

## 一、项目名称

难加工材料干式/准干式高效切削机理及高性能刀具技术

## 二、申报奖种

自然科学奖

## 三、推荐单位

山东大学

## 四、项目简介

本项目属于机械工程切削理论和切削刀具学科。

使用浇注和高压冷却等冷却润滑方式的传统切削技术面临着生产成本低、环保压力大等问题，开发生态友好型切削技术及高性能刀具成为实现钛合金、镍基合金、淬硬钢和高强度钢等难加工材料高效加工的重要途径。据此，研究团队在国家自然科学基金、教育部博士点基金和山东省自然科学基金等资助下，围绕难加工材料的干式/准干式切削机理、内冷式刀具和变齿距减振刀具的创新设计等关键科学问题和关键技术进行了系统研究，取得了一些原创性成果。重要科学发现点简述如下：

(1) 揭示了周期性裂纹的产生和局部剪切失稳的共同作用是诱发镍基合金高速切削条件下锯齿状切屑形成的主要原因；基于时频域分析技术，阐释了钛合金切削条件下的机床主轴频率、颤振现象和切削力突变之间的关系。

(2) 提出了定量控制的低温微量润滑（CMQL）辅助切削技术，揭示了低温油气混合物对刀—屑摩擦系数及对切削力、刀具磨损的影响；研究表明 CMQL 辅助切削技术有效地提高了淬硬钢和镍基合金的切削刀具寿命。

(3) 基于流体动力学特性，揭示了内冷式刀具结构对切削力、刀具磨损及寿命的影响机制；提出了基于切削位移和切削力数量关系的变齿距减振刀具设计理念。

上述工作全部在国内完成，具有自主知识产权，项目发表 SCI 论文 20 篇，

其中 2 篇发表论文在《Journal of Cleaner Production》上。研究成果的原始创新和理论上的重要贡献得到了国际同行专家的充分肯定。发表在国际权威杂志《Journal of Cleaner Production》、《Renewable & Sustainable Energy Reviews》、《International Journal of Machine Tools & Manufacture》等的 17 篇综述论文将项目成果作为代表性方法加以介绍。8 篇代表性论文 SCI 他引 224 次；其中论文“Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions”的 SCI 他引为 106 次，连续多次入选 ESI 前 1% 高被引论文。在多次引用和推广的国际同行中，不乏相关领域的知名学者和专家，包括 Dragos Axint（Int. J. Mach. Tools Manuf. 主编、CIRP Fellow、英国诺丁汉大学教授）、Tuğrul Özel（Int. J. Mechatron. Manuf. Syst. 主编、ASME J. Manuf. Sci. Eng. 副主编、Int. J. Mach. Tools Manuf. 编委、美国罗格斯大学教授）、John W. Sutherland（CIRP Fellow、ASME Fellow、SME Fellow、美国普渡大学教授）等知名学者。国家同行评价认为“CMQL 系统将低温气体与微量润滑技术的优点完美结合”、“在可持续制造背景下，MQL 加工被认为是清洁生产的实用方法之一”、“（皇等）使用变齿距刀具干式铣削薄壁钛合金 Ti-6Al-4V，有效减缓了切削振动，降低了切削温度”。

项目实施期间，授权发明专利 1 项、软件著作权 2 项，2 人入选山东省泰山学者特聘专家。

## 五、主要完成人情况表

1、姓名：张松            排名： 1            技术职称： 教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：项目负责人，提出项目的总体技术路线及研究方案。揭示了周期性裂纹的产生和局部剪切失稳的共同作用是镍基合金高速切削条件下锯齿状切屑形成的主要原因；阐明了锯齿节的形成频率与切削力的波动频率

的正相关性；提出了低温微量润滑（CMQL）辅助切削技术，搭建了CMQL辅助切削系统。

对发现点1、2、3均有贡献，其中对发现点1有重要贡献，是代表性论文1、8的第一作者/通讯作者（附件1-1、1-8）以及代表性论文3、6、7的通讯作者（附件1-3、1-6、1-7）。

