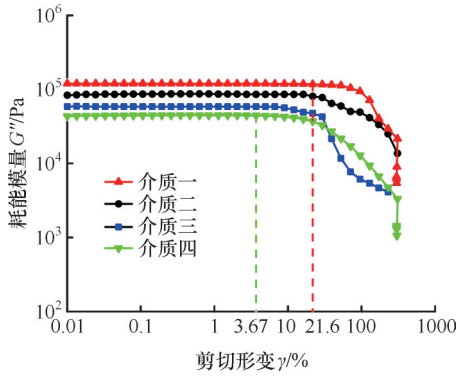



**图10　四种介质基于振荡扫描测试的线性黏弹性区间试验（形变）**

**Fig.10　Linear viscoelastic interval test based on oscillation scanning test for four media**（deformation）

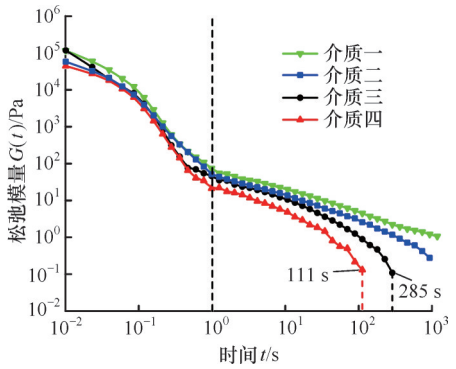



**图11　四种介质的松弛模量随时间的变化**

**Fig.11　Changes in relaxation modulus of four media over time**

### 2.1.3　储能模量$G'$和耗能模量$G''$

鉴于储能模量和耗能模量能直观地反映抛光介质的弹性强度和黏性流动性，本文对四种介质进行振荡扫描试验，以研究各介质两种模量的变化规律。储能模量$G'$表征材料在变形过程中储存能量的能力，耗能模量$G''$表征材料在黏性变形过程中耗散能量的能力。如图12所示，在较低的振荡角频率下，四种介质的储能模量都低于耗能模量，此时耗能模量占主导地位，介质以黏性耗散为主，能量被转化为热能，结构易变形。随着振荡角频率的增大，介质一～介质三在不同时间点出现了储能模量大于耗能模量的现象，这表明在高频率区间，存储模量$G'$的增势更为明显，而耗能模量$G''$则逐渐趋于平缓，主导地位的因子变成了储能模量，更倾向于弹性行为，但介质仍然具有很大的黏性，有利于磨料流加工。

