

铝合金材料的机械加工工艺研究

徐 磊

上海电控研究所 上海 200092

摘要: 本文围绕铝合金材料机械加工展开。首先分析铝合金特性,其低密度、高强度与良好塑性平衡及耐腐蚀性使其在多领域优势显著,但机械加工面临变形、刀具磨损等问题。接着介绍车削、铣削、钻孔等常见工艺及问题。最后提出优化策略,包括刀具优化(材料与几何参数)、切削参数优化(考虑速度、进给量、深度)及冷却润滑优化(切削液与气体冷却)。通过这些策略,可提升铝合金加工质量与效率,推动其更广泛应用。

关键词: 铝合金; 机械加工工艺; 加工精度; 表面质量; 工艺优化

引言: 铝合金凭借低密度、高强度与良好耐腐蚀性等特性,在航空航天、新能源汽车等领域应用广泛。然而,其硬度低、热导率高、粘性大等特性,给机械加工带来了尺寸精度控制难、刀具磨损快、表面质量差等诸多挑战。为充分发挥铝合金材料优势,提升加工质量与效率,深入探究其机械加工工艺,分析常见问题,并从刀具、切削参数、冷却润滑等方面提出优化策略,具有重要的现实意义,对推动铝合金在更多领域的广泛应用至关重要。

1 铝合金材料的特性分析

铝合金作为一种以铝为基体的合金材料,通过添加铜、硅、镁、锌、锰等主要合金元素以及镍、铁、钛、铬、锂等次要合金元素,形成了一系列具有独特性能的材料体系。其特性在诸多领域展现出显著优势,但同时也给机械加工带来了一系列挑战。(1)从物理特性来看,铝合金的密度通常在 $2.6 - 2.8\text{g/cm}^3$ 范围内,仅为钢铁密度的 $1/3$ 左右。这一低密度特性使其在航空航天、新能源汽车等对重量极为敏感的领域具有不可替代的应用价值。在航空航天领域,减轻飞行器自身重量可降低能耗、提高飞行性能和载重能力;在新能源汽车中,采用铝合金部件有助于增加续航里程,提升车辆的整体性能。(2)力学性能方面,铝合金经过恰当的热处理和加工工艺,能够兼顾高强度与良好塑性。时效处理是一种常用的强化手段,通过控制加热温度和保温时间,使合金内部发生析出强化,显著提高硬度和强度,同时仍能保留一定的韧性。这种强度与韧性的平衡,使得铝合金能够满足不同工程结构件在复杂受力条件下的使用要求。(3)耐腐蚀性是铝合金的又一突出特性。其表面能够自然形成一层致密的氧化铝薄膜,这层薄膜犹如一层天然的保护屏障,有效阻止了内部金属与外界环境的进一步接触,从而抑制了氧化反应的持续进行。在海洋工

程领域,铝合金结构件能够抵御海水的侵蚀,延长使用寿命;在建筑装饰行业,铝合金门窗、幕墙等制品凭借其耐腐蚀、美观大方的特点,得到了广泛应用。然而,铝合金的这些优良特性在机械加工过程中却转化为一系列难题。首先,铝合金硬度相对较低,在切削力的作用下容易产生变形,导致加工尺寸精度难以保证。其次,铝合金具有较高的热导率,加工过程中产生的热量会迅速扩散,使得刀具温度急剧升高。高温不仅会加速刀具的磨损,缩短刀具使用寿命,还可能引起刀具材料的软化,降低切削性能。此外,铝合金的粘性较大,在切削过程中容易与刀具表面发生粘结,形成积屑瘤。积屑瘤的存在会改变刀具的实际几何角度,影响切削过程的稳定性,导致加工表面粗糙度增大,尺寸精度降低。为应对铝合金机械加工中的这些问题,需要采取一系列针对性的措施。例如,合理选择刀具材料和几何参数,优化切削用量,采用适当的冷却润滑方式等。通过深入研究铝合金的特性及其对机械加工的影响,不断改进加工工艺和技术,能够充分发挥铝合金的优势,提高加工质量和效率,推动铝合金在更多领域的广泛应用^[1]。

2 铝合金材料常见机械加工工艺及问题分析

2.1 车削加工

车削加工是铝合金机械加工中不可或缺的工艺,尤其适用于轴类、盘类等回转体零件的加工。刀具选择是车削铝合金的关键环节。高速钢刀具虽具备较高的强度和韧性,但耐热性欠佳,在车削铝合金时,高速切削产生的热量易使其迅速磨损,因此通常仅适用于低速、小切削量的加工场景。而硬质合金刀具凭借其硬度高、耐磨性好、耐热性强的优势,成为车削铝合金的常用刀具。车削铝合金过程中,表面粗糙度高和尺寸精度难以保证是常见难题。铝合金切削性能良好,切削时产生的切屑容易缠绕在刀具和工件上,划伤工件表面,严重影

