2020年中国机械工程学会年会暨绿色制造发展学术会议

纳米润滑剂微量润滑可持续制造的应用与展望

汇 报 人：李长河

青岛理工大学

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

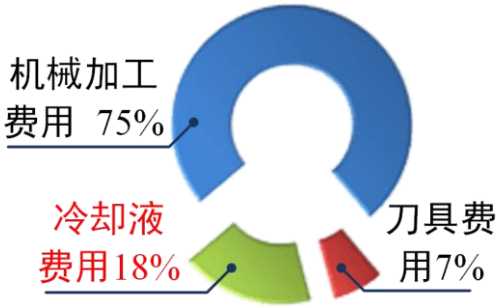
课 题 背 景

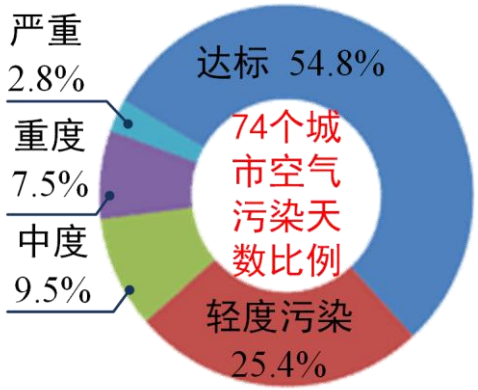
智能与洁净精密制造新工艺

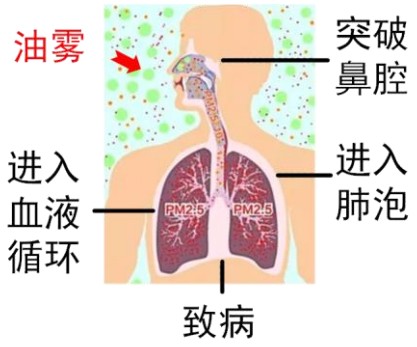
高昂成本

环境污染

工人健康威胁





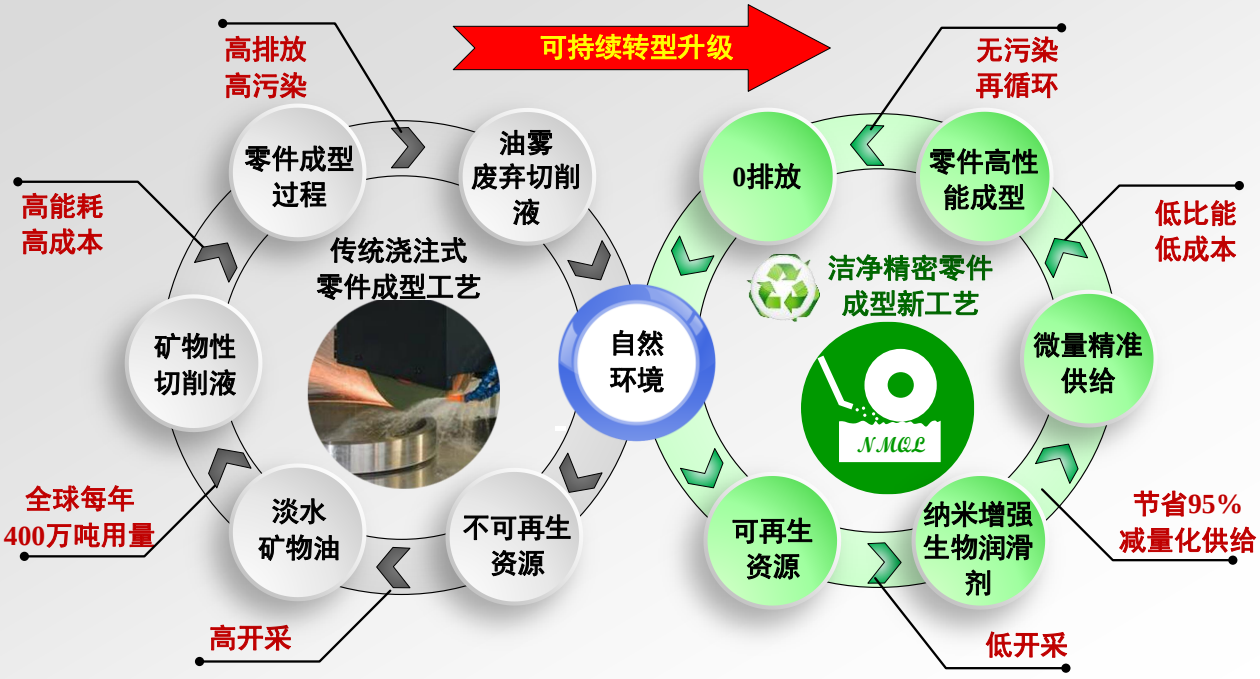


纳米流体微量润滑

传统浇注式

课 题 背 景

纳米增强生物润滑剂



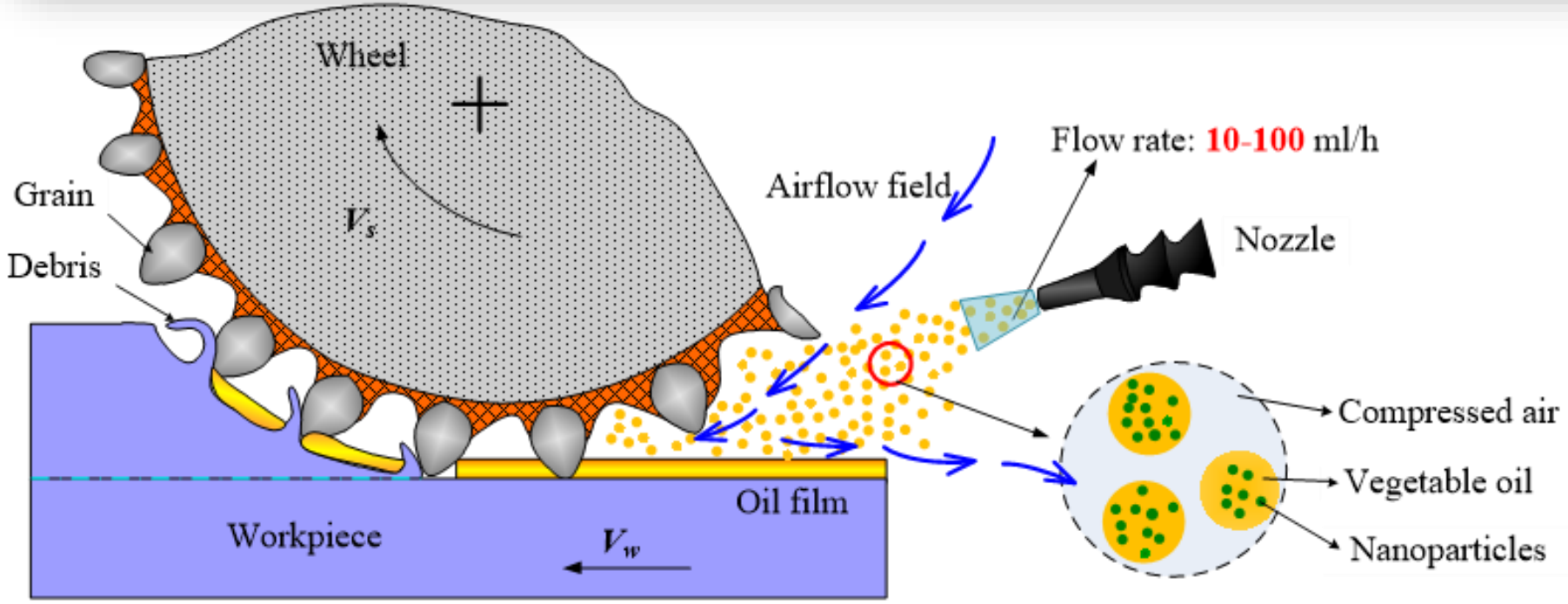
政策牵引

迫切产业需求

新方法定义

纳米增强生物润滑剂微量润滑：

采用植物性基础油和纳米添加相制备纳米增强生物润滑剂，以10~100ml/h的流量供给至切削/磨削区，显著提升减摩抗磨和强化换热性能。



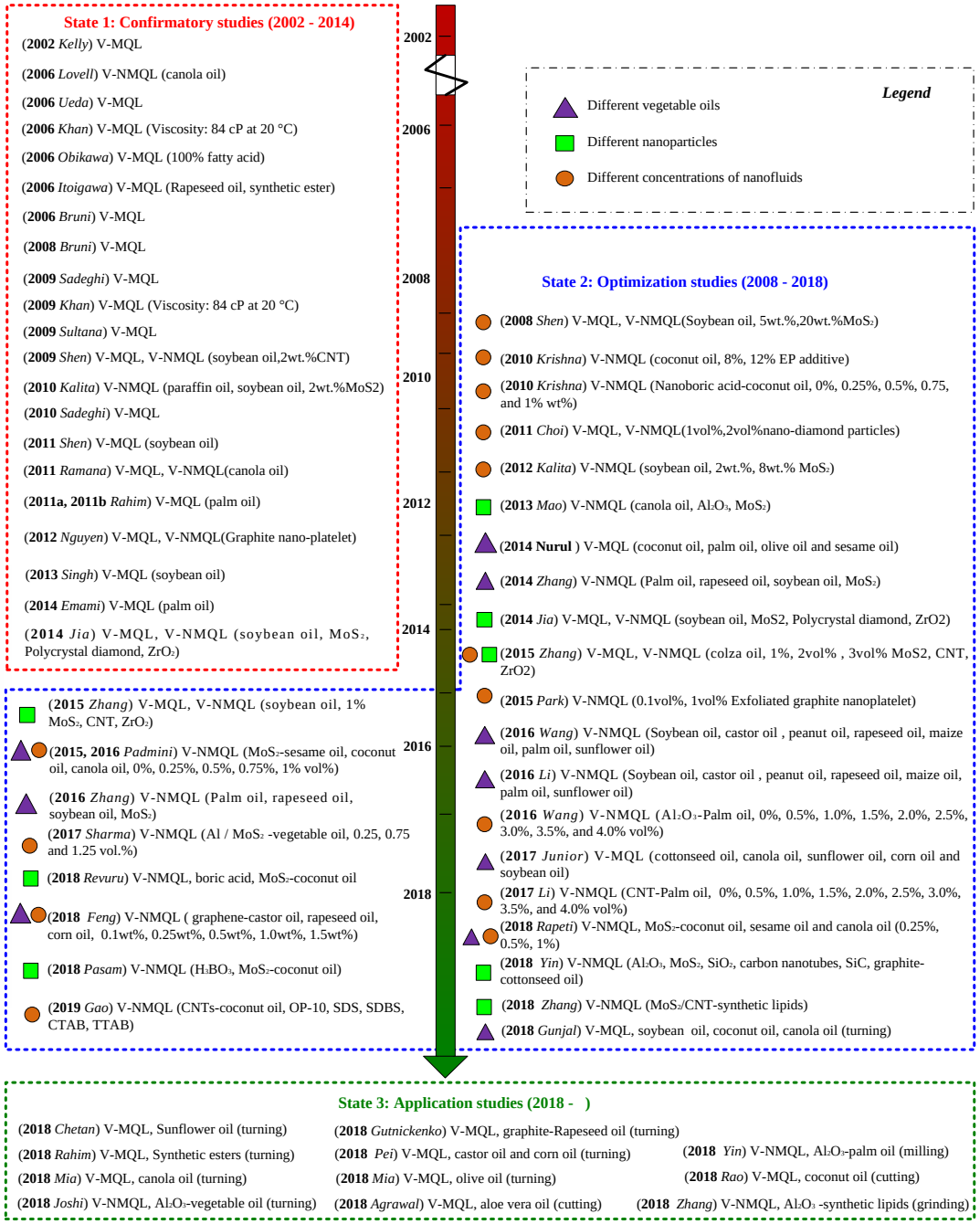
发 展 历 程

2002年~至今

验证性实验研究

工艺优化实验研究

多工艺耦合实验研究



技 术 瓶 颈

1）生物润滑剂**理化特性、碳链长度、脂肪酸饱和度**对冷却润滑影响机理？

2）纳米添加相**微观结构和微运动活跃度**对减摩抗磨和强化换热影响机理？

3）纳米添加相**分散性**对纳米增强生物润滑剂**理化特性**和加工性能影响机制？

纳米增强生物润滑剂微量润滑工程实践应用技术瓶颈

报 告 思 路

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂分析

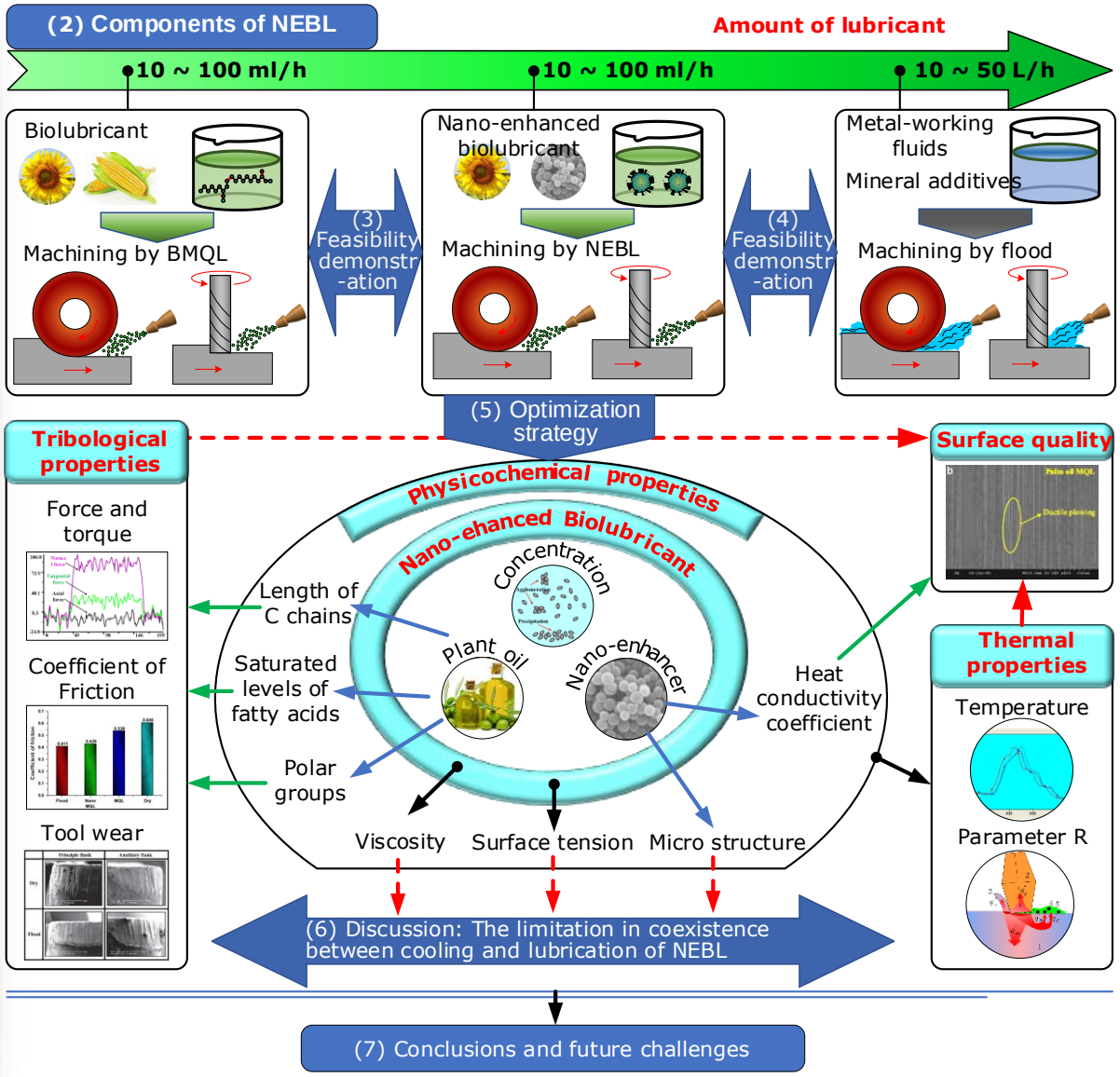
（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）结论及发展趋势