在抛光螺杆的实际加工中，抛光螺杆的剪切

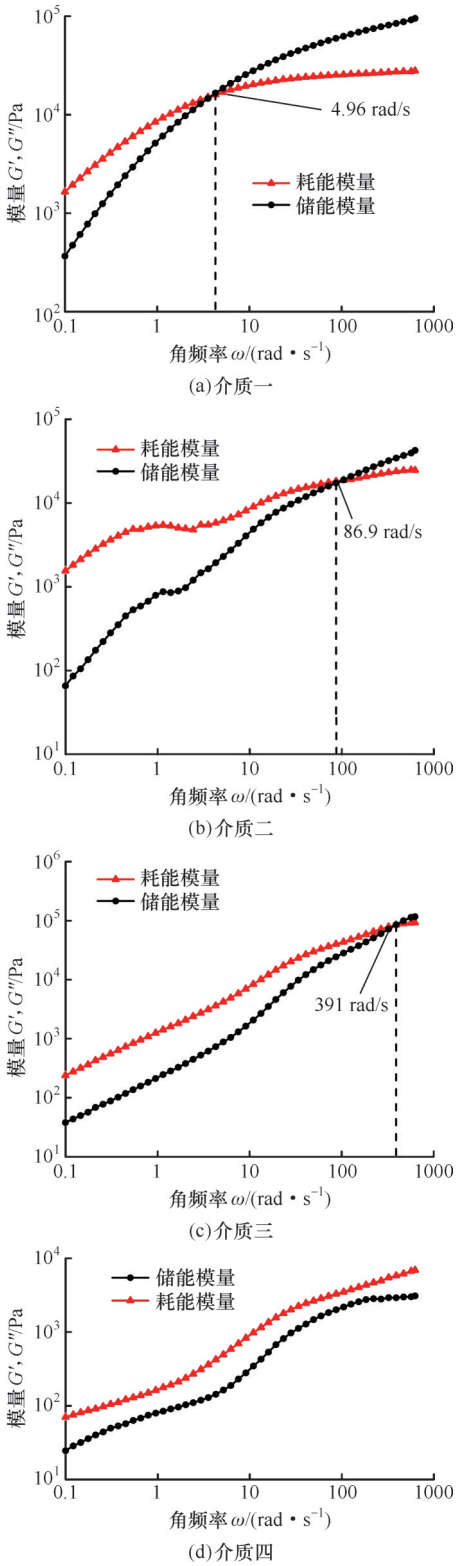



**图12　四种介质的储能模量和耗能模量随角频率的变化**

**Fig.12　Changes in storage modulus and energy dissipation modulus of four media with angular frequency**

速率$\dot{\gamma}_{luo}$由螺杆几何参数和转速决定[16]：

$$\dot{\gamma}_{luo}=\frac{2\pi nD}{60h} \tag{2}$$

其中，$D$为螺杆直径，m；$h$为螺距，m；$n$为螺杆转速，r/min。在动态振荡测试中，通常使用小振幅振荡应变幅值1%，剪切速率则与频率和应变幅值有关，使得流变仪剪切速率$\dot{\gamma}_{liu}=\omega\gamma_0=\dot{\gamma}_{luo}$，螺杆实际加工过程中，转速设置大于100 r/min，则振荡角频率大于130 rad/s。如图12a所示，介质一在低振动频率时，弹性成分仍占主导地位，使得介质流动性较差，抛光过程中没有良好的可达性。如图12c所示，介质三在391～628 rad/s角频率范围内，弹性占主导地位，但范围太小；如图12d所示，介质四始终以黏性主导；而如图12b所示，介质二在86.9～628 rad/s角频率范围内，$G'$始终高于$G''$，表明其弹性行为具有宽频带稳性，可适应螺杆转速的动态变化，这表明该介质能根据外部应力动态调整黏弹性行为，既能保证加工时的流动性(低频率下)，又能在高剪切速率下维持结构强度。

## 2.2 磨料流抛光介质性能对比

在外力作用下，磨料流抛光介质的流动行为复杂多变。橡胶作为黏弹性基体，磨料形成分散相，两者相结合在光整加工过程中起着重要作用。此抛光过程中，介质的流动行为具有时变性和复杂性，需衡量磨料的壁面黏附性、耐高温性和耐磨性。因此，本文将研制的甲基乙烯基抛光介质与丁苯抛光介质进行对比试验。

### 2.2.1 壁面黏附性能

为研究甲基乙烯基抛光介质和丁苯抛光介质在加工过程的壁面黏附性能，试验选用Easy Flow 200磨料流加工设备，设计了方孔状流道，如图13所示。通过挤推两种磨料流抛光介质流过方孔状流道，从流道入口流入、出口流出，其中入口压力为5.6 MPa，出口处压力为0。在工件1～工件3上的检测区域放置2 mm×2 mm的检测片，试验完成后将检测片取出，保留表面残留基体并烘干，采用工业显微镜提取表面黏附区域。

取出检测片后，使用XDS-10A工业体视显微镜对其进行拍摄检测，并提取表面形貌图。首先采用Image J图像处理软件对样片表面形貌图进行灰度化处理，再将图片像素离散化，黏附区域相较于其他区域颜色更深，灰度值更小，由此分离出样片的黏附区域像素。以黏附区域像素量占检测样片总像素量的比值黏附率$Z_n$表征磨料流抛光

