

基于加工评估的特殊环境 内形面车刀几何参数标准化策略

李捷, 卢刚, 王乐祥, 杨金川

中国工程物理研究院材料研究所 四川绵阳 621700

摘要: 为解决极端特殊环境中自制刃磨内形面车刀的参数标准化问题, 在保证内形面表面粗糙度的情况下, 以刀具最长使用寿命为目标, 优选样本库中的标准尺寸刀具, 从而固化刀具关键参数。基于此标准化策略, 建立了极端特殊环境下的刀具参数标准化工艺路线与方法, 从而达到使产品加工精度更加稳定、人工刃磨刀具寿命更长的目标。

关键词: 特殊环境; 人工刃磨; 刀具; 参数固化; 标准化

1 序言

与常规制造环境相比, 极端特殊环境一般包括高危、高放、高压、高毒性以及受到严格特殊条件约束的生产场景。此类环境中的加工制造过程受到严格限制, 一旦进入加工步骤, 便很难再与外界进行直接行为交互或信息传输^[1, 2]。由此可见, 在常规制造环境中能够广泛使用的刀具标准化技术或装备, 无法在极端特殊环境中发挥关键作用。

目前, 在极端特殊环境中, 特种材料(铈、铟等)的切削加工性能与普通材料相比, 具有高毒性且活性高的特点^[3, 4], 因其材料的特殊性, 故对应产品的生产加工均使用自制专用非标刀具。对于塑性金属而言, 加工过程极易磨损且粘刀, 从而产生积屑瘤, 导致加工后的表面质量不易控制^[5, 6]。表面粗糙度、刀具材料和几何参数都是关键工序中的重要性能指标, 基于产品和材料的特殊性, 人工刃磨刀具状态存在的差异, 加工质量及刀具寿命有待进一步提升。综上所述, 需要开展加工刀具的关键参数固化与优化研究, 对材料、几何参数以及寿命等进行收集、分析、试验和管理, 获得影响加工质量的关键参数, 提炼出合理参数并进行标准化, 进而提升表面质量及稳定性, 提升刀具寿命。

由于受空间约束和环境影响, 当前无法进行基

于加工过程的刀具标准化精密测量和系统化研究, 因此, 本文以某产品内形面车刀刀尖前角与后角为变量, 根据加工产品的表面粗糙度和效率来间接综合评估刀具有效使用寿命、刀具质量可靠性及其关键参数影响指标及范围, 研究建立了极端特殊环境下的切削刀具关键参数标准化的工艺路线与方法。

2 产品加工分析

以某普通锥面夹持式产品的加工状态为例, 其装夹及加工状态如图1所示。

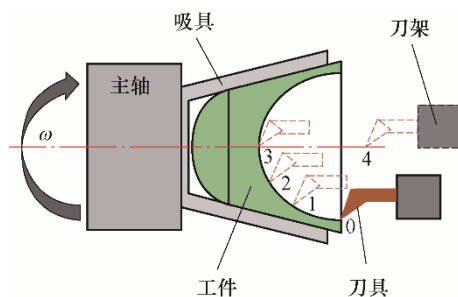


图1 产品装夹及加工状态

刀具从位置0起始, 经过位置1、位置2到位置3的实际切削路径, 再退刀至位置4, 从而实现整个产品内形面的车削加工。刀具切削曲面时, 从开口(0°位置)始到顶部(90°位置)止, 刀具刀尖的切削位置始终处于动态变化中, 如图2所示。

