

机械加工残余应力的形成与控制研究

郭广凯

河南钢铁集团安阳钢铁股份公司设备管理处 河南 安阳 455000

摘要: 在机械加工领域,残余应力的存在对工件性能、尺寸稳定性及使用寿命构成显著影响。本文旨在对机械加工过程中残余应力的形成进行深入探讨,分析其产生的多种机理,识别关键影响因素,并提出一套系统而有效的控制措施。通过综合应用理论与实践知识,为机械制造业的进一步优化提供指导。

关键词: 机械加工;残余应力;形成机理;控制措施;工艺优化

引言

随着现代工业对高精度、高性能机械零部件的需求不断增长,机械加工技术也在不断发展和完善。然而,即使在最先进的加工条件下,工件内部也往往会留下一定程度的残余应力。这些应力可能在后续的使用过程中导致工件变形、开裂或疲劳失效等问题,严重影响其服役性能。因此,深入理解残余应力的形成机理并发展有效的控制措施,已成为当前机械加工领域的重要研究课题。

1 机械加工残余应力的形成机理

1.1 热应力机制

在机械加工过程中,刀具与工件材料之间的剧烈摩擦和塑性变形会产生大量的切削热,这些热量使得工件局部区域的温度迅速升高。然而,由于材料内部的热传导速率有限,热量无法迅速扩散到整个工件,从而在工件内部形成明显的温度梯度。这种温度梯度导致材料不同区域之间的热胀冷缩程度存在差异,进而引发热应力的产生。热应力的大小和方向取决于温度梯度的分布以及材料的热物理性质。随着加工过程的进行,这些热应力在工件内部不断积累,最终在切削结束后形成残余应力。残余应力的存在对工件的尺寸稳定性、抗疲劳性能和耐腐蚀性能产生重要影响。

1.2 机械应力机制

在机械加工中,当刀具切入工件材料时,会在接触区域产生强烈的挤压、剪切和拉伸等复杂力系作用。这些力系不仅导致材料的塑性变形和切屑的形成,还会在工件内部引发显著的机械应力。机械应力的产生与切削力的大小、方向以及作用时间密切相关。随着刀具在工件表面的移动,机械应力在工件内部不断传递和累积。即使在切削过程结束后,部分机械应力由于材料的弹性恢复不完全或塑性变形的不均匀性,仍会遗留在工件中,成为残余应力的重要组成部分。这些残余机械应力对工件的力学性能和尺寸稳定性具有显著影响,可能导致工

件在后续使用中出现变形、开裂或疲劳失效等问题。

1.3 相变应力机制

在机械加工过程中,尤其是涉及淬火、回火或热处理等特定工艺时,工件材料常常会发生相变。相变是指材料从一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程,如奥氏体转变为马氏体。这些相变过程往往伴随着明显的体积变化、晶格重排以及组织转变,从而导致工件内部产生相变应力。相变应力的大小和分布取决于材料的相变特性、工艺参数以及相变过程中的组织转变程度^[1]。在相变结束后,由于材料内部的新旧组织共存以及不同组织间的力学性能差异,部分相变应力可能无法完全释放,从而遗留在工件内部形成残余应力。这些由相变引起的残余应力对工件的力学性能、尺寸稳定性和抗疲劳性能均产生显著影响。

2 影响机械加工残余应力的关键因素

2.1 切削参数的选择

在机械加工中,残余应力的形成和分布受到多种因素的影响,其中切削参数的选择是至关重要的一个方面。切削参数包括切削速度、进给率和切削深度等,这些参数的选择直接影响着切削过程中的切削力和切削热的生成。首先,切削速度的选择对残余应力的形成具有显著影响。过高的切削速度会导致切削温度过高,进而增加工件内部的热应力。同时,高速切削还会使刀具与工件之间的摩擦加剧,导致更大的切削力和更高的机械应力。这些应力的综合作用会使工件在加工结束后保留较高的残余应力。其次,进给率的选择也是影响残余应力的重要因素。进给率过大时,刀具对工件的挤压和剪切作用增强,导致机械应力增大。同时,过大的进给率还会使切削过程中的切削热来不及散发,从而加剧热应力的积累。这些应力的叠加会使工件内部的残余应力水平升高^[2]。最后,切削深度的选择同样对残余应力产生影响。较大的切削深度意味着每次切削去除的材料体积更