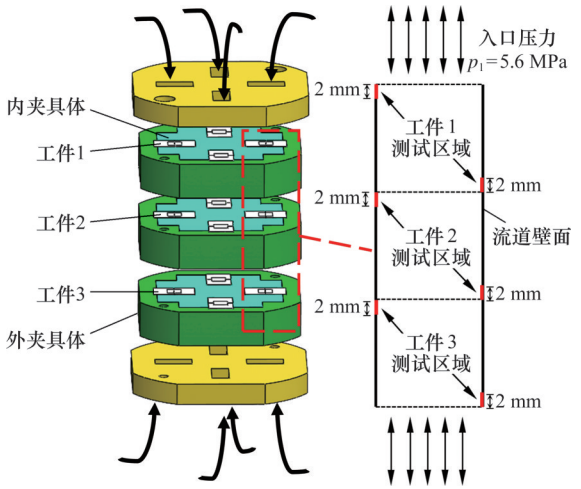
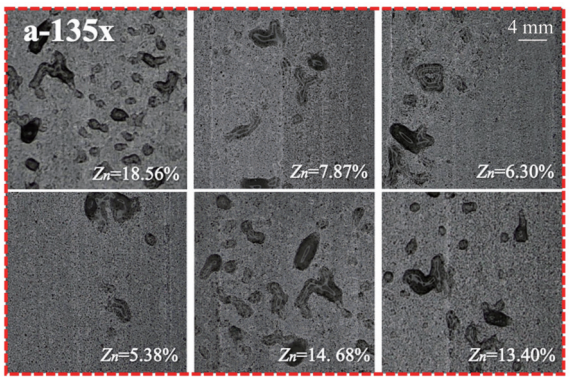



图13 试验装置及流道示意图

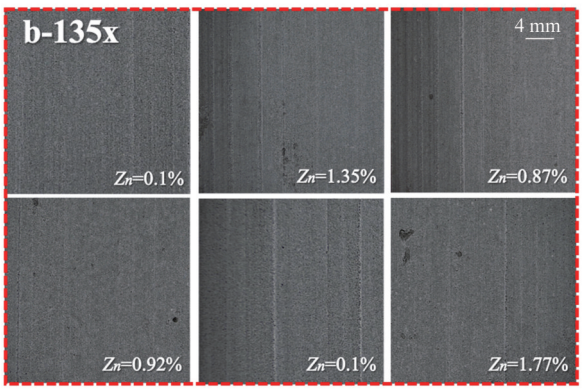
Fig.13 Schematic diagram of experimental apparatus and flow channel

介质的黏附性能。

对两种磨料流抛光介质于检测片上的黏附状况进行对比，如图14所示。采用丁苯橡胶基的抛光介质加工后的工件1工件3检测区域黏附率$Z_n$分别为18.56%、7.87%、6.30%、5.38%、14.68%、13.40%，平均黏附率达11.03%。而研制的新型磨料流抛光介质在上述六个区域内的黏附率$Z_n$依次是0.1%、1.35%、0.87%、0.92%、0.1%、




(a)丁苯抛光介质




(b)甲基乙烯基抛光介质

图14 两种抛光介质壁面黏附

Fig.14 Wall adhesion of two polishing media

1.77%，平均黏附率仅0.85%，尽管六个区域也出现了少量壁面黏附情况，但程度较轻。

综上所述，相较于现有的丁苯抛光介质，甲基乙烯基抛光介质壁面黏附性能有了显著改善，在壁面黏附方面更能满足磨料流抛光的需求。

2.2.2　**耐高温性**

在磨料流抛光过程中，随着加工时间的增加，磨料流抛光介质和流道壁面以及工件表面之间的相对摩擦使流道内侧温度上升，一般而言抛光介质在加工时候的温度可以上升到40～60 ℃。如果介质的耐热稳定性低，会导致抛光介质在温升工况下流变特性发生改变，加工性能和磨粒的携带能力明显下降，且会出现性能与工艺参数不匹配，致使磨料流抛光一致性差等问题。因此，抛光介质良好的耐热稳定性，是决定其加工性能的关键性能之一。

为分析甲基乙烯基抛光介质的耐热稳定性，本文对其进行耐热稳定性测试试验。在测试试验中，测量温度范围为20～70 ℃，测定不同温度下磨料流介质的储能模量$G'$和耗能模量$G''$的变化。

