DOI: 10.3901/JME.2018.03.196

金刚石砂轮 V 形尖端切向磨削修整试验研究*

梁志强 吴立飞 周天丰 张素燕 王秋燕 焦 黎 王西彬

(北京理工大学先进加工技术国防重点学科实验室 北京 100081)

摘要: 针对超硬模具微结构磨削过程中金刚石砂轮 V 形尖端几何精度难以保证以及修整困难等问题, 提出碳化硅修整轮切向磨削修整方法, 采用不同修整参数对树脂结合剂和金属结合剂金刚石砂轮 V 形尖端进行修整试验, 并采用修整后的金刚石砂轮进行了微结构阵列磨削试验。结果表明: 在一定的修整参数下, 树脂结合剂和金属结合剂金刚石砂轮的尖端圆弧半径分别达到 3.5 μm 和 2.0 μm ; 两种砂轮尖端圆弧半径随着修整轮进给速度、修整深度的增加而增大, 随着金刚石砂轮转速和修整轮粒度号的增加而减小; 金属结合剂金刚石砂轮修整效率较低, 修整后的尖端圆弧半径较小。微结构阵列磨削结果表明, 修整后的两种金刚石砂轮能够满足微结构加工, 而且发现树脂结合剂金刚石砂轮加工的微结构表面质量较好, 更易于实现延性磨削。

关键词: 金刚石砂轮; 碳化硅修整轮; 切向磨削修整; 尖端圆弧半径; 微结构阵列

中图分类号: TG156

Experimental Study on Diamond Wheel V-tip Truing Using a Tangential Grinding Truing Method

LIANG Zhiqiang WU Lifei ZHOU Tianfeng ZHANG Suyan WANG Qiuyan JIAO Li
WANG Xibin

(Key Laboratory of Fundamental Science for Advanced Machining, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: In order to improve the machining quality during truing V-tip of diamond grinding wheel, a tangential grinding truing method is presented. A series of truing experiments are conducted with the resin-bonded and metal-bonded diamond wheels, and micro grinding experiments on cemented carbide micro structure array also are carried out. Experiments results show that the radius of V-tip of resin-bonded and metal-bonded diamond wheel have been trued to 3.5 μm and 2.0 μm , respectively. The V-tip radius of trued wheel is increased as the increase of feed rate and truing depth per pass, and decreased as the increase of the diamond wheel speed and grain size number of silicon carbide (GC) wheel. Metal-bonded diamond wheel has a lower truing efficiency but a smaller radius of V-tip, compared with resin-bonded diamond wheel. Further, experimental results on micro structure array show that the cemented carbide materials are precisely ground by the trued diamond wheels, a better machining quality are obtained by using the resin-bonded wheel, and it is prone to remove the cemented carbide material in ductile mode.

Key words: diamond wheel; GC dressing wheel; tangential grinding truing; V-tip radius; micro structure array

0 前言

微结构光学元件具有体积小、重量轻、便于优化光学系统和实现任意波面变换等光学功能, 在军民领域具有广泛的应用前景, 其加工能力和水平体现了关键制造技术的核心竞争力, 已成为国内外光

学制造领域研究热点之一^[1-3]。目前, 美国、德国、日本等国家先后使用超精密磨削、超精密切削、微细电火花加工技术、光刻技术、LIGA 技术等超精密加工技术在微结构光学元件或模具上进行超精密加工。其中微结构超精密磨削因其具有效率高、加工精度高、表面粗糙度小并能够加工高硬度材料等优点, 成为微结构光学元件或模具加工的主要方法^[4-5]。然而, 在微结构磨削中金刚石砂轮尖端需要采用合理的精密修整, 获得高形状精度、小尖端圆弧半径的砂轮尖端, 并且要求长时间的砂轮精度保

* 国家重点基础研究计划(973 计划, 2015CB059900)、基础科研(A0920132008)和国家自然科学基金(51575049)资助项目。20170113 收到初稿, 20170724 收到修改稿

持性。为此，国内外学者开展了一系列的微结构砂轮精密修整理论与技术研究。有学者提出干式电火花技术修整金刚石砂轮 V 形尖端方法用于金属结合剂砂轮修整^[6-8]。华南理工大学谢晋等^[9-11]利用碳化硅(GC)磨石对金刚石砂轮尖端进行数控对磨修整，尖端圆弧半径达到 20 μm。日本 SUZUKI 等^[2]利用钼、钼铌合金块对磨修整金刚石砂轮 V 形尖端，修整出圆弧半径很小的 V 形尖端。哈尔滨工业大学 GUO 等^[12]利用 GC 修整轮进行展成磨削法修整金刚石砂轮 V 形尖端，修整出的砂轮尖端圆弧半径达 18 μm。

