

机械加工质量控制与检测技术在制造业的应用与优化研究

秦冬雁 黄青松 王宏

(平高集团有限公司 河南 平顶山 467000)

摘要: 随着全球制造业竞争日益激烈, 质量控制与检测技术在机械加工中的应用已成为产业发展的关键。此研究的前提是针对当前制造业面临的机械加工质量挑战, 特别是在表面粗糙度、尺寸偏差和材料硬度或韧性的不均匀性方面。为了有效应对这些挑战, 文章选择某制造工厂对 AISI 1045 碳钢的加工过程作为研究对象, 深入探讨了质量检测技术, 如三坐标测量机、表面粗糙度测量仪以及非破坏性检测技术的实际应用。研究策略包括系统收集和分析加工数据, 识别主要的加工问题, 以及基于数据分析的优化建议。

关键词: 机械加工; 质量控制; 检测技术

0 引言

随着全球制造业的高速发展, 机械加工质量已经成为影响产品性能、可靠性和经济效益的关键因素。传统的质量检测方法已经无法满足日益增长的精度要求和生产效率。因此, 采用先进的质量控制与检测技术在机械制造中显得尤为重要。三坐标测量机、表面粗糙度测量仪和非破坏性检测技术等检测手段, 在确保制造出的部件与产品达到预定标准的同时, 也为工程师和研发人员提供了更准确的数据支持, 有助于进一步优化设计和生产过程^[1]。同时, 机械加工中可能出现的典型质量问题, 如表面粗糙度异常、尺寸偏差及材料硬度或韧性的不均匀性, 也给制造业带来了严峻的挑战。对这些问题的深入研究和分析, 将有助于为制造业提供更具针对性的解决方案。

1 质量控制与检测技术概述与应用

1.1 三坐标测量机 (CMM) 在精密检测中的应用

三坐标测量机作为一种先进的测量工具, 在精密制造行业中得到了广泛的应用, 能够提供高精度的三维尺寸和形状测量。图1给出了CMM的核心结构。其中, 驱动机构包括X轴、Y轴和Z轴驱动部, 确保测量头在三个主轴向上的精准移动, 而动作控制器则负责这些移动的控制, 以确保测量过程的稳定性和重复性。操作单元允许操作者与机器进行互动, 选择适当的测量程序和参数, 驱动控制部负责整个驱动机构的协调和控制^[2]。此外, 信号

检测部由滑动机构和测头组成, 滑动机构确保测量头的平稳移动, 测头是直接与被测零件接触的部分, 负责收集三维数据并将其传送到主计算机。电流值检测部则监控测量过程中的电流变化, 以确保整个系统的稳定运行, 而负载判断部则负责监测系统的负载情况, 确保在不同的工作条件下, 系统都能够稳定、准确地工作^[3]。CMM在精密检测中的应用主要体现在其对各种形状零件的高精度测量能力, 尤其是对那些传统测量工具难以测量的复杂形状的测量能力。