（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

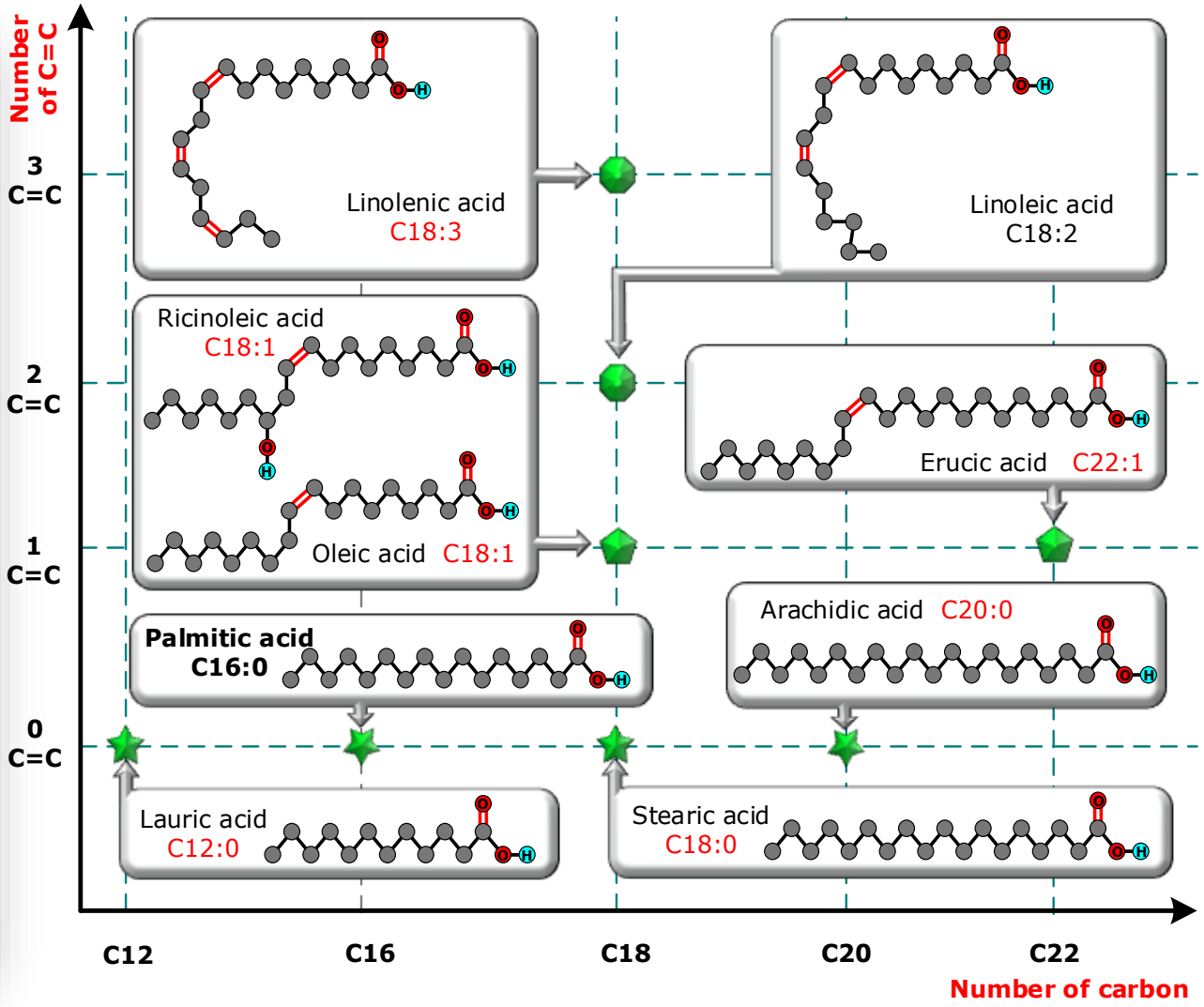
（2）纳米增强生物润滑剂

典型生物润滑剂

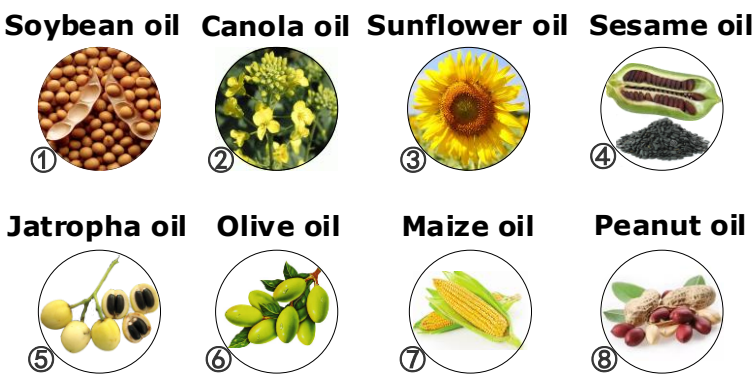
1）饱和脂肪酸生物润滑剂

2）不饱和脂肪酸生物润滑剂

3）特殊极性基团生物润滑剂

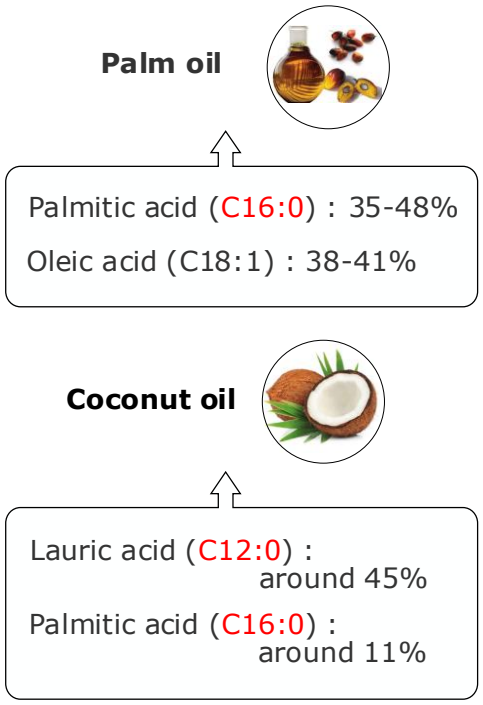


（2）纳米增强生物润滑剂

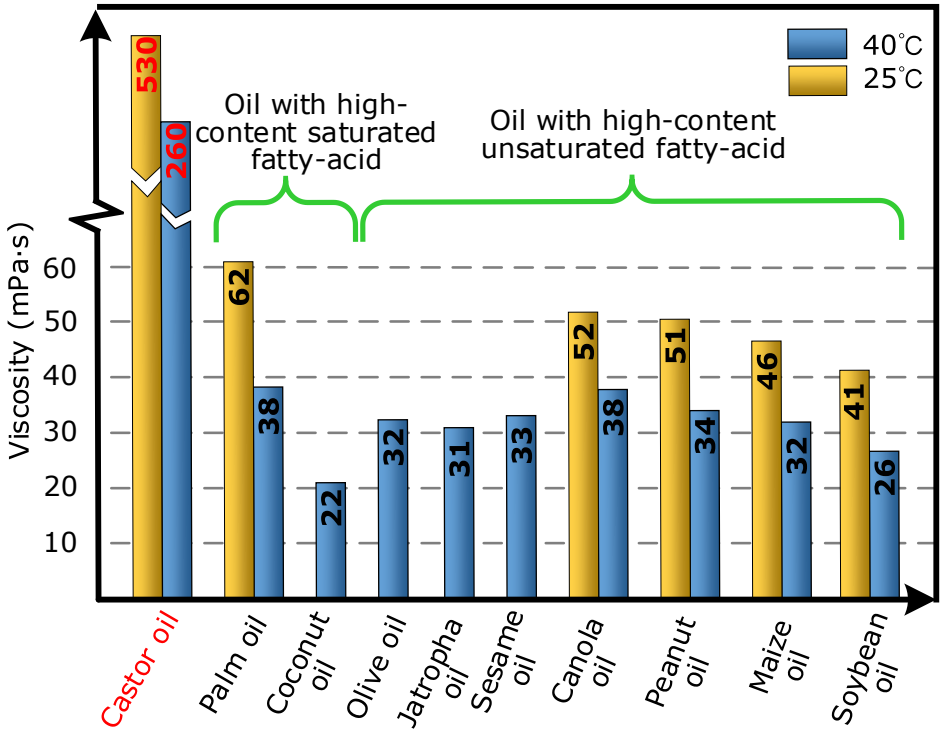


Compositions (%)				
Oil	①	②	③	④
Oleic acid	22-31	14-19	14-35	39
Linoleic acid	49-55	12-24	50-75	41
Erucic acid	--	45-55	--	--
Oil	⑤	⑥	⑦	⑧
Oleic acid	39	55-83	26-40	55-71
Linoleic acid	32	3.5-21	40-55	13-25
Erucic acid	--	--	--	--

(a)



(b)



(c)

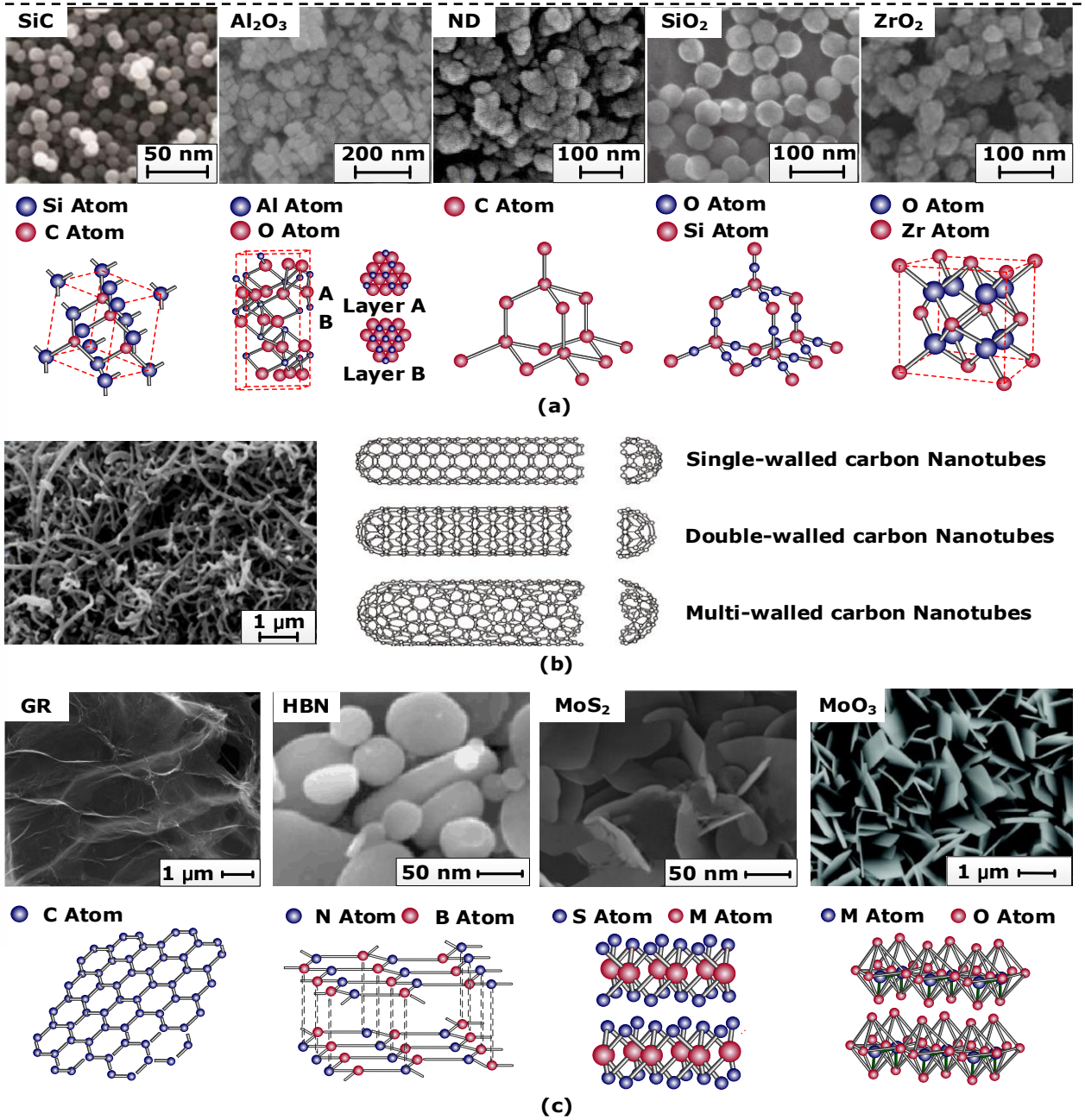
（2）纳米增强生物润滑剂

典型纳米添加相

1）球形：SiC、Al_2O_3、ND、SiO_2、ZrO_2

2）管状：碳纳米管

3）层状：石墨烯、HBN、MoS_2、MoO_3



（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

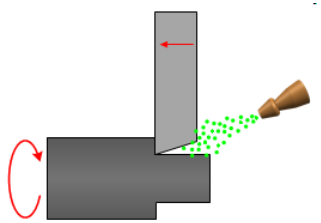
（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

（3）与微量润滑对比先进性分析

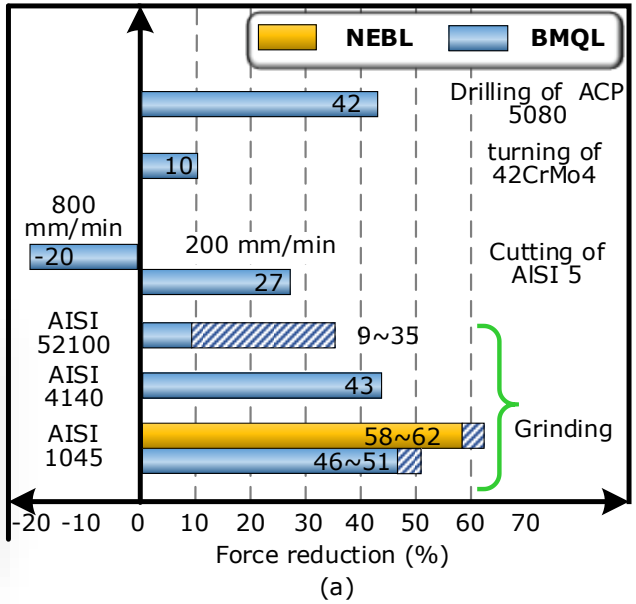


摩擦学特性评价参数

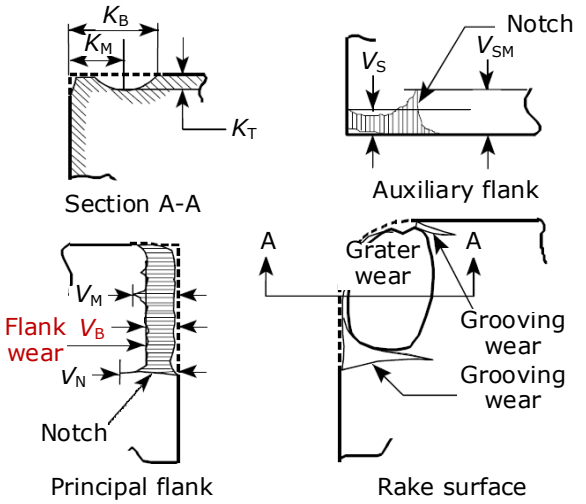
切削/磨削力

摩擦系数

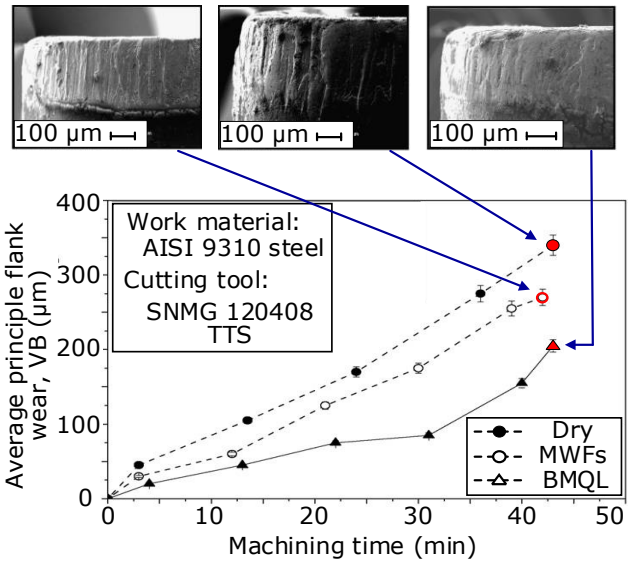
刀具磨损



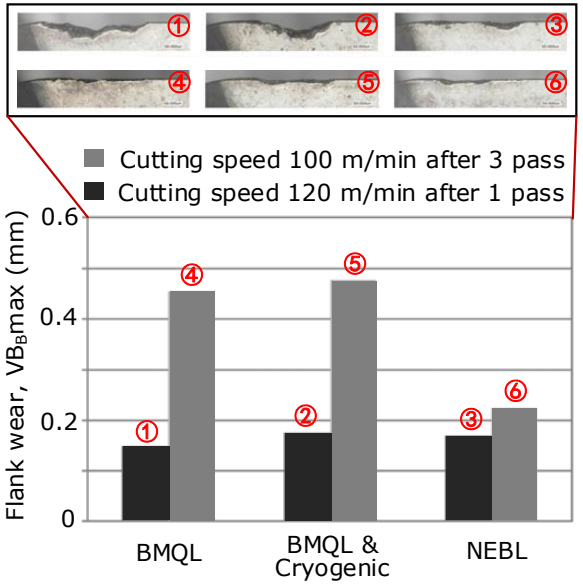
(a)



(b)



