

不锈钢材料变形机理及切削参数优化研究

李永杰¹, 杨帆², 王丽¹, 郝伟伟¹, 朱亮¹, 黄家旺¹

¹西安西材三川智能制造有限公司, 陕西 西安

²湖南江麓机电集团有限公司, 湖南 湘潭

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月24日

摘要

本文聚焦不锈钢材料, 深入研究其变形机理及切削参数优化方法。分析了切削过程中塑性变形、切削热、残余应力和刀具几何参数变化导致的变形情况, 明确材料特性、切削参数和刀具几何参数是影响变形的主要因素, 工件结构与装夹方式、切削液、机床精度与稳定性为次要因素。提出优化切削参数、合理选择刀具、改进加工工艺等主要措施, 以及优化工件结构与装夹方式、合理使用切削液、保证机床精度与稳定性等次要措施。研究成果对提高不锈钢加工质量与效率具有重要的理论和工程应用价值。

关键词

不锈钢材料, 变形机理, 切削参数优化

Research on Deformation Mechanism and Optimization of Cutting Parameters of Stainless Steel Materials

Yongjie Li¹, Fan Yang², Li Wang¹, Weiwei Hao¹, Liang Zhu¹, Jiawang Huang¹

¹Xi'an Xicai Sanchuan Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Hunan Jianglu Electromechanical Group Co., Ltd., Xiangtan Hunan

Received: May 24th, 2025; accepted: Jun. 16th 2025; published: Jun. 24th, 2025

Abstract

This paper focuses on stainless steel materials and delves into their deformation mechanisms as well as paths for optimizing cutting parameters. It analyzes deformation conditions caused by plastic deformation, cutting heat, residual stress, and changes in tool geometry during the cutting process. It identifies that material properties, cutting parameters, and tool geometry are the main

文章引用: 李永杰, 杨帆, 王丽, 郝伟伟, 朱亮, 黄家旺. 不锈钢材料变形机理及切削参数优化研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(3): 337-342. DOI: 10.12677/met.2025.143032

factors influencing deformation, while workpiece structure and clamping method, cutting fluid, and machine tool precision and stability are secondary factors. Primary measures proposed include optimizing cutting parameters, selecting appropriate tools, and improving processing techniques, along with secondary measures such as optimizing workpiece structure and clamping methods, using cutting fluids effectively, and ensuring machine tool precision and stability. The research findings hold significant theoretical and practical value for improving the quality and efficiency of stainless steel materials.

Keywords

Stainless Steel Materials, Deformation Mechanism, Cutting Parameter Optimization

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

不锈钢是一类重要的工程材料,具有良好的耐腐蚀性能和优异的综合性能,被广泛应用于航空航天、石化、医疗器械等领域[1]。随着工业技术的进步,对不锈钢零件的加工精度、表面质量提出了越来越高的要求。然而,由于不锈钢材料的高强度、高硬度及低导热特性,切削时极易产生较大的切削力及热,引起材料变形,严重影响其加工精度及表面质量,成为制约不锈钢高效加工及应用的瓶颈。因此,本项目以不锈钢为对象,对其变形机制进行深入研究,探索合理的工艺参数优化路径,对提高不锈钢加工质量与效率,具有重要的理论与工程应用价值。目前,国内外已有许多学者对不锈钢材料进行切削加工方面的研究。在变形机制上,主要从材料的微观结构和力学性能两个方面进行了研究[2];在切削用量优化方面,采用实验设计和数值模拟相结合的方法,研究切削用量对加工质量的影响规律[3]。然而,已有研究尚不能系统地揭示不锈钢材料的变形机制和建立完整的切削工艺优化系统。在此基础上,本项目拟从不锈钢材料变形机理入手,系统研究切削用量对其变形行为的影响规律,提出科学、有效的切削用量优化路径。

2. 不锈钢材料的变形机理分析

2.1. 切削过程中的塑性变形

不锈钢切削加工时,刀具-工件接触部位将发生强烈的塑性变形,因此对其进行有效控制是十分必要的。刀具在切削过程中,由于刀具对工件的挤压、剪切而产生塑性流动[4]。由于奥氏体不锈钢的高加工硬化倾向,其内部位错运动受阻,位错密度持续增加,从而使材料的硬度、强度增加,而塑性降低。这一加工硬化现象不仅增加了切削力,而且对后续切削过程中材料的变形行为也产生了一定的影响。在切削过程中,塑性变形区不断扩大。在刀具前刀面与切屑接触区,由于高温、高压的作用,切屑发生剧烈塑性变形,切屑厚度及形状发生改变。同时,由于刀具的挤压、摩擦等因素,工件表面将发生二次塑性变形,进而影响工件的尺寸精度与表面质量[5]。

