

刀具设计参数对粗糙度的影响综述

周声明^{1,2}, 胡高峰^{1,2}, 李占杰^{1,2}, 卢颜杰^{1,2}, 张敏^{1,2}, 辛文东^{1,2}, 逯俊体^{1,2}

¹天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津

²天津市高速切削与精密加工重点实验室, 天津

收稿日期: 2025年1月12日; 录用日期: 2025年2月5日; 发布日期: 2025年2月13日

摘要

本研究以刀具设计参数对粗糙度的影响为主题。首先, 概述了粗糙度在机械加工中的重要性和刀具设计参数对粗糙度影响的研究意义。阐述了粗糙度的定义、测量方法, 以及它对产品性能的影响, 并回顾了当前的相关研究。其次, 本研究详细分析了刀具设计参数与粗糙度的关系, 包括刀具的几何参数(如刀具角度和刃口形状)以及刀具的材料和涂层技术对粗糙度的影响。特别是对不同的刀具材料(如高速钢、硬质合金等)和涂层技术如何改进刀具性能, 从而影响粗糙度进行了深入的探讨。

关键词

粗糙度, 刀具设计参数, 涂层技术

Overview of the Influence of Tool Design Parameters on Roughness

Shengming Zhou^{1,2}, Gaofeng Hu^{1,2}, Zhanjie Li^{1,2}, Yanjie Lu^{1,2}, Min Zhang^{1,2}, Wendong Xin^{1,2}, Junti Lu^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

²Tianjin Key Laboratory of High-Speed Cutting and Precision Machining, Tianjin

Received: Jan. 12th, 2025; accepted: Feb. 5th, 2025; published: Feb. 13th, 2025

Abstract

This study focuses on the influence of tool design parameters on roughness. Firstly, it outlines the importance of roughness in mechanical machining and the research significance of tool design parameters on roughness. This article elaborates on the definition and measurement methods of roughness, as well as its impact on product performance, and reviews current related research. Secondly, this study analyzed in detail the relationship between tool design parameters and roughness,

文章引用: 周声明, 胡高峰, 李占杰, 卢颜杰, 张敏, 辛文东, 逯俊体. 刀具设计参数对粗糙度的影响综述[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(1): 41-49. DOI: 10.12677/met.2025.141004

including the geometric parameters of the tool (such as tool angle and blade shape) as well as the influence of tool material and coating technology on roughness. In particular, in-depth discussions have been conducted on how different tool materials (such as high-speed steel, hard alloys, etc.) and coating technologies can improve tool performance and thus affect roughness.

Keywords

Roughness, Tool Design Parameter, Coating Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在机械加工中，粗糙度是一个非常重要的参数。表面粗糙度是指加工表面上所具有的较小间距和微小峰谷不平度微观几何形状的尺寸特性。它直接影响到零件的装配质量，精度，耐磨性，疲劳强度，热处理性能，密封性，抗腐蚀等许多重要的性能。粗糙度过高会导致零件的寿命缩短，易损性增强，而且会增加零件的摩擦阻力，导致能量的损失增大。同时，过高的粗糙度还会影响到零件的装配质量和密封性，从而影响到整个机械系统的性能和稳定性[1]-[3]。

刀具设计参数对粗糙度影响的研究意义重大，它不仅能够提升加工质量，还能通过降低加工表面粗糙度来提高零件的摩擦磨损、耐腐蚀性和疲劳强度，从而增强零件性能和延长使用寿命。此外，合理的刀具设计参数有助于减少切削过程中的振动和刀具磨损，提高生产效率，减少因刀具磨损导致的频繁换刀，降低生产成本，并提高加工过程的连续性。优化刀具参数还能降低切削力和刀具磨损、延长刀具寿命、减少刀具消耗、降低制造成本。在促进材料的可持续性利用方面，优化刀具参数有助于减少材料浪费和能源消耗，符合可持续发展的要求。同时，表面粗糙度的控制对提高装配精度和质量至关重要，优化刀具设计参数可以提升产品的装配质量[4]-[7]。