响表面质量。同时,切屑的变形和堆积会干扰刀具的正常切削状态,导致尺寸精度出现偏差。此外,铝合金热膨胀系数较大,加工过程中切削热引发的工件热变形,也会进一步加剧尺寸精度的失控。为解决这些问题,可选用合适的切削液,既能有效冷却刀具和工件,降低切削热的影响,又能起到润滑作用,减少切屑与刀具、工件的摩擦,防止切屑缠绕。同时,合理控制切削参数,如降低切削速度、减小进给量,也能在一定程度上改善加工质量。

2.2 铣削加工

铣削加工在铝合金零件加工中应用广泛,可加工平面、沟槽、轮廓等多种形状。铣刀的类型和几何参数对加工质量和效率起着决定性作用。端铣刀适用于平面加工,立铣刀则常用于沟槽和轮廓加工。为减小铣削过程中的切削力和切削热,铣刀的前角一般设计得较大,后角也适当增大,以降低刀具与工件之间的摩擦。然而,铣削铝合金时,加工表面容易出现颤纹和刀痕,影响表面质量。铝合金刚性较差,在铣削力作用下易产生振动;同时,切削热会使铝合金材料软化,加剧振动幅度。此外,切屑排出不畅也会降低加工表面质量。针对这些问题,可采用高刚性的铣床和夹具,增强系统的刚性,减少振动。优化铣削参数,如选择合适的切削速度、进给量和切削深度,也能有效降低振动。同时,改进切屑排出方式,如采用合适的排屑槽设计或使用压缩空气吹屑,确保切屑顺利排出^[2]。

2.3 钻孔加工

钻孔是铝合金零件加工中常用的孔加工方法。钻头选择和钻孔参数的确定直接影响钻孔质量。鉴于铝合金硬度较低,一般选用高速钢麻花钻或硬质合金麻花钻。为提高钻孔效率和质量,钻头的顶角、螺旋角等几何参数需根据铝合金特性进行优化设计。钻孔铝合金时,孔径扩大、孔壁表面粗糙度高以及孔的位置精度差是常见问题。铝合金塑性较大,钻孔时易产生弹性变形和塑性变形,导致孔径扩大;切屑在孔内堆积和排出不畅会划伤孔壁,影响表面质量;钻头的磨损和振动会降低孔的位置精度。为解决这些问题,可采用合适的切削液,冷却润滑钻头和孔壁,减少摩擦和热量产生。同时,定期检查和更换钻头,确保钻头的锋利度和几何精度。此外,采用高精度的钻床和夹具,提高钻孔的定位精度和稳定性。

3 铝合金材料机械加工工艺优化策略

3.1 刀具优化

(1) 刀具材料选择:合理选择刀具材料是提高铝合

金加工质量的关键因素之一。除了传统的高速钢和硬质合金刀具外,涂层刀具在铝合金加工中展现出了显著的优势。以 TiAlN 涂层刀具为例,它具有一系列优良的性能。TiAlN 涂层硬度高,能够有效抵抗铝合金切削过程中产生的磨损,延长刀具的使用寿命。其耐磨性好,在长时间的切削加工中,刀具的几何形状和尺寸精度能够保持相对稳定,从而保证加工零件的尺寸精度。同时, TiAlN 涂层化学稳定性强,在高温切削环境下,不易与铝合金发生化学反应,避免了刀具与工件之间的粘结现象。此外,该涂层能够显著降低刀具与铝合金之间的摩擦系数,减少切削力和切削热的产生,降低刀具的磨损速率,进一步提高加工表面质量。(2) 刀具几何参数优化:优化刀具几何参数可以显著改善铝合金的加工效果。在车削加工中,适当增大车削刀具的前角,可以使切削刃更加锋利,在切削铝合金时,能够更轻松地切入工件,从而减小切削力。切削力的降低会减少切削过程中产生的热量,进而降低切削温度,有利于提高刀具寿命和加工表面质量。增大后角则可以减小刀具后刀面与工件已加工表面之间的摩擦,减少刀具磨损和加工表面的划痕。在铣削加工中,铣削刀具螺旋角的增大对排屑性能有积极影响。较大的螺旋角能够使切屑在排出过程中更加顺畅,减少切屑在铣刀槽内的堵塞,避免因切屑堆积而导致的切削力增大和加工表面质量下降。对于端铣刀,减小主偏角可以降低切削力在径向的分量,使切削过程更加平稳,从而提高加工表面质量。在钻孔加工中,优化钻头的顶角和螺旋角至关重要。合理的顶角能够提高钻头的定心性能,使钻头在钻孔过程中保持稳定的轴向位置,减少孔径扩大现象。同时,适当的螺旋角可以提高钻头的排屑能力,使切屑能够及时排出孔外,避免切屑在孔内划伤孔壁,降低孔壁表面粗糙度^[3]。