本文提出采用碳化硅修整轮切向磨削修整法，对金属和树脂两种结合剂金刚石砂轮 V 形尖端进行修整，研究不同修整参数对金刚石砂轮尖端形貌和效率的影响规律，最后利用修整后的金刚石砂轮进行硬质合金微阵列模具磨削试验，验证金刚石砂轮的磨削性能。

1 金刚石砂轮修整原理及试验条件

金刚石砂轮 V 形尖端修整原理如图 1 所示，碳化硅修整轮通过数控编程沿着金刚石砂轮 V 形尖端一边以一定的切削深度切向移动，砂轮与修整轮之间通过不断挤压破碎或脱落的 GC 磨粒对金刚石磨粒和结合剂产生冲击及研磨作用，进而达到整形和修锐的目的。在修整一面后，移动到 V 形尖端另一面，做同样的切向移动，最终将砂轮尖端修整成 V 形轮廓形状。金刚石砂轮 V 形尖端修整试验在六轴牧野工具磨床(CNS7d，日本牧野公司)上进行，试验装置如图 2 所示。

图 1 金刚石砂轮 V 形尖端修整示意图

图 2 金刚石砂轮 V 形尖端修整试验装置

修整对象为磨粒粒度为#5000 的 V 形金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮。修整后砂轮尖端形貌采用三维激光显微镜(VK-100，日本基恩士公司)进行检测。砂轮修整试验工艺条件如表 1 所示。

表 1 修整试验工艺条件

因素	内容			
金刚石砂轮	粒度 5 000#，尖端角度 60°，树脂结合剂和金属结合剂(100 mm×6 mm)			
碳化硅修整轮	尺寸：120 mm×10 mm 粒度：600#、1 200#、2 000#			
金刚石砂轮转速 $N/(r/min)$	1 000	2 000	3 000	4 000
修整轮进给速度 $f/(mm/min)$	10	30	50	70
修整磨削深度 $a_p/\mu m$	1	2	3	4
冷却液	油性冷却液			
修整轮转速 $n/(r/min)$	400			

2 微结构硬质合金模具磨削试验条件

微沟槽的微磨削加工试验装置如图 3 所示。在微沟槽的微细磨削加工中，采取单个沟槽多次磨削的方式，即磨削总深度为 40 μm 沟槽，通过 13 次磨削进给、每次磨削深度 3.1 μm 的方式实现。工件材料采用硬质合金材料(GU25UF、粒度 0.4 μm，厦门金鹭特种合金公司)，其材料属性如表 2 所示。加工的微结构形貌采用扫描电镜(QUANTA FEG 650，美国 FEI 公司)观测，沟槽表面粗糙度采用三维光学表面轮廓仪(NanoMap-D，美国 AEP Technology 公司)进行测量。微沟槽微磨削加工工艺条件如表 3 所示，选用树脂和金属结合剂金刚石砂轮，油性冷却液作为磨削液。

图 3 微沟槽磨削试验装置

表 2 硬质合金 GU25UF 材料属性

参数	参数
密度/(g/cm ³)	14.00~14.20
洛氏硬度 HRA	92.2~93.0
Co(化学)%	12.00
平均粒度/μm	0.4
抗压强度/(N/mm ²)	≥5 600
断裂韧性指数 KIC /(MN · m ^{-3/2})	14

表3 微结构磨削工艺参数

因素	参数
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	3.1
工件进给速度 $v_f/(\text{mm}/\text{min})$	9
金刚石砂轮转速 $N/(\text{r}/\text{min})$	5 000
单次磨削行程 L/mm	10

3 试验结果及分析

3.1 修整参数对金刚石砂轮尖端圆弧半径的影响

利用三维激光显微镜检测修整后砂轮尖端轮廓, 用其后处理软件进行尖端圆弧半径拟合, 如图4所示。图5为不同修整参数对金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮尖端圆弧半径的影响规律。