2. 刀具设计参数与粗糙度关系分析

2.1. 刀具几何参数对粗糙度的影响

刀具角度是影响刀具切削性能和加工质量的关键因素，它们在刀具的设计和应用过程中起着决定性作用。谭靛等[8]探讨了硬质合金刀具几何参数对铣削力和表面完整性的影响，结果表明大前角、小后角、大螺旋角的条件下铣削力较小，且刀具螺旋角对表面粗糙度的影响显著，刀具后角对表面残余应力的影响显著。这表明刀具角度的合理配置能够有效降低切削力和表面粗糙度，同时减少表面残余应力，提高加工质量。其中刀具角度对表面粗糙度的影响如图 1(a)所示。韩金华[9]通过切削试验分析了刀具前角、后角、主偏角、副偏角和刀尖圆弧半径等几何参数对加工表面粗糙度的影响，发现不同的几何参数组合对粗糙度有显著影响，合理的参数配置可以显著提高表面粗糙度的质量。这说明在实际生产中，应根据加工材料和要求来优化刀具的几何参数，以达到最佳的加工效果。和其他研究一样，韩金华也强调了刀具几何参数对表面粗糙度的重要性，并通过实验验证了不同参数对表面粗糙度的具体影响规律。例如，增大前角和后角通常可以降低表面粗糙度。研究特别关注了刀具副偏角和刀尖圆弧半径对表面粗糙度的影响，并通过实验得出了具体的数值结果。此外，还综合考虑了多个几何参数的交互作用，提出了最佳的参数组合。相比之下，一些其他研究可能更侧重于单一参数的影响，或者在不同的材料和加工条件下

进行研究。Jun 等[10]利用分子动力学理论,探讨了刀具的几何形状(包括前角、刃半径和后角)在纳米级切削多晶 NiFeCr 高温合金时对工件表面质量和内部损伤的影响。研究发现,在切削初期,材料主要是被挤压去除,随着切削的进行,逐渐转变为以剪切为主。当刀具前角从负值调整为正值时,切削力会减小,摩擦系数增大,表面粗糙度降低,而拉伸残余应力则会增加。如果刀具的刃半径增大,切削力会上升,摩擦系数会降低,表面粗糙度和位错密度会增加,残余应力会向压缩方向移动。对于刀具后角,当其增大时,切削力和摩擦系数都会减小,表面粗糙度先下降后上升,拉伸残余应力先增加后减少,位错密度会出现波动,相变原子数量会减少。此外,晶界处的位错网络能够限制位错和相变损伤的扩展,位错之间的相互作用还会产生新的位错。

楚文斌等[11]通过车削加工试验和数据测量,探讨了刀具参数及刀具磨损量对加工表面粗糙度的影响,并利用 Matlab 软件建立了刀具参数变化和刀具磨损量与加工表面粗糙度之间的定量关系,研究表明,刀具磨损量的增加会导致表面粗糙度的增大,而合理的刀具参数配置可以在一定程度上减缓磨损对粗糙度的影响。如图 1(b)、图 1(c)和图 1(d)所示,为选用刀具参数及控制刀具磨损量提供了理论依据。此外,Kevin 等[12]研究发现,使用较大的刀具圆弧半径可以得到更光滑的表面,但在刀具磨损和切削能耗方面,与较小圆弧半径的刀具表现相似。这说明在选择刀具圆弧半径时,需要综合考虑表面粗糙度、刀具磨损和切削能耗等因素,以达到最佳的整体性能。不过,这项研究只针对 AISI 52100 钢,硬度为 60~62 HRC。不同材料的切削特性和对刀具几何参数的敏感性可能不同。例如,不同合金成分、硬度或微观结构的钢材可能表现出不同的切削行为和表面质量特性。此外,还可以探索其他刀具几何参数(如前角、后角、主偏角等)对硬车削的影响,以及这些参数与刀具圆角半径的相互作用。

