Journal of Zhejiang University-SCIENCE A

材料加工 · 先进制造技术

低温等离子体与超声振动协同增效的金属玻璃微铣削研究

冷等离子体预处理与超声振动辅助微铣削的复合加工策略
在提升块状金属玻璃可加工性中的协同机制与性能验证

清华大学机械工程系 · 摩擦学国家重点实验室

Cite this as: Qilin LI, Emek Babuskin KOCYIGIT, Long YE, Nan YU, Pingfa FENG, Jianjian WANG, 2026. Synergistic enhancement of machinability and surface integrity in bulk metallic glasses via cold plasma pretreatment and ultrasonic vibration-assisted micromilling. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 27(5):466-478. https://doi.org/10.1631/jzus.A2500552

研究背景与挑战

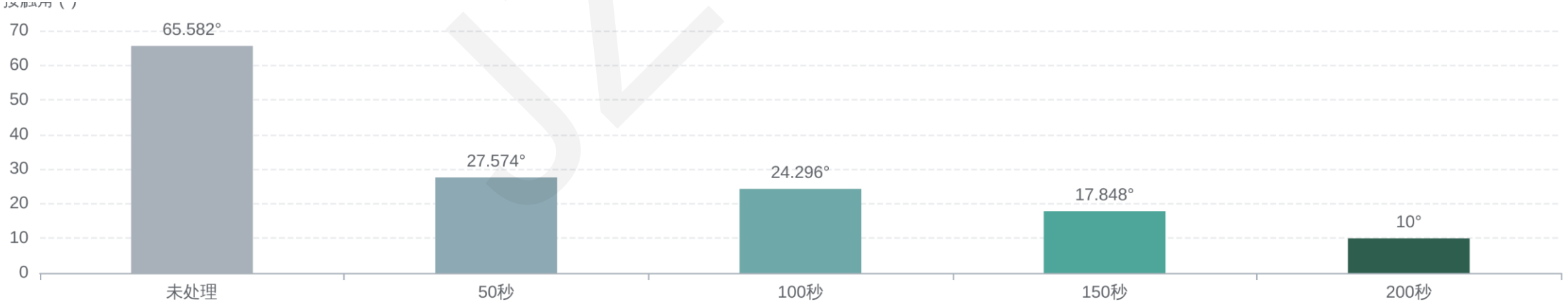
块状金属玻璃特性

- ✓ 非晶态原子结构，无晶界
- ✓ 高强度、高硬度、优异的耐腐蚀性
- ✓ 适用于生物医学植入物和微机电系统
- ✓ 材料：Vitreloy 1（$Zr_{41.2}Ti_{13.8}Cu_{12.5}Ni_{10}Be_{22.5}$ at%）

加工挑战

- ✗ 高硬度和脆性导致可加工性差
- ✗ 传统微铣削导致刀具快速磨损
- ✗ 表面缺陷多，剪切带形成产生微裂纹
- ✗ 热加工技术易诱发结晶（超过玻璃转变温度）
- ✗ 传统参数优化难以克服材料固有特性限制