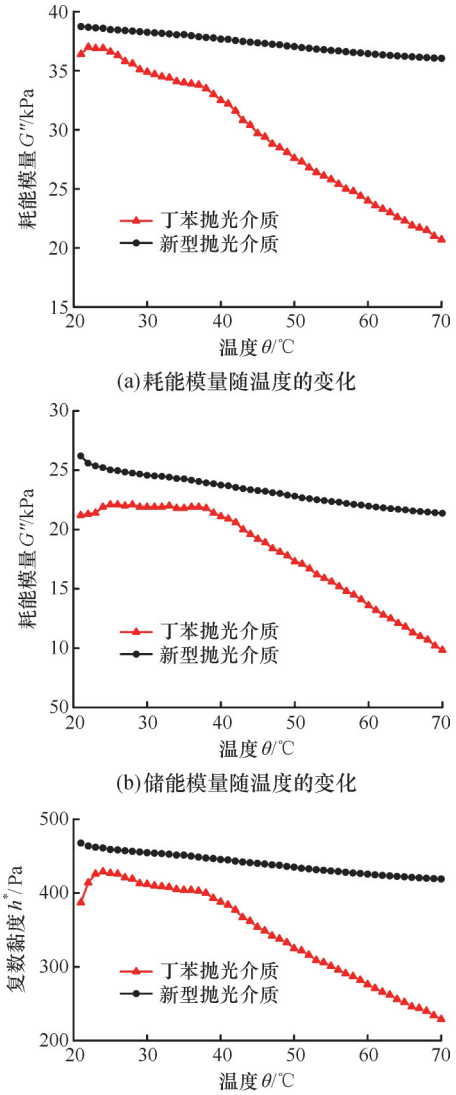
如图15所示，随着温度的升高，甲基乙烯基抛光介质和丁苯抛光介质的黏度和模量都有下降，然而对比其下降趋势，丁苯抛光介质随着温度下降的趋势更明显，新型抛光介质的黏度和模量随着温度的变化更平稳。

综上所述，本文研制的磨料流抛光介质的耐热稳定性相比现有的丁苯抛光介质有了明显的提高，在加工过程中随着加工温度的上升，其流变特性更加稳定，变稀程度相对较小。

2.2.3　**耐磨性**

磨料流抛光介质在长时间使用过程中存在性能衰变现象，其交联网络结构可能发生交联、断链，老化分解，导致介质的黏弹性变差，还会由于长时间放置，与空气接触部分出现“硬化”，导致磨料流介质的流动性下降，从而降低了磨料流介质的加工性能和使用寿命。

为分析研制的甲基乙烯基抛光介质在长时间使用下的稳定性，本文通过测量使用前后磨料流介质的动态频率扫描，分析其流变特性的变化。如图16a所示，甲基乙烯基抛光介质在使用5个月后，其黏度和模量虽有一定的下降，但降幅不大，使用前后的流变特性基本相同；如图16b所示，丁苯抛光介质在长时间使用后出现了黏度和模量增大的现象，且增幅较大，即表现为磨料流介质的




(a)耗能模量随温度的变化

(b)储能模量随温度的变化

(c)复数黏度随温度的变化

**图15　甲基乙烯基抛光介质与丁苯抛光介质耐热稳定性测试**

**Fig.15　Thermal stability testing of methyl vinyl polishing medium and styrene butadiene polishing medium**

“硬化”，出现“硬化”现象的抛光介质流动性能明显下降，无法满足磨料流抛光的要求。

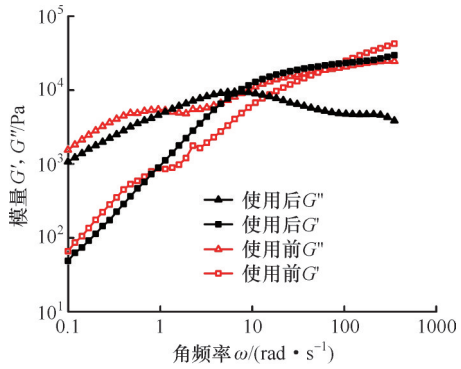
通过对比可以看出，甲基乙烯基抛光介质长时间使用的稳定性相对于丁苯抛光介质明显提高，经过长时间放置或使用，其性状变化不大，流变特性更稳定。

