

# 机械加工零件表面质量检测方法及影响因素分析

莫卫江 苏江平

西安法士特汽车传动有限公司 陕西 西安 710077

**摘要:** 机械加工零件的表面质量是衡量产品性能与寿命的重要指标,其检测方法的科学性和影响因素的识别准确性直接关系到零件的使用可靠性与制造成本。随着制造业对零件性能要求的不断提高,表面质量检测已从单一粗糙度测量向多维度综合表征发展。本文系统阐述机械加工零件表面质量的内涵与评价维度,梳理接触式轮廓测量、光学非接触测量及表面完整性分析等主流检测方法的技术原理、适用条件与选择策略。在此基础上,从加工工艺参数、刀具几何参数、切削液应用、振动因素及工件材料特性等方面深入分析表面质量的影响机制,并探讨检测方法与影响因素之间的逻辑关联。研究表明,科学的表面质量管控需要建立在检测方法精准选型与影响因素的定向归因基础之上,二者之间的系统性匹配是提升零件表面质量的关键。

**关键词:** 机械加工;表面质量;检测方法;表面粗糙度;影响因素

## 引言

机械加工零件的表面质量直接决定其耐磨性、疲劳强度及密封性等关键性能,是衡量加工水平的核心指标。随着制造业向高精度、高可靠性发展,表面质量控制已广泛应用于航空、汽车及医疗器械等领域。即便尺寸精度达标,表面缺陷仍可能导致早期失效。表面质量的形成源于刀具与工件的复杂相互作用,涉及切削变形、摩擦及热力耦合等物理现象,受工艺参数、机床、刀具及夹具等多环节影响。因此,准确检测并分析影响因素对优化工艺至关重要。然而,实际生产中常面临检测困惑:如何选取最能反映真实状态的检测方法?除粗糙度外还需关注哪些指标?不同方法结果差异的原因何在?以及如何定量评估关键影响因素?这些问题亟待解决,以提升产品良率与可靠性。

## 1 机械加工零件表面质量的内涵与评价维度

### 1.1 表面质量的概念界定

机械加工零件的表面质量是一个综合性的技术概念,它包含了几何特征和物理力学特征两个层面的内容。从几何层面来看,表面质量主要表现为加工表面的微观几何形状误差,即表面粗糙度(微观不平度)和表面波纹度(介于粗糙度与形状误差之间的周期性起伏)。从物理力学层面来看,表面质量还包括加工表面因切削热和塑性变形而引起的表层材料性能变化,如加工硬化程度、残余应力分布、显微组织变化及微观裂纹等。两个层面相互关联,共同决定零件的表面服役性能。

### 1.2 表面质量的评价指标体系

表面质量的评价已从单一的粗糙度参数扩展到多维

指标体系。粗糙度参数是最基本的评价依据,常用的有:轮廓算术平均偏差 $R_a$ (最常用)、轮廓最大高度 $R_z$ (反映尖峰谷底)、轮廓单元平均宽度 $R_{Sm}$ (反映间距特征)等。不同参数从不同侧面描述表面微观形貌,应根据零件的功能要求选择合适的评价参数。表面波纹度反映加工过程中因振动、刀具进给不均匀等引起的周期性起伏,对于高速运转的精密配合面尤为重要<sup>[1]</sup>。表面层物理力学性能包括加工硬化层深度和硬度梯度、残余应力的性质与分布,这些指标直接影响零件的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力。此外,表面的微观缺陷(如微裂纹、折叠、划痕)也是表面质量评价的重要内容。

### 1.3 表面质量对零件使用性能的影响机理

表面质量对零件使用性能的影响是多方面的。影响耐磨性——表面粗糙度越大,实际接触面积越小,接触应力集中,初期磨损加剧;但过于光滑的表面不利于润滑油膜的附着和保持,在边界润滑条件下反而可能增加摩擦系数。影响疲劳强度——表面粗糙的谷底和微观裂纹处产生应力集中,成为疲劳裂纹萌生的源头,加工硬化层和残余压应力则有助于提高疲劳抗力。影响耐腐蚀性——粗糙表面的凹谷容易积聚腐蚀介质,加速腐蚀进程;表面残余拉应力则会诱发应力腐蚀开裂。影响配合精度和密封性——表面粗糙度直接影响过盈配合的实际过盈量和间隙配合的定位精度,对密封面的泄漏率也有显著影响。