大,这会导致更高的切削力和更大的热输入。这些因素都会使工件在加工过程中产生更高的应力,并在加工结束后以残余应力的形式保留下来。

2.2 刀具特性与磨损状态

在机械加工过程中,刀具作为直接与工件接触并执行切削操作的工具,其特性与磨损状态对残余应力的产生具有显著影响。一方面,刀具的材料选择至关重要。不同材料的刀具在切削过程中产生的切削力和切削热会有很大差异。例如,硬质合金刀具具有较高的硬度和耐磨性,适用于加工硬度较高的材料,但其在切削过程中可能产生较高的切削温度,从而增加热应力的积累。而高速钢刀具则具有较好的韧性和热稳定性,适用于加工韧性较好的材料,但其耐磨性相对较差,可能导致切削力波动和机械应力增加。另一方面,刀具的几何形状也对残余应力产生影响。刀具的前角、后角、刃倾角等几何参数决定了刀具与工件的接触方式和切削力的分布。合理的几何形状设计可以降低切削过程中的切削力和切削热,从而减小残余应力的产生。例如,增大前角可以减小切削力,但过大的前角可能导致刀具强度降低和磨损加剧。再者,刀具的磨损状态也是影响残余应力的关键因素之一。随着刀具的磨损,其切削刃变得钝化,导致切削力增加。同时,磨损的刀具在切削过程中可能产生更多的切削热和摩擦,进一步加剧残余应力的积累。

2.3 工件材料的物理和机械性能

工件材料的物理和机械性能在机械加工中对残余应力的形成起着至关重要的作用。这些性能,如硬度、导热性、弹塑性等,直接影响着材料在切削过程中对切削力和切削热的响应。硬度是衡量材料抵抗局部塑性变形能力的重要指标。硬度较高的材料在切削过程中往往需要更大的切削力,这会导致更高的机械应力和热应力。同时,高硬度材料在切削过程中产生的切屑往往更加硬脆,这也可能增加切削过程中的不稳定性,从而加剧残余应力的积累。导热性是影响切削过程中热传递的重要因素。导热性好的材料能够更快地将切削热从切削区域传递出去,从而降低工件内部的温度梯度和热应力。相反,导热性差的材料在切削过程中更容易产生热积聚,导致更高的切削温度和更大的热应力。弹塑性反映了材料在受力时的变形行为。弹塑性好的材料在切削过程中能够更好地吸收和分散切削力,从而降低机械应力的产生。然而,弹塑性过好的材料也可能在切削过程中产生较大的塑性变形,这可能导致工件形状和尺寸的不稳定,以及残余应力的增加。

2.4 加工环境与冷却方式

在机械加工中,加工环境与冷却方式对残余应力的形成和分布同样具有不可忽视的影响。加工环境涉及环境温度、湿度等多个方面,而冷却方式则包括冷却液的选择、使用方式及其冷却效果等。环境温度和湿度的变化会对切削过程中的热传递和材料的物理性能产生影响。较高的环境温度可能导致切削热难以迅速散发,从而加剧热应力的积累。同时,湿度过高可能导致工件和刀具表面形成一层薄薄的水膜,影响切削液的润滑和冷却效果,进而增加切削力和切削热^[1]。再有,冷却液的选择和使用方式对残余应力的控制至关重要。适当的冷却液可以有效降低切削温度,减少工件材料的热变形和热应力。不同种类的冷却液具有不同的冷却性能和润滑性能,因此需要根据具体的加工条件和工件材料来选择合适的冷却液。此外,冷却液的使用方式也会影响其冷却效果。例如,采用高压喷射的方式可以将冷却液直接喷射到切削区域,提高冷却效率;而采用浸没式冷却则可以使冷却液充分接触工件表面,实现均匀冷却。

3 机械加工残余应力的控制措施

3.1 优化切削参数与刀具设计

优化切削参数与刀具设计在机械加工中扮演着至关重要的角色,它们是降低残余应力生成、提高加工质量和效率的关键。通过合理的切削参数选择和刀具设计,可以显著降低切削力和切削热,从而减少工件内部应力的积累,确保工件的尺寸精度和表面质量。首先,切削参数的选择对残余应力的控制具有决定性影响。切削速度、进给率和切削深度等参数的合理搭配,能够实现切削过程中的力热平衡,避免过高的切削温度和切削力。具体来说,适当降低切削速度和进给率,可以减少切削热的产生和传递,从而降低工件内部的热应力;同时,选择合适的切削深度,可以确保切削过程的平稳进行,避免过大的切削力导致的机械应力。其次,刀具设计也是降低残余应力的关键。优秀的刀具设计应具备优良的热稳定性和耐磨性,能够在高温、高压等恶劣切削条件下保持刀具的锋利度和切削性能^[4]。通过采用高性能的刀具材料、合理的刀具几何形状和刃口处理技术等手段,可以显著提高刀具的耐用度和切削效率,从而降低切削过程中的切削力和切削热,减少残余应力的生成。