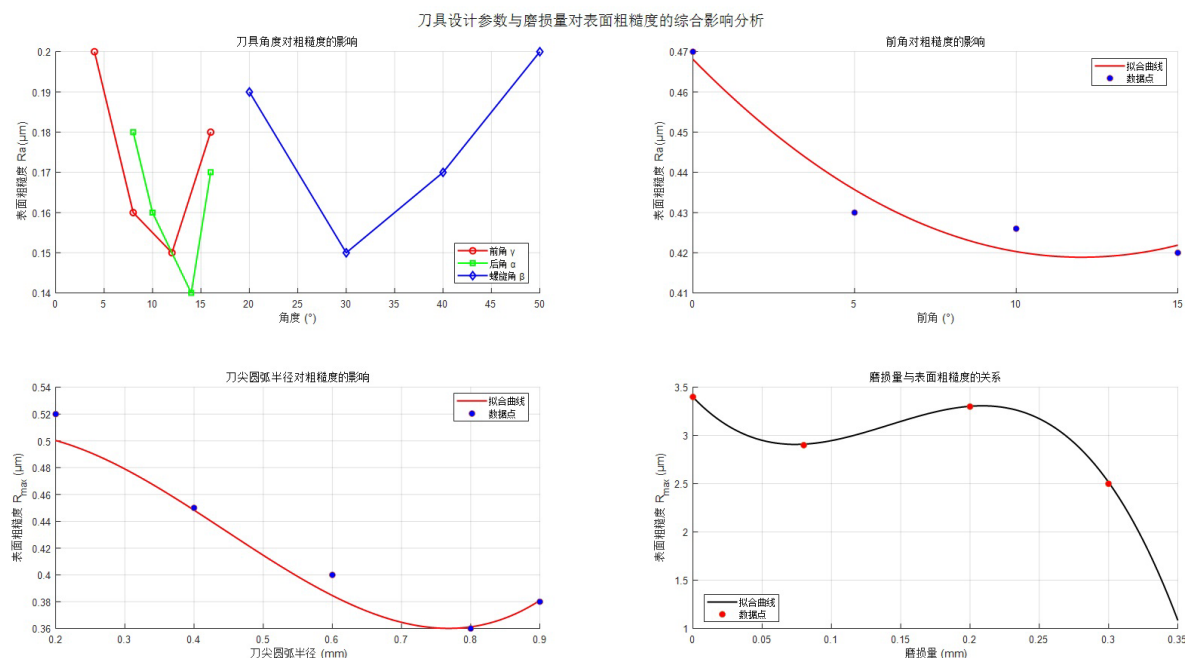


Figure 1. (a) The influence of tool angle on roughness [8]; (b) Surface roughness variation with front angle; (c) The variation of surface roughness with the radius of the tooltip arc; (d) The relationship between wear and surface roughness [11]

图 1. (a) 刀具角度对粗糙度的影响[8]; (b) 表面粗糙度随前角的变化; (c) 表面粗糙度随刀尖圆弧半径的变化; (d) 磨损量与表面粗糙度的关系[11]

Hasan 等[13]探讨了不同刀具半径、不同切削深度和不同进给率对 AISI 1030 钢表面粗糙度的影响,也得到了类似的结论,即使用较大的刀具半径、较小的进给率和切削深度可以获得更好的表面质量,

如图 2 所示。

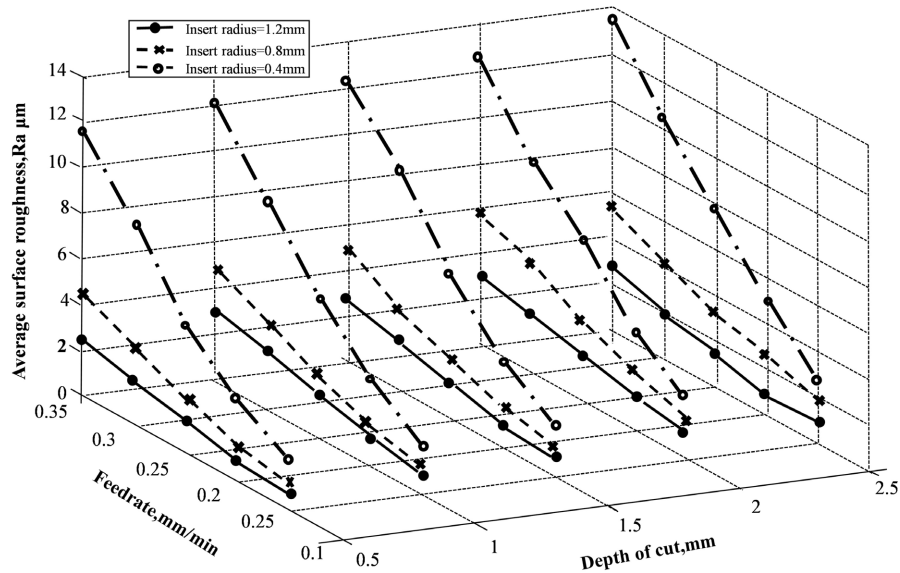


Figure 2. The effects of tool radius, feed rates and depths of cut on average surface roughness values [13]
图 2. 刀具半径、进给速度和切削深度对平均表面粗糙度值的影响[13]

2.2. 刀具材料与涂层对粗糙度的影响

2.2.1. 刀具材料对粗糙度的影响

刀具材料对表面粗糙度的影响是金属切削加工领域的一个重要研究课题。不同的刀具材料因其物理和化学特性的差异，会在加工过程中产生不同的切削性能，进而影响加工表面的粗糙度。