图4 修整后金刚石V形尖端圆弧半径测量图

从图5a中可以看出随着砂轮转速的增加,V形尖端圆弧半径呈现减小趋势。较大的磨削力会导致砂轮结合剂断裂并产生微观破损, 砂轮线速度增加将促使磨削力减小, 砂轮V形尖端微破损将随之减小, 因此能获得更小的砂轮尖端圆弧半径。砂轮

(a) 砂轮转速对尖端圆弧半径的影响

(b) 进给速度对尖端圆弧半径的影响

(c) 修整深度对尖端圆弧半径的影响

图5 修整参数对V尖端圆弧半径的影响

转速对金属结合剂金刚石砂轮圆弧半径影响更加显著, 当转速为4 000 r/min时, V形尖端圆弧半径达到最小值, 为2.4 μm 。图5b为进给速度对其圆弧半径的影响规律, 可以看出, V形尖端圆弧半径随着进给速度的增加而增加, 最小圆弧半径在进给速度为10 mm/min时得到, 此时金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮修整后尖端圆弧半径分别为2.1 μm 和4.8 μm 。这主要是因为低进给速度更有利于增强碳化硅修整轮和金刚石砂轮之间的研磨作用, 从而使得砂轮修整效果增强, V形尖端更加锋利。与砂轮转速和进给速度相比, 修整深度对其圆弧半径的影响更加显著(图5c)。随着修整深度的增加, 砂轮V形尖端圆弧半径呈显著增加趋势。主要因为随着修整深度的增加, 磨粒切除厚度增加, 修整力显著增加。在较大修整力作用下砂轮磨粒发生脱落和破碎, 结合剂断裂, 加剧了砂轮磨损, 导致尖端圆弧半径变大。

3.2 修整轮磨粒粒度对尖端圆弧半径的影响

修整轮磨粒粒度对金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮尖端圆弧半径的影响规律如图6所示。由图可知随着修整轮粒度增加, 尖端圆弧半径呈减小趋势, 表明细粒度的修整轮更容易获得较小的尖端圆弧半径。这主要是因为微细粒度修整轮在磨削过程中磨粒切除厚度减小, 修整力减小, 且脱落的细小碳化钨颗粒能够在砂轮和修整轮之间形成研磨作用, 可逐渐去除金刚石磨粒周围的结合剂, 有利于形成较小的尖端圆弧半径。但较细粒度的修整轮会使修整效率下降, 修整时间延长。

图6 修整轮粒度对尖端圆弧半径影响

3.3 修整轮粒度和砂轮结合剂对修整效率的影响

砂轮的修整效率用修整比 T 来表示, 定义为修整工具单位体积磨损所对应的去除金刚石砂轮的体积, 通常计算为

$$T = \frac{\Delta Q_w}{\Delta Q_s} \quad (1)$$

式中, ΔQ_w 为金刚石砂轮去除体积; ΔQ_s 为修整轮磨损体积。

金刚石砂轮尖端在修整过程中的磨耗几何关系如图 7a 所示。根据砂轮去除几何关系图, 可以计算出砂轮的去除体积 ΔQ_w ^[8]

$$\Delta Q_w = \frac{\pi W \Delta R \left[2(D - \Delta R) - W \tan\left(\frac{\pi - \alpha}{2}\right) \right]}{2} \quad (2)$$

式中, W 为金刚石砂轮厚度; D 为金刚石砂轮直径; α 为金刚石砂轮 V 形尖端角度; ΔR 为金刚石砂轮半径减少量。

根据平行修整轮的几何结构, 计算出修整轮磨损消耗体积 ΔQ_s

$$\Delta Q_s = \pi w \Delta h (d - \Delta h) / 2 \quad (3)$$

式中, w 为修整轮厚度; d 为修整轮直径; Δh 为修整轮半径减少量。

金刚石砂轮的体积变化率可通过修整后金刚石砂轮半径变化率 ΔR 计算而得, 半径变化率 ΔR 由三维激光显微镜测量砂轮磨削石墨块的沟槽轮廓获得, 如图 7 所示。修整轮半径减少量 Δh 通过直接测量砂轮直径获得。