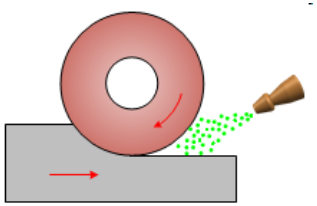
(c) **AISI 9310**

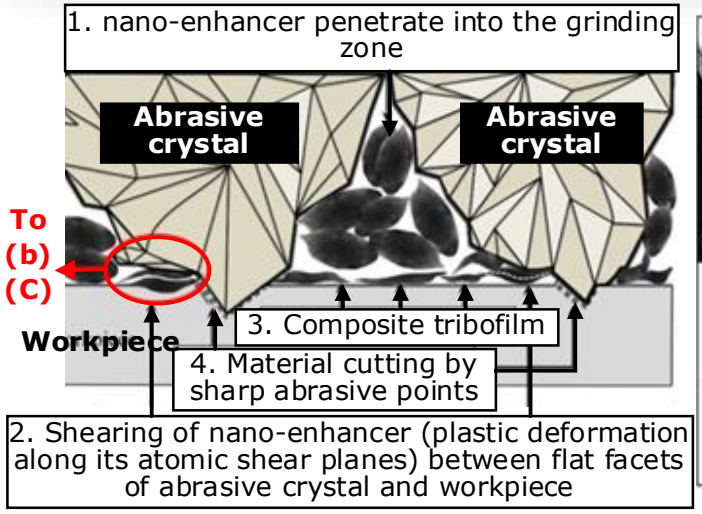


(d) **Ti-6Al-4V**

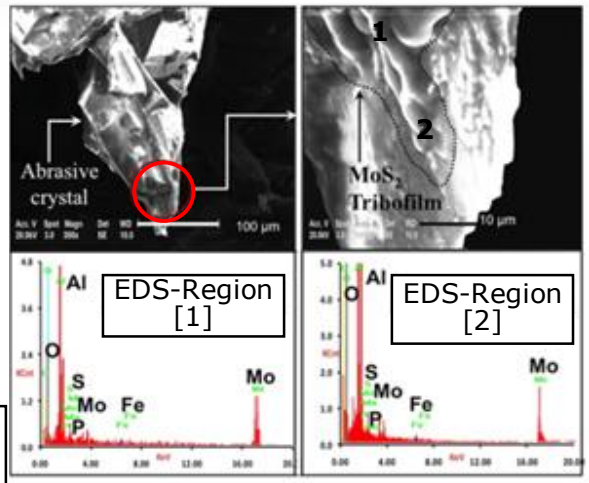
（3）与微量润滑对比先进性分析

纳米增强生物润滑剂减摩抗磨机理

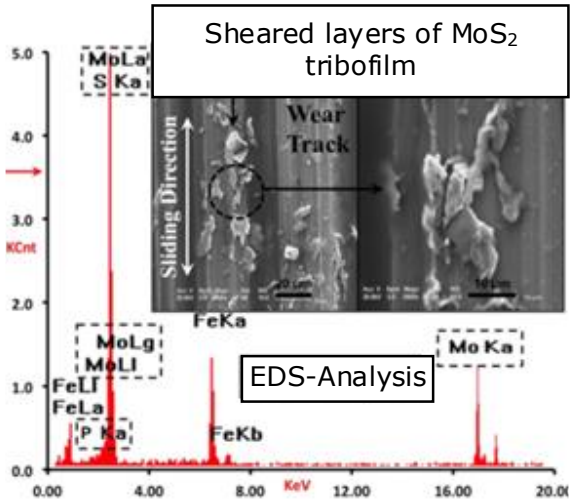




(a)



(b)



(c)

通过SEM和EDS分析发现，在磨粒表面和工件表面发现了由纳米添加相形成的润滑油膜。

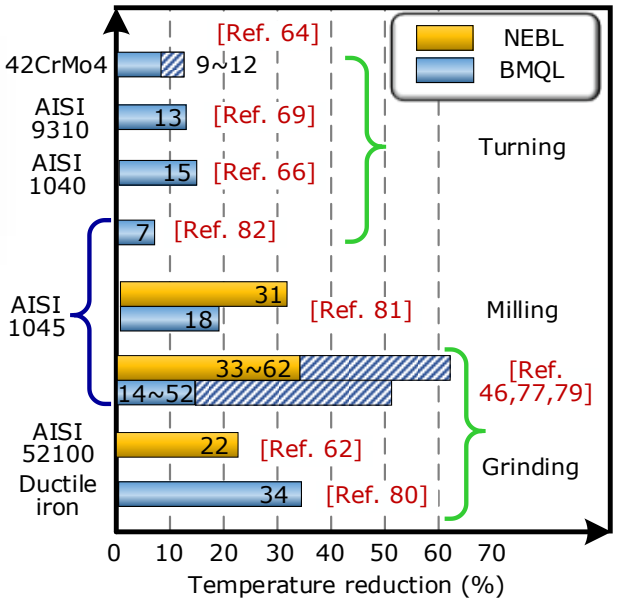
（3）与微量润滑对比先进性分析

强化换热特性评价参数

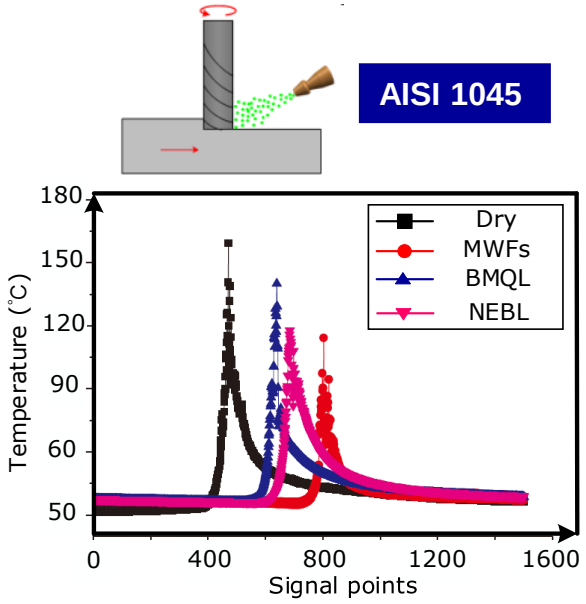
切削/磨削温度

传入工件能量比例

系数

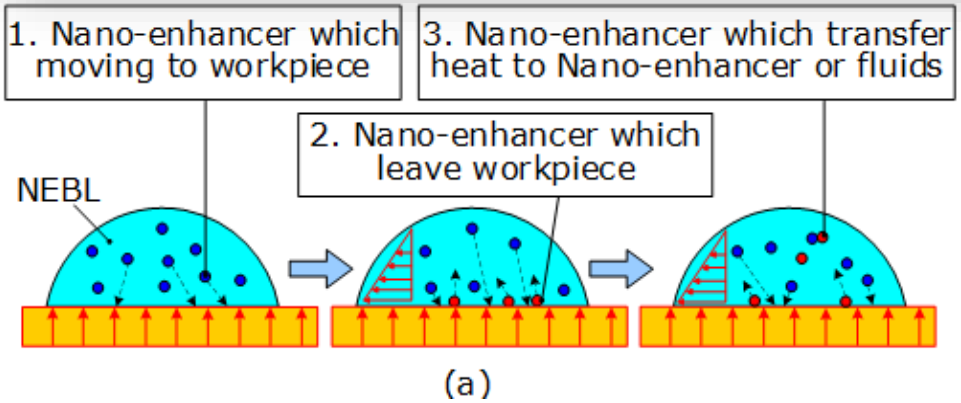


(a)

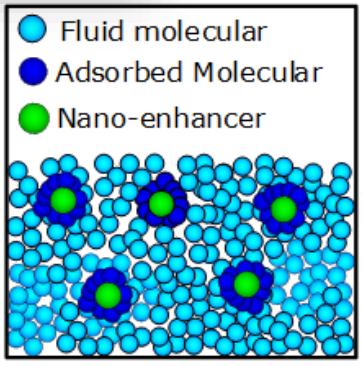


(b)

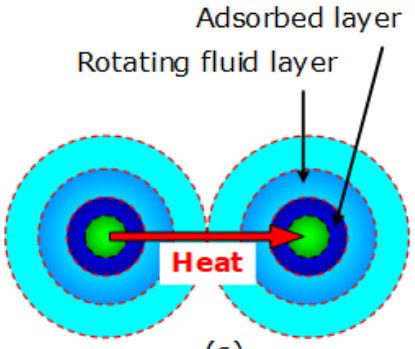
纳米增强生物润滑剂强化换热机理



(a)



(b)

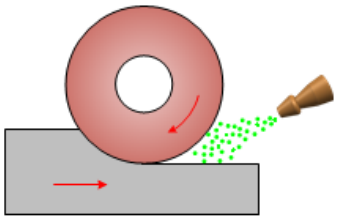


(c)

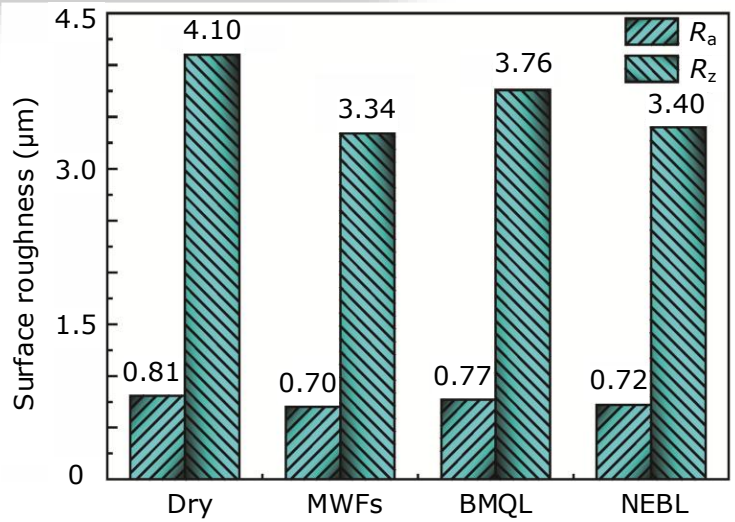
（3）与微量润滑对比先进性分析

工件表面质量评价参数

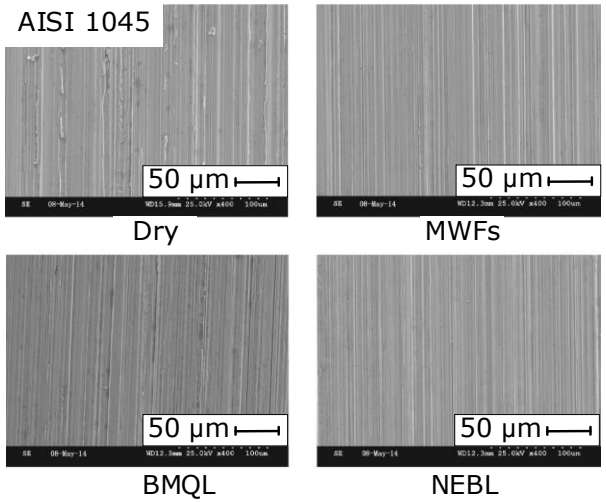
表面粗糙度，工件表面微观形貌，磨屑形貌



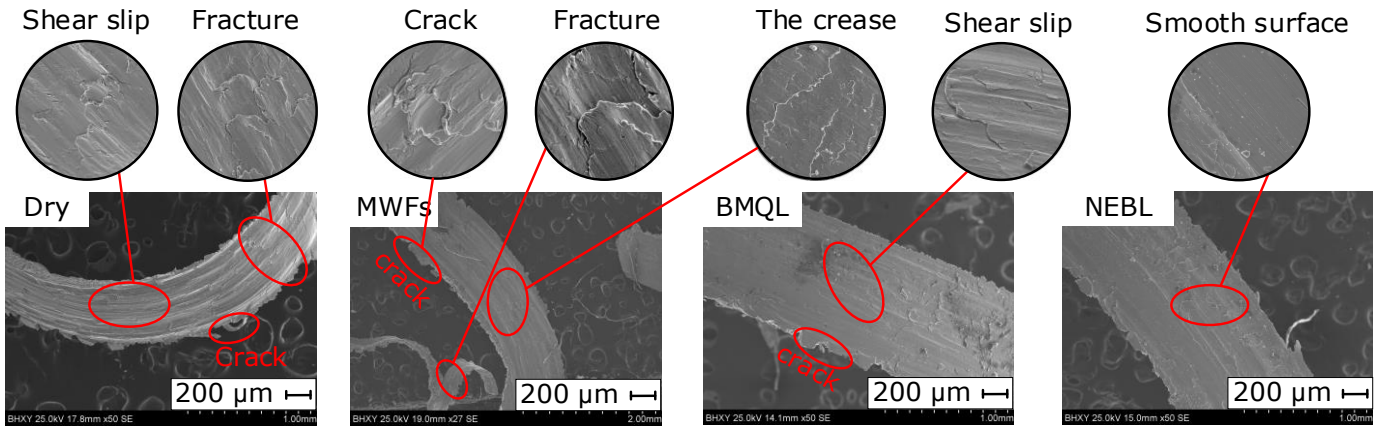
AISI 1045



(a)



(b)



(c)

（3）与微量润滑对比先进性分析

与传统微量润滑相比，在MQL中应用NEBL能够显著降低切削力、切削温度，提升刀具寿命和工件表面粗糙度。以上结论可以总结为两个机理：

1. **纳米增强生物润滑剂减摩抗磨机理：**纳米增强剂的引入彻底改变了基于一般润滑机理的刀具/工件界面的摩擦状态，由滑动接触转变为滚动摩擦；
2. **纳米增强生物润滑剂强化换热机理：**纳米添加相的布朗运动和传热通道极大地提升了微量润滑剂的传热性能。

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

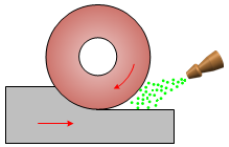
（5）工艺优化策略分析

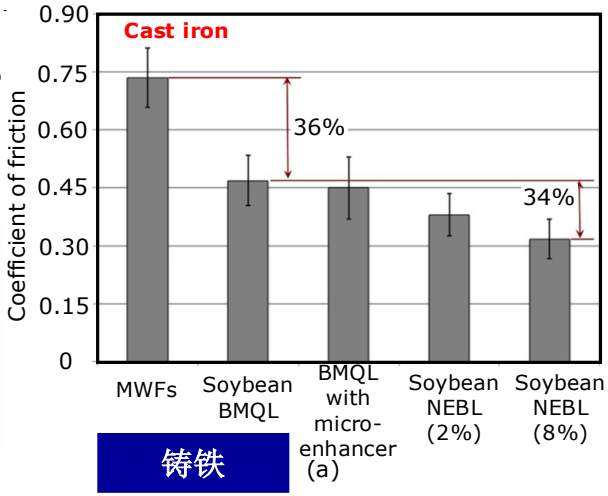
（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

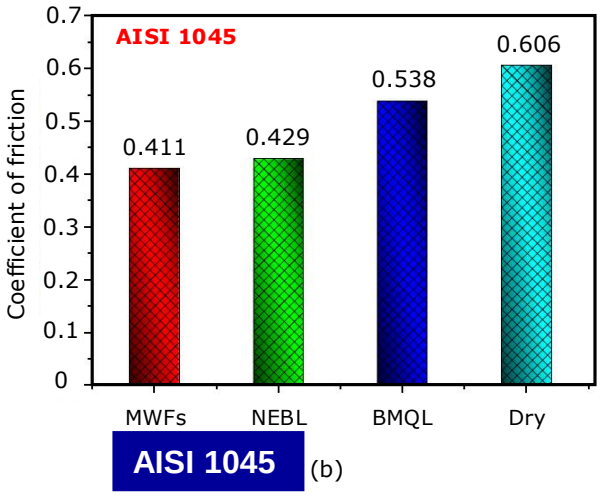
（4）与传统切削液对比先进性分析

摩擦学特性评价参数





铸铁 (a)

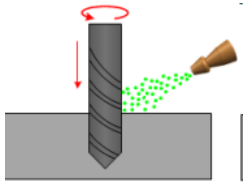


AISI 1045 (b)

