

镍基高温合金磨削加工技术研究现状

Research Situation of Grinding Technology for Nickel Based High-temperature Alloys

唐杰 刘健 胡鉴 欧晓乐

Jie Tang Jian Liu Jian Hu Xiaole Ou

中国航发贵州黎阳航空动力有限公司 中国·贵州 贵阳 550014

Aero Engine Corpo Ration of China Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550014, China

摘要: 论文探讨了镍基高温合金磨削加工技术的研究现状,分析了磨削参数、磨削润滑和冷却技术、磨削工具材料和涂层、表面质量和精度控制等方面的关键内容。同时,讨论了在镍基高温合金磨削加工中面临的挑战和难点,如磨损和热变形、材料脆性和易烧损性、环境友好型磨削以及自动化和智能化磨削。基于此,寻求最新的磨削加工技术和创新,包括超声波辅助磨削、高速磨削技术、钻石磨削工具的应用以及先进的冷却和润滑方法,以提高镍基高温合金磨削加工的效率和质量。

Abstract: This paper discusses the research situation of grinding technology of nickel-based superalloy, and analyzes the key contents of grinding parameters, grinding lubrication and cooling technology, grinding tool materials and coatings, surface quality and precision control. At the same time, the challenges and difficulties in the grinding of nickel-based superalloy are discussed, such as wear and thermal deformation, brittleness and burnability of materials, environmentally friendly grinding, and automatic and intelligent grinding. Based on this, the latest grinding technology and innovation are sought, including ultrasonic-assisted grinding, high-speed grinding technology, the application of diamond grinding tools and advanced cooling and lubrication methods, in order to improve the efficiency and quality of nickel-based superalloy grinding.

关键词: 镍基高温合金; 磨削加工技术; 自动化磨削

Keywords: nickel-based superalloy; grinding technology; automatic grinding

DOI: 10.12346/etr.v6i2.9043

1 引言

镍基高温合金在航空、能源等领域中扮演着至关重要的角色,但其高温、高强度等特性也使得其加工变得极具挑战性。磨削是一种常用的加工方法,用于制造镍基高温合金零件的表面加工和精度控制。

2 镍基高温合金磨削加工技术的现状

2.1 磨削参数

2.1.1 切削速度

切削速度通常以米每分钟(m/min)或英尺每分钟(ft/min)来表示。对于不同种类的镍基高温合金,合适的切削速度是不同的。一般来说,切削速度过高可能导致工具过早磨损,过低则可能导致加工效率低下^[1]。因此,在选择切削速度时,需要考虑材料的硬度、强度、导热性以及所需的加工质量。常见的切削速度范围在50~200m/min之间,但具体数值需

要根据材料的特性和实验数据来确定。

2.1.2 进给速度

进给速度决定了工具与工件之间的相对运动速度。适当的进给速度可以控制材料的切削率,防止过度加热和磨损。与切削速度一样,进给速度也需要根据具体的合金类型来选择。对于某些镍基高温合金,进给速度可以设置得较低,以减少材料的热积累,提高加工质量。然而,为了实现高效的加工,必须在保证质量的前提下选择合适的进给速度。

2.1.3 磨削深度

磨削深度是指每次磨削中去除工件上的材料的深度。较大的磨削深度可以提高加工效率,但也会增加磨削过程中的热积累和工具磨损。在选择磨削深度时,需要根据所需的表面质量和精度进行权衡。一般来说,磨削深度应逐步增加,以避免材料的过度加热和工具的早期失效。对于镍基高温合金,通常建议的磨削深度在0.1~0.5mm之间,但具体数值

【作者简介】唐杰(1982-),男,中国贵州贵阳人,硕士,高级工程师,从事焊接研究。

仍然需要根据具体合金的特性来确定。

2.2 磨削润滑和冷却技术

磨削润滑和冷却技术在镍基高温合金磨削加工中扮演着至关重要的角色。由于镍基高温合金的高温和高硬度特性，磨削过程中会产生大量的热量，容易导致工具损耗和加工表面质量下降。因此，有效的润滑和冷却技术可以帮助降低磨削温度，减轻工具磨损，提高加工效率。传统的润滑和冷却技术包括切削油和冷却液的使用。然而，对于镍基高温合金这种高温材料，传统技术可能不够有效。因此，研究人员已经开始探索高温润滑和冷却技术，如使用涂层和纳米颗粒的方式来改进润滑和冷却效果。这些创新技术有望提高镍基高温合金磨削加工的质量和效率。

2.3 磨削工具材料和涂层

磨削工具的选择对于镍基高温合金磨削加工至关重要。由于高温合金的高硬度和耐磨性，磨削工具需要具备相应的硬度和耐磨性。常见的磨削工具材料包括刚玉、氮化硅、金刚石等。涂层技术也被广泛应用于提高工具的性能，如采用涂层可以提高工具的抗磨性和降低摩擦系数。然而，针对不同类型的镍基高温合金，需要选择适合的工具材料和涂层。这涉及对不同工具材料和涂层性能的深入了解和研究。优化工具材料和涂层的选择可以显著改善磨削加工的效率和质量。