图 7 修整后金刚石砂轮高度差

不同粒度的碳化硅修整轮的修整比如图 8 给出, 金属和树脂结合剂金刚石砂轮的修整比随着碳

图 8 不同粒度碳化硅修整轮修整比

化硅修整轮磨粒直径的减小而大幅度降低, 表明细颗粒度修整轮去除金刚石砂轮结合剂能力相比于粗颗粒度修整轮弱。碳化硅修整轮对树脂结合剂金刚石砂轮的修整比远大于金属结合剂金刚石砂轮, 原因在于树脂结合剂对磨粒的把持能力较弱, 而金属结合剂对磨粒的把持能力较强。

3.4 修整后的金刚石砂轮尖端形貌观察与分析

图 9 为金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮修整后 V 形尖端修整前后微观形貌图。图 9a 是磨损后的金属结合剂尖端形貌, 基本呈磨平状态且金刚石磨粒脱落, 砂轮尖端被金属结合剂覆盖。图 9b 是修整后的金刚石尖端形貌, 可以看出金属结合剂金刚石砂轮在修整后尖端锋利, 金刚石颗粒基本暴露出来, 形成微小切削刃。图 9c 为树脂结合剂金刚石砂轮磨损后形貌图, 表面裸露金刚石颗粒减少,

(a) 金属结合剂金刚石砂轮修整前

(b) 金属结合剂金刚石砂轮修整后

(c) 树脂结合剂金刚石砂轮修整前

(d) 树脂结合剂金刚石砂轮修整后

图 9 金刚石砂轮尖端形貌图

尖端圆弧半径较大。图 9d 为修整后树脂结合剂金刚石砂轮尖端形貌, 可以观察到金刚石颗粒在 V 形尖端表面凸显出来, 形成锋利的切削刃。因此, 碳化硅修整砂轮切向磨削修整不仅能够将金刚石砂轮修整成符合形状要求的 V 形尖端, 也能够修锐金刚石砂轮微细磨粒, 使 V 形金刚石砂轮能够进行微结构精密磨削加工。

3.5 砂轮磨损表面微观形貌观察与分析

对于成形磨削, 沿砂轮表面的整体磨损影响并不大, 而廓形角部和尖锐凸起的局部磨损则直接影响加工精度, 特别是对于微结构表面磨削来说, 加工尺度一般在微米量级, 砂轮尖端的磨损对微结构表面的加工精度影响更大。图 10 为树脂结合剂和金属结合剂金刚石砂轮在磨削 12 道 V 沟槽阵列后的砂轮轮廓形貌。从两种砂轮的 V 形截面轮廓可以看出, 与金属结合剂相比, 树脂结合剂金刚石砂轮 V 形尖端圆弧半径保持性更好, 而且金属结合剂金刚石砂轮尖端磨损严重。在金属结合剂砂轮 V 形尖端和侧面部分均发生严重磨损现象, 其 V 形尖端被磨平且出现了凹坑现象, 同时砂轮侧面出现了较为明显的磨削痕迹。这是因为金属结合剂金刚石砂轮尖端较锋利, 而硬度较高, 砂轮磨削过程中, 尖端部分容易出现了宏观的结合剂断裂和磨粒成片脱落现象, 而初始磨粒被磨平后, 新的磨粒没有及时露出, 出现具有光亮平面的平台, 此时砂轮磨损已较为严重, 磨粒与工件的接触面积增加, 导致摩擦系数增大, 磨削力增加。相比金属结合剂砂轮, 在树脂结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽过程中尽管在 V 形尖端也出现了部分磨粒的磨损平台, 突出于砂轮表面的有效磨粒数量已减少, 但未有明显的因结合剂断裂形成凹坑的现象, 这是因为树脂结合剂砂轮的

自锐性较强, 新的磨粒及时露出表面参与磨削。由此可知, 在合理的加工条件下采用修整后的树脂结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽能够有效提高工件的磨削质量。

图 11 为金属结合剂和树脂结合剂金刚石砂轮 V 形尖端圆弧半径与磨削沟槽数量的关系图。图 11 中可以看出随着磨削 V 沟槽数量的增加, 金属结合剂和树脂结合剂砂轮的尖端圆弧半径整体上呈现上升趋势。因此, 在实际 V 沟槽磨削过程中应该合理的选定砂轮修整间隔, 以期更好的保证微结构的加工精度和质量。