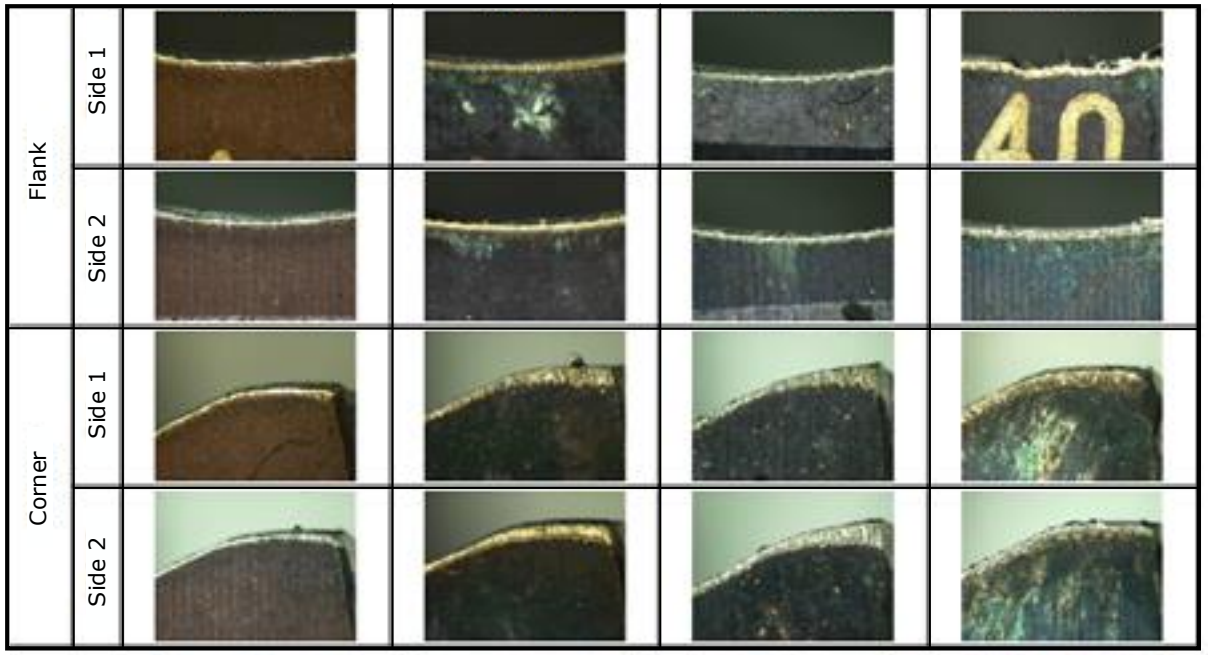
切削/磨削力

摩擦系数

刀具磨损



Ti-6Al-4V

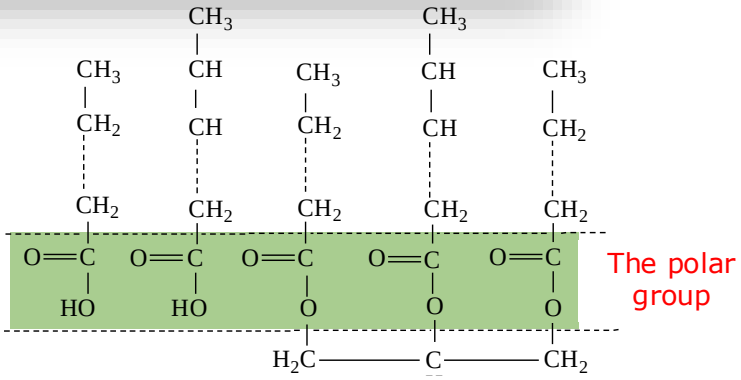


(c)

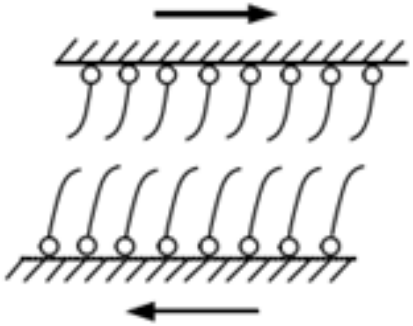
（4）与传统切削液对比先进性分析

纳米增强生物润滑剂成膜机理

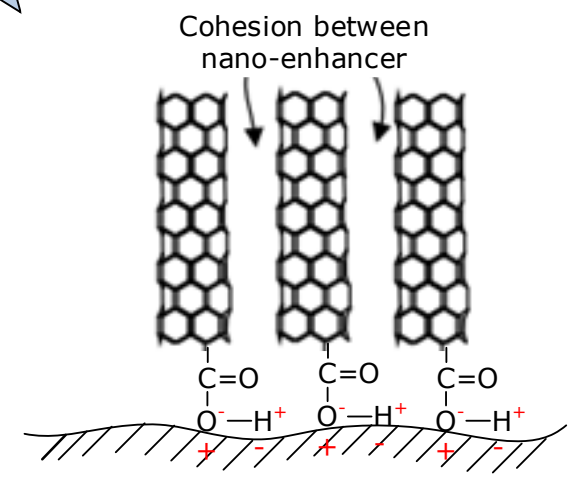
与传统切削液相比，纳米增强生物润滑剂独特的极性基团（羟基、羧基）和高粘度特性有利于工件表面油膜形成。



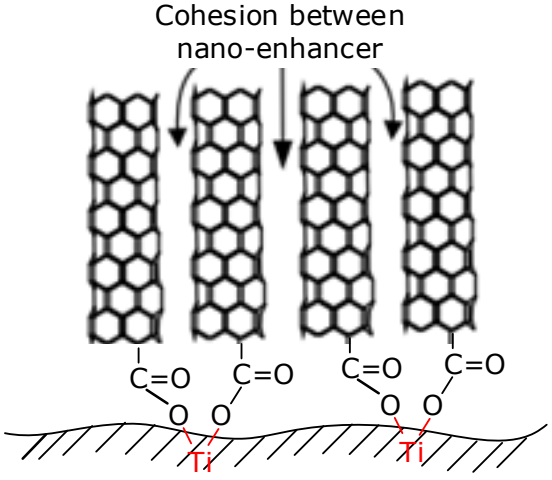
(a)



(b)



(c)

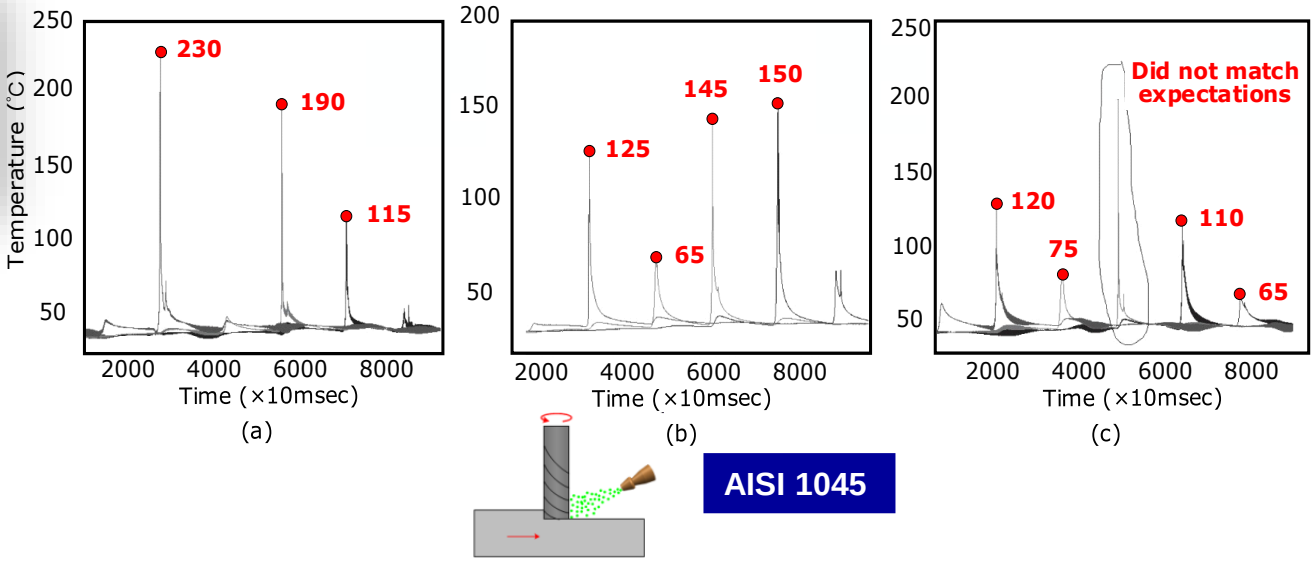


(d)

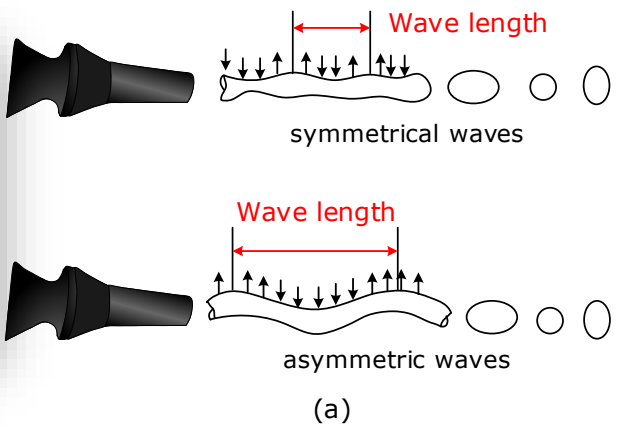
（4）与传统切削液对比先进性分析

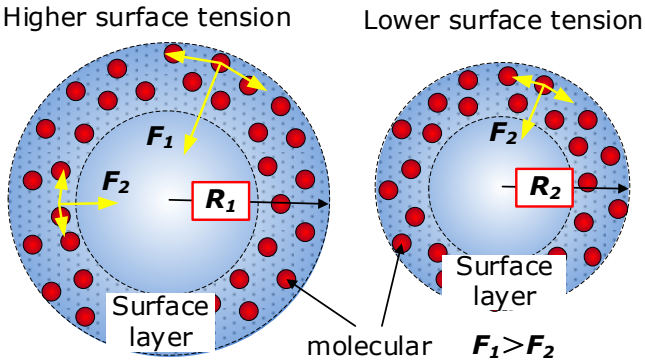
强化换热特性评价参数

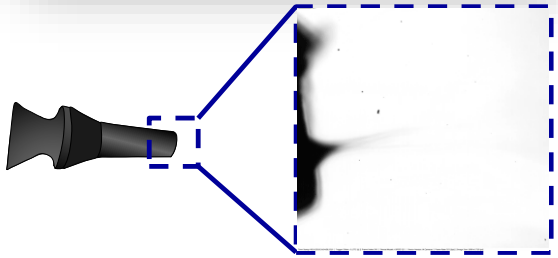
切削/磨削温度
传入工件能量比例
系数

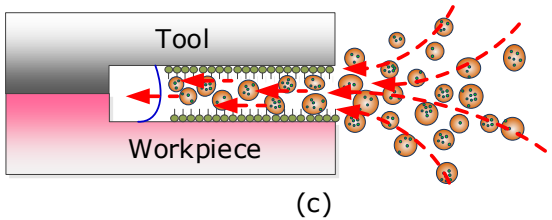


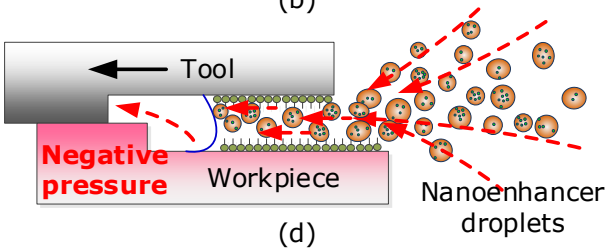
纳米增强生物润滑剂雾化与浸润机理





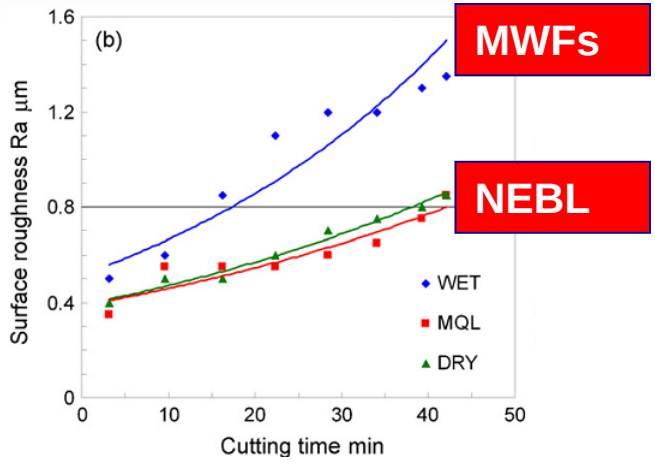


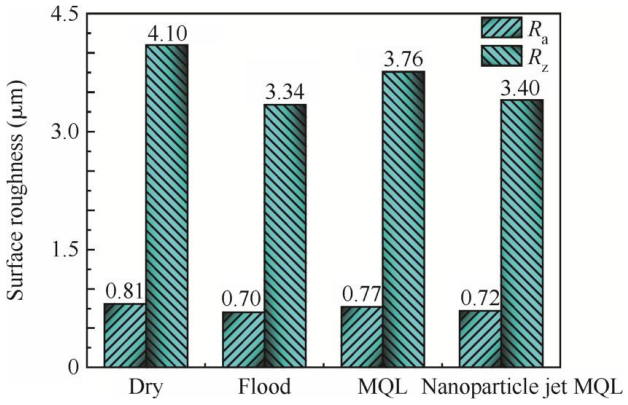




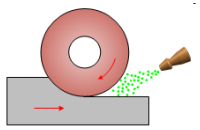
（4）与传统切削液对比先进性分析

工件表面质量评价参数

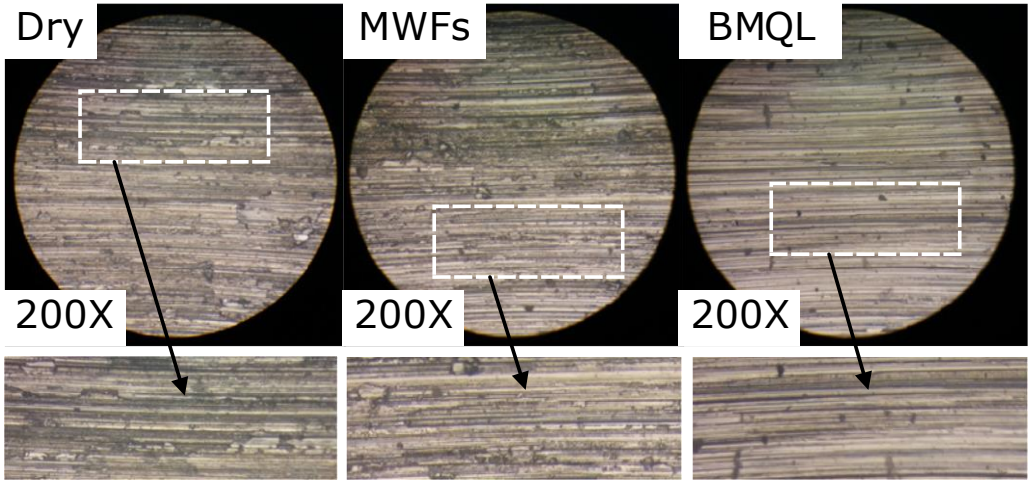




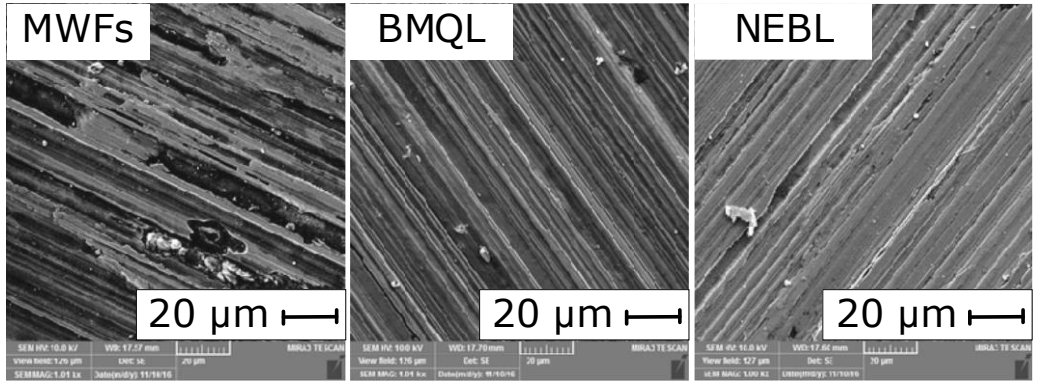
表面粗糙度，工件表面微观形貌



AISI 1045



(a)



(b)

（4）与传统切削液对比先进性分析

与传统矿物性切削液相比，NEBL采用可降解/可再生生态资源作为基础油，满足制造业可持续发展需求；采用5%用量即能够取得和传统切削液相同的加工效果。其优异特性可总结为两个机理：