对研制的甲基乙烯基磨料流抛光介质的壁面黏附性能、耐热稳定性能和长时间使用稳定性进行分析，结果表明：该磨料流介质具备良好的物理性能，能够满足磨料流抛光对介质的要求。

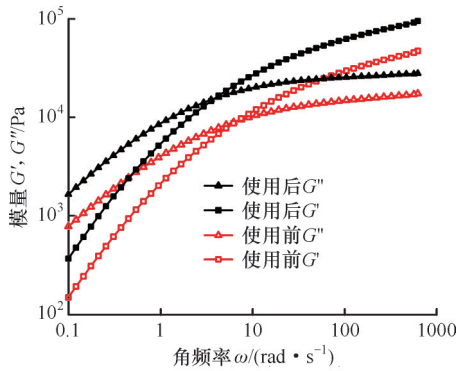
## 3　磨料流加工试验

### 3.1　试验条件

磨料流螺杆加工设备原理如图17所示，抛光




(a)甲基乙烯基磨料流介质(性能稳定)




(b)丁苯抛光介质(出现“硬化”)

**图16 甲基乙烯基磨料流介质与丁苯抛光介质用前后动态频率扫描测试**

**Fig.16 Dynamic frequency sweep tests before and after use for methyl vinyl abrasive flow medium and styrene-butadiene polishing medium**

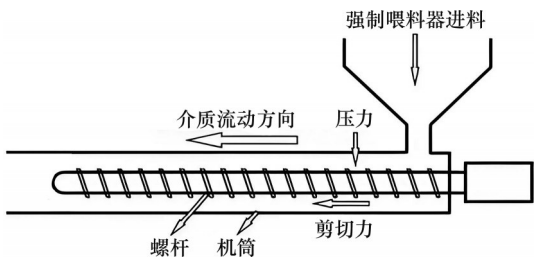



**图17 螺杆挤压加工原理**

**Fig.17 Working principle of screw extrusion processing**

介质在进料系统的推动下进入机筒，在机筒中同时受到入口压力和螺杆旋转产生的推力作用，在一定压力和速度的作用下，持续地对工件表面进行挤压与磨削作用，对螺杆表面产生了切削力，从而达到抛光的效果。以通用型螺杆为例，通常划分为三段：进料段、压缩段、均化段(又称计量段)，其中进料段主要输送物料，螺槽深度一般较深且恒定，确保物料顺利进入螺杆；压缩段压实、熔融、塑化物料，螺槽深度由深变浅，使物料受挤压与剪切而塑化；均化段进一步均化物料，让其温度、压力和组分更均匀，将最后的熔融物料挤入机头，起到定量、定温、定压的作用，该段螺槽深度较小，维持不变螺槽深度浅且恒定，保障稳定挤出。螺杆结构示意图见图18。




**图18 螺杆几何结构**

**Fig.18 Geometric structure of screw**

### 3.2 试验结果

为了比较磨料流抛光介质的加工性能，采用甲基乙烯基抛光介质和丁苯抛光介质对螺杆进行抛光加工，具体工艺参数如表3所示。比较了两种抛光介质加工前后的表面粗糙度$Sa$改善情况。

**表3 试验参数**

**Tab.3 Test parameters**

| 抛光介质 | 甲基乙烯基抛光介质 | 丁苯抛光介质 |
|---|---|---|
| 入口压力/MPa | 3 | 3 |
| 螺杆转速/(r·min$^{-1}$) | 120 | 120 |
| 加工时间/min | 100 | 100 |
| 磨料粒径 | 240# | 240# |

表面粗糙度$Sa$和表面轮廓最大高度$Sz$的改善情况如表4和表5所示，可以看出两种介质的$Sa$和$Sz$降幅均随抛光时间的延长而提升，加工25 min内$Sa$和$Sz$的降幅相较于25～100 min时较为明显。丁苯抛光介质的$Sa$和$Sz$降幅分别为74.71%和73.37%，而甲基乙烯基抛光介质的$Sa$和$Sz$降幅分别为89.23%和83.58%。明显优于丁苯抛光介质。总体上，较丁苯抛光介质，甲基乙烯基磨料流抛光介质的加工效果更好。