## 2 表面质量的主要检测方法及适用性分析

### 2.1 接触式轮廓测量法

接触式轮廓测量是目前应用最广泛的表面粗糙度检测方法,其代表性仪器是触针式轮廓仪。其测量原理

是：一个具有尖锐金刚石触针的传感器在驱动箱的带动下，以恒定速度沿被测表面横向移动，触针随表面微观起伏上下运动，其位移信号经传感器转换为电信号，经过放大、滤波和数字化处理后，按标准算法计算粗糙度参数。接触式轮廓测量法的优势在于：测量结果符合国际标准，具有良好的可溯源性和可比性；能够获取完整的表面轮廓数据，可计算多种粗糙度和波纹度参数；适用于大多数金属加工表面，不受表面颜色和光泽的影响<sup>[2]</sup>。其主要局限性为：触针的物理接触可能划伤软质或已加工的精密表面；触针半径（通常为2~5微米）限制了其对微细沟槽和尖锐谷底的完全复现；测量速度较慢，不适合在线检测；对测量人员的技术要求较高，测针的安放和测量方向选择影响结果。

## 2.2 光学非接触测量法

光学非接触测量凭借快速、无损及高分辨率优势，在精密加工表面检测中至关重要。主流方法包括：激光共聚焦显微镜利用共焦原理逐点扫描重建三维形貌，精度媲美触针式且对软质材料友好，适用于 $Ra < 2\mu m$ 的低粗糙度表面，但对倾斜和反射率敏感；白光干涉法基于干涉相位变化实现纳米级纵向分辨率，适合 $Ra < 0.05\mu m$ 的超精密表面，速度快但大倾斜或高粗糙度下易失相干；数字全息显微术通过记录物光波振幅和相位信息，兼具横向高分辨与纵向纳米精度，速度极快，适合动态检测；机器视觉法则利用CC图像提取纹理与缺陷，支持100%在线全检，虽精度尚难替代轮廓仪进行精确粗糙度定量评定，但在缺陷识别和一致性比对中表现优异。

## 2.3 表面完整性检测方法

表面完整性检测关注的是加工表面层材料的物理力学状态，主要方法包括：X射线衍射法测量表层残余应力，通过检测晶面间距的变化推算残余应力值，是无损检测的首选方法，但设备昂贵、测量速度较慢。显微硬度法通过测量沿深度方向的硬度分布来确定加工硬化层的深度和程度，采用显微维氏或努氏硬度计，在抛光后的截面上进行梯度测量。金相观察法用于检测表层的显微组织变化（如相变、过热组织、微裂纹），需对试样进行切割、镶嵌、抛光和腐蚀处理，属于破坏性检测，通常在工艺研发阶段使用。

## 2.4 检测方法的比较与选择策略

面对多种检测方法，如何合理选择是实际工作中的核心问题。选择依据应遵循以下逻辑顺序：首先明确检测目的——是工艺研发阶段的全面评价还是生产现场的快速抽检，是评定粗糙度还是分析表面完整性；其次考虑被测表面的特征——粗糙度范围、材料硬度、表面形

状（平面、曲面、内孔）、表面反光特性等；再次权衡检测效率和成本——在线检测优先考虑机器视觉或便携式粗糙度仪，精密评定首选轮廓仪或共聚焦显微镜；最后确保标准的可追溯性，使检测结果能够对照相应标准进行合格性判定。实践中，推荐采用“光学筛选+触针确认”的组合策略——用非接触光学方法进行快速大范围初筛，发现可疑区域后采用接触式测量进行精确定量。

## 3 机械加工表面质量的主要影响因素及作用机制

### 3.1 切削参数的影响

切削参数（切削速度 $v$ 、进给量 $f$ 、切削深度 $a_p$ ）是影响表面质量最直接、最显著的因素。切削速度对表面粗糙度的影响呈非线性特征。在低速切削时，容易产生积屑瘤，导致表面粗糙度增大；随着切削速度提高，切削温度上升，积屑瘤消失，表面粗糙度趋于降低；但在高速切削时，若机床刚度不足或刀具磨损加剧，反而可能引起颤振而使表面质量恶化。对残余应力的影响同样显著——低速时以冷塑性变形为主，表面产生压应力；高速时热效应占主导，表面可能产生拉应力。进给量是影响理论粗糙度的首要因素<sup>[3]</sup>。增大进给量使残留面积增大，理论粗糙度升高，这是几何层面的基本规律。在实际切削中，进给量还通过影响切削厚度和切削力来影响表面层的塑性变形程度。切削深度对表面粗糙度的直接影响较小，但其通过影响切削力、切削温度和刀具磨损间接影响表面质量。过大的切削深度导致切削力增大，系统变形和振动加剧，恶化表面质量；同时切削温度升高，热损伤风险增加。

### 3.2 刀具几何参数的影响

刀具几何参数决定了切削刃与工件材料的接触条件，对表面质量具有系统性影响。前角增大时，切削变形减小、切削力降低，有利于获得较光洁的表面，但前角过大会削弱切削刃强度，在加工硬脆材料时可能引起崩刃反而恶化表面。后角影响刀具后刀面与已加工表面的摩擦状况，合理增大的后角可减小摩擦、降低表面粗糙度，但过大会降低刃口强度。刀尖圆弧半径的影响尤为显著——增大圆弧半径可减小理论粗糙度（残留面积高度）并提高刀具的切入稳定性，但同时增大了径向切削力，对薄壁零件加工可能引起变形。修光刀的设计可在不减小进给量的前提下显著降低粗糙度，是高效精密加工的有效手段。