等离子体处理改善表面润湿性



冷等离子体处理时间对BMG表面接触角的影响（从疏水性到超亲水性）

创新点：CP-UVAM复合加工方法

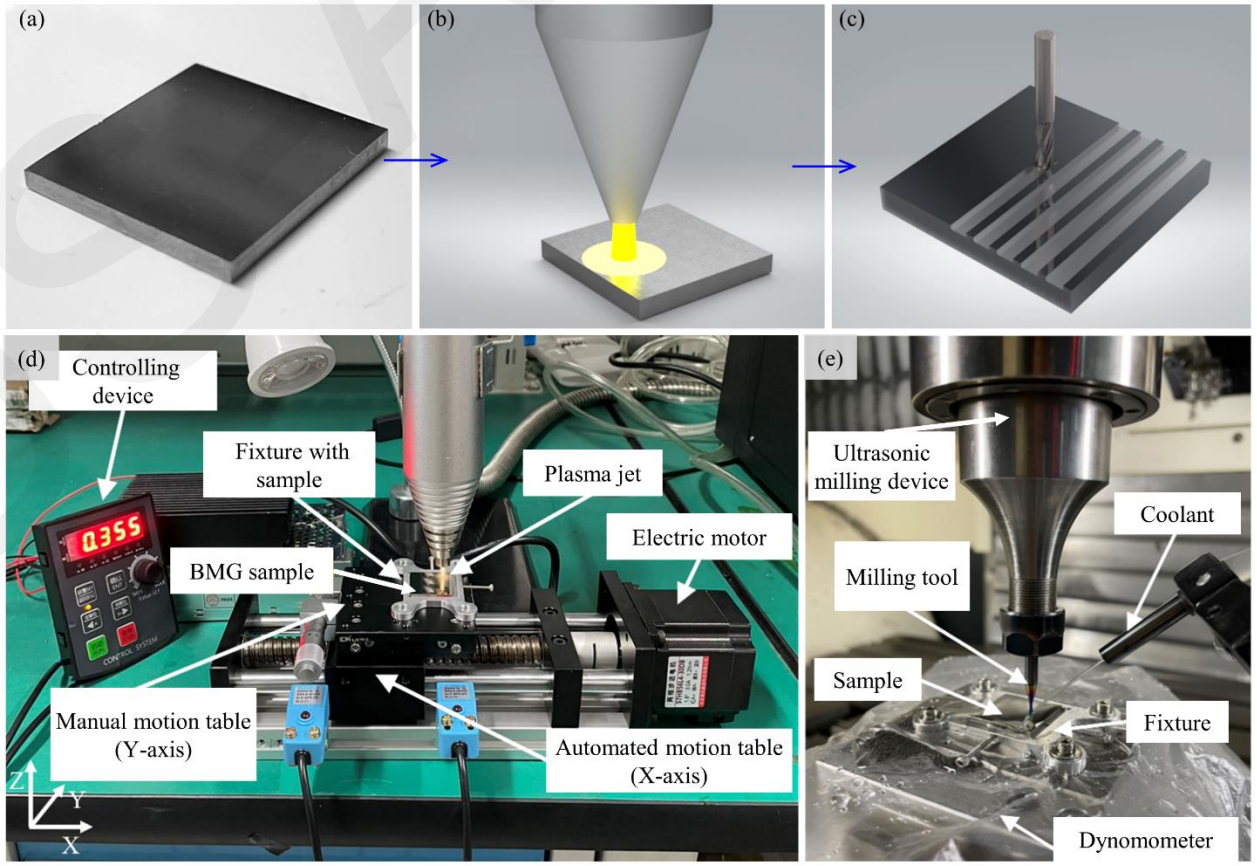
研究创新性

首次系统研究**冷等离子体预处理(CP)**与**超声振动辅助微铣削(UVAM)**的协同效应，提出CP-UVAM复合加工策略，突破传统方法对BMG可加工性的固有限制。