2.2. 切削热引起的热变形

由于不锈钢材料导热系数低,切削时产生的大量热量难以快速传递,造成切削区温度急剧上升。切削热主要来自切削层金属的塑性变形功以及刀具-切屑及工具-工件间的摩擦功。高温会改变工件材料

的力学性能,热膨胀系数大,加热后易发生热变形,从而影响加工精度。切削温度分布不均,前刀面与切屑接触区温度最高,其次为后刀面与工件表面接触区;高温使刀具材料硬度降低、耐磨性能降低、刀具磨损速度加快。同时,工件材料在高温条件下会发生相变,进而对材料的力学性能及变形行为产生影响。如奥氏体不锈钢在高温条件下可发生部分马氏体相变,从而提高材料的硬度、强度及变形抗力[6]。

2.3. 残余应力与变形

切削加工结束后,工件内部将存在残余应力。在切削加工过程中,由于材料塑性变形不均匀,热变形不均匀,刀具-工件间产生摩擦,从而产生残余应力。本文将残余应力划分为宏观残余应力、微观残余应力及超微观残余应力三个方面。宏观残余应力对零件整体变形有很大影响,对零件的尺寸精度、形位精度有很大的影响;在此基础上,研究了微残余应力对材料疲劳性能及抗腐蚀性能的影响。不锈钢在切削加工过程中,由于加工硬化与热变形的耦合作用,其残余应力分布比较复杂。如刀具对工件表面的挤压、摩擦,使工件表层产生较大的压应力;在亚表层,由于热变形,可能出现拉应力。在后续加工或服役过程中,由于残余应力的存在,会导致零件变形,影响其稳定性与可靠性[7]。

2.4. 刀具几何参数变化导致的变形

切削加工过程中,刀具几何参数是不断变化的,这种变化对不锈钢材料的变形有不可忽略的影响。切削过程中,由于刀具的磨损,刀具前角的减小使切削力增加,切削温度提高,从而加剧了材料的变形。以奥氏体不锈钢为例,当前角由 15° 增加到 10° 时,切削力增加 $10\%\sim 15\%$,使工件的变形显著增加[7]。刀具后角磨损加剧了后刀面与工件表面之间的摩擦,从而产生更大的热和摩擦,促使材料产生更大的塑性变形。随着磨损时间的增加,刀具钝圆半径逐渐增大,挤压作用加强,改变了材料的应力-应变状态,从而使变形增大。切削过程中,刀具几何参数的动态变化与切削热、切削力等因素交互作用,是不锈钢材料变形过程中必须密切关注的问题,及时调整刀具,实现对材料变形的有效控制,保证加工精度。

3. 影响不锈钢变形的因素

3.1. 主要因素

3.1.1. 材料特性

不锈钢强度高、硬度高,加工硬化倾向明显。例如,抗拉强度超过 520 MPa 的304不锈钢,切削加工硬化效应使切削区硬度提高 $40\%\sim 70\%$,极大地增加了切削力,进而引起工件变形。同时,不锈钢导热系数低,只有碳素钢的 $1/3$,切削过程中产生的热量很难快速散发出来,大量热量聚集在切削区,造成工件局部温升、材料软化、变形加剧。以某汽车零件厂304不锈钢轴类零件为例,由于材料特性,切削温度过高,导致工件弯曲变形 0.3 mm [8]。

3.1.2. 切削参数

切削速度、进给量、切削深度等因素对不锈钢的变形有很大的影响。当切削速度过大时,切削温度急剧升高,材料发生塑性变形;但如果切削速度过小,则易在工件表面形成积屑瘤,影响加工精度及表面质量。当进给量较大时,切削力明显增加,造成工件的振动与变形。研究表明:对1Cr18Ni9Ti不锈钢进行切削时,切深由 $0.5\sim 1.5\text{ mm}$ 可使切削力增加1.8倍左右[8]。在某机械加工车间加工不锈钢法兰时,由于切削参数的设定不合理,造成工件的平整度误差超过 0.2 mm 。