### 3.3 切削液的影响

切削液的作用主要体现在冷却、润滑和清洗三个方面。在表面质量控制方面，切削液通过降低切削区温度来减少热损伤和热膨胀变形，通过改善刀-屑界面摩

擦来减少积屑瘤和鳞刺的形成,通过冲洗作用清除切屑和磨粒以减轻二次划伤。不同类型切削液的效用有所区别:乳化液以冷却为主,适用于高速切削;切削油以润滑为主,适用于低速重切削和精密加工;极压切削液含有硫、氯等添加剂,在高温下形成润滑膜,对难加工材料的表面质量改善尤为有效<sup>[4]</sup>。切削液的使用方式(浇注、高压喷射、微量润滑)也影响其效果,高压喷射可有效突破蒸汽屏障,将冷却液送达切削区。

### 3.4 加工系统振动的影响

加工系统(机床—夹具—刀具—工件)的振动是恶化表面质量的重要干扰源。强迫振动(由机床旋转部件的不平衡、断续切削等引起)会在加工表面留下与振动频率相关的周期性波纹,破坏表面的均匀性。自激振动(颤振)则更为有害,它不仅使表面粗糙度急剧增大,还可能造成刀具崩损和机床损坏。颤振的发生与切削宽度、切削深度、刀具悬伸长度及系统刚度等参数密切相关。控制振动对表面质量的影响,应从提高系统刚度、合理选择切削参数(避开颤振临界区域)、采用减振刀具和优化工艺路线等方向入手。

### 3.5 工件材料特性

工件材料的硬度、韧性、导热性及微观组织等特性对表面质量的形成有基础性影响。塑性好的材料(如铝合金、低碳钢)在切削时容易产生粘刀和积屑瘤,表面粗糙度不易降低,需要采取润滑措施和合适的速度避开积屑瘤区间。硬脆材料(如淬硬钢、陶瓷)的切削以脆性断裂方式去除材料,易在表面留下微裂纹和破碎坑,需要采用负前角刀具和适当的切削参数以控制裂纹扩展。导热性差的材料(如钛合金、不锈钢)切削热不易传导,高温集中在表层,容易造成热损伤和残余拉应力,需要采用较小切削深度和充足的冷却。

## 4 检测方法与影响因素的逻辑关联

表面质量检测与影响因素分析并非孤立存在,而是通过“测量—诊断—调整”的闭环控制紧密耦合。检测的核心目的在于通过数据反向推断成因,其关键在于检

测方法选择与因素归因的精准匹配。具体而言,若Ra值偏高且伴随等间距尖峰,通常由进给量偏大或刀尖圆弧半径过小引起;若Ra偏高但呈现不规则撕裂粘附,则多源于刀具磨损或切削速度偏低导致的积屑瘤,需借助电镜辅助确认。当粗糙度合格却出现早期失效时,隐患往往在于残余应力或加工硬化异常,必须采用X射线衍射或显微硬度等完整性检测手段,仅靠轮廓仪无法排查。此外,单向周期性波纹需结合振动频谱分析以锁定主轴或进给系统源头。综上,检测方法应服务于因素分析需求。只有深入理解切削速度、进给量、刀具状态及振动等因素的作用机制,才能从数据中提取有效信息。脱离因素分析的检测是“有数无识”,而缺乏数据验证的因素推断则是“有识无数”。二者有机结合,构成了机械加工表面质量科学管控的底层逻辑。

### 结束语

机械零件表面质量涵盖几何形貌与物理力学性能,贯穿加工全过程。本文梳理了接触式、光学非接触及表面完整性检测三类方法,分析了切削参数、刀具、切削液、振动及材料等关键影响因素及其作用机制。核心观点在于:科学管控需兼顾检测(解决“是什么”)与机理分析(解决“为什么”),二者系统性匹配是实现质量持续改善的方法论基础。未来,随着智能制造与在线检测技术的发展,表面质量检测将迈向产线化、在线全检与定量预测,推动控制水平显著提升。

### 参考文献

- [1]杨晓京,李勇,王磊.机械加工表面粗糙度检测方法比对与精度分析[J].机械工程学报,2022,58(8):212-220.
- [2]赵宏伟,陈思,刘洋.光学非接触测量技术在精密加工表面检测中的应用[J].光学精密工程,2023,31(6):845-854.
- [3]刘战强,张华,李明.切削参数对加工表面完整性的影响机制研究综述[J].中国机械工程,2024,35(3):312-322.
- [4]王西彬,孙涛,周明.刀具几何参数对表面质量影响的实验与理论分析[J].工具技术,2023,57(9):3-10.