协同增效机制

- CP改善表面润湿性，增强冷却润滑剂渗透
- UVAM通过间歇切削降低平均切削力
- = 协同作用：CP抵消UVAM的刀具损伤，UVAM增强CP的力减效果

实验装置



实验装置，用于BMG微铣削性能测试

等离子体预处理机制

冷等离子体提升BMG可加工性：表面润湿性改善与近表面塑性增强

表面润湿性转变

从疏水性到超亲水性

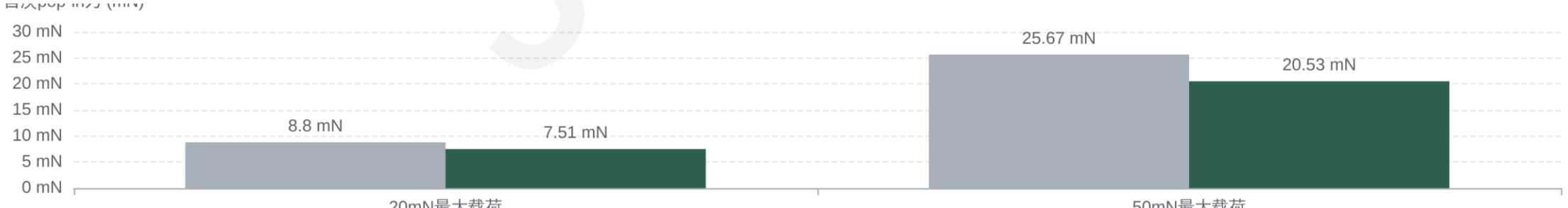
1. **接触角显著降低**
   从 65.582° → <10° （超亲水）
2. **作用机制**
   等离子体活性氧与Zr表面反应，形成亲水氧化物层(ZrO_2)
3. **加工优势**
   改善冷却液渗透性，减少热积累和结晶风险

力学性能改善

塑性变形能力提升

1. **近表面自由体积增加**
   促进多重剪切带形成，改善延展性
2. **首次pop-in力降低**
   20mN：8.80 → 7.51 mN（↓15%）
   50mN：25.67 → 20.53 mN（↓20%）
3. **加工优势**
   降低剪切带形核临界应力，实现更稳定塑性变形

纳米压痕测试：首次pop-in力显著降低



JZUSA

不同加工方法切削力对比

核心发现：CP-UVAM实现最佳切削力降低

CP-UVAM切削力较传统铣削降低34.36%，优于单独CPAM(20.90%)和UVAM(29.02%)