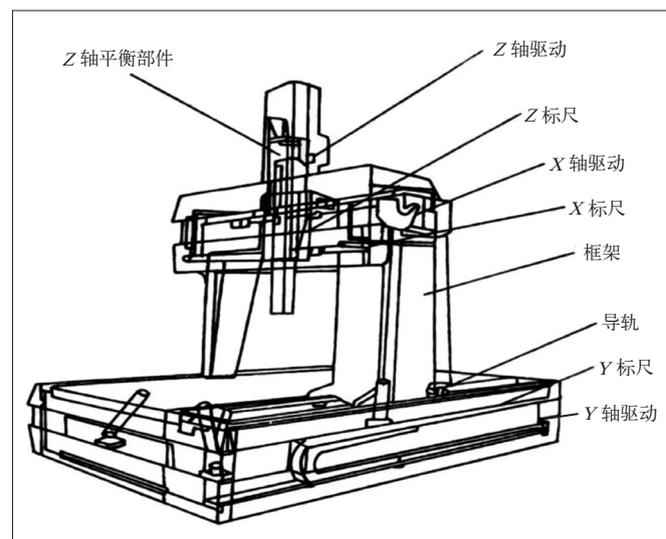


图1 三坐标测量机 (CMM) 的组成

1.2 表面粗糙度测量仪

表面粗糙度测量仪专为评估和定量材料表面上微小的几何形状不规则性而设计。这种不规则性通常描述为表面的微观起伏, 对多种工程应用都有深

远的影响,尤其在润滑学、摩擦学和接触力学领域。此测量仪器可以采用非接触或接触的方法来执行测量。非接触式技术,如激光扫描或光学显微技术,提供了一种在不与样本表面物理接触的前提下获取精确数据的手段,从而减少了由于物理接触导致的潜在测量误差。而接触式技术,如使用针尖探测器,虽然涉及与样本表面的直接接触,但由于其精确性和灵敏度,可以准确地提供表面粗糙度参数。该仪器的关键功能是将材料表面的微观起伏数字化^[5]。这些数字信息,经常以 Ra 、 Rz 等参数形式呈现,为制造和研究人员提供了关于表面质量的关键定量数据。

1.3 非破坏性检测 (NDT) 技术

随着工业制造和基础设施的复杂性增加,对非破坏性检测技术的需求也在持续增长。例如,在桥梁、隧道和其他重要结构的维护中,NDT 技术为检测隐蔽的结构缺陷提供了一种安全而高效的手段。同时,在核电和石油化工领域,确保设备的完整性和安全运行是至关重要的,而 NDT 技术为这一目标提供了强大的支持。而在航空航天领域,对于飞机和航天器的关键组件,如机翼、涡轮和其他受力部分,进行定期非破坏性检测是确保安全的关键。此外,随着新材料(如复合材料和陶瓷)越来越多地被应用于工业生产,NDT 技术也正在适应这些新材料的特性,开发新的检测方法。总之,非破坏性检测技术在保障现代社会安全、提高产品质量和延长设备使用寿命方面都发挥着不可替代的作用。

2 典型的机械加工质量问题及其成因

2.1 表面粗糙度异常

表面粗糙度异常在机械加工领域被认为是一个关键的质量问题。精密零件的功能往往与其表面状态直接相关,因此表面粗糙度的控制至关重要。比如在液压系统或密封部件中,表面的过度粗糙可能导致密封不良,从而导致泄漏。同样地,在轴与轴承的配合部分,不合适的表面粗糙度可能会加速磨损,缩短使用寿命。为了更好地控制表面粗糙度,首先需要对其产生原因有深入的了解。切削工具的磨损不仅会导致加工效率下降,还可能影响零件的尺寸和形状精度。同时,如果工具的磨损不被及时发现和更换,可能导致表面的烧伤或划伤。此外,不合适的润滑剂或润滑条件可能会导致切削热量无法及

时散发,造成加工表面的过热或氧化,这也可能导致表面质量下降。另外,机床的振动是另一个关键因素。无论是由于机床自身的问题,还是外部环境导致的振动,都可能在加工表面留下不规则的纹路,进一步影响表面粗糙度。

2.2 尺寸偏差

尺寸偏差作为机械加工中的一个普遍问题,可能对整个项目或产品的质量、可靠性和功能产生重大影响。当部件的尺寸不在规定的公差范围内时,可能会导致组装困难,甚至无法组装。因此,控制和预防尺寸偏差是制造过程中的一个重要环节。在实际的生产中,还有其他多种原因可能导致尺寸偏差^[4]。例如,材料的初始状态,如是否有预应力、内部应力或表面硬化,都可能在加工过程中导致尺寸变化。切削液的选择和使用也会影响材料的切削行为和尺寸稳定性。在某些情况下,切削液可能会与材料或切削工具产生不良的化学反应,从而导致加工表面的变形或腐蚀,这也可能影响到部件的尺寸精度。此外,机械加工中的夹持方法和夹具的稳定性也是尺寸偏差的潜在来源。如果工件在加工过程中移动或变形,那么尺寸精度就很难得到保证。因此,选择合适的夹持方法并确保夹具的稳定性对于确保尺寸精度至关重要。而对于复杂的三维形状或曲面,数控编程的策略和路径选择也可能影响最终的尺寸精度。