硬度和耐磨性较高的刀具材料(如立方氮化硼 CBN 和陶瓷刀具)能够在更高的切削速度下保持锋利，减少刀具磨损，从而获得较好的表面粗糙度。聚晶立方氮化硼(PCBN)是一种硬度达到 5000Hv 的刀具材料，其硬度仅次于金刚石，远高于碳化钨和陶瓷刀具。聚晶立方氮化硼(PCBN)是由立方氮化硼(CBN)颗粒和按照一定比例组成的金属粘结剂或陶瓷粘结剂在高温高压条件下烧结而成的，这种材料不仅硬度高，还具有出色的热稳定性和较低的摩擦系数。因此，PCBN 刀具非常适合用于加工硬度较高(45HRC 以上)的材料以及那些难以加工的材料，特别是在黑色金属加工领域得到了广泛的应用[14]-[18]。李庆华等[19]探讨了 PCBN 刀具在硬车削 T10 钢材料时，切削速度和进给量对工件表面粗糙度的作用，并据此调整切削参数以优化表面光洁度。研究表明，PCBN 刀具在高切削速度和适中进给量的条件下，能够获得较低的表面粗糙度，这与其优异的硬度和耐磨性密切相关。此外，苏君等[20]通过实验分析，使用聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具以车代磨加工 20CrMnTi 合金钢的切削性能。研究结果表明，PCBN 刀具在该合金钢的精密切削加工中表现出优异的耐磨性和表面加工质量。此外，进给量和切削速度被确认为是影响刀具磨损和工件表面粗糙度的关键因素。而 Tian 等[21]探讨了不同含量和粘结剂的 PCBN 刀具在干式切削铁基高温合金 GH2132 时的切削性能。研究发现，含 85%的 CBN 和 Co-W-Al 粘结剂的 CBN200 刀具在切削过程中表现出色。然而，每当切削速度增加 50 m/min 时，刀具寿命大约减半。更重要的是，当刀具磨损值达到约 0.25 mm 时，加工表面粗糙度开始显著增加，如图 3 所示。

Zhao 等[22]针对镍基高温合金 Inconel-718 的切削难题，提出了一种新型纳米孪晶立方氮化硼(PCBN)刀具。通过分子动力学模拟，研究了纳米孪晶 PCBN (nt-cBN)与单晶 PCBN (sc-cBN)纳米片的力学性能，并比较了它们在切削简化镍基高温合金模型时的表现。结果显示，纳米孪晶结构显著提高了 cBN 材料的

强度、韧性和刚度。在高速切削中, nt-cBN 刀具表现出更优的耐磨性, 减少了塑性变形、扩散磨损和粘着磨损, 尤其侧面磨损明显降低。作为新型刀具, nt-cBN 在难加工材料中的应用展现出良好的前景。此外, 长春理工大学的张涵[23]研究了三种不同几何参数的微型 nt-cBN 刀具: 锋利的正前角刀具、锋利的负前角刀具和不锋利的圆角刀具。研究表明, 正前角刀具的加工表面质量最高, 负前角刀具次之, 圆角刀具的表面质量最差。

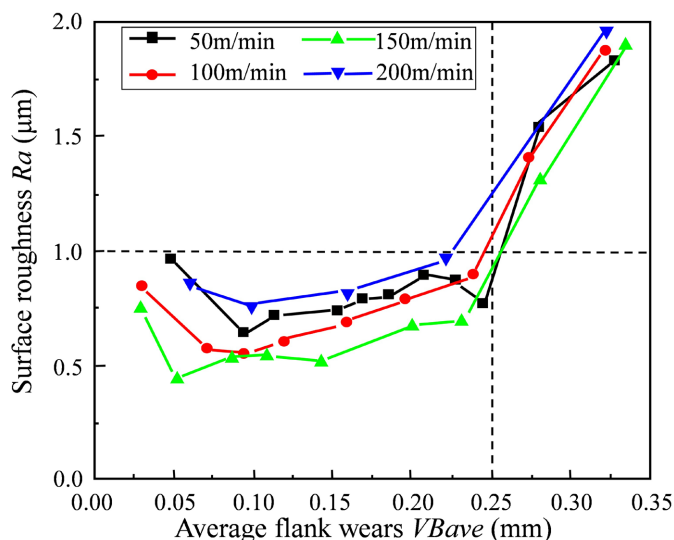


Figure 3. Effects of tool wear value of CBN200 on surface roughness [21]

图 3. CBN200 刀具磨损值对表面粗糙度的影响[21]

热稳定性好的刀具材料(如硬质合金和陶瓷)在高温下仍能保持其硬度和强度, 减少因热量引起的刀具变形, 有助于维持表面粗糙度的一致性。PCD 刀具是指聚晶金刚石(Polycrystalline Diamond)刀具。PCD 是由许多微细的金刚石颗粒通过高温高压工艺结合在一起, 并添加少量金属或非金属粘结剂制成的复合材料。单明依[24]研究探讨了使用 PCD 刀具在不同切削参数下对 TC4 钛合金进行精密车削时, 得到了如图 4 所示对表面粗糙度的影响规律。结果表明, PCD 刀具在适当的切削速度和进给量下, 能够获得较低的表面粗糙度, 这与其高硬度和低摩擦系数有关。Li 等[25]研究对比了常规磨削和放电磨削(EDG)两种方法制造的聚晶金刚石(PCD)刀具在车削钛合金 Ti6Al4V 时的磨损机制、切削性能及表面质量, 分析了残余应力和石墨化对刀具的影响。研究表明, EDG 方法制造的 PCD 刀具在切削钛合金时, 具有更好的表面质量, 这与其制造过程中产生的残余应力和石墨化程度较低有关。此外 Petr 等[26]研究探讨了在干式切削条件下, 使用聚晶金刚石(PCD)刀具切削钛合金 Ti6Al4V 时, 不同高压冷却(HPC)模式和强度对刀具磨损、切削力、切屑形态和加工表面粗糙度的影响, 结果表明适当的 HPC 模式和强度能显著降低刀具磨损、提高加工效率和表面质量, 其中 HPC 强度在 60 bar 时最为合适。