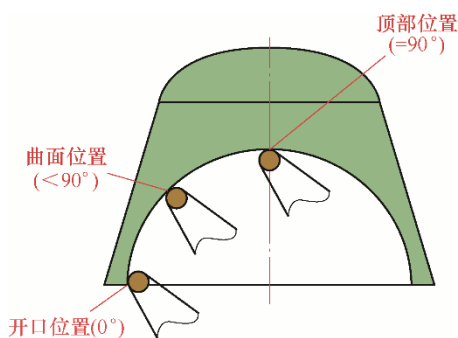


图2 内形面切削位置状态

内形面经过上述切削工艺后，需要使其内表面特征位置表面粗糙度值 $Ra \leq 1.63\mu\text{m}$ ，内形面表面粗糙度测量特征位置分布如图3所示。

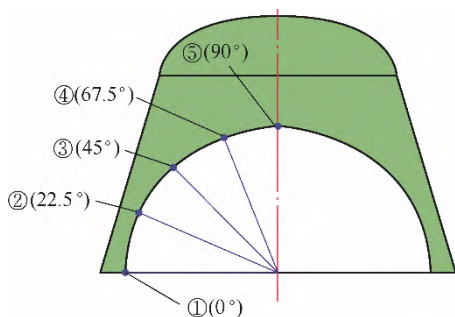


图3 内形面表面粗糙度测量特征位置分布

每次内形面切削完成后，均需采用白光干涉仪对图3所示5个特征位置的表面粗糙度值进行测量，以保证内形面表面粗糙度的一致性。

在产品加工过程中，除了测量受限外，刀具标准化难点还包括：关键工艺使用的刀具存在刃磨人员不固定、刃磨不连续的情况；不同工艺人员所刃磨刀具的状态存在差异，导致刀具结构及参数存在差异；不同工艺与零部件加工过程中刀具的一致性及寿命存在较大差距。

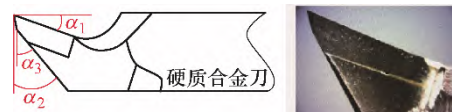
以上难点导致产品内形面的表面粗糙度值与刀具有效使用寿命之间难以取得最优效果。

3 刀具标准化对策

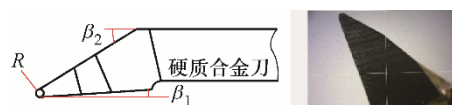
围绕提升产品内形面加工质量及刀具寿命的两个目标开展标准化研究^[7, 8]。由于刀具加工过程中与加工后无法进行几何形貌与磨损状态的测量和识别，因此，采用加工前对刀具进行初始状态测量的方式，来确定刀具几何基线。

选取刀具部分关键参数进行固化，包括刀具材料成分、钝圆半径和主副偏角等。此外将刀具设计

形状进行固化，内形面车刀固定变量设定如图4所示，其中： α_1 为前角， α_2 为结构后角， α_3 为切削后角， β_1 为主刃偏角， β_2 为副刃偏角。



a) 以车刀前、后角为固定变量



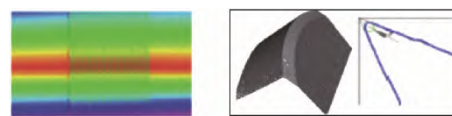
b) 以主、副刃偏角为固定变量

图4 内形面车刀固定变量设定

将需要固化或优化的刀具几何参数作为变量，通过实际加工来验证变量参数的有效性。选取刀具圆弧半径和刀尖后角作为第1批进行标准化的刀具关键几何参数。

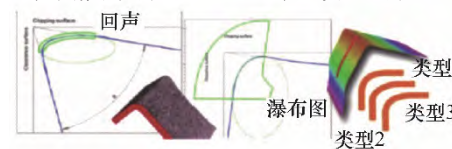
3.1 刀具测量

采用基于 Alicona 高精度三维形貌测量仪进行参数固化和标准化刀具的刀尖形貌参数（切削）刃口测量，刀具刀尖三维形貌测量示意如图5所示^[9]。



a) 轮廓形状测量

b) 刀尖刃口测量



c) 特型刃口测量

图5 刀具刀尖三维形貌测量示意

测量时，将刀尖在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 按照垂直截面等分成12截面区域，分别测量每个截面的刀尖圆弧半径和后角，刀具刀尖测量位置分布如图6所示。

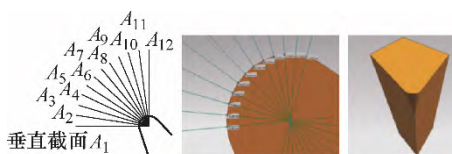


图6 刀具刀尖测量位置分布

在主切削圆弧为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时，刀尖钝角圆弧半径为 $(10 \pm 2)\mu\text{m}$ 。由于 Alicona 测量刀具钝圆半径误差为 $\pm 1\mu\text{m}$ ，所以本次刀具参数固化暂不考虑刀

尖锐圆半径的影响。

首批9把刀具在 $-10^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 的刀尖圆弧半径测量数据如图7所示。