1. **纳米增强生物润滑剂成膜机理：**纳米增强生物润滑剂独特的极性基团（羟基、羧基）和高粘度特性有利于工件表面油膜形成；

2. **纳米增强生物润滑剂雾化与浸润机理：**纳米增强生物润滑剂的地表面张力和雾化形式有利于切削区微纳通道的快速浸润。

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

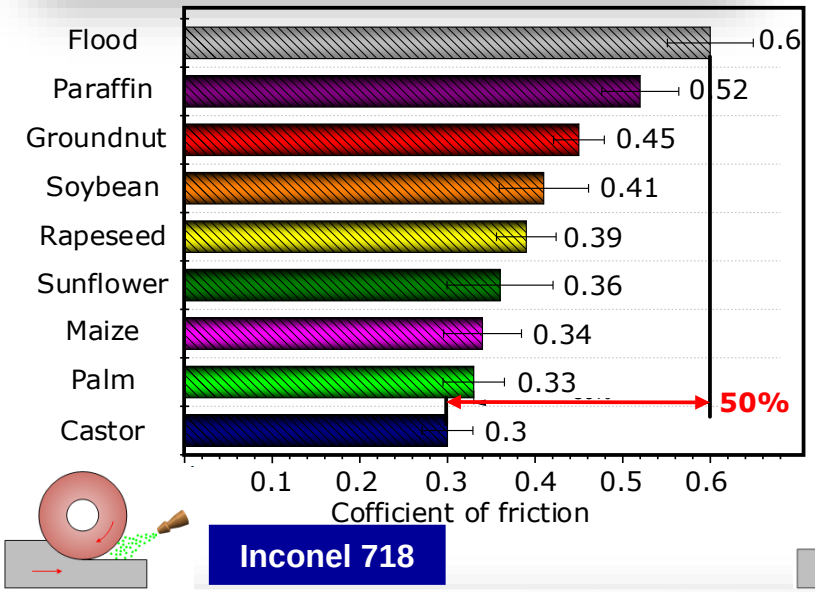
（6）矛盾与解决方法

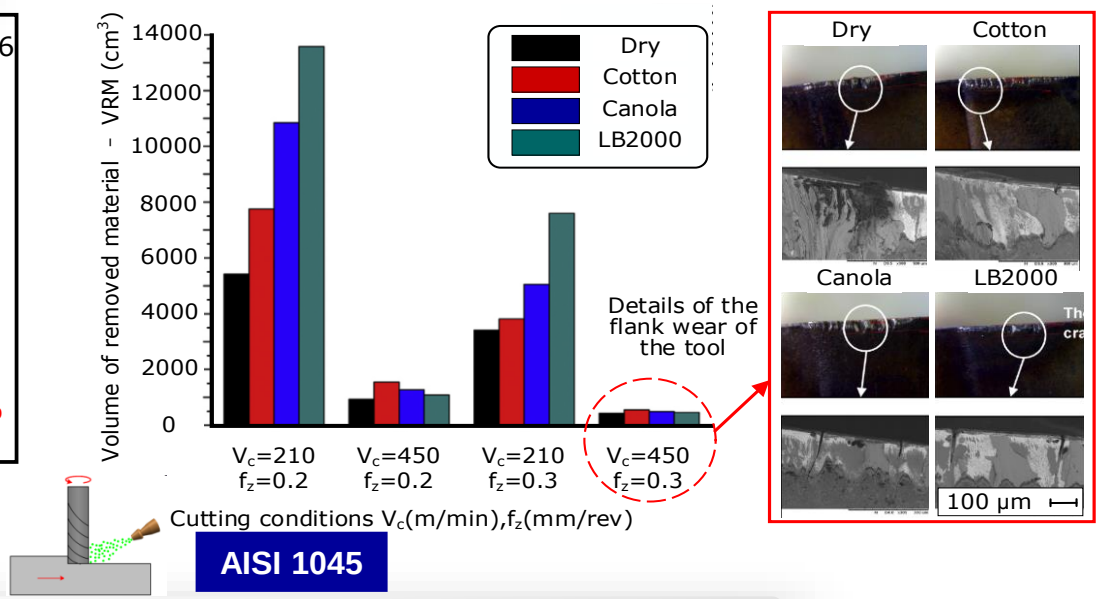
（7）发展趋势

（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

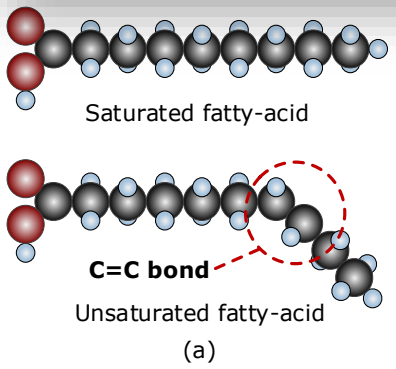
摩擦学特性评价参数

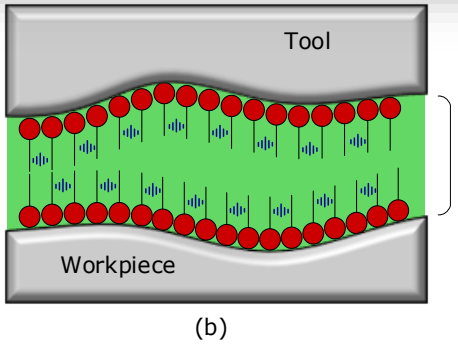
切削/磨削力，摩擦系数，刀具磨损

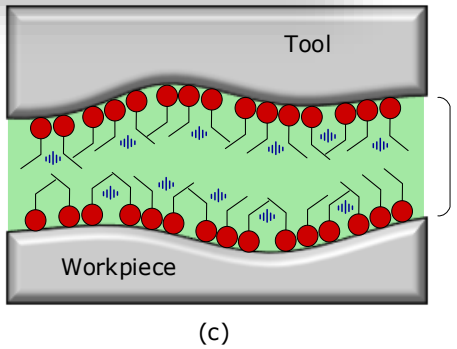




纳米增强生物润滑剂分子结构对润滑性能影响机制

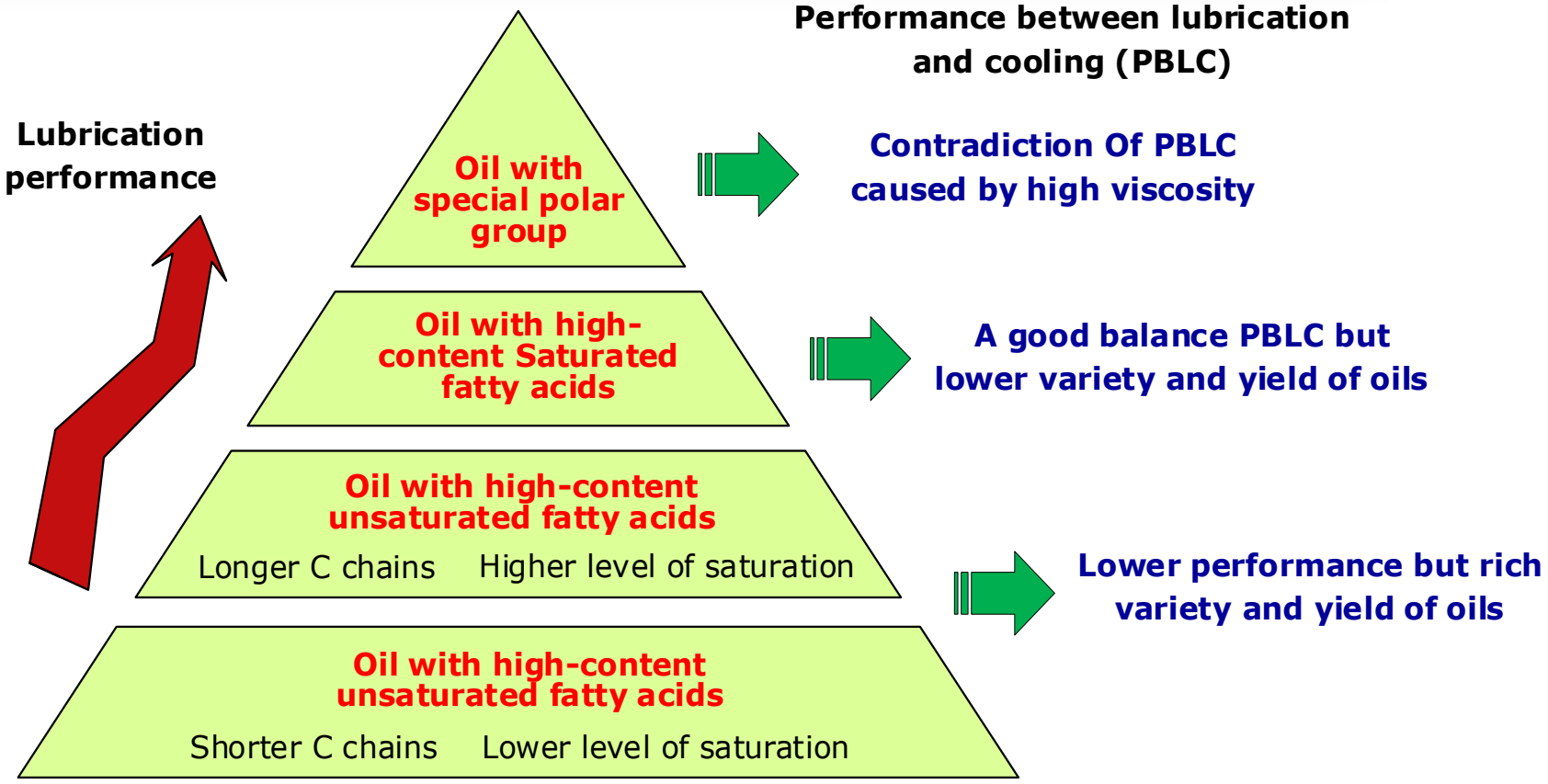






（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

纳米增强生物润滑剂分子结构对润滑性能影响机制

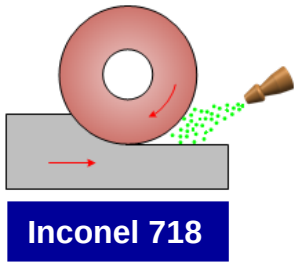


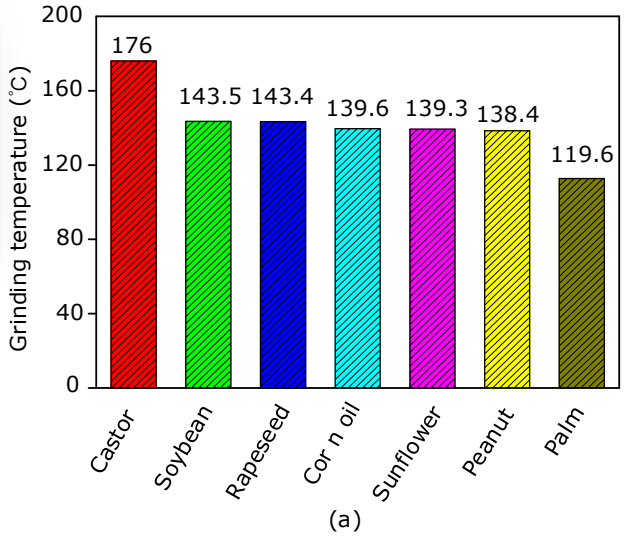
脂肪酸饱和度、碳链长度、极性基团对润滑性能影响的综合分析

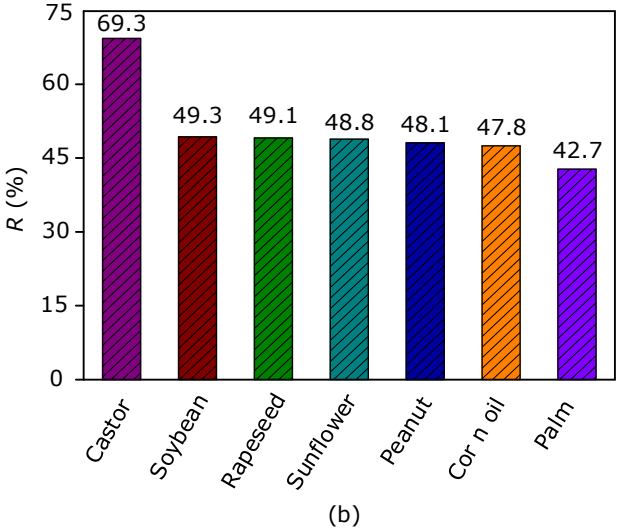
（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

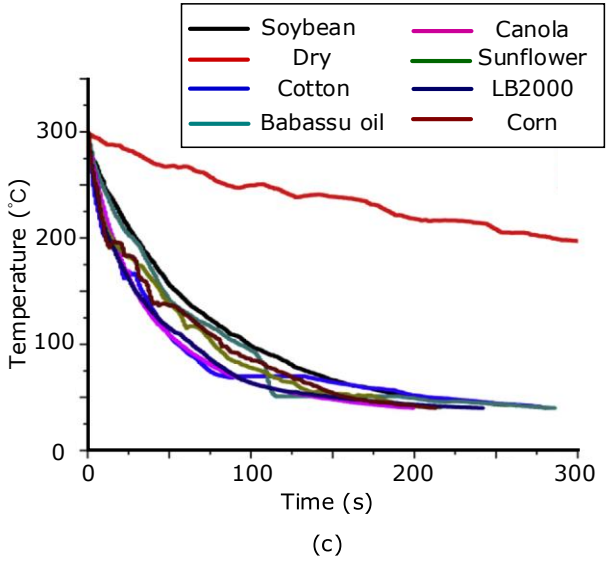
强化换热特性评价参数

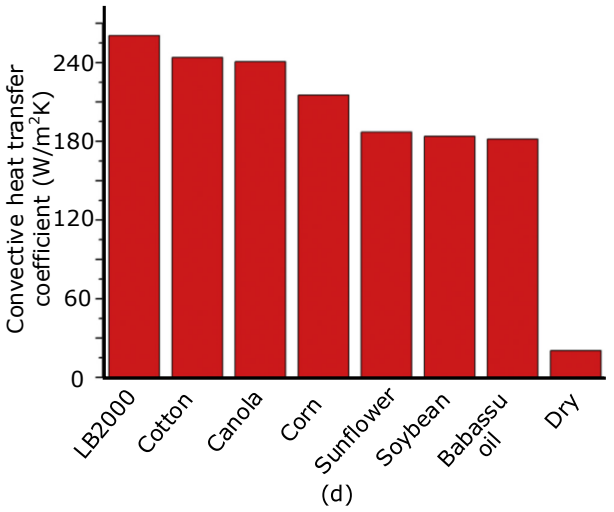
切削/磨削温度
传入工件能量比例
系数





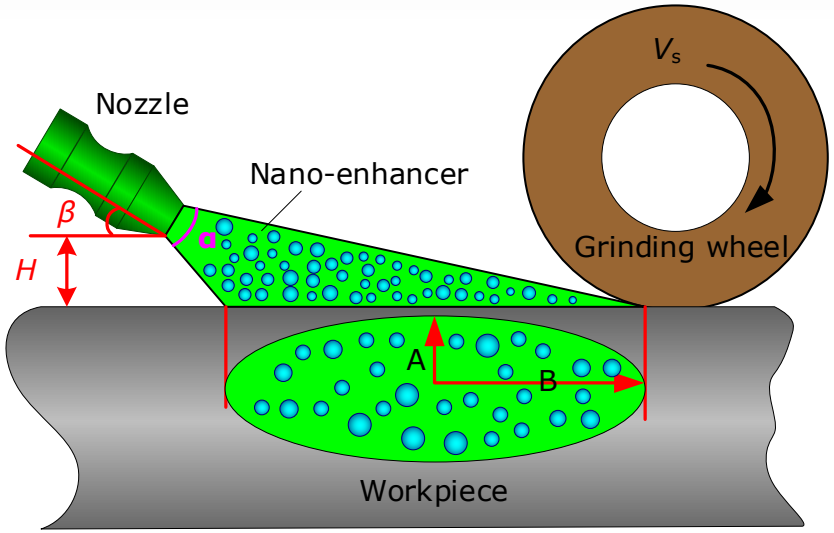




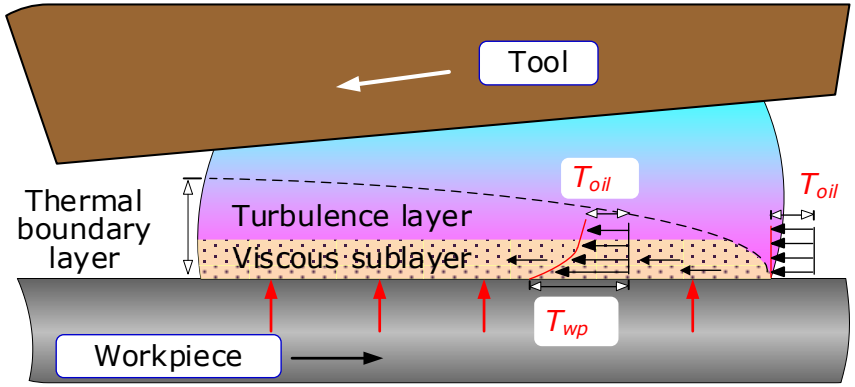


（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

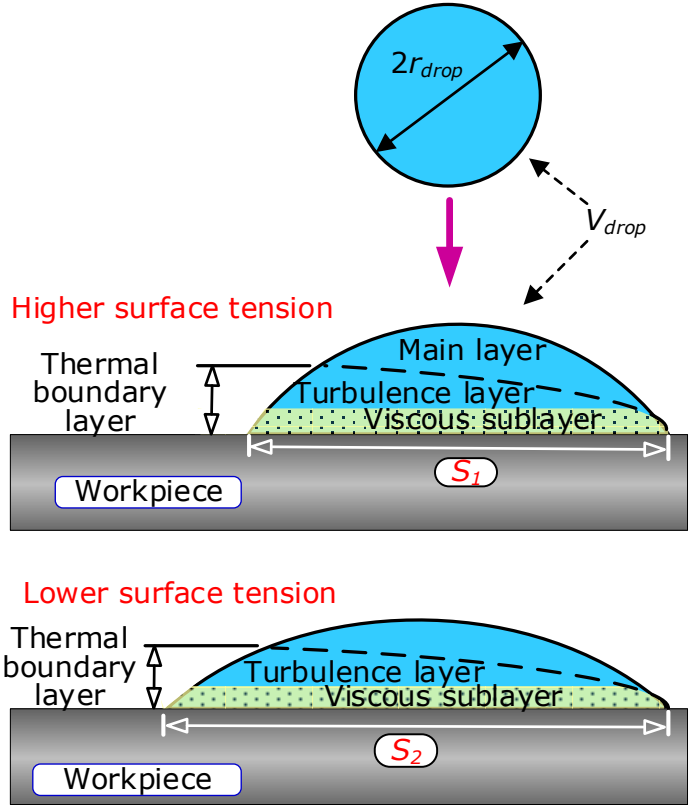
粘度和表面张力对换热性能影响机制



(a)



(b)