**表4 两种介质加工前后$Sa$改善率**

**Tab.4 Improvement rate of $Sa$ before and after processing with two different media**

| 时间/min | 抛光初始$Sa$/nm | 甲基乙烯基抛光介质抛光后$Sa$/nm | 丁苯抛光介质抛光后$Sa$/nm | 甲基乙烯基抛光介质的改善率/% | 丁苯抛光介质的改善率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | $Sa_{methyl}$=362.14<br>$Sa_{styrene}$=340.36 | 97.46 | 132.37 | 73.20 | 61.11 |
| 50 | | 69.24 | 114.76 | 80.88 | 66.28 |
| 75 | | 50.12 | 100.52 | 85.27 | 70.47 |
| 100 | | 39.45 | 86.26 | 89.23 | 74.71 |

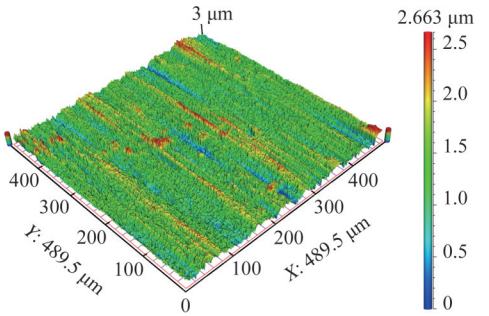
**表5 两种介质加工前后$Sz$改善率**

**Tab.5 Improvement rate of $Sz$ before and after processing with two different media**

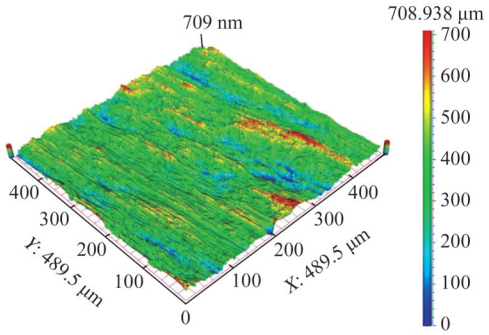
| 时间/min | 抛光初始$Sz$/nm | 甲基乙烯基抛光介质抛光后$Sz$/nm | 丁苯抛光介质抛光后$Sz$/nm | 甲基乙烯基抛光介质改善率/% | 丁苯抛光介质改善率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | $Sz_{methyl}$=2777.34<br>$Sz_{styrene}$=2663.56 | 1065 | 1036 | 61.65 | 61.10 |
| 50 | | 745 | 923 | 73.17 | 65.34 |
| 75 | | 634 | 837 | 77.17 | 68.57 |
| 100 | | 459 | 709 | 83.58 | 73.37 |

图19所示依次为丁苯抛光介质和甲基乙烯基抛光介质加工前后螺杆壁面的三维表面纹理变化，原件表面毛刺较多，凸凹起伏不平，经两种磨

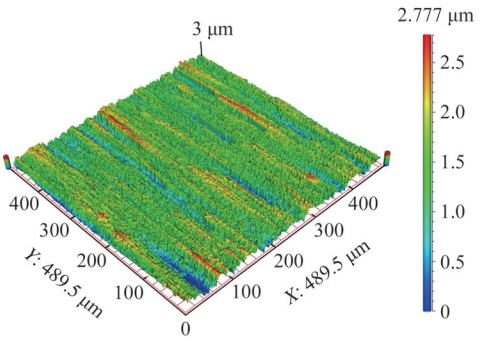
料流介质加工后，这些缺陷都被除去，表面三维轮廓都发生了较为显著的变化，但相较于丁苯基磨料流介质，甲基乙烯基磨料流抛光介质的加工效果更好。