3.2 应用先进的加工技术

应用先进的加工技术是减少机械加工中残余应力的又一重要策略。随着科技的不断进步,一系列新型加工技术应运而生,为降低切削过程中的应力和热输入提供了有力支持。超声振动切削技术便是其中的佼佼者。通过在传统切削过程中引入高频振动,超声振动切削能

够显著改善刀具与工件之间的接触状态,有效降低切削力和切削热。这种技术利用超声振动的特性,使刀具在极短的时间内完成切削动作,从而减少了刀具与工件的摩擦时间,降低了热量和应力的产生。同时,超声振动还有助于切屑的顺利排出,进一步提高了加工表面的质量。激光辅助加工技术也为减小残余应力提供了新的思路。该技术利用高能激光束照射工件表面,使材料在瞬间达到熔化或汽化状态,随后通过高速气流将熔化或燃烧的材料迅速吹走,从而实现材料的去除。由于激光加工过程中热影响区小、切削力几乎为零,因此可以显著降低热应力和机械应力,减小残余应力的产生。此外,激光加工还具有高精度、高速度和高效率等优点,为复杂形状和高精度工件的加工提供了有力支持。

3.3 合理安排加工顺序与热处理工艺

在工件加工过程中,合理安排加工顺序与应用适当的热处理工艺对于降低残余应力水平、确保工件质量和性能至关重要。加工顺序的合理安排能够避免应力集中和叠加,而热处理工艺则可以有效释放和调整工件内部的应力分布。加工顺序的合理安排是减小残余应力的关键。在进行多道工序加工时,应遵循“先粗后精”的原则,即先进行粗加工去除大部分余量,再进行精加工以达到最终尺寸和表面质量。这样可以避免在精加工阶段产生过大的切削力和热应力,从而减小残余应力的积累^[5]。此外,对于容易产生残余应力的部位,如孔、槽等,应尽量安排在最后进行加工,以避免在后续加工中对其产生不利影响。其次,应用适当的热处理工艺对于降低残余应力同样重要。预热处理可以在加工前对工件进行加热,使其内部应力得到释放和调整,从而降低加工过程中产生的残余应力。中间退火则是在加工过程中对工件进行加热和保温处理,以消除已产生的残余应力并改善材料的加工性能。最终时效处理则是在加工完成后对工件进行长时间低温加热,以进一步稳定工件尺寸和降低残余应力水平。

3.4 强化在线监测与质量控制

强化在线监测与质量控制对于机械加工过程中残余应力的管理和工件质量的确保具有不可或缺的作用。通过引入先进的在线监测系统,可以实时监控加工过程中

各种关键参数的变化,包括切削力、切削温度、工件变形等,这些参数都是残余应力产生的直接或间接指标。在线监测系统的实施,使得加工过程中的任何异常变化都能被迅速捕捉和分析。一旦监测到切削力或温度等参数超出预设的安全范围,系统可以立即发出警报,并自动或提示操作人员采取相应的调整措施,如改变切削参数、更换刀具或进行工件的中间热处理等,从而避免残余应力的过度积累。同时,实施严格的质量控制措施也是确保工件质量满足要求的关键。这包括对原材料进行严格的入厂检验,确保其物理和机械性能符合加工要求;对加工过程中的各道工序进行严格把关,确保每一步都符合既定的工艺规范;以及对加工完成的工件进行全面的质量检测,包括尺寸精度、表面粗糙度、残余应力水平等。通过强化在线监测与质量控制,不仅可以实时评估加工过程中残余应力的变化,还可以及时发现并纠正可能导致质量问题的各种因素。这样不仅可以显著提高工件的加工质量和性能稳定性,还可以大大降低废品率和生产成本,提高企业的整体竞争力。

结语

本文对机械加工中残余应力的形成机理进行了深入分析,并探讨了影响其形成的关键因素。在此基础上,提出了一系列有效的控制措施,旨在降低或消除残余应力对工件性能的不利影响。展望未来,随着新材料和新工艺的不断涌现,对残余应力的控制将提出更高的要求。因此,持续开展相关研究,不断完善和优化控制措施,对于推动机械加工技术的进一步发展具有重要意义。

参考文献

- [1]李兰花.机械加工工艺技术的误差分析及策略分析[J].技术与市场,2020,27(11):104+106.
- [2]王世伟.机械加工工艺技术误差分析与改进策略[J].科技资讯,2020,18(28):56-57+60.
- [3]任恒.机械加工中深孔加工技术研究[J].造纸装备及材料,2023,52(04):88-90.
- [4]马立权.机械加工中工件变形的原因及预防措施[J].化学工程与装备,2022,(08):229-230.
- [5]张春娜.数控技术在现代机械加工中的应用[J].现代制造技术与装备,2022,58(05):118-121.