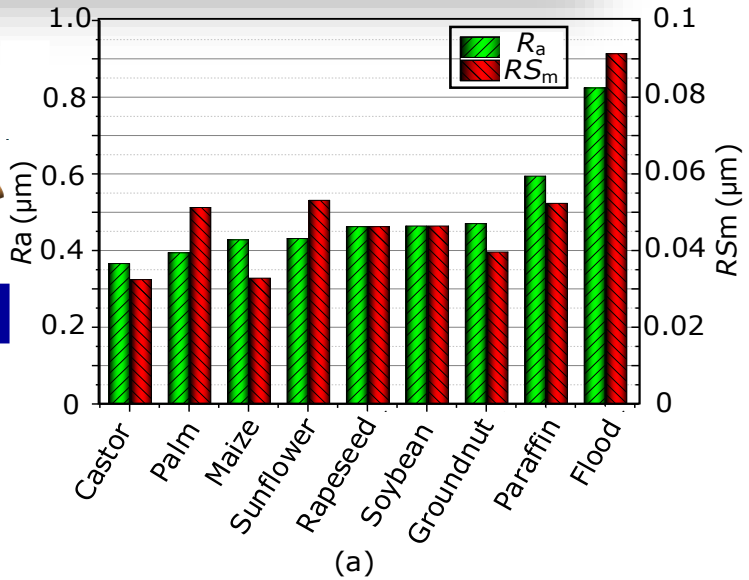
(c)

（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

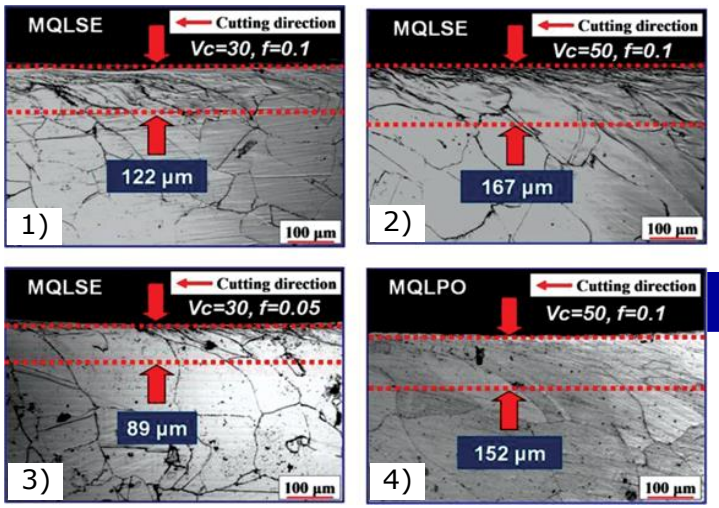
工件表面质量评价参数

表面粗糙度，工件表面微观形貌

Inconel 718



(a)



(b)

Inconel 718

AISI 316

	1 st cutting	9 th cutting		1 st cutting	9 th cutting
Coconut oil	Width: 161 nm Length: 11.7 μm	Width: 365 nm Length: 35.8 μm	Olive oil	Width: 30.8 μm Length: 48.4 μm	Width: 2.48 μm Length: 42.4 μm
Palm oil	Width: 731 nm Length: 10 μm	Width: 1.02 μm Length: 22 μm	Sesame oil	Width: 20.2 μm Length: 30.6 μm	Width: 9.76 μm Length: 54 μm

(c)

（5）工艺优化策略分析—生物润滑剂

不同的生物润滑剂具有不同的理化特性，也展现了不同的加工性能，生物润滑剂的优化策略可依据两个机制：

1. **纳米增强生物润滑剂分子结构对润滑性能影响机制：**脂肪酸饱和度、碳链长度、极性基团等综合影响润滑性能；
2. **粘度和表面张力对换热性能影响机制：**粘度和表面张力是影响润滑剂铺展和纳米添加相布朗运动活跃度的关键参数，从而决定换热性能。

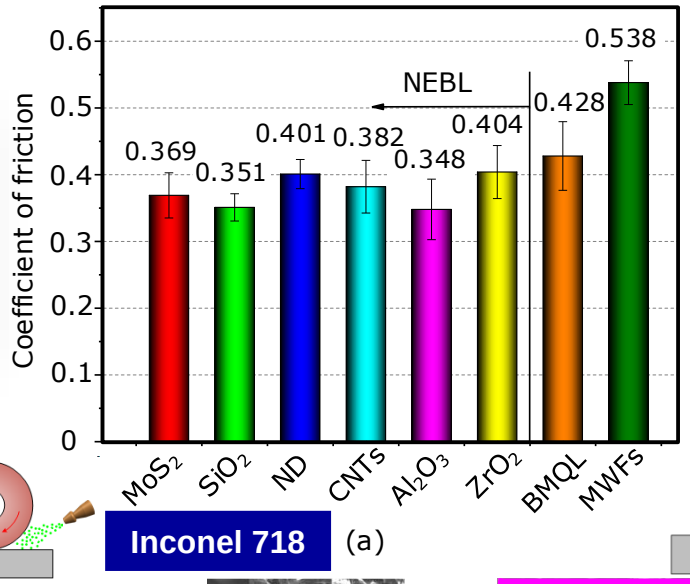
（5）工艺优化策略分析—纳米添加相

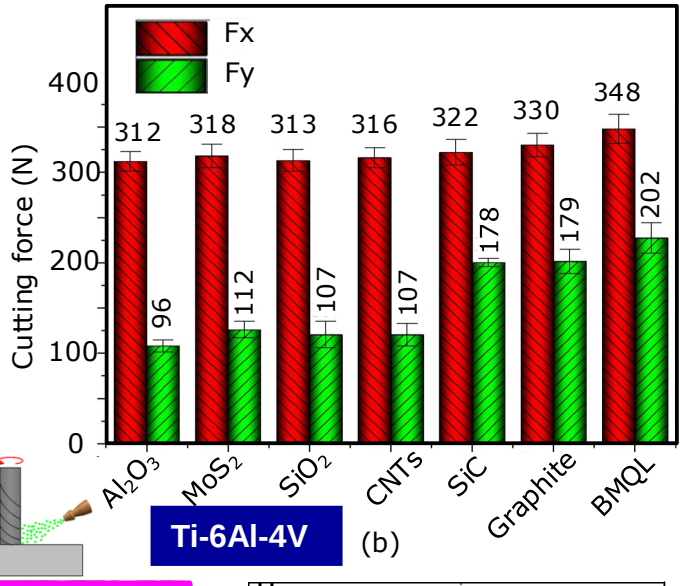
摩擦学特性评价参数

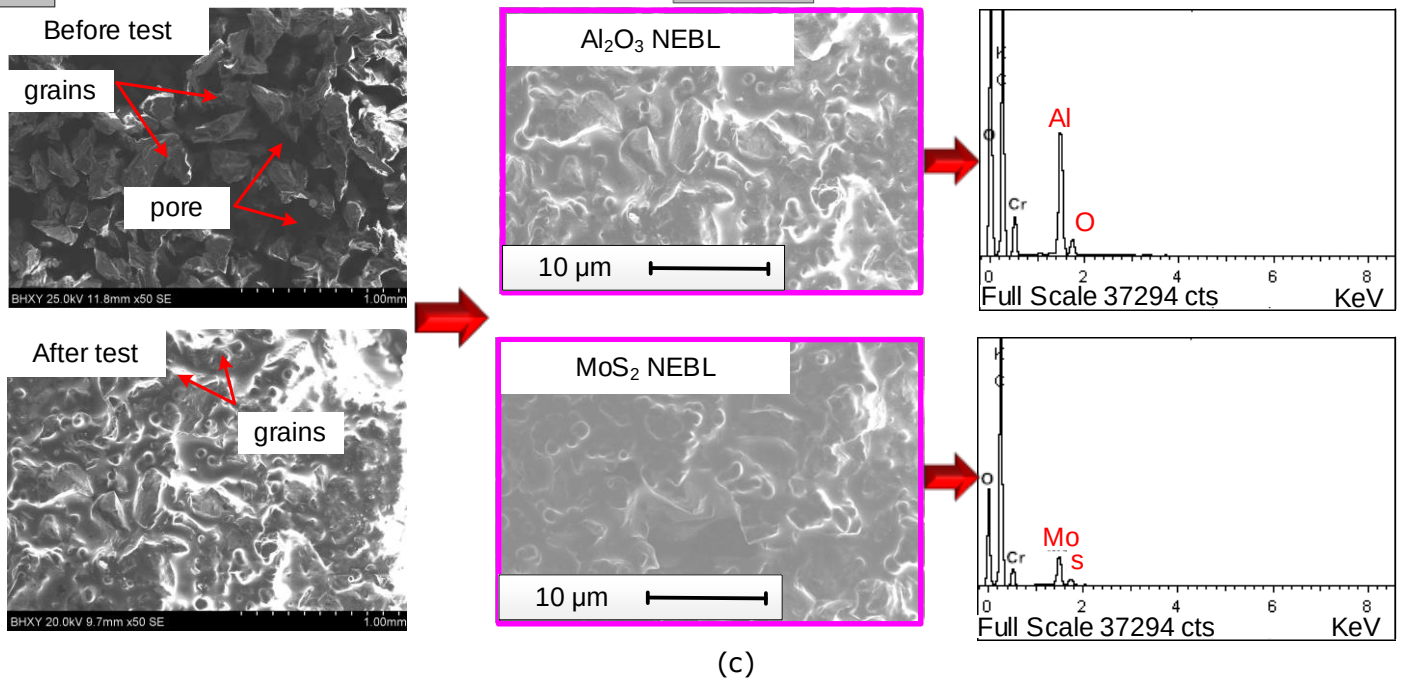
切削/磨削力

摩擦系数

刀具磨损

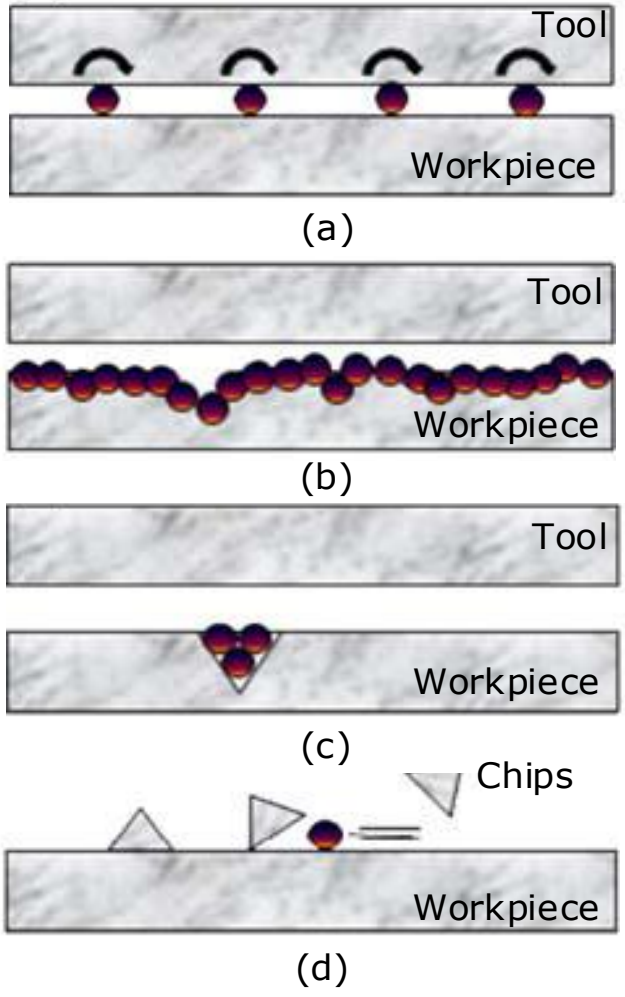


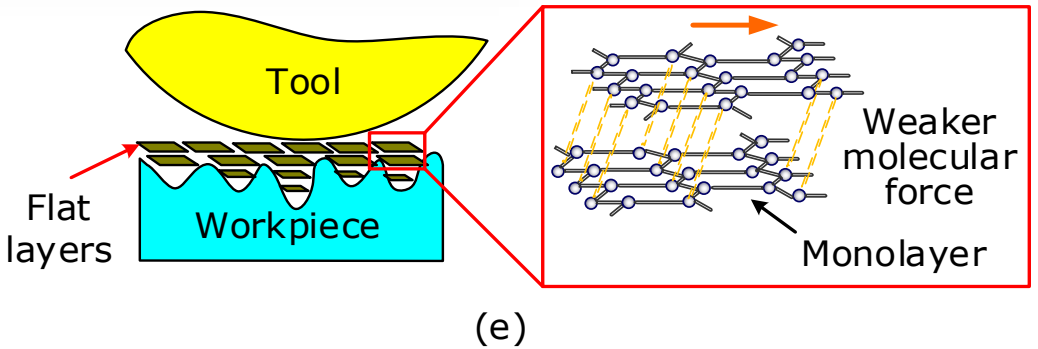


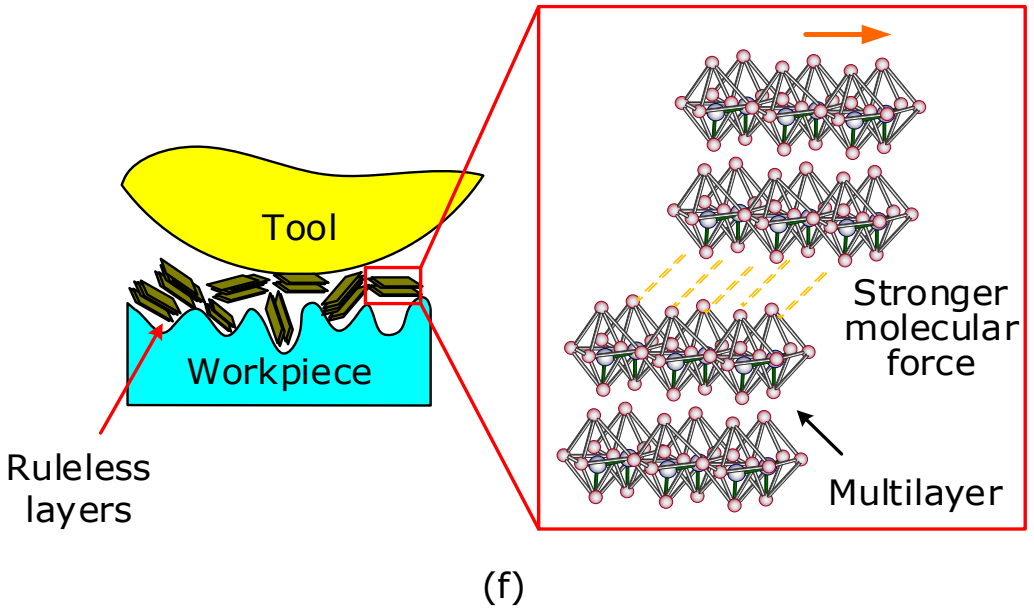


（5）工艺优化策略分析—纳米添加相

纳米添加相微观形态对减摩抗磨影响机制



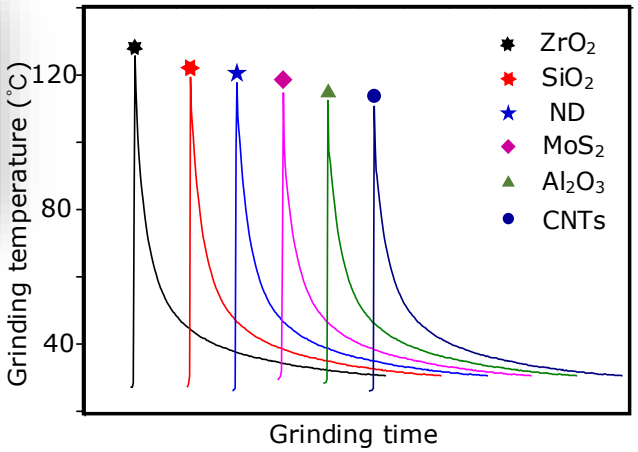




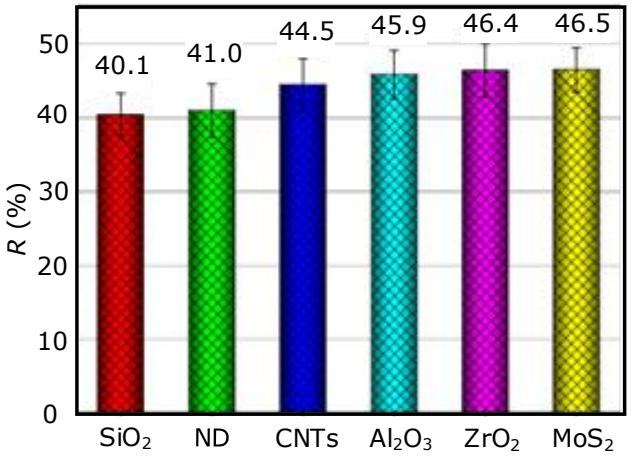
（5）工艺优化策略分析—纳米添加相

强化换热特性评价参数

切削/磨削温度传入工件能量比例系数

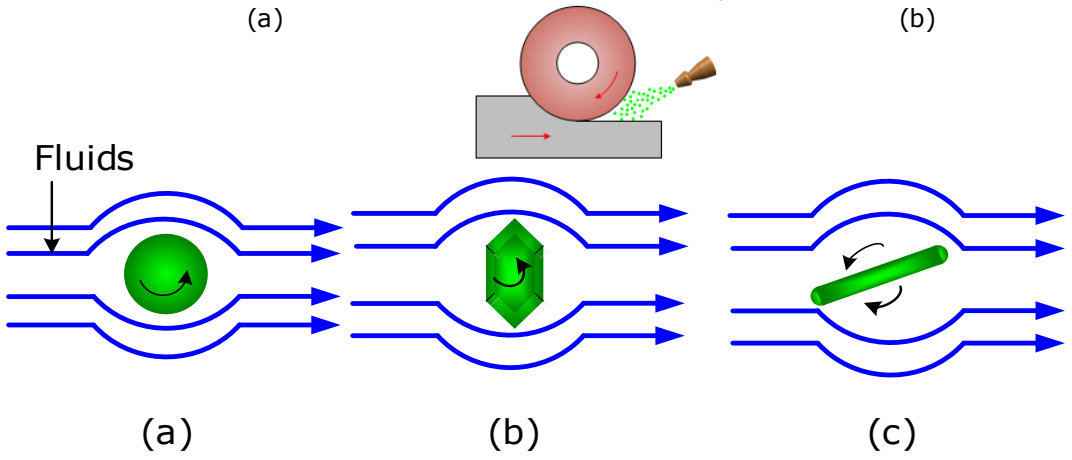


(a)