2.4 表面质量和精度控制

最终产品的表面质量和精度对于镍基高温合金零件的性能和可靠性至关重要。因此，磨削加工过程中的表面质量和精度控制是一个关键问题。磨削过程中可能会产生各种缺陷，如裂纹、表面粗糙度等，这些缺陷可能对零件的性能产生负面影响。为了实现优质的表面质量和精度控制，需要采用适当的磨削参数、工具材料和涂层，以及有效的润滑和冷却技术；还需要采用先进的表面检测技术，如光学显微镜、扫描电子显微镜等，来评估和改进加工表面的质量。

3 镍基高温合金磨削加工技术的挑战和难点

3.1 磨削工艺中的磨损和热变形

镍基高温合金的高硬度和高温特性使其容易导致工具的磨损和热变形。在磨削过程中，由于高温引起的材料软化和切削力的高度集中，工具可能会快速失效，降低了加工效率和质量^[2]。磨损还会导致工具的几何形状发生变化，进一步影响工件的表面质量和精度。因此，如何降低磨损和有效管理热变形成为磨削镍基高温合金时的重要挑战之一。

3.2 镍基高温合金的脆性和易烧损性质

镍基高温合金具有一定的脆性和易烧损性质，这增加了磨削过程中出现缺陷和裂纹的风险。在高温环境下，合金可能出现明显的变形和开裂，特别是在高切削速度和深度下。脆性和易烧损性质使得必须采取特殊的预防措施来降低缺陷的产生，如采用适当的冷却和润滑技术以及优化的切削参数。

3.3 环境友好型磨削

环境友好型磨削对于镍基高温合金磨削加工至关重要。

传统的磨削加工可能涉及使用大量的切削液和润滑剂，这些化学品可能对环境产生负面影响。因此，研究人员和制造商正在寻求更环保的磨削方法，如润滑液的可再生利用、减少废物产生以及切削废物的回收和处理。这些举措有助于减少环境影响，并提高磨削加工的可持续性。

3.4 自动化和智能化磨削

自动化和智能化磨削技术的应用是提高镍基高温合金磨削加工效率和质量的关键。然而，将这些技术应用于高温合金的磨削过程需要克服多项挑战。例如，高温环境可能对自动化设备和传感器造成损害，因此需要采取适当的保护措施。此外，智能化磨削系统需要具备足够的智能来自动调整磨削参数以适应材料的变化，以实现最佳加工效果。

4 最新的磨削加工技术和创新

4.1 超声波辅助磨削

在超声波辅助磨削技术中，振幅（ A ）和频率（ f ）是关键参数，它们用于描述超声波振动的性质。超声波的振幅通常在 $5\sim 50\mu\text{m}$ 的范围内，振幅的大小直接影响了振动的幅度和能量传递^[3]。频率通常在 20kHz 以上，频率的选择取决于工具材料的硬度和切削速度。振动的频率和振幅可以通过以下方程表示：

$$A = A_0 \cdot \sin(2\pi ft)$$

其中， A 表示振幅， A_0 是振幅的峰值， f 是振动频率， t 是时间。

超声波辅助磨削的效果可以通过改善切削参数来量化，其中切削力（ F ）是一个关键的性能指标。这种振动通过改善切削参数，可显著减小切削力。例如，切削力 F 可以通过以下公式计算：

$$F = K \cdot A \cdot f \cdot V$$

其中， F 表示切削力， K 是切削力系数， A 是刀具的有效面积， f 是振动频率， V 是切削速度。

超声波的振动作用下，切削力系数 K 减小，这降低了工具的磨损率。同时，振动频率的增加导致工具与工件之间的分离和重新接触，减少了热变形的风险。

此外，超声波振动还改善了冷却液的传导性，液体的传导率 k 可以通过以下公式表示：

$$k = \frac{\lambda}{\rho c}$$

其中， λ 是液体的导热系数， ρ 是液体的密度， c 是液体的比热容。

振动帮助液体更好地渗透到切削区域，提高了润滑和冷却效果。这些参数的优化共同作用，使超声波辅助磨削能够显著提高加工效率，降低工具磨损，改善表面质量，为镍基高温合金磨削加工提供了一种有力的创新方法。

4.2 高速磨削技术

高速磨削技术是一种利用高转速的磨削工具来加工材料

的方法。在镍基高温合金磨削中，高速磨削技术具有显著的优势。通过提高切削速度和进给速度，高速磨削可以实现更高的切削率，从而提高加工效率。

在高速磨削中，切削速度(V_c)和进给速度(F_z)显著增加，导致切削率的提高。切削率(Q)通常定义为每分钟材料去除的体积，可以通过以下公式计算：

$$Q = \frac{V_c \cdot F_z}{1000}$$

其中， V_c 表示切削速度(以 mm/min 为单位)， F_z 表示进给速度(以 mm/tooth 为单位)。

高速磨削能够实现更高的切削率，从而提高了加工效率。此外，高速磨削还能减少切削力，降低磨损和热变形的风险。

切削力(F_c)在高速磨削中通常较低，这可以通过力的平衡方程表示：

$$F_c = \frac{P}{V_c}$$

其中， P 表示切削功率。

由于切削速度较高，相同的切削功率下切削力较低。这减轻了工具和工件的负担，并降低了工具的磨损风险。然而，高速磨削也带来了新的挑战，如工具的稳定性和冷却需求的增加。高速磨削引入了工具的高旋转速度，这可能导致工具的振动和热变形^[4]。为了确保工具的稳定性，需要使用高质量的工具材料和设计，并采用冷却和润滑系统以控制温度。