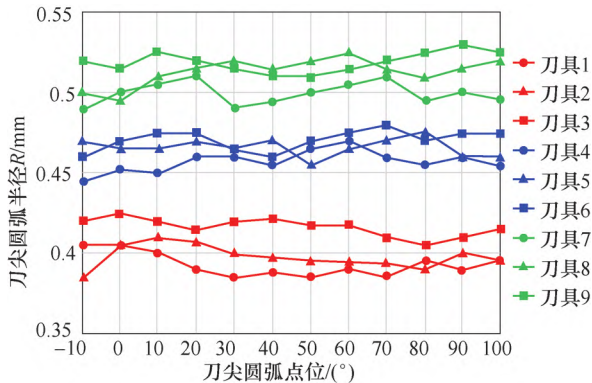


图7 刀具刀尖圆弧半径测量数据

同一把刀具的刀尖圆弧半径变化误差为 $0.02 \sim 0.04\text{mm}$ ，相同测量位置不同刀具的刀尖圆弧半径最大差值为 $\pm 0.04\text{mm}$ 。可将首批9把刀具分成3组，分别为 $R0.4\text{mm}$ 、 $R0.45\text{mm}$ 和 $R0.5\text{mm}$ ，每组各3把刀具。

刀具前角对表面粗糙度和刀具有效使用寿命的影响较为复杂，可将前角设定恒定参数 15° ，将后角作为设计变量，首批9把刀具在 $-10^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 刀具刀尖圆周后角测量数据如图8所示。

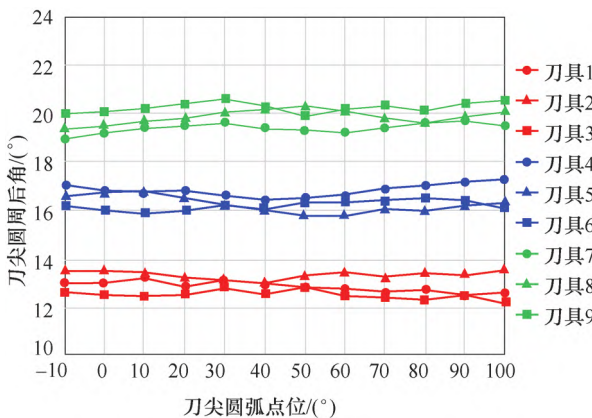


图8 刀具刀尖圆周后角测量数据

同一把刀具的刀尖在 120° 有效圆周内，其后角变化误差为 $0.3^{\circ} \sim 0.7^{\circ}$ 。将首批9把刀具进行后角分组，分别为 13° 、 16° 和 19° ，每组各3把刀具。同时，确定刀尖圆弧半径为 $R0.4\text{mm}$ 、 $R0.45\text{mm}$ 和

$R0.5\text{mm}$ ，后角作为刀具参数的固化对象和试验变量。

3.2 刀具试验

刀尖区域材料遵照JB/T 11442—2013，选择HW或者HT类别^[10, 11]。刀具切削刃应光整，表面不得有裂纹和崩刃，其他区域不得有锈迹、裂纹等影响使用性能的缺陷因素。刀具表面粗糙度的最大允许值为：前刀面 $Ra \leq 1.63\mu\text{m}$ ，后刀面 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$ ，刀杆其他部位 $Ra \leq 6.4\mu\text{m}$ ，刀片与刀具机体间焊接牢固，无松动现象。

试验刀具统一使用的加工工艺参数见表1。

表1 试验刀具统一使用的加工工艺参数

走刀类型	工件转速/(r/min)	进给量/(mm/r)	背吃刀量/mm
恒线速度	40~800	0.05	0.05

口部端面切削起始转速为 40r/min ，切削至顶部转速为 400r/min 。按角度分割为4个区域，转速分别为 40r/min 、 50r/min 、 90r/min 和 400r/min ，以靠近顶部 1° 部位作为第5个特征位置点。

其他试验条件：①遵照GB/T 2075—2007，选择HW类别的硬质合金刀片。②车刀安装的刀尖高度与主轴中心位置的偏差 $\leq 0.02\text{mm}$ 。③采用温度为 20°C 的氩气冷却，不使用切削液。