3.2 切削参数优化

切削速度、进给量和切削深度是影响铝合金加工质量和效率的重要切削参数。在车削铝合金时,切削速度的选择需要综合考虑刀具磨损和加工效率。较高的切削速度可以降低切削力和切削温度,这是因为切削速度的提高会使切削变形区的温度升高,铝合金材料的塑性增加,切削力相应减小。然而,过高的切削速度会导致刀具与工件之间的摩擦加剧,刀具磨损速度加快,从而影响刀具寿命和加工质量。适当增加进给量可以提高加工效率,但进给量过大会使切削厚度增大,切削力急剧增加,导致加工表面出现撕裂、划痕等缺陷,影响加工表面质量。因此,需要根据刀具材料、工件材料和加工要求,合理选择切削速度和进给量。一般来说,对于硬

质合金刀具车削铝合金,切削速度可控制在 150-300m/min,进给量在 0.1-0.3mm/r 之间。(1)在铣削铝合金时,切削速度、进给量和切削深度的匹配更为复杂。较低的切削深度和较高的进给速度有利于提高加工表面质量,因为较小的切削深度可以减少切削过程中的振动和变形,较高的进给速度可以使切削过程更加平稳。但这种参数组合会降低加工效率。较大的切削深度可以提高加工效率,但容易引起振动和刀具磨损,导致加工表面质量下降。因此,应根据具体情况进行优化选择。例如,端铣铝合金平面时,切削速度可选择 100-200m/min,每齿进给量在 0.05-0.2mm 之间,切削深度控制在 0.5-2mm。(2)在钻孔加工中,切削速度和进给量对钻孔质量影响显著。过高的切削速度会使钻头与铝合金之间的摩擦加剧,钻头温度升高,导致钻头磨损加剧,孔径扩大。进给量过大会使钻头在钻孔过程中受到的轴向力增大,孔壁表面粗糙度增加。一般情况下,钻削铝合金时,切削速度可控制在 20-50m/min,进给量在 0.1-0.3mm/r。

3.3 冷却润滑优化

冷却润滑在铝合金机械加工中起着至关重要的作用。合适的冷却润滑方式可以降低切削温度,减少刀具磨损,改善加工表面质量。常用的冷却润滑方式有切削液冷却和气体冷却。(1)切削液冷却中,水溶性切削液具有良好的冷却性能和清洗性能。在铝合金切削过程中,水溶性切削液能够迅速吸收切削热,降低切削温度,同时将切屑冲走,保持切削区域的清洁。然而,其润滑性能相对较差,在高速切削或对润滑要求较高的加工中可能无法满足需求。油基切削液的润滑性能较好,能够在刀具与工件、切屑之间形成一层润滑膜,减少摩擦和磨损,但冷却性能和清洗性能不如水溶性切削液。

在铝合金加工中,可根据加工工艺和要求选择合适的切削液^[4]。例如,在车削和铣削加工中,可采用乳化液作为切削液,它兼具水溶性切削液和油基切削液的优点,既能有效冷却和润滑,又能清洗切屑。(2)气体冷却如液氮冷却、冷风冷却等,具有冷却速度快、不污染环境等优点。液氮冷却可以将切削区域的温度迅速降低到极低水平,有效减少刀具磨损,提高加工表面质量,但液氮的成本较高,设备复杂。冷风冷却则相对较为经济实用,它可以通过压缩空气冷却切削区域,降低切削温度,减少刀具磨损,同时不会产生废液处理问题,在一些高精度加工和难加工材料加工中得到了广泛应用。

结束语

综上所述,铝合金材料凭借其独特物理、力学及耐腐蚀等特性,在多领域应用广泛,但机械加工面临诸多难题。通过刀具优化,合理选择材料与几何参数;优化切削参数,精准匹配切削速度、进给量和切削深度;改进冷却润滑方式,综合运用切削液与气体冷却等策略,可有效应对加工挑战。这些优化措施不仅能提高铝合金加工质量和效率,还能充分发挥其性能优势,推动铝合金在更高端、更复杂领域的应用拓展,助力相关产业技术升级。

参考文献

- [1]张洁溪.热处理工艺对铝合金组织性能的影响[J].现代制造技术与装备, 2021, 57(08):183-184.
- [2]刘文平.铝合金材料的机械加工工艺分析[J].冶金与材料, 2020, 40(06):87-88.
- [3]叶贻周.浅析铝合金材料机械加工安全技术与事故防范措施[J].安全与健康, 2020(03):39-40+44.
- [4]刘文平.铝合金材料的机械加工工艺分析[J].冶金与材料, 2020, 40(06):87-88.