工具的稳定性可以通过振动频率和振幅的分析来评估，并通过以下振动频率(f_v)公式表示：

$$f_v = \frac{N \cdot z}{120}$$

其中， N 表示主轴转速(以转/分钟为单位)， z 表示刀具的齿数。

高速磨削需要更高的振动频率以确保工具的稳定性。同时，高速磨削产生更多的热量，需要更有效的冷却系统。

冷却系统的性能可以通过冷却剂的流量(Q_c)和冷却剂温度降低(ΔT_c)来衡量，可以使用以下公式计算冷却功率(P_c)：

$$P_c = m \cdot c_p \cdot \Delta T_c$$

其中， m 表示冷却剂的质量流量， c_p 表示冷却剂的比热容。

高速磨削需要更高的冷却功率以控制温度，防止工具和工件的过热。因此，该技术需要结合先进的工具材料和冷却技术，以实现在高速条件下的稳定和高质量的磨削加工。

4.3 钻石磨削工具的应用

钻石磨削工具在镍基高温合金磨削领域的应用具有深远的技术意义。首先，钻石工具的应用范围包括表面磨削、轮廓磨削、内外圆磨削等多个领域，这使得其在高温合金零部件制造中具备多样化的适用性。其次，钻石工具的高硬度和磨损抗性赋予了其卓越的加工性能，能够在高温和高切削力的环境下稳定运行，延长工具寿命，减少更换频率，降低生

产成本。最后，钻石工具的高效磨削能力提高了加工效率，通过提高切削速度和进给速度，实现更高的切削率，减少了加工周期，提高了生产效益。

另外，钻石工具能够实现高精度的加工，提高了零件的尺寸和形状的控制能力，降低了零件的废品率。然而，钻石磨削工具的高成本和特殊工艺要求仍然是挑战，需要在材料选择、工具设计和工艺优化方面进行深入研究，以充分发挥其在镍基高温合金磨削中的潜力

4.4 先进的冷却和润滑方法

在镍基高温合金磨削领域，先进的冷却和润滑方法具有至关重要的技术意义。这些方法的不断创新和应用，对于提高加工效率、降低磨损、控制温度和改善工件表面质量都起到了关键作用。首先，通过采用高压冷却系统，能够迅速排除磨削过程中产生的热量，有效地降低工件表面温度，减轻磨损，延长工具寿命，并有效地控制加工过程中的热变形。其次，微纳米润滑剂的应用也是一个重要的创新领域。这些微纳米润滑剂能够在磨削接触区域形成高效的润滑膜，降低摩擦和磨损。微纳米润滑剂能够在微小尺度下渗入工件表面，提供持久的润滑效果，改善加工表面质量，并减少能量消耗^[5]。最后，绿色润滑剂和可再生资源的替代品也引起了广泛的关注。这些替代品具有更环保的特性，有助于降低磨削加工对环境的不良影响。研究人员正在积极探索这些新型润滑剂的性能和可行性，以满足可持续制造的需求。

5 结语

总之，镍基高温合金磨削加工技术的研究和应用在现代工程领域具有重要地位。我们深入探讨了磨削参数、冷却润滑技术、工具材料、表面质量控制等方面的关键要素，同时也面临着磨损、热变形、脆性、环境友好性和自动化等多重挑战。在这一背景下，钻石磨削工具等先进技术的应用显著提高了磨削效率和加工质量。高压冷却系统、微纳米润滑剂等创新冷却润滑方法为工程领域提供了更多选择，同时可持续制造和环保意识也在不断引领磨削技术的发展。镍基高温合金磨削加工技术的不断进步将为工程领域的高温合金制造带来更多机遇，提高产品质量，降低生产成本，促进工程技术的不断前进。

参考文献

- [1] 蔡明,朱涛,高兴军,等.镍基高温合金磨削加工技术研究现状[J].辽宁石油化工大学学报,2023,43(3):60-68.
- [2] 刘达.镍基单晶高温合金的磨削性能及织构砂轮磨削试验研究[D].湘潭:湘潭大学,2021.
- [3] 刘明佳.镍基合金叶片叶尖精密磨削实验及其振动特性影响研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [4] 杨路.CFRP砂轮超高速磨削镍基高温合金的基础研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [5] 丁文锋,徐九华,杨长勇,等.航空发动机零件高效精密磨削技术的发展与应用[J].航空制造技术,2014(12):26-29.