试验结果有效性判定，以内形面表面粗糙度值 $Ra \leq 1.63\mu\text{m}$ 的0.9倍为临界值，考核刀具实际可加工的工件数量，工件内形面轮廓如图9所示。

内形面刀具的加工工艺参数见表2。

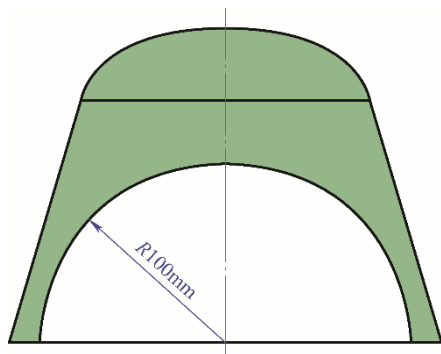


图9 工件内形面轮廓

表2 内形面刀具的加工工艺参数

角度区域	$0^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$	$22.5^{\circ} \sim 45^{\circ}$	$45^{\circ} \sim 67.5^{\circ}$	$67.5^{\circ} \sim 90^{\circ}$
切削速度/(m/s)	0.387~0.418	0.370~0.483	0.360~0.666	0.073~1.602

铝合金产品内形面加工装夹状态如图10所示，切削状态如图11所示。

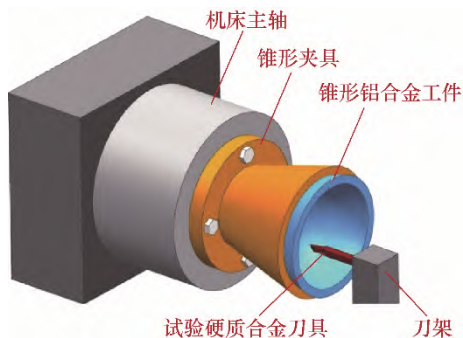


图10 铝合金产品内形面加工装夹状态

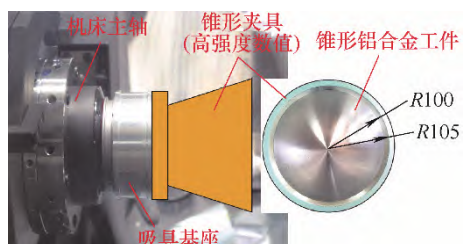


图11 铝合金产品内形面加工切削状态

4 工艺试验结果

以刀具1为例，测量其加工试验件内形面表面粗糙度值及其加工X形面次数，加工后的表面粗糙度值见表3。

表3 刀具1加工后的表面粗糙度值（单位： μm ）

次数	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
1	0.94	1.02	1.02	1.07	1.31
2	0.97	1.01	1.15	1.06	1.27
3	0.94	1.03	1.07	1.09	1.23
4	0.95	1.09	1.11	1.06	1.24
5	1.01	1.12	1.15	1.13	1.27
6	0.99	1.13	1.1	1.09	1.31
7	1.07	1.17	1.11	1.17	1.36
8	1.13	1.21	1.19	1.29	1.48

由表3数据可知，在第8次加工后，90° 位置的内形面表面粗糙度值超过了 $Ra \leq 1.63\mu\text{m}$ 的0.9倍，可以判定1号刀仅能完成7次有效加工。

首批9把试验刀具完成加工后的有效次数如图12所示。

由图12中数据可知，刀尖圆弧为R0.45mm和

R0.5mm时具有相对较优的有效使用寿命；刀尖圆弧为R0.4mm时，后角为13° 相对最优；刀尖圆弧为R0.45mm时，后角为13° 相对最优；刀尖圆弧为R0.5mm时，后角为16° 相对最优。