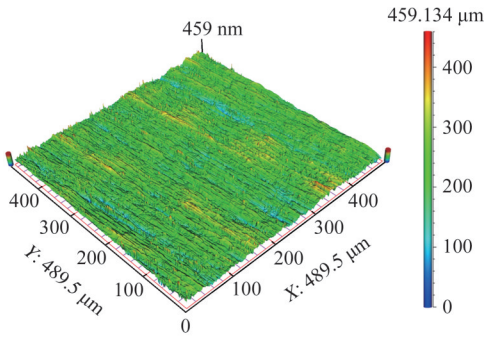

(a)丁苯抛光介质加工前




(b)丁苯抛光介质加工后




(c)甲基乙烯基抛光介质加工前




(d)甲基乙烯基抛光介质加工后

**图19　两种介质加工前后工件表面三维轮廓变化**

**Fig.19　3D surface topography changes of workpiece before and after processing with two media**

## 4　结论

1)基于甲基乙烯基硅橡胶、碳化硅磨料和加工油研制新型抛光介质，所研制的介质磨粒均匀致密分布，且基体与磨粒紧密结合。

2)调控基体、加工油与SiC磨料配比并对其进行流变性能测试，表明介质二(30%基体、20%加工油、45%SiC、5%热稳定剂)在宽频带范围(86.9～628 rad/s)内表现出弹性主导特性($G>G''$)，在高剪切速率下维持材料结构刚性，同时适应低剪切流动性，适配螺杆抛光动态工况。

3)在加工性能上，甲基乙烯基介质的壁面黏附率降至0.85%(丁苯介质为11.03%)，减少了加工残留；耐高温性显著增强，40～60 ℃工况下，甲基乙烯基介质的复数黏度与模量降幅较丁苯介质明显减少，具有高温流变稳定性；耐磨性突出，使用5个月后，甲基乙烯基介质的储能模量和耗能变化较小，无“硬化”现象。

4)将介质用于螺杆抛光加工，在相同参数下(3 MPa压力，120 r/min转速，100 min加工时间)，甲基乙烯基抛光介质使螺杆表面粗糙度$Sa$降幅达89.23%，$Sz$降幅为83.58%，而丁苯介质的$Sa$和$Sz$的降幅分别为74.71%和73.37%，甲基乙烯基介质加工的表面三维轮廓均匀性显著提高，毛刺与划痕有效消除，有更优的加工效果。

## 5　局限性及研究展望

1)在磨料流介质制备过程中，磨粒筛选范围目前仅限于240号SiC。后续可进一步尝试不同目数的磨粒或混合磨粒或其他种类的磨粒。此外，可在现有甲基乙烯基硅橡胶基体的基础上引入纤维增强，以提高介质结构刚度，或通过化学交联改性优化其动态流变稳定性，相关机制值得深入研究。

2)当前试验只对一种螺杆进行抛光效能评估，然而实际工业场景中螺杆几何特征及表面处理工艺存在显著差异。因此，可进一步研究螺杆类型不同、结构不同、表面处理方法不同等情形下甲基乙烯基抛光介质和丁苯介质的加工效果。

**参考文献：**

[1] DIXIT N, SHARMA V, KUMAR P. Research Trends in Abrasive Flow Machining: a Systematic Review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1434-1461.

[2] 魏海波. 磨粒流抛光介质性能表征与调控方法的研究[D]. 大连：大连理工大学，2020.
WEI Haibo. Study on Performance Characterization and Control Method of Media in Abrasive Flow Polishing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[3] RAJESHA S, AK S, KUMAR P. Some Studies on Performance of a Natural Polymer Media for Abrasive Flow Machining[C]// TMS 2011 140th Annual Meeting and Ex-