曾获科技奖励情况：1995-12，“自动化切削加工系统中刀具 CAD 的智能化”，山东省科学技术进步二等奖（第五位）；2011-12，“钛合金高效加工关键技术研究”，山东省科学技术进步二等奖（第三位）。

2、姓名：李剑峰            排名： 2            技术职称： 教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：项目主要参加者，对发现点2做出了重要贡献，并对发现点1，3有部分贡献。参与提出了低温微量润滑（CMQL）辅助切削技术；参与搭建CMQL辅助切削系统的部分工作；参与提出了变齿距减振铣刀的设计方法。是代表性论文4的通讯作者（附件1-4）以及代表性论文2、3、5、8的第二作者（附件1-2、1-3、1-5、1-8）。

曾获科技奖励情况：2011-12，“钛合金高效加工关键技术研究”，山东省科学技术进步二等奖（第一位）；2019-03，“机械装备高效绿色再制造关键技术及应用”，山东省科学技术进步二等奖（第二位）。

3、姓名：皇攀凌            排名： 3            技术职称： 副教授

工作单位：山东大学

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：项目主要参加者，提出了基于切削位移和切削力的数量关系的变齿距减振铣刀的设计方法，通过试验验证和信号分析阐述了变齿距减振铣刀的优越性；利用时频域分析技术揭示了钛合金切削条件下的机床主轴

频率、颤振现象和切削力突变之间的关系。是代表性论文 2、5 的第一作者/通讯作者（附件 1-2、1-5）以及代表性论文 4 的第一作者（附件 1-4）。

曾获科技奖励情况：2011-12，“钛合金高效加工关键技术研究”，山东省科学技术进步二等奖（第七位）。

4、姓名：丁同超            排名： 4            技术职称： ——

工作单位：江苏省句容市行政审批局

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：项目主要参加者，阐述了切削参数对切削力的影响规律；揭示了切削参数及可转位刀片几何结构对表面粗糙度的影响规律。是代表性论文 3、6 的第一作者（附件 1-3、1-6）。

曾获科技奖励情况：无。

5、姓名：张成良            排名： 5            技术职称： 助理工程师

工作单位：中车长春轨道客车股份有限公司

完成单位：山东大学

对本项目技术创造性贡献：项目主要参加者，研究了低温油气混合物对摩擦系数及切削力、刀具磨损的影响规律；揭示了 CMQL 辅助切削条件下的内冷式刀具结构对切削力、刀具磨损及寿命的影响规律，为创新设计内冷式刀具结构提供支持。是代表性论文 7 的第一作者（附件 1-7）。

曾获科技奖励情况：无。

## 六、代表性论文专著目录

1. S. Zhang\*, J.F. Li, YW. Wang. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions, Journal of Cleaner Production, 2012, 32: 81-87

2. P.L. Huang\*, J.F. Li, J. Sun, J. Zhou. Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools/Journal of Cleaner Production,

Journal of Cleaner Production, 2014, 67: 258-264

3. T.C. Ding, S. Zhang\*, YW. Wang, X.L. Zhu. Empirical models and optimal cutting parameters for cutting forces and surface roughness in hard milling of AISI H13 steel, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(1-4): 45-55

4. P.L. Huang, J.F. Li\*, J. Sun, J. Zhou. Vibration analysis in milling titanium alloy based on signal processing of cutting force, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(5-8): 613-621

5. P.L. Huang\*, J.F. Li, J. Sun, M.J. Ge. Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1-4): 153-160

6. T.C. Ding, S. Zhang\*, H.G. Lv, X.L. Xu. A comparative investigation on surface roughness and residual stress during end-milling AISI H13 steel with different geometrical inserts, Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(8): 1085-1093

7. C.L. Zhang, S. Zhang\*, X.F. Yan, Q. Zhang. Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5-8): 975-984

8. S. Zhang\*, J.F. Li, X.L. Zhu, H.G. Lv. Saw-tooth chip formation and its effect on cutting force fluctuation in turning of Inconel 718, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(6): 957-963