化学稳定性高的刀具材料不易与工件材料发生化学反应, 减少积屑瘤(BUE)的形成, 这些积屑瘤是造成表面粗糙度增加的常见原因。立方氮化硼(CBN)的化学惰性大, 与铁系材料在 1200~1300℃时也不起化学反应。它是用与金刚石制造方法相似的方法合成的, 热稳定性极好, 在大气中加热至 10000℃也不发生氧化, 对于黑色金属具有极为稳定的化学性能, 广泛用于钢铁制品的加工[27] [28]。高世龙等[29]探讨了在无冷却液的环境下, 使用立方氮化硼(CBN)刀具车削经过淬火的 Cr12MoV 钢时, 切削速度、进给量和切削深度这三个关键切削参数如何影响工件的表面粗糙度。通过应用响应曲面法(RSM)构建了一个预测模型, 用以估算表面粗糙度。研究发现, 切削速度对表面粗糙度的影响最为显著, 其次是进给量, 而切

削深度的影响相对较小。该预测模型显示出较高的预测精度,平均误差率低于9.7%。这表明在实际加工过程中,应优先控制切削速度和进给量,以获得较好的表面粗糙度。

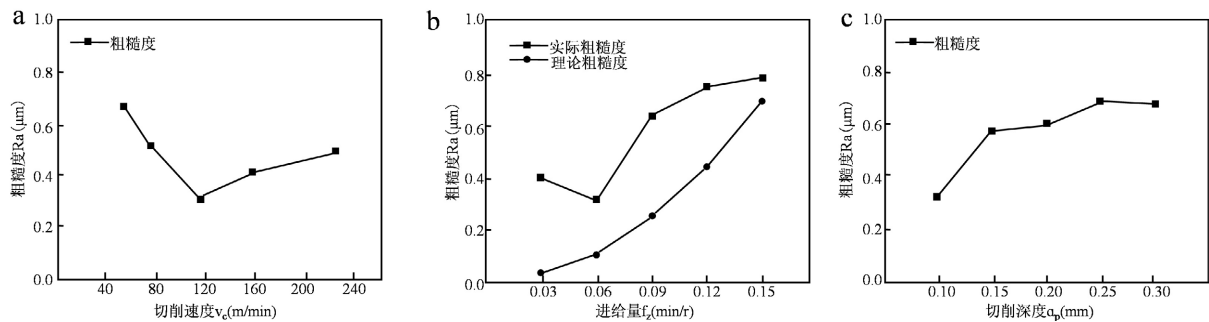


Figure 4. (a) Surface roughness changes with cutting speed; (b) Surface roughness changes with feed rate; (c) Surface roughness changes with cutting depth [24]

图 4. (a) 表面粗糙度随切削速度的变化; (b) 表面粗糙度随进给量的变化; (c) 表面粗糙度随切削深度的变化[24]

2.2.2. 刀具涂层技术对粗糙度的影响

刀具涂层是在强度和韧性较好的硬质合金或高速钢刀具表面(也可涂覆陶瓷、金刚石和立方氮化硼等超硬材料),利用气相沉积法涂覆一层耐磨性好的难熔金属或非金属化合物[30]。

刀具涂层技术通过降低摩擦系数、提高耐磨性、增强化学惰性、提升热稳定性、增强抗粘结能力、提高表面硬度、减少刀具磨损以及改善润滑性等多种方式显著影响加工表面粗糙度[31]-[33]。这些特性共同作用,减少刀具与工件之间的直接接触,降低摩擦和热量产生,保持切削刃锋利,减少化学反应和材料转移,维持切削过程中的精度,保持切削刃清洁,延长刀具使用寿命,并减少因刀具磨损导致的表面粗糙度增加,从而在加工硬质材料时获得更光滑的表面。

涂层刀具可以分为硬质涂层刀具和软质涂层刀具两大类。硬质涂层刀具主要包括碳化钛(TiC)、氮化钛(TiN)和碳氮化钛(TiCN)等材料,这些材料以其高硬度、优异的高温稳定性和出色的耐磨性而著称。尽管软涂层具有出色的减摩性能,但它们的缺点同样明显,主要由于其较低的剪切强度、硬度和耐磨性,这些特性导致软涂层在实际应用中的持久性不足,如图5所示,以减摩和抗摩为目标,孙鸿洋[34]研究了具有高硬度、低摩擦系数、高耐磨性的软硬复合涂层刀具。