2.3 材料硬度或韧性的不均匀性

工件的材料硬度或韧性不均匀会导致加工过程中的切削力变化,可能引起断刀、机床振动或是尺寸偏差。原材料的质量直接决定了工件的内部组织结构,如存在夹杂、气孔或未熔合区,都可能导致硬度或韧性的不均匀。而加热或冷却过程中的不均匀性可能会引起内部应力的累积,导致工件在加工或使用过程中出现裂纹或变形。先前的加工步骤也是关键因素,如焊接过程中产生的高温区域可能导致材料的局部硬化,而锻造或热处理可能会改变材料的内部结构,从而影响其机械性能^[5]。

3 实验研究

3.1 材料选择与预处理

此次研究选择了 AISI 1045 碳钢作为实验对象。AISI 1045 碳钢是一种常见的中碳钢,具有良好的加工性质、强度和韧性平衡,因此经常在机械制造中

使用。预处理步骤如下：

(1) 退火处理。为了消除铸造或先前加工中可能产生的内部应力和微观组织不均匀性，碳钢样品首先在 800℃ 下进行退火，保温 2h 后，然后让其在炉内自然冷却至室温。这确保了材料的均匀性，并为后续加工创造了理想的初始状态。

(2) 表面清洁。使用有机溶剂（如酒精）来清除样品表面的油渍、氧化层或其他可能的杂质。之后，利用砂纸微细打磨，确保材料表面光洁并为切削过程提供一个均质的起始表面。

(3) 材料切割。使用带锯或数控切割机将大块碳钢切割成预定大小的样品，为后续的机械加工做准备。

3.2 机械加工参数与方法

为了确保实验的一致性和结果的可比性，制定了一套详细的机械加工参数。表 1 是为 AISI 1045 碳钢选定的加工参数。

表 1 AISI 1045 碳钢选定的加工参数表

参数名称	参数值
切削速度 (v_c)	60 m/min, 90 m/min, 120 m/min
进给率 (f)	0.08 mm/rev, 0.12 mm/rev, 0.16 mm/rev
切削深度 (a)	1 mm, 2 mm, 3 mm
工具几何角	主偏角: 15° ; 切削刃倾角: 6°
冷却液类型	水溶性切削液
工具材料	硬质合金

实验方法如下：使用硬质合金切削刀具，因为其在加工碳钢时可以提供较长的工具寿命和良好的切削效果。选择一台具有数控功能的车床，确保其刚性良好，减少振动对实验结果的影响。按照上述参数表中的值，分别设置切削速度、进给率和切削深度，以进行不同条件下的加工试验。启动冷却液供应，确保切削区域得到充分冷却。然后按照所设定的参数进行车削，确保每个试样在同样的条件下都进行足够长的时间，以获得一致的加工效果。机械加工完成后，从每一组条件下获得的试样中随机选择几个，准备进行后续的表面粗糙度和尺寸精度检测。

3.3 数据处理

某制造工厂对 AISI 1045 碳钢进行了机械加工实验。该实验的主要目的是确定切削速度、进给率和切削深度如何影响加工出的零件的质量。现在，来自五台机床的原始数据已经收集完毕，每台机床处

理了 200 个样品，总计 1000 个样品。

3.3.1 数据校验与筛选

从第一台机床的数据开始，发现其中 15 个样品的数据因传感器故障而丢失，因此从分析中排除这些样品。在第四批数据中，进给率异常地跃升至 5 mm/rev，这明显超过了机床的最大设定值，将这些数据点视为异常并删除。

3.3.2 数据汇总与标准化

在合并数据时，注意到第三台机床的表面粗糙度值在 0.5 μ m 至 3 μ m 范围内，而其他机床则在 0.3 μ m 至 2.8 μ m 范围内。为确保一致性，执行数据标准化。

3.3.3 描述性统计分析

第二台机床在 2mm/rev 进给率下的平均表面粗糙度为 1.8 μ m，标准偏差为 0.3 μ m。第五台机床在 1000r/min 的切削速度下的尺寸精度偏差的中位数为 -0.05mm。