hibition, General Paper Selections. John Wiley & Sons, 2011: 333-336.
[4] SIDPARA A, DAS M, JAIN V K. Rheological Characterization of Magnetorheological Finishing Fluid[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2009, 24(12): 1467-1478.
[5] KAR K K, RAVIKUMAR N L, TAILOR P B, et al. Performance Evaluation and Rheological Characterization of Newly Developed Butyl Rubber Based Media for Abrasive Flow Machining Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 2212-2221.
[6] AGRAWAL A, JAIN V K, MURALIDHAR K. Experimental Determination of Viscosity of Abrasive Flow Machining Media[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2005, 7(2/3/4): 142-156.
[7] FANG Liang, ZHAO Jia, SUN Kun, et al. Temperature as Sensitive Monitor for Efficiency of Work in Abrasive Flow Machining[J]. Wear, 2009, 266(7/8): 678-687.
[8] WEI Haibo, GAO Hang, WANG Xuyue. Development of Novel Guar Gum Hydrogel Based Media for Abrasive Flow Machining: Shear-thickening Behavior and Finishing Performance[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 157/158: 758-772.
[9] KUMAR S S, HIREMATH S S. Temperature-dependent Rheological Properties of Viscoelastic Polymer Based Flexible Abrasive Media for Finishing Process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2021, 235(4): 973-985.
[10] 高立娟. 甲基乙基乙烯基硅橡胶的制备与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
GAO Lijuan. Preparation and Properties of Methylethylvinylsilicone Rubber[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
[11] 颜莎妮, 邹华, 张立群, 等. 镀镍填料/甲基乙烯基硅橡胶导电复合材料的制备与性能研究[J]. 橡胶工业, 2012, 59(11): 645-649.
YAN Shani, ZOU Hua, ZHANG Liqun, et al. Preparation and Properties of Nickel-coated Fillers/Silicone Rubber Conductive Composites[J]. China Rubber Industry, 2012, 59(11): 645-649.
[12] ZHANG Baocai, QIAO Yu, KHIABANI N, et al. Study on Rheological Behaviors of Media and Material Removal Mechanism for Abrasive Flow Machining (AFM) Micro Structures and Corresponding Simulations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 248-259.
[13] XU Zhiqiang, WANG Jun, WANG Qiuliang, et al. Investigation of the Polishing Mechanism of Magnetorheological Elastic Polishing Composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(1): 377-389.
[14] GOLSANAMI N, JAYASURIYA M N, YAN Weichao, et al. Characterizing Clay Textures and Their Impact on the Reservoir Using Deep Learning and Lattice-Boltzmann Simulation Applied to SEM Images[J]. Energy, 2022, 240: 122599.
[15] SANKAR M R, JAIN V K, RAMKUMAR J, et al. Rheological Characterization of Styrene-butadiene Based Medium and Its Finishing Performance Using Rotational Abrasive Flow Finishing Process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(12): 947-957.
[16] SMITH C L, SHINSKEY F G, GASSMAN G W, et al. Perry's Chemical Engineers' Handbook[M]. 8th ed. New York: McGraw Hill, 2007: 45-85.

(编辑 陈 勇)

作者简介：曹伟婷，女，2000年生，硕士研究生。研究方向为超精密加工、磨料流抛光介质。文东辉*(通信作者)，男，1974年生，教授、博士研究生导师。研究方向为磨粒加工装备及技术、精密切削加工。E-mail: wendh@zjut.edu.cn。

本文引用格式：
曹伟婷，文东辉，蔡姚杰. 甲基乙烯基磨料流抛光介质的研制及性能分析[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1937-1946.
CAO Weiting, WEN Donghui, CAI Yaojie. Development and Performance Analysis of Methyl Vinyl Abrasive Flow Polishing Media[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1937-1946.

(上接第1936页)

[30] LEE K I, YANG S H. Robust Measurement Method and Uncertainty Analysis for Position-independent Geometric Errors of a Rotary Axis Using a Double Ball-bar[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(2): 231-239.

(编辑 陈 勇)

作者简介：鲍玺宇，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为数控装备技术及其动力学。刘焕牢*(通信作者)，男，1966年生，教授、博士研究生导师。研究方向为数控装备技术、智能制造。E-mail: HL66@163.com.

本文引用格式：
鲍玺宇，刘焕牢，王宇林，等. 五轴机床旋转轴位置无关几何误差的快速辨识方法[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1928-1936.
BAO Xiyu, LIU Huanlao, WANG Yulin, et al. Rapid Identification of Position-Independent Geometric Errors of Rotary Axes in Five-axis Machine Tools[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 1928-1936.