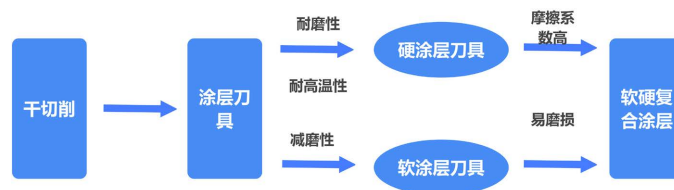


Figure 5. Characteristics of different coatings [34]

图 5. 不同涂层特点[34]

在研究刀具涂层和切削参数对加工性能的影响时,多项研究提供了有价值的见解。Suresh 等[35]的研究表明,在干式切削条件下使用 PVD 涂层(TiCN)陶瓷刀具车削硬化 AISI H13 钢(55 HRC)时,切削速度对刀具磨损的影响最大,而进给量对表面粗糙度的影响最显著。通过响应面方法(RSM)建立了数学模型来进行分析。另一方面,Debin 等[36]分析了不同涂层硬质合金刀具在高速铣削压实石墨铸铁(CGI)时的磨损行为和表面粗糙度,发现 TiAlN/TiN 涂层刀具在切削力、刀具磨损和表面粗糙度方面表现最佳。相比于其他涂层刀具, TiAlN/TiN 涂层刀具显著延长了刀具寿命并改善了加工表面粗糙度。

此外, L 等人[37]研究了不同涂层刀具在加工 AISI 52100 轴承钢时的性能, 发现 PVD-TiAlN 涂层刀具具有较低的磨损、高硬度和良好的表面光洁度。通过田口 - 灰色关联分析法, 他们优化了切削参数, 以减少切削力和表面粗糙度。同时, Badiger 等[38]探讨了铝和铁涂层工具在加工 MDN431 合金时对刀具磨损、切削力和表面粗糙度的影响。使用全因子实验设计、回归分析、人工神经网络和粒子群优化技术进行了多目标优化。确定了 AlCN/AlC 涂层工具在 $V_c = 75 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.062 \text{ mm/rev}$ 、 $a_p = 0.3 \text{ mm}$ 和 FeCrN 涂层工具在 $V_c = 118 \text{ m/min}$ 、 $f = 0.062 \text{ mm/rev}$ 、 $a_p = 0.2 \text{ mm}$ 时的最优工艺参数, 以最小化切削力和表面粗糙度。

通过这些研究, 可以看出不同涂层类型和切削参数的组合对加工性能有显著的影响。这些结果为选择合适的刀具涂层和优化切削参数提供了重要的指导。

吴振宇等[39]研究了深冷处理、微喷砂处理以及两者结合对 TiAlSiN 涂层硬质合金刀具表面完整性和切削性能的影响。研究发现, 深冷处理与微喷砂处理结合使用时, 刀具的表面粗糙度、硬度和残余应力都得到了显著改善。这种处理方法不仅能有效降低切削时的力和温度, 还能延长刀具的使用寿命, 提高其耐磨性, 并减少前刀面的月牙洼磨损以及后刀面的崩刃和磨粒磨损。

另一方面, 史建猛等[40]研究了超精细抛光处理(MST)对硬质合金铣刀耐磨性能的影响。研究表明, 在离子镀 TiAlN 涂层后进行 MST, 能够显著降低表面粗糙度并提高耐磨性。具体而言, 在 D16R3 硬质合金铣刀上进行 MST 后, 其在加工 Ti6Al4V 钛合金时的后刀面最大磨损量比未进行 MST 的原刀降低了约 44.6%, 显示出耐磨性能的显著提升。然而, 若先进行 MST 再进行离子镀 TiAlN 涂层, 则会降低涂层的结合强度, 导致耐磨性下降。例如, XF200 硬质合金铣刀在加工 30CrMnSiA 高强度钢后, 其后刀面最大磨损量比未经 MST 的原刀增大了 109.8%, 耐磨性能显著下降。这些研究结果表明, 超精细抛光处理对硬质合金刀具耐磨性能的影响与其工艺顺序密切相关。在制备涂层后进行 MST 能够有效提高刀具的耐磨性能, 因为这会降低表面粗糙度, 从而减小切削阻力。相反, 若在制备涂层前进行 MST, 则会降低涂层的结合强度, 进而损害涂层对刀具的保护作用, 使刀具耐磨性能降低。因此, 正确的工艺顺序是保证刀具性能的关键。