3.1.3. 刀具几何参数

刀具前、后角和主偏角是影响切削力和切削热的主要因素。前角越小,切削力越大,变形越大;过小的后角会加剧刀具和工件间的摩擦,产生大量的热量,使工件发生变形。如某刀具制造厂的试验结果

表明,当刀具前角由 8° 增加到 12° 时,切削力减小15%~20%,使工件的变形量大大降低。主偏角的大小对切削力的方向及大小有重要影响,主偏角越大,切削力越小,轴向切削力越大;对于细长轴系不锈钢零件,如果主偏角选取不当,容易引起工件的弯曲变形[9]。

3.2. 次要因素

3.2.1. 工件的结构和夹持方法

复杂结构的不锈钢零件,如薄壁和深腔件,由于刚性差,容易受到切削力的作用而产生变形。例如,航空航天领域的薄壁不锈钢薄壳零件,其壁厚只有1~2 mm,由于刚性不足,切削时极易出现颤振、变形等问题。另外,夹持方法的不合理也会引起变形。夹紧力太大时,工件将发生弹性变形;夹紧力过小时,工件不能被有效地固定,而且在切削力的作用下也会产生位移与变形。某公司生产的薄壁不锈钢套类零件,由于受力不均,造成工件的圆度误差达0.15 mm。

3.2.2. 切削液

在一定程度上,切削液的润滑、冷却及排屑特性都会影响不锈钢的加工变形。一种好的切削液可以有效地降低切削温度,降低刀具和工件间的摩擦力。但是,如果切削液的选用不合适,或者使用不当,则会影响切削液的使用效果。如切削液润滑性差,切削力增加;冷却效果差,不能及时将切削热量带走,造成工件的热变形。据统计,采用优质的切削液对不锈钢进行切削,可以使切削温度降低20%~30%,变形量降低10%~15%。

3.2.3. 机床的精度和稳定度

机床的加工精度与稳定性是保证加工质量的重要因素。机床导轨的直线度和主轴回转精度的误差将直接影响到切削加工,造成工件的变形。机床长期运行后,如得不到很好的保养与维护,其精度将逐步降低。以某机床为例,经过5年的使用,其主轴误差由0.005 mm增加到0.02 mm,而不锈钢零件的圆柱度误差则显著增加,并出现变形。同时,机床振动对切削加工的稳定性有很大的影响,并加剧了工件的变形[10]。

4. 解决变形问题的措施

4.1. 主要措施

4.1.1. 优化切削参数

采用试验与模拟分析相结合的方法,确定合理的切削用量组合。在不锈钢加工中,可以适当降低切削速度,降低切削热。一般情况下,粗切削速度可控制为60~80 m/min,精加工时为30~50 m/min。同时,减小进给量,减小切削深度,减小切削力。如一家不锈钢零件,进给量由0.3 mm/r减为0.15 mm/r,切削深度由1 mm减至0.5 mm,变形量减少40% [11]。另外,采用变频调速和可变进给等先进的加工方法,可以根据实际情况实时调整切削用量,提高加工精度,减小变形。

4.1.2. 合理选择刀具

根据不锈钢材质特点及加工要求,选用适当的刀具材料及几何参数;刀具的材质主要有硬质合金、陶瓷等,涂层硬质合金可以有效地降低切削力,降低切削温度。对刀具的几何参数而言,增大前角能降低切削力,一般选用 10° ~ 15° ;适当增大后角可以减小刀具和工件之间的摩擦力,后角取8~12。某刀具制造厂研制出一种新型涂层硬质合金刀具,对不锈钢进行切削时,切削力降低25%,变形量降低30%,加工质量明显提高[11]。

4.1.3. 改进加工工艺

为了减小切削力的集中效应,采用了分步切削和对称切削等工艺方法。对于不锈钢薄壁零件,可以采用多层切削,逐步消除余量,减小切削力对工件的冲击。对于具有对称结构的不锈钢零件,采用对称切割方式,使各切削力互相抵消,减小了变形;例如,对称式箱形件,用对称铣削的方法,使工件的变形由原来的 0.25 mm 减至 0.08 mm。另外,为了改善切削条件,降低切削力,降低切削热,降低工件的变形,也可以采用特殊的加工方法如振动切削、超声波切削等。