图 11 金刚石砂轮尖端磨损分析

4 硬质合金模具表面微结构磨削

利用扫描电子显微镜对磨削后 V 沟槽阵列表面形貌进行观察分析, 得到如图 12 所示的微观形貌。图中 V 沟槽加工深度为 $40\text{ }\mu\text{m}$, 磨削工艺参数如表 3 所示。从图 12a 和图 12b 可以看出, 树脂结合剂金刚石砂轮和金属结合剂金刚石砂轮均能实现微米尺度的 V 沟槽阵列加工, 且这两种砂轮加工后的 V 沟槽表面粗糙度分别为 $0.059\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.157\text{ }\mu\text{m}$, 明显树脂结合剂金刚石砂轮磨削沟槽表面质量要优于金属结合剂砂轮。进一步对 V 沟槽尖端部位进行放大观察, 发现树脂结合剂金刚石砂轮磨削痕迹较少且浅, 磨削表面并未出现损伤, 相邻 V 结构连接部的边缘除了存在残余塑性去除后留下的微观毛刺外, 尖端形貌完整(图 12c); 而金属结合剂加工表面磨痕较多且深, 相邻 V 结构连接部边缘存在微小崩碎现象, 磨削质量相比较差(图 12d)。由图 12e 和图 12f 可知树脂结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽侧面磨削沟痕较少且浅, 而金属结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽侧面磨削沟痕较多且深。对 V 沟槽底部进行放大分析, 发现树脂结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽底部 WC 颗粒完整, 几乎全部被塑性去除, 而金属结合剂金刚石砂轮磨削 V 沟槽底部 WC 颗粒部分破碎, 塑性去除和脆性去除同时存在, 如图 12g 和图 12h 所示。主要有两方面原因: 一方面因为树脂

(a) 树脂结合剂金刚石砂轮磨削形貌图

(b) 金属结合剂金刚石砂轮磨削形貌图

图 10 金刚石砂轮磨削形貌图

结合剂砂轮磨削过程中易产生微观弹性变形, 使切削厚度减小, 降低了磨削力, 从而使表面质量得到提高; 另一方面树脂结合剂具有更好的自锐性, 容易实现延性域去除, 获得较为光滑的表面形貌。而金属结合剂砂轮自锐性差, 金刚石颗粒磨钝后未能及时露出的足够切削刃, 磨削性能下降, 导致表面质量变差。

图 12 金刚石砂轮磨削 V 沟槽阵列形貌

5 结论

(1) 采用碳化硅修整轮切向磨削修整方法可以获得较小的尖端圆弧半径。在一定的修整参数下, 树脂结合剂和金属结合剂金刚石砂轮的尖端圆弧半径分别达到 $3.5 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 。

(2) 在修整砂轮转速不变的条件下, 砂轮转速增加、进给速度和修整深度减小时, 砂轮尖端圆弧半径呈现减小趋势。而且修整深度对砂轮圆弧半径的影响最显著。

(3) 采用较细粒度修整轮修整金刚石砂轮的 V 形尖端, 获得的尖端圆弧半径较小。采用较粗粒度

的修整轮修整金刚石砂轮时, 尖端圆弧半径较大, 但修整比提高。

(4) 根据磨削微结构及砂轮尖端几何形状观察, 发现树脂结合剂金刚石砂轮磨削的微结构表面质量较好。

参 考 文 献

- [1] OHMORI H, EBIZUKA N, MORITA S, et al. Ultraprecision micro-grinding of germanium immersion grating element for mid-infrared super dispersion spectrograph [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 221-224.
- [2] SUZUKI H, OKADA M, YAMAGATA Y, et al. Precision grinding of structured ceramic molds by diamond wheel trued with alloy metal[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 283-286.
- [3] 郭兵, 赵清亮, JACKSON M J, 等. 超硬微结构表面模具的精密磨削加工技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 174-179.
- [4] GUO Bin, ZHAO Qinglian, JACKSON M J, et al. Investigation of precision grinding process on super hard molds with micro structured surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 174-179.
- [5] 谢晋, 李萍, 吴可可, 等. 微结构表面精密磨削技术及其功能特性开发[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 182-190.
- [6] XIE Jin, LI Ping, WU Keke, et al. Micro and precision grinding technique and functional behavior development of micro-structured surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 182-190.
- [7] XIE J, XIE H F, LIU X R, et al. Dry micro-grooving on Si wafer using a coarse diamond grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61(10): 1-8.
- [8] 赵毅. 面向微结构表面磨削的金刚石砂轮精密修整技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [9] ZHAO Yi. Precision conditioning of diamond wheels with respect to microstructured surface grinding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] GUO B, ZHAO Q. On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 62-70.
- [11] XIE J, XIE H F, LUO M J, et al. Dry electro-contact discharge mutual-wear truing of micro diamond wheel V-tip for precision micro-grinding[J]. International

- Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 61(9): 44-51.
- [9] 谢晋, 谭廷武, 郑佳华, 等. 金刚石砂轮 V 形尖端的数控对磨微细修整技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 1-5.
- XIE Jin, TAN Tingwu, ZHENG Jiahua, et al. CNC mutual-wear micro truing technique of diamond wheel V-tip[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(5): 1-5.
- [10] 谢晋, 孙晋祥, 黎宇弘, 等. F-Theta 自由曲面透镜的精密与镜面磨削[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 72-77.
- XIE Jin, SUN Jinxiang, LI Hongyu, et al. F-Theta free-form surface lens precision and mirror grinding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (17): 72-77.
- [11] 谢晋, 罗敏健, 吴可可, 等. CBN 车刀前刀面微沟槽结构磨削及其对干切削温度的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (11): 192-197.
- XIE Jin, LUO Minjian, WU Keke, et al. Turning rake face CBN grinding micro channel structure and its effect on the dry cutting temperature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (11): 192-197.
- [12] GUO B, ZHAO Q. Mechanical truing of V-shape diamond wheels for micro-structured surface grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 78(5-8): 1067-1073.
-
- 作者简介: 梁志强(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为难加工材料切削磨削, 微细刀具设计与刃磨。
E-mail: liangzhiqiang@bit.edu.cn
- 吴立飞, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为微结构磨削技术。
E-mail: wulifei1991@126.com

第 7 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

多尺寸超薄二维材料制备及其摩擦学特性研究

作者: 陈哲

毕业学校: 清华大学

指导教师: 雒建斌 Selda Günsel

人类对于通过新材料和新方法来改善润滑, 从而节约能源的探索从未停止过。超薄二维材料作为一种新材料, 其摩擦学特性是当前的研究热点。然而, 超薄二维材料在液体润滑剂, 尤其是润滑油中的稳定分散问题并没有得到很好的解决, 制约了超薄二维材料的实际应用。此外, 超薄二维材料的横向尺寸, 作为一个重要参数, 对于其摩擦学特性的影响有待进一步研究。

针对上述问题, 本文以多种尺寸的超薄二硫化钼和氧化石墨烯为研究对象, 对其摩擦学特性展开研究。

首先, 通过溶剂热法, 一步完成超薄二硫化钼的合成与表面修饰, 分别制备得到两种横向尺寸分别在纳米尺度和亚微米尺度且表面修饰有油胺分子的油溶性超薄二硫化钼。利用间接分散法将上述超薄二硫化钼成功分散到基础油中后, 通过与其他含 Mo 元素添加剂的对比, 发现纳米尺度超薄二硫化钼能大幅提高润滑油样品的极压性能, 而亚微米尺度超薄二硫化钼则可以显著改善润滑油的摩擦磨损性能。

其次, 通过直接对比上述两种横向尺寸不同的油溶性超薄二硫化钼以及微米尺度多层二硫化钼, 发现超薄二硫化钼相较于多层二硫化钼, 能够在更高的载荷下进入接触区并提供稳定润滑。并且发现油胺并不适合作为微米尺度多层二硫化钼的表面改性剂。而亚微米尺度超薄二硫化钼相较于纳米尺度超薄二硫化钼具有更好的摩擦磨损性能, 说明横向尺寸对超薄二维材料的摩擦学特性会产生影响。

然后, 为了进一步深入研究横向尺寸对超薄二维材料摩擦学特性的影响规律, 选取三种横向尺寸不同的氧化石墨烯分别分散到去离子水中, 研究其水溶液在不同质量分数下的摩擦磨损性能。发现相同质量分数下, 含有较大尺寸氧化石墨烯的水溶液能取得更低的摩擦系数和磨损量。从而得到了超薄二维材料横向尺寸对其摩擦学特性影响的一般规律。

最后, 在发现并研究丙三醇水溶液超润滑的基础上, 研究了氧化石墨烯对其超润滑特性的影响。发现添加氧化石墨烯能够在保持超低摩擦系数的同时, 大幅缩短跑合时间、减小磨斑面积并且降低磨斑区域表面粗糙度, 从而在更高压强下实现稳定超润滑。