3. 结语

本研究系统地分析了刀具设计参数对机械加工表面粗糙度的影响, 为制造领域提供了重要见解。首先强调了表面粗糙度对产品性能、寿命和外观质量等方面的直接影响。通过详细解释表面粗糙度的定义和测量方法, 本研究为读者提供了清晰的理论基础。进一步深入探讨了表面粗糙度对产品性能的具体影响, 包括疲劳强度、耐磨性、抗腐蚀性和密封性能等方面。

在文献回顾部分, 本研究总结了关于刀具设计参数对表面粗糙度影响的研究进展, 详细分析了刀具的几何参数对表面粗糙度的影响, 揭示了这些参数通过影响切削力、热量产生和切削液流动等方式来改变表面粗糙度。此外, 还探讨了不同刀具材料(如高速钢、硬质合金、陶瓷等)和涂层技术(如 TiN、Al₂O₃、TiAlN 等)对刀具性能和表面粗糙度的影响。通过比较不同材料和涂层的刀具在相同加工条件下的表现, 本研究揭示了这些因素通过提高刀具的耐磨性、抗热性和化学稳定性来降低表面粗糙度。

研究表明, 通过合理选择刀具材料和涂层, 以及优化刀具的几何参数, 可以显著改善加工表面的粗糙度, 提高产品的质量和市场竞争力。这对于制造业具有重要的实际意义, 尤其是在高精度和高质量要求的领域, 如航空航天、汽车制造和精密仪器等。

最后, 建议继续探索新型刀具材料和涂层技术, 以及它们与加工参数的最佳组合, 以实现更高精度和更高质量的机械加工。这不仅能够提高生产效率、降低成本, 还能够推动制造业的技术进步和创新发展。

参考文献

- [1] 王素玉, 赵军, 艾兴, 等. 高速切削表面粗糙度理论研究综述[J]. 机械工程师, 2004(10): 3-6.
- [2] 彭展. 论表面粗糙度对零件使用性能的影响[J]. 时代农机, 2015, 42(4): 36-37.
- [3] 文海鹏. 浅谈表面粗糙度对零件性能的影响[J]. 现代机械, 2017(2): 56-58.
- [4] Byrne, G., Dornfeld, D. and Denkena, B. (2003) Advancing Cutting Technology. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **52**, 483-507. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60200-5](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60200-5)
- [5] Özel, T., Hsu, T. and Zeren, E. (2004) Effects of Cutting Edge Geometry, Workpiece Hardness, Feed Rate and Cutting Speed on Surface Roughness and Forces in Finish Turning of Hardened AISI H13 Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **25**, 262-269. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1878-5>
- [6] Davim, J.P. and Figueira, L. (2007) Machinability Evaluation in Hard Turning of Cold Work Tool Steel (D2) with Ceramic Tools Using Statistical Techniques. *Materials & Design*, **28**, 1186-1191. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.011>
- [7] Tönshoff, H.K., Arendt, C. and Amor, R.B. (2000) Cutting of Hardened Steel. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, **49**, 547-566. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63455-6](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63455-6)
- [8] 谭靓, 张定华, 姚倡锋, 等. 刀具几何参数对钛合金铣削力和表面完整性的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 737-742.
- [9] 韩金华. 刀具几何参数对表面粗糙度的影响及试验[J]. 装备制造技术, 2015(4): 187-189.
- [10] Jiang, J., Sun, L., Ma, H. and Liu, S. (2023) Influence Mechanisms of Tool Geometry Parameters on Surface Quality and Subsurface Damage in Polycrystalline NiFeCr Superalloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **127**, 3637-3653. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11730-5>
- [11] 楚文斌, 林大钧, 陈浩, 等. 刀具参数对加工表面粗糙度影响的研究[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 52-56.
- [12] Chou, Y.K. and Song, H. (2004) Tool Nose Radius Effects on Finish Hard Turning. *Journal of Materials Processing Technology*, **148**, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.029>
- [13] Gökkaya, H. and Nalbant, M. (2007) The Effects of Cutting Tool Geometry and Processing Parameters on the Surface Roughness of AISI 1030 Steel. *Materials & Design*, **28**, 717-721. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.09.013>
- [14] 李麟, 黄楠. PCBN 刀具的应用及发展展望[J]. 中原工学院学报, 2022, 33(4): 17-21.
- [15] Pu, Z. and Singh, A. (2013) High Speed Ball Nose End Milling of Hardened AISI A2 Tool Steel with PCBN and Coated Carbide Tools. *Journal of Manufacturing Processes*, **15**, 467-473. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.05.005>
- [16] Patel, V.D. and Gandhi, A.H. (2016) Analytical and Empirical Modeling of Wear and Forces of CBN Tool in Hard Turning—A Review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, **98**, 507-513. <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0310-5>
- [17] Sobiyi, K. and Sigalas, I. (2016) High-Speed Machining of Martensitic Stainless Steel Using PcBN. *Journal of Superhard Materials*, **38**, 34-39. <https://doi.org/10.3103/s1063457616010056>
- [18] 胡恺星. 表面微织构 PCBN 刀具干式车削钛合金的切削性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春大学, 2020.
- [19] 李庆华, 潘晨. PCBN 刀具硬车削 T10 钢工件表面质量研究[J]. 长春大学学报, 2017, 27(6): 1-3+7.
- [20] 苏君, 冯佩佩. PCBN 刀具以车代磨加工 20CrMnTi 合金钢试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 154-157+163.
- [21] Tian, X., Gong, S., Zhou, Q., Wang, D., Wang, Q., Li, L., et al. (2025) Performance of PCBN Tools in Dry Cutting Iron-Based Superalloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, **128**, Article ID: 106986. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106986>
- [22] Hao, Z., Zhang, H. and Fan, Y. (2023) Cutting Performance of the Nanotwinned CBN Tool in Nano-Cutting of Ni-Cr-Fe Alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, **95**, 521-534. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.043>
- [23] 张涵. 纳米孪晶 cBN 刀具切削性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- [24] 单明依, 黄树涛, 于晓琳, 等. PCD 刀具精密车削 TC4 钛合金的实验研究[J]. 工具技术, 2024, 58(9): 25-30.
- [25] Li, G., Rahim, M.Z., Ding, S. and Sun, S. (2015) Performance and Wear Analysis of Polycrystalline Diamond (PCD) Tools Manufactured with Different Methods in Turning Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **85**, 825-841. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7949-6>
- [26] Petr, M., Jan, M., Pavel, Z., et al. (2022) Turning of Titanium Alloy with PCD Tool and High-Pressure Cooling. *Journal of Manufacturing Processes*, **84**, 871-885.
- [27] 陈俊云, 靳田野, 鹿玲. CBN 刀具材料的发展及其切削性能研究进展[J]. 制造技术与机床, 2015(3): 33-39.