首批9把刀具加工试验后，内形面特征位置表面粗糙度值对比如图13所示（内形面相同位置取表面粗糙度均值）。

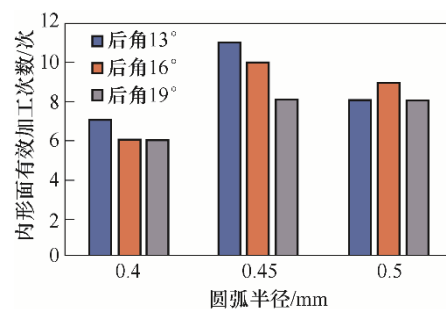


图12 试验刀具加工有效次数

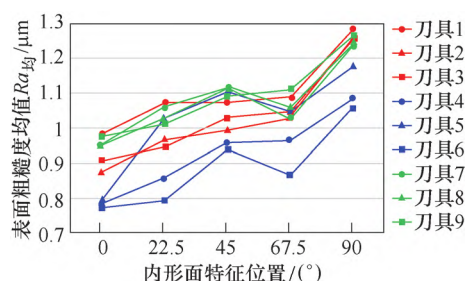


图13 内形面特征位置表面粗糙度值对比

由图12、图13中数据可知，6号刀选用R0.45mm、后角为19° 时，加工后的内形面表面粗糙度均值相对最小，有效加工次数为8次，同组4号刀选用R0.45mm、后角13° 时，有效加工次数为11次。

5 结束语

结合以上研究内容及数据，为保证内形面加工后表面粗糙度值 $Ra \leq 1.63\mu\text{m}$ ，以相对较优的有效内形面加工次数为优化条件，可获得刀具参数固化与优化结论如下。

1) 刀尖圆弧为R0.45mm且后角为13° 或16° 的刀具和刀尖圆弧R0.5mm且后角为16° 的刀具相比，前者在表面粗糙度值范围内具有较多的有效加工次数。

2) 刀具若使用较大后角，刃口会更加锋利，使刀具更易于切入工件，并减少后刀面与已加工表面的摩擦，有利于降低表面粗糙度值；若使用较大的刀尖圆弧半径，则有利于提升刀具的有效加工次数。

综上所述,基于极端环境的刀具参数固化及其标准化数据,可采用加工前特征尺寸(参数变量)的测量方法,将其作为加工质量控制变量,直接在加工过程快结束时进行加工质量和刀具有效使用寿命的综合评估,从而完成刀具特征参数的固化和后续一系列几何尺寸参数的标准化研究。

参考文献:

- [1] 李天梁,郭金秀,吴冬健,等.基于光纤传感的极端环境下装备制造与运行状态监测技术现状与发展[J].机械工程学报,2022,58(8):27-53.
- [2] 陈成,王锐.自动化加工工作站系统集成方法研究[J].装备制造技术,2019,(6):98-101.
- [3] 王帅鹏,罗文华,李赣,等.铜含量对铈铜合金氧化动力学的影响[J].化学研究与应用,2018,30(4):605-609.
- [4] 朱浏镇,李江涛,徐亮,等.平板撞击和磁驱动加载下铈铜合金的相变[J].高压物理学报,2022,36(6):27-34.
- [5] 刘志兵,王西彬.积屑瘤状态对微细切削表面轮廓特征的影响[J].光学精密工程,2011,19(1):90-96.
- [6] 卞凯,唐思文,王睿,等.纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 多层涂层的低温制备及其性能[J].中国表面工程,2022,35(3):245-253.
- [7] 田东缙,王新辉,宋文,等.壳体类零件自动化生产线刀具选用研究[J].机械制造,2020,58(3):80-82,94.
- [8] 张栋升,邓红雨,李心锋.铝合金飞轮壳类零件的加工[J].金属加工(冷加工),2016(22):29-30.
- [9] 刘晓军,黄进康,柴常春.融合共焦与变焦测量技术的复杂表面测量方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(10):1-5.
- [10] 蔡杨.硬质合金刀具在金属切削中的应用优化[J].现代制造技术与装备,2022,58(6):126-128.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部:整体硬质合金涂层刀具检测方法.JB/T 11442—2013[S].北京:机械工业出版社,2013.

MW 20240727

《金属加工(冷加工)》“刀具”栏目征稿

《金属加工(冷加工)》杂志设有多个常规栏目,现“刀具”栏目面向广大的制造业业内人士征集稿件,欢迎各位踊跃投稿。

“刀具”栏目征稿内容:

1. 国内外数控切削刀具的发展变化,刀具材料、刀具形状及切削技术等革新与升级。
2. 某难加工工件或者材料的切削加工方案设计以及实施过程。

详细征稿内容及投稿规范请扫码查看。

投稿网址: <http://www.mw1950.com/manuscript>



征稿内容



投稿规范