CM 传统铣削

基准方法，刀具磨损严重，切削力不稳定

CP CPAM

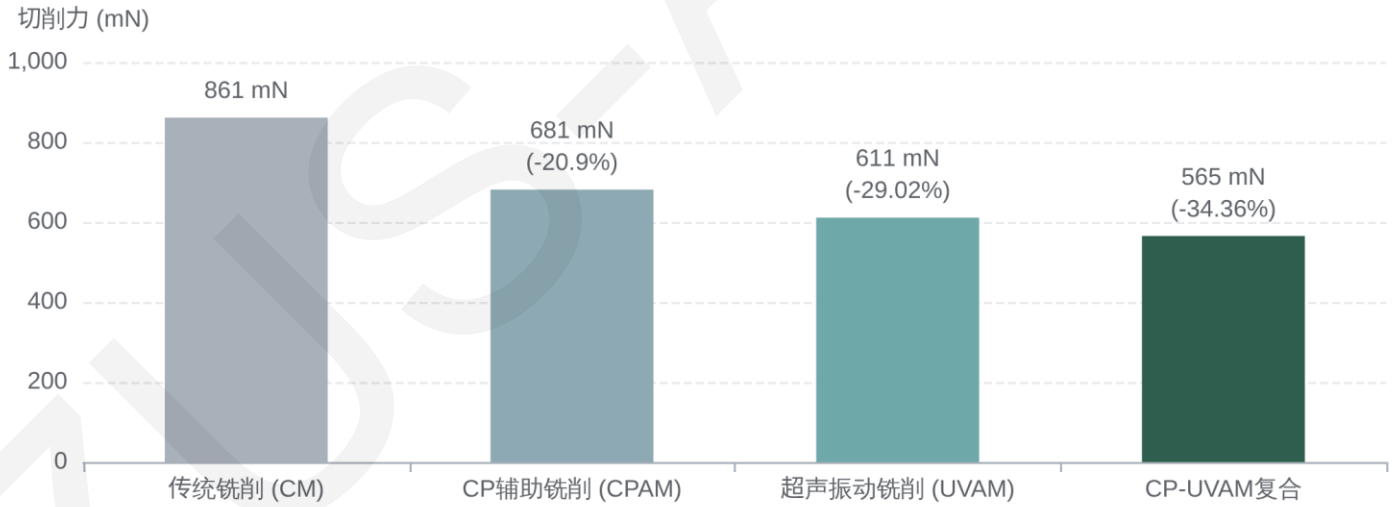
等离子体预处理增强塑性变形能力

UV UVAM

超声振动实现间歇切削，降低平均力

CP+UV CP-UVAM

协同效应：结合两者优势，实现最佳性能



34.36%
CP-UVAM力降
vs 传统铣削

20.90%
CPAM力降
vs 传统铣削

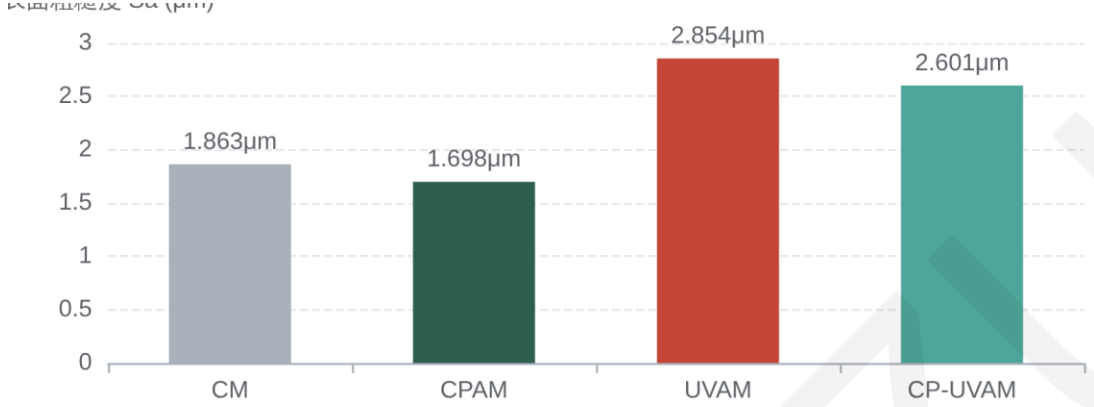
29.02%
UVAM力降
vs 传统铣削

90.22%
稳定性提升
CP-UVAM间标准差降低

表面质量与刀具磨损结果

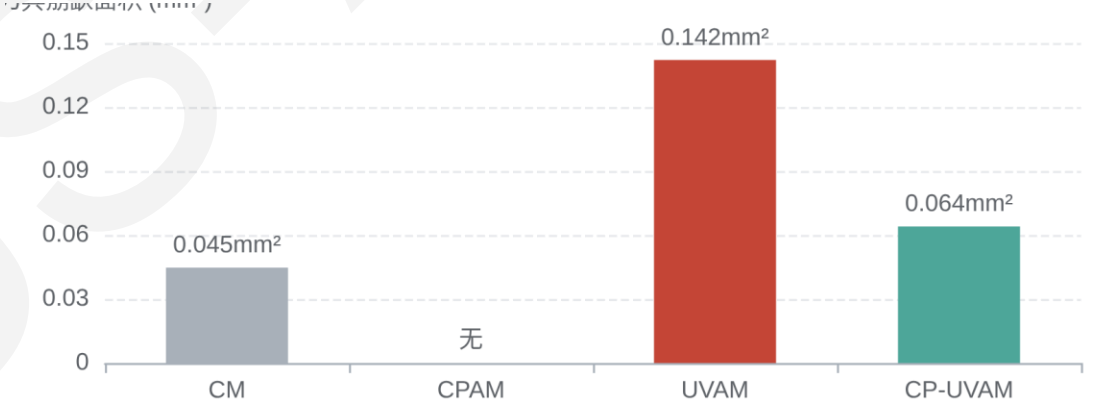
CPAM实现最佳表面质量，CP-UVAM抑制UVAM刀具崩缺43.97%，稳定态表面粗糙度Sa达2.601 μm

表面质量对比



- CPAM表面质量最佳：稳定态Sa = 1.698 μm
- CPAM比CM降低8.87%
- CP-UVAM比UVAM降低8.85%
- CPAM沟槽间标准差降低87.01%