- [28] de Godoy, V.A.A. and Diniz, A.E. (2011) Turning of Interrupted and Continuous Hardened Steel Surfaces Using Ceramic and CBN Cutting Tools. *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 1014-1025. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.002>
- [29] 高世龙, 安立宝, 李晨辉, 等. CBN 刀具车削淬硬钢表面粗糙度的试验与预测[J]. 现代制造工程, 2015(10): 102-105+87.
- [30] 范其香, 林静, 王铁钢. 刀具涂层材料的最新研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 1-19+28.
- [31] 刘永龙, 石海川, 黄金成, 等. 刀具涂层技术研究现状和发展趋势[J]. 工具技术, 2024, 58(6): 12-27.
- [32] Henderer, W. and Xu, F. (2013) Hybrid TiSiN, CrC/C PVD Coatings Applied to Cutting Tools. *Surface and Coatings Technology*, **215**, 381-385. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.092>
- [33] 王启民, 黄健, 王成勇, 等. 高速切削刀具物理气相沉积涂层研究进展[J]. 航空制造技术, 2013(14): 78-83.
- [34] 孙鸿洋. WS2/Cr-AlCrSiN 软硬复合涂层刀具的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [35] Suresh, R. and Basavarajappa, S. (2014) Effect of Process Parameters on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of Hardened Steel with Coated Ceramic Tool. *Procedia Materials Science*, **5**, 1450-1459. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.464>
- [36] Lai, D., Ma, J., Liao, X., Ji, Q. and Lin, Y. (2024) Wear Behavior and Surface Roughness Analysis of Carbide Tools with Varying Coating for High-Speed Milling of Compacted Graphite Cast Iron. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **38**, 3667-3681. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0639-2>
- [37] Bhandarkar, L.R., Behera, M., Mohanty, P.P. and Sarangi, S.K. (2021) Experimental Investigation and Multi-Objective Optimization of Process Parameters during Machining of AISI 52100 Using High Performance Coated Tools. *Measurement*, **172**, Article ID: 108842. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108842>
- [38] Badiger, P.V., Desai, V., Ramesh, M.R., Prajwala, B.K. and Raveendra, K. (2018) Effect of Cutting Parameters on Tool Wear, Cutting Force and Surface Roughness in Machining of MDN431 Alloy Using Al and Fe Coated Tools. *Materials Research Express*, **6**, Article ID: 016401. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae2a3>
- [39] 吴振宇, 郑光明, 颜培, 等. 表面处理对 TiAlSiN 涂层刀具表面完整性及切削性能的影响研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(1): 75-83.
- [40] 史建猛, 董卫萍, 成书民, 等. 超精细抛光处理对硬质合金铣刀耐磨性能的影响[J]. 机械工程材料, 2022, 46(7): 16-22.