(b)

纳米添加相微观形态对换热性能影响机制



(a) (b) (c)

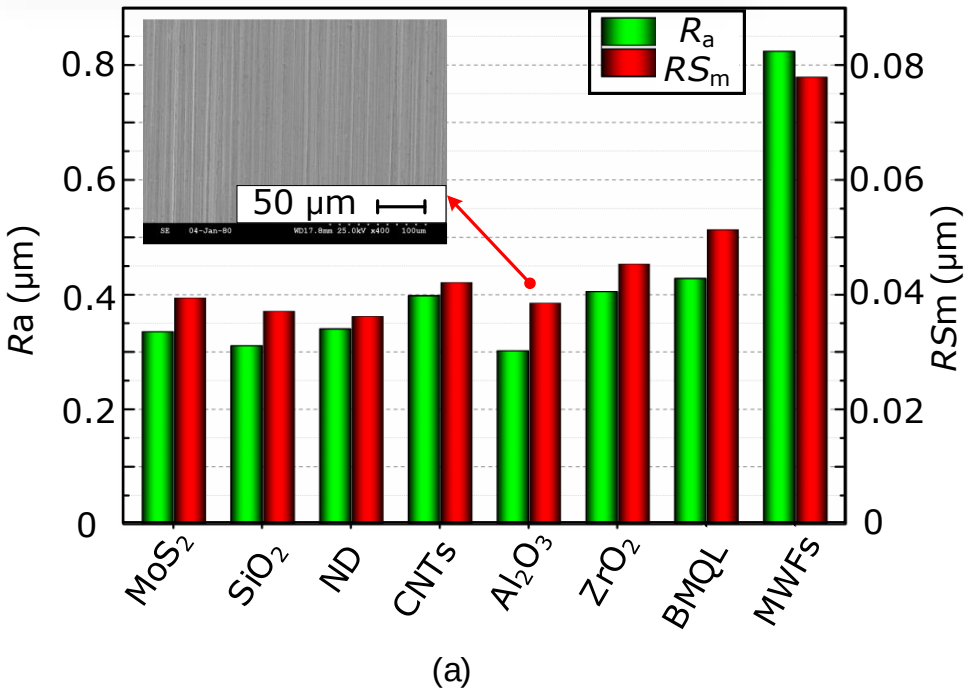
Heat conductivity coefficient of different nano-enhancers

Nano-enhancers	ZrO_2	SiO_2	HBN	Al_2O_3	MoS_2	ND	CNT	GR
Heat conductivity coefficient /W(m·K)$^{-1}$	< 2	7.6	33	40	138	2300	3000	5300

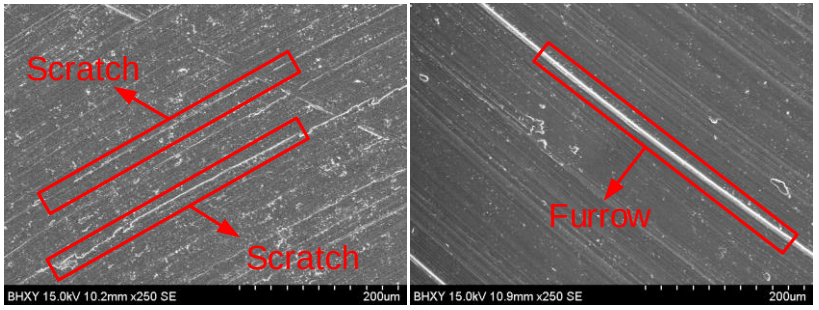
（5）工艺优化策略分析—纳米添加相

工件表面质量评价参数

表面粗糙度，工件表面微观形貌

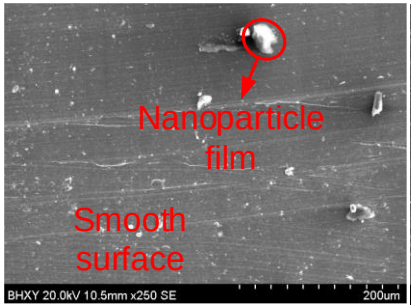


(a)

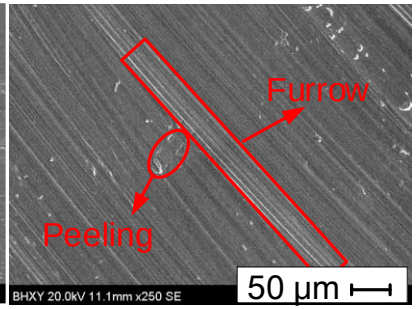


(b)

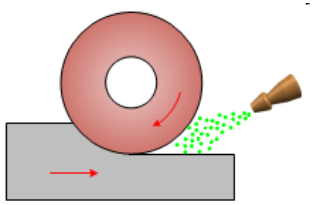
(c)



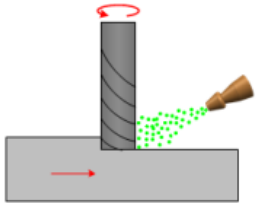
(d)



(e)



Inconel 718



Ti-6Al-4V

（5）工艺优化策略分析—纳米添加相

不同的纳米添加相具有不同的微观结构和导热系数，制备纳米增强生物润滑剂后也展现了不同的加工性能，纳米添加相的优化策略可依据两个机制：

1. **纳米添加相微观形态对减摩抗磨影响机制：**球形、管状和层状的纳米添加相在刀具/工件界面展现了的摩擦学特性，对于不同工况具有不同的最优选择；

2. **纳米添加相微观形态对换热性能影响机制：**纳米增强生物润滑剂的换热性能取决于静态换热系数（纳米添加相导热系数主导）和动态换热能力（纳米添加相形态及布朗运动活跃度主导）。

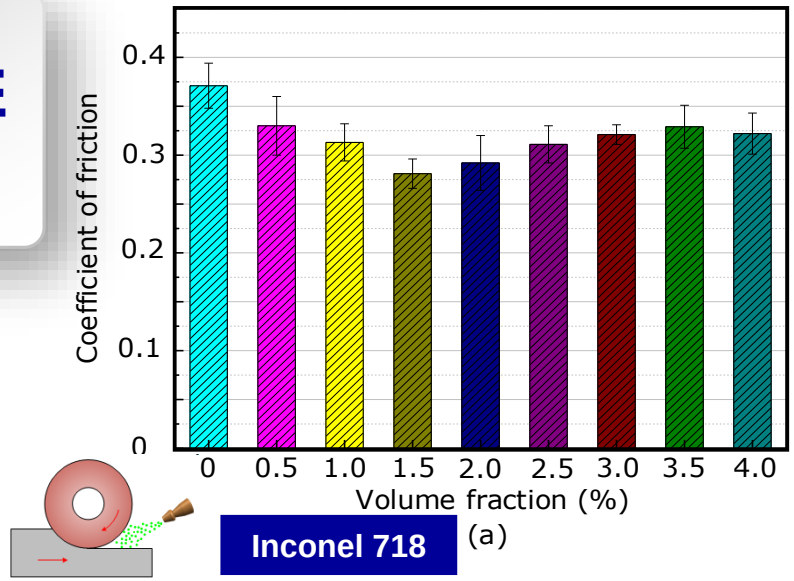
（5）工艺优化策略分析—纳米添加相分散性

摩擦学特性评价参数

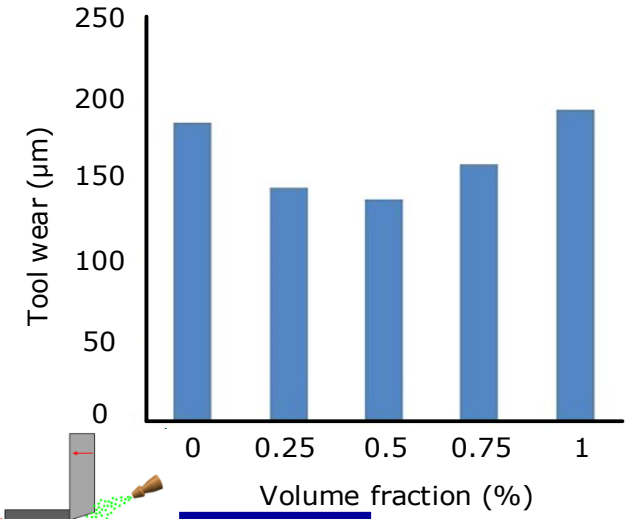
切削/磨削力

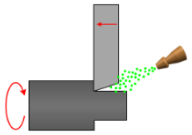
摩擦系数

刀具磨损

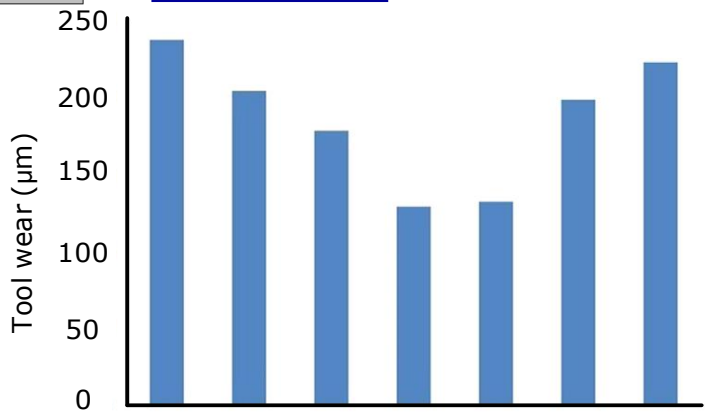


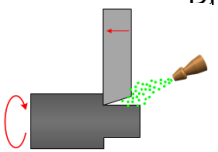
Inconel 718 (a)



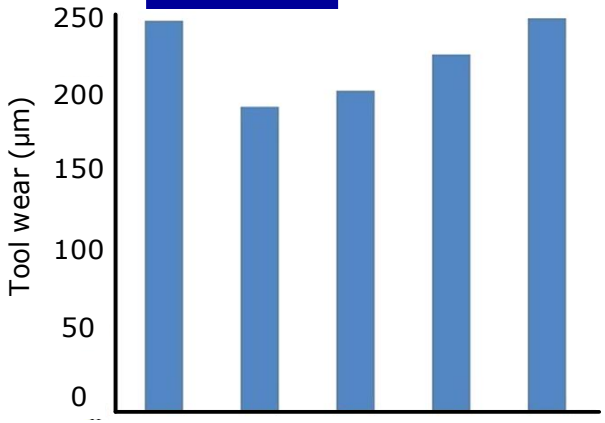


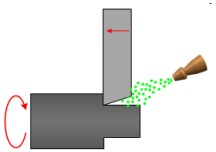
AISI 1040 (b)





AISI 1040 (c)

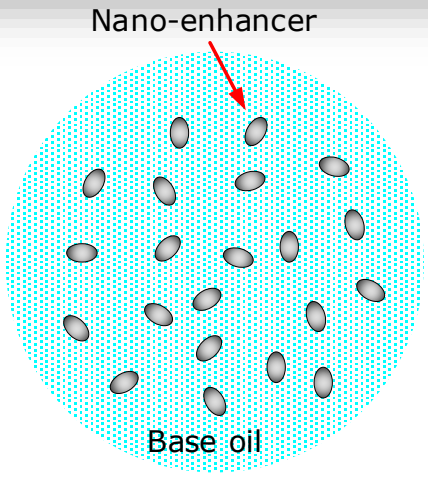




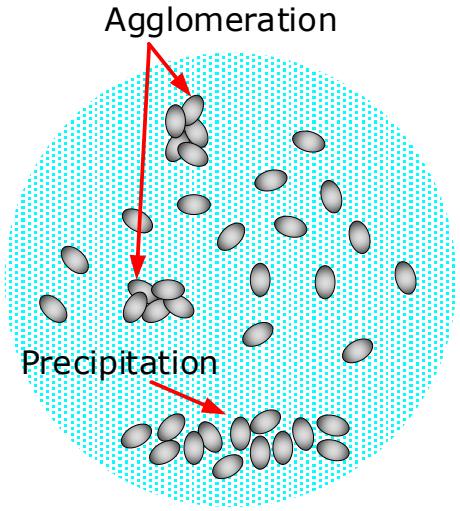
AISI 1040 (d)

（5）工艺优化策略分析—纳米添加相分散性

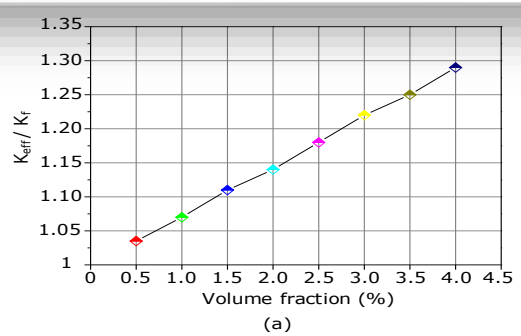
纳米添加相分散性对润滑剂物理特性影响机制



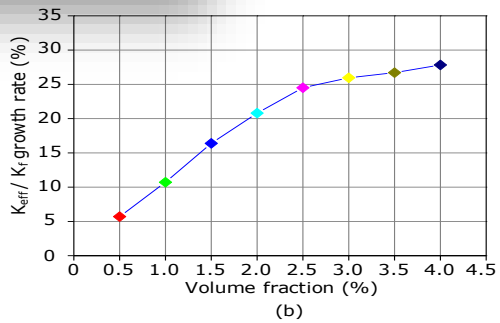
(a)



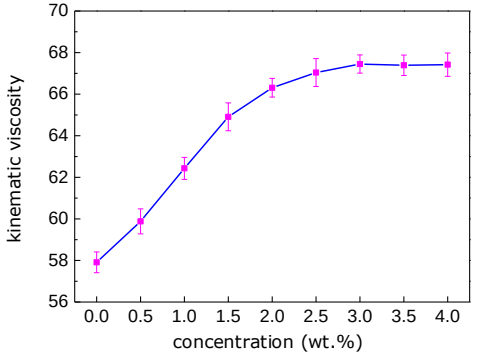
(b)



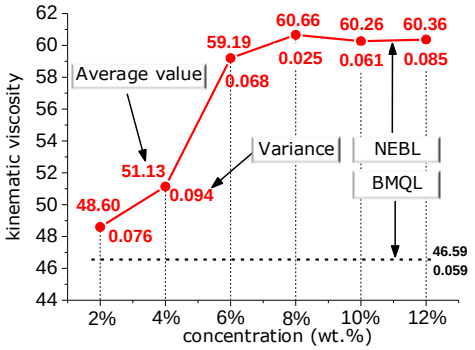
(a)



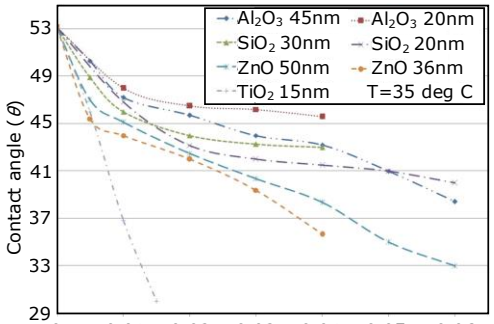
(b)



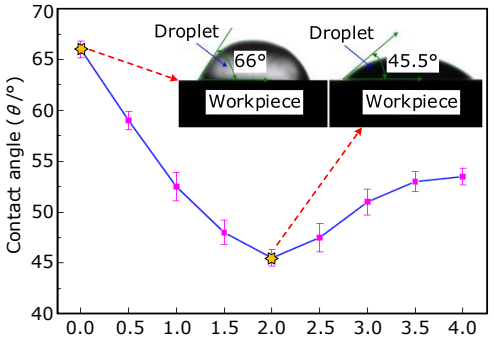
(a)



(b)



(c)

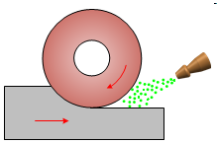


(d)