3.3.4 参数影响的深入分析

方差分析结果显示，在 1.5mm/rev 的进给率下，切削速度每增加 500r/min，表面粗糙度的均值上升了 0.2 μ m。在 2mm 切削深度下，不同的进给率对尺寸精度的影响显著， P 值小于 0.001。多元线性回归模型的结果显示，切削速度的每 500r/min 增加，与表面粗糙度的增加 0.15 μ m 显著相关；而进给率的每 0.5mm/rev 增加，与尺寸偏差的 0.04mm 增加显著相关。在 Tableau 中制作的图表清晰地显示，当进给率从 1mm/rev 增加到 2mm/rev 时，表面粗糙度的上升趋势最为明显。数据解释报告指出，在所有测试条件下，第三台机床的性能表现最佳，推测是由于其刀具和主轴的更好对齐。

3.4 结果分析

经过前述的详细数据处理，对该制造工厂针对 AISI 1045 碳钢的机械加工实验所产生的数据获得了深入的认识。接下来对数据结果进行分析。经过初步筛选，995 个样品中的 970 个被认为是有效的，而那些被排除的样品大多由于机械故障或传感器的问题。结果明确地揭示了进给率与表面粗糙度之间的正相关关系，即进给率越高，碳钢的表面粗糙度越大。切削速度对尺寸偏差的影响也相当明显，特别是在高切削速度下，部分样品显示出超出公差范围的尺寸偏差。

如表 2 所示，随着切削速度的增加，样品数量呈现轻微的波动。最低数量出现在切削速度为 2000r/min

表2 切削速度与碳钢样品的质量关系表

参数	样品数量	平均表面粗糙度 / μm	尺寸偏差 / mm
切削速度 500r/min	195	1.3	-0.01
切削速度 1000r/min	192	1.5	-0.03
切削速度 1500r/min	198	1.8	-0.06
切削速度 2000r/min	185	2.1	-0.08
...

的条件下,为185个。而切削速度1500r/min时样品数量最多,为198个。但整体上,样品数量与切削速度之间没有明显的线性关系。平均表面粗糙度随着切削速度的增加而增大。从500r/min的1.3 μm 增加到2000r/min的2.1 μm 。这可能是由于切削速度增加导致的热量和摩擦同时增大,从而使得样品的表面粗糙度增加。从数据上看,随着切削速度的提高,碳钢样品的尺寸偏差也逐渐增大。这可能意味着在更高的切削速度下,切削过程可能更为激烈,导致更大的材料去除或是由于热膨胀等原因造成的尺寸变化。

综上所述,切削速度对碳钢样品的加工质量有明显的影响。随着切削速度的增加,样品的平均表面粗糙度也相应增大,而尺寸偏差则变得更大。这可能是由于更高的切削速度带来的更大的热量和摩擦。在选择切削速度时,需要平衡切削效率和样品的加工质量。

4 结语

本研究针对制造业中的机械加工质量控制与检

测技术进行了深入探讨,重点考察了某制造工厂对AISI 1045碳钢的机械加工过程。通过对质量检测技术如三坐标测量机、表面粗糙度测量仪和非破坏性检测的综合运用,为确保产品的高质量提供了有力的技术支持。实验数据揭示了机械加工过程中可能出现的质量问题及其成因,并据此提出了具体的优化策略。结合实验数据和质量控制策略,为制造业的机械加工环节提供了宝贵的经验与参考。

参考文献:

- [1] 张巧. 机械自动化技术在机械制造业中的应用 [J]. 智能城市应用, 2022, 5(7): 55-57.
- [2] 金建白. 自动化技术在机械设计制造中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 1(3): 76-77.
- [3] 陈媛媛, 徐浩, 魏庆丰. 机器人激光在线检测技术在汽车焊装线上的应用 [J]. 金属加工: 热加工, 2018(3): 10-13.
- [4] 吴员, 陈亮, 张俊杰, 等. 海底管道无损检测技术评定的破坏性试验 [J]. 无损检测, 2019, 41(11): 34-35.
- [5] 桑建国. 新形势下自动化技术在机械设计制造中的应用研究 [J]. 农机使用与维修, 2020(5): 21-22.

作者简介: 秦冬雁(1971.11-),男,汉族,河南叶县人,本科,工程师,研究方向: 机械加工工艺; 黄青松(1982.10-),男,汉族,河南鲁山人,本科,工程师,研究方向: 机械加工工艺; 王宏(1979.06-),男,汉族,河南淮阳人,本科,工程师,研究方向: 机械加工工艺。