刀具磨损对比



- UVAM刀具崩缺最严重：0.142mm²
- CP-UVAM比UVAM减少43.97%刀具崩缺
- CPAM无刀具刃口崩缺发生
- UVAM刀具崩缺比CM增加217.70%

JZJSA

协同效应机理

冷等离子体预处理与超声振动辅助微铣削的互补增强机制

冷等离子体预处理

- **表面润湿性提升**
  接触角从65.6° 降至<10°
- **塑性变形能力增强**
  pop-in力降低15-20%
- **润滑剂渗透改善**
  氧化层与极性基团形成

"实现最佳表面质量与最小刀具磨损"

协同效应

超声振动辅助

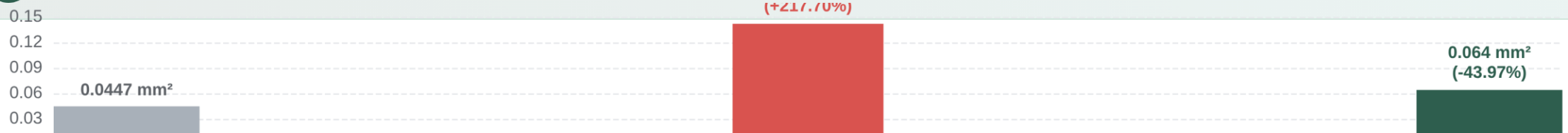
- **切削力显著降低**
  切削力降低29.02%
- **间歇式切削机制**
  高频振动减少切削力
- **刀具损伤挑战**
  刃口崩缺增加217.70%

"降低切削力但加剧刀具磨损"

协同效应在刀具保护上的体现

CP-UVAM协同效应：优势互补

保留UVAM切削力降低优势（34.36% vs CM），同时减轻刀具损伤（刃口崩缺减少43.97% vs UVAM）



JZUS-A

研究结论

CP-UVAM复合工艺有效解决金属玻璃加工难题
为高精密微铣削提供新途径

等离子体预处理

将BMG表面从疏水性转变为超亲水性（接触角<10°），增强润滑剂渗透

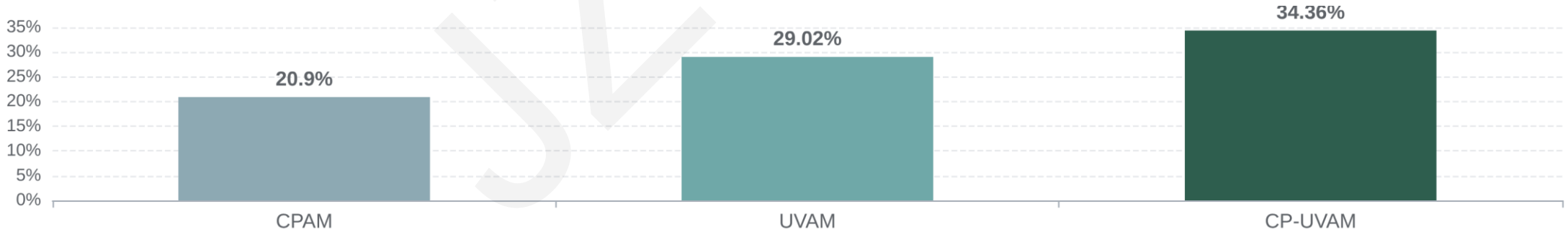
超声振动辅助

通过高频振荡降低平均切削力（29.02%）， 但单独使用会导致刀具刃口崩缺

协同增效

CP-UVAM在保留超声振动降力效果的同时， 大幅减轻刀具损伤（刃口崩缺减少43.97%）

不同加工方法切削力降低效果对比



与传统铣削(CM)相比的切削力降低百分比

本研究证明了低温等离子体预处理在独立及复合加工中的关键作用， 为克服脆性非晶合金加工挑战提供创新解决方案