4.2. 次要措施

4.2.1. 优化工件结构与装夹方式

在设计阶段,充分考虑工件的结构刚性,避免设计过于复杂、刚性差的结构。对于薄壁零件,可通过增加加强筋等方式提高刚性。在装夹方面,采用合理的装夹方式和装夹力,如采用真空吸盘装夹薄壁零件,可避免因装夹力过大导致的变形;使用弹性夹具,可根据工件形状自动调整装夹力,保证装夹的稳定性和可靠性。某企业改进装夹方式后,在加工不锈钢薄壁零件时,工件圆度误差从 0.12 mm 降低到 0.05 mm [12]。

4.2.2. 合理使用切削液

根据不锈钢加工要求,选择合适的切削液,并确保其性能良好。对于不锈钢加工,可选用含有极压添加剂的切削液,提高润滑性能。同时,合理控制切削液的流量和压力,保证切削液能够充分冷却和润滑切削区域。一般来说,切削液流量应控制在 15~30 L/min,压力在 0.3~0.5 MPa。某企业在更换高性能切削液并优化使用参数后,工件表面温度降低了 25℃,变形量减少了 12% [13]。

4.2.3. 保证机床精度与稳定性

定期对机床进行维护和保养,检查和调整机床导轨、主轴等关键部件的精度。通过定期润滑、校准等措施,确保机床的精度和稳定性。对于精度下降的机床,可进行精度修复或升级改造[14]。同时,采取措施减少机床振动,如安装减振垫铁、优化机床布局等。某企业对使用多年的机床进行精度修复和振动优化后,在加工不锈钢零件时,工件圆柱度误差从 0.03 mm 减小到 0.01 mm,有效降低了工件变形。

5. 结论

本文围绕不锈钢材料变形及切削参数优化展开研究,得出以下结论:1) 不锈钢材料变形由多种因素造成,塑性变形、切削热、残余应力和刀具几何参数变化均会引发变形,其中材料特性、切削参数和刀具几何参数影响较大,是主要因素。2) 这些变形影响因素对不锈钢加工精度和表面质量产生负面作用,制约了不锈钢的高效加工及应用。3) 针对变形问题,可采取优化切削参数、合理选择刀具、改进加工工艺等主要措施,以及优化工件结构与装夹方式、合理使用切削液、保证机床精度与稳定性等次要措施来解决。4) 通过对不锈钢变形机理的研究和优化措施的实施,能够有效提高不锈钢加工质量与效率,为不锈钢在各领域的广泛应用提供有力支持。

参考文献

- [1] 郭锐,孙馥,陈永恒. 不锈钢薄壁零件的车削加工工艺研究[J]. 装备制造技术, 2023(2): 283-286.
- [2] 秦斌,何云,龙顺建,等. 不同几何结构对硬质合金立铣刀加工 316L 不锈钢性能的影响[J]. 硬质合金, 2024, 41(3): 206-212.
- [3] 韩军,李贞杰. 不锈钢薄壁套零件加工车刀几何参数优化[J]. 制造技术与机床, 2023(7): 150-155.
- [4] 李多,赵宽,周鹏,等. 304LN 不锈钢材料加工特性研究[J]. 机械制造, 2023, 61(7): 26-28.

- [5] 周德华. 浅谈不锈钢的机械切削加工[J]. 世界制造技术与装备市场, 2022(6): 95-97.
- [6] 赵宏伟. 车削不锈钢零件的工艺分析与加工方法[J]. 产业创新研究, 2019, 50(15): 106.
- [7] 张鹏飞. 304 不锈钢铣削残余应力预测研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [8] 高可. 高速铣削沉淀硬化不锈钢的切削特性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [9] 姚新. 负倒棱刀具切削不锈钢温度建模与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2023.
- [10] 邹佳旭. 切削双目不锈钢 S32760 粘性效应研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [11] 吴张欣. CVD/PVD 涂层铣削刀片加工 2Cr13 不锈钢实验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2023.
- [12] 张兴海. 加工工艺对 S32101 双目不锈钢组织及性能的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [13] 喻林. 含添加剂硬质合金刀具制备及其对不锈钢切削性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都大学, 2023.
- [14] 苗卧龙. 亚伟奥氏体不锈钢切削加工表面残余应力仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020.