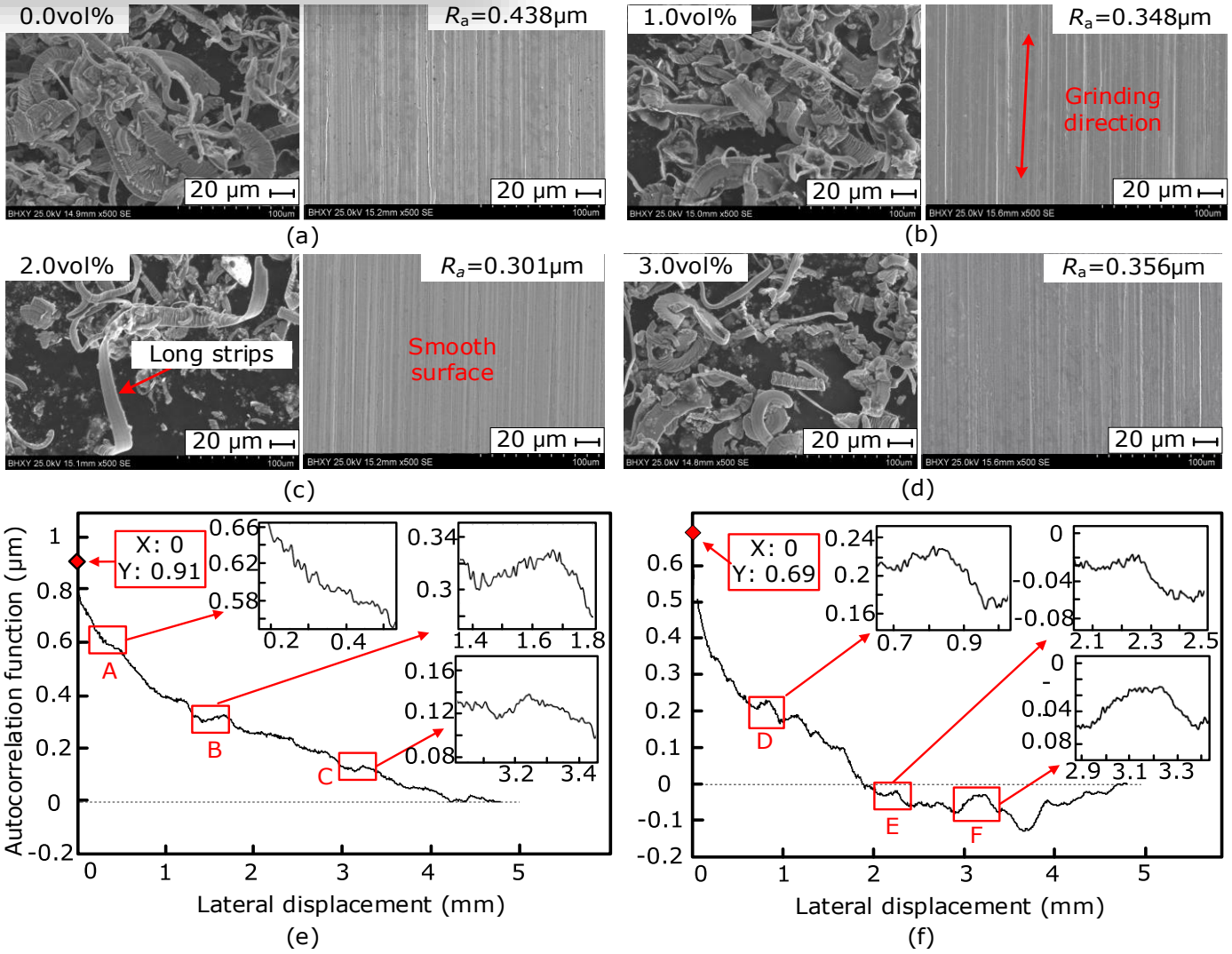
（5）工艺优化策略分析—纳米添加相分散性

工件表面质量评价参数

表面粗糙度，工件表面微观形貌



Inconel 718



（5）工艺优化策略分析—纳米添加相分散性

随着纳米添加相在基础油中的浓度提升，纳米增强生物润滑剂的粘度、表面张力、对流换热系数也向有利的方向提升，受限于分散性，纳米添加相浓度过高时将团聚沉淀，因此存在最佳浓度值。

纳米添加相分散性对润滑剂物理特性影响机制：采用分散剂和在线超声波分散方法，能够有效提升分散性；然而对于不同种类纳米添加相和基油，具有不同的最优方案。

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

（6）讨论--矛盾与解决方法

- 基础油改性
- 混合基础油
- 纳米材料改性
- 复合纳米材料
- 分散剂
- 超声辅助分散

（1）研究背景

（2）纳米增强生物润滑剂

（3）与微量润滑对比先进性分析

（4）与传统切削液对比先进性分析

（5）工艺优化策略分析

（6）矛盾与解决方法

（7）发展趋势

（7）发展趋势

生物润滑剂**稳定性**有待提升，材料改性研究是有效解决方法；适应不同润滑工况的生物润滑剂**配伍性体系**需要建立；刀具/工件动态微观接触区**贮巢形成机制**及纳米强化附着油膜减摩抗磨行为

目前微量润滑供给装备的雾化及射流性能差导致微液滴飞逸飘散，研究**多能场雾化新方法及参数化可控输运供给策略**是有效途径；

目前微量润滑供给装备无法实现**喷嘴位姿和射流参数随加工工况的自适应调节**，导致加工性能无法满足需求；研究智能供给装备并实现射流工艺参数与机床NC系统的实时通讯和智能调控，势在必行；

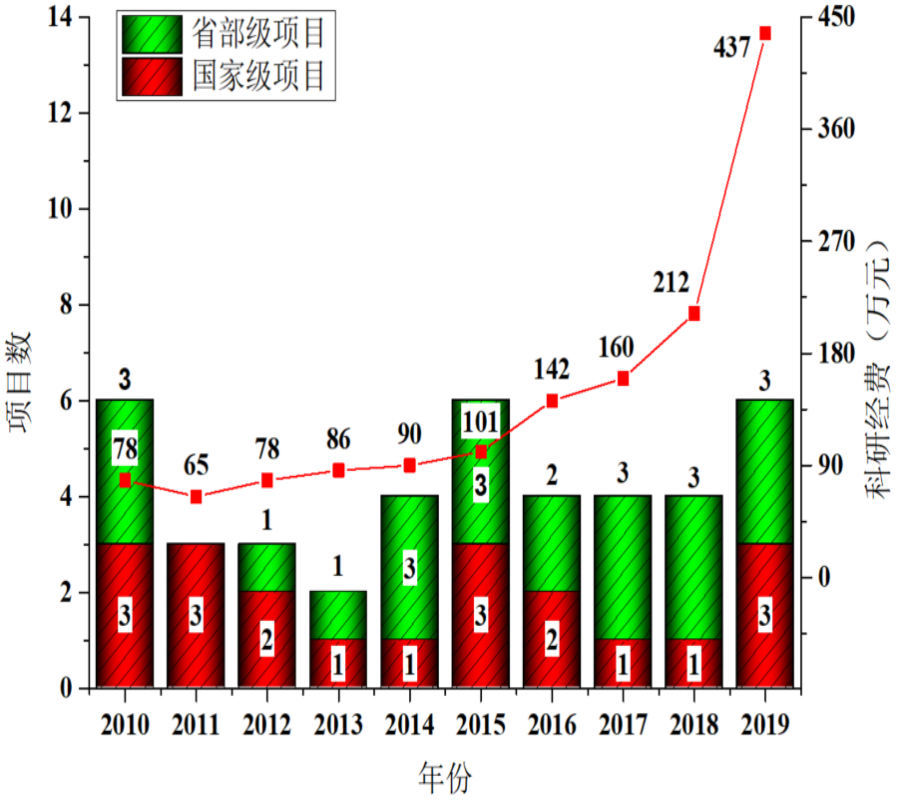
从单变量/因素定性变化规律发展到工艺数据库，建立**工艺系统多参数和加工性能协同调控**的定量数学模型，是下一步科研重点；

针对不同加工工况，**建立微量润滑和其他能场协同调控方案**，实现模型、加工结果和经济性为主要指标的工艺优化。

学术影响和经济社会发展贡献——承担项目

团队得到了国家自然科学基金委连续12 年的持续资助，科研经费逐年增加。2 项国家自然科学基金（51175276；51575290）被遴选为机械工程领域国家自然科学基金优秀结题项目

代表性国家基金项目	主持人	年份
磨粒排布和凸出精确可控的自由型面截面砂轮制造方法	李长河	2009
纳米粒子射流微量润滑强化换热机理及砂轮/工件界面摩擦学行为	李长河	2012
磁增强纳米流体荷电雾化机理及雾滴可控输运微量润滑磨削新方法	李长河	2016
超声辅助静电雾化生物骨微磨削机理及低热力损伤抑制策略	李长河	2020
纳米流体微液滴砂轮/工件约束界面动态毛细管形成机制与微液滴迁移成膜机理	张彦彬	2020



团队承担项目和科研经费趋势

团队贡献

团队自2006年持续进行清洁生产方向研究，发表SCI（JCR1-2）论文43篇，机械工程学报3篇。

Journal Title	Year, Volume/Issue, Pages	Citations	
International Journal of Machine Tools and Manufacture	2017, 122, 81-97	100	ESI hot paper ESI highly cited paper Most cited paper in IJMTM
	2015, 99, 19-33	121	ESI highly cited paper Most cited paper in IJMTM
	2017, 122, 55-65	89	
Journal of Materials Processing Technology	2016, 232, 100-115	113	ESI highly cited paper Most cited paper in IJMTM
	2020（已录用）	0	
Journal of Cleaner Production	2015, 87/1, 930-940	182	Most cited paper in JMPT
	2017, 142, 3571-3583	68	ESI highly cited paper
	2017, 140/3, 1060-1076	71	
	2016, 127/1, 487-499	95	ESI highly cited paper
	2016, 139, 685-705	35	
	2017, 154, 1-11	87	
	2018, 193, 236-248	12	
	10.1016/j.jclepro.2020.123328	0	
Tribology International	2016, 99/1, 198-210	79	
	2019, 131, 51-63	20	
Applied Thermal Engineering	2017, 126/1, 525-537	23	
Ceramics International	2019, 45(12):14908-14920.	23	
Chinese Journal of Aeronautics	2015, 28/2, 570-581	86	Most cited paper in CJA
	2016, 29/4, 1084-1095	63	
	10.1016/j.cja.2020.07.004	0	
	10.1016/j.cja.2020.04.029.	0	

团队贡献

Journal Title	Year，Volume/Issue，Pages	Citations
Materials and Manufacturing Processes	2017，32/6，589-597	21
	2018，33/1，58-68	13
	2018，33/9，950-963	23
Journal of Manufacturing Processes	2017，32，94-104	35
International Journal of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology	2018，5，327-339	33
	10.1007/s 40684-020-00268-6.	0
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	2017，89/9-12，3459-3474	32
	2015，78/5-8，1275-1288	88
	2016，81/9-12，3427-3441	56
	2016，82/1-4，617-630	28
	2014，74/5-8，835-850	25
	2017，93，1971-1988	10
	2018，96/1，1-20	15
	2018，96/1-4，1-17	19
	2019，100/1-4，457-473	30
	2018，89/9-12，3091-3109	8
	2020，107，1277-1296.	0
Int. J. Surface Science and Engineering	2015，9/2-3，159-173	9
Journal of Nanoparticle Research	2014，16/12，1-5	40
Industrial Crops & Products	2018，111，494-505	16
Precision Engineering	2017，50，248-262	33
	2017, 47, 532-545	28
机械工程学报	2018，54/1，161-170	19
	2018，54/23， 215-222	0
	2018，54/18，194-203	4

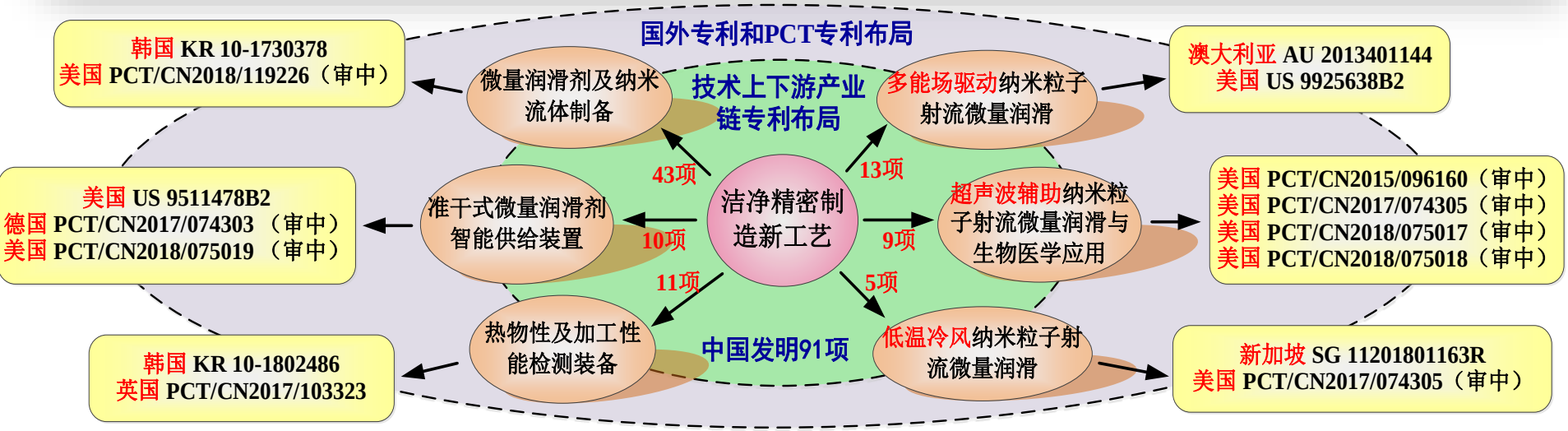
Most cited paper

ESI highly cited paper

机械工程学报高被引论文

高价值专利

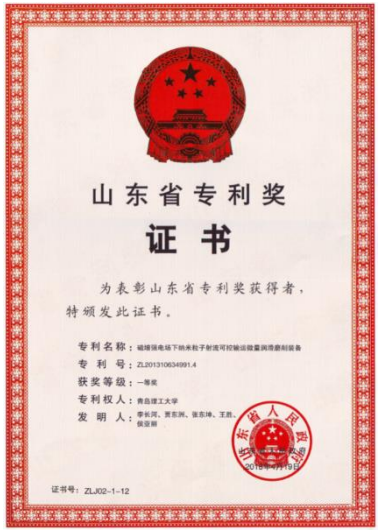
助推产业转型升级及新旧动能转换，构筑了涵盖不同地域的上下游产业链专利群，授权包括美国、澳大利亚、韩国等国外专利在内发明专利98项，其他知识产权88项。

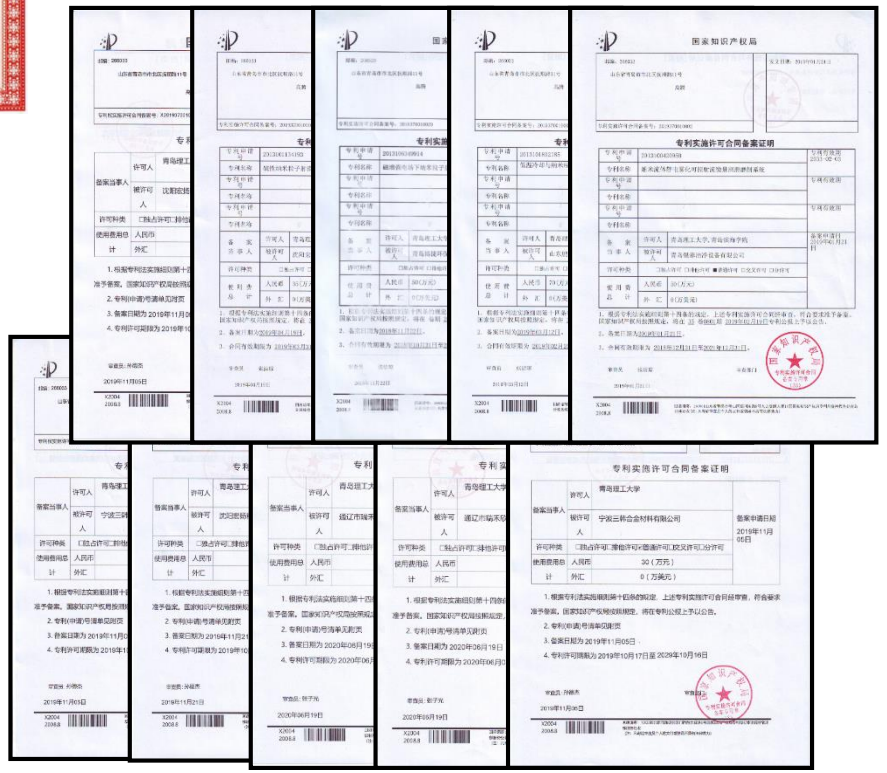


- 10 项专利已许可产业化

学术影响和经济社会发展贡献——知识产权

- 山东省**高价值专利**
- 山东省**专利导航项目**
- 青岛市**高价值专利**
- **15**项专利已**转让**
- **10** 项专利已**许可产业化**
- 中国专利优秀奖
- 山东省专利**一等奖（2项）**
- 中国循环经济协会专利奖**金奖**





谢谢各位同行!

感谢各位同仁鼎力支持与相助!