

陶瓷手机壳数控加工工艺优化

徐超

西门子（中国）有限公司 北京 100102

摘要：以新研发的陶瓷手机中框零件为例，探讨陶瓷材料的加工方案。针对陶瓷手机壳零件加工中遇到的问题，分析并寻找规律，优化加工工艺，涉及机床机械、数控系统、NC程序、刀具和测量设备等方面，解决加工中的工艺难题，提升零件加工质量，全面提升产品的成品率。

关键词：氧化锆陶瓷；手机；中框零件；3C行业；磨削；数控加工

1 序言

我国是世界手机生产和销售第一大国，手机产业在国际上有着举足轻重的地位。通过多年的发展，国内手机生产企业在国际市场占得一席之地，但是在竞争激烈的手机市场，企业只有不断技术迭代和科技创新，才能赢得市场和客户认可。随着5G时代的到来，手机产业又将迎来一轮新的变革。5G时代要求信号传输速度更快，是4G的1~100倍。5G通信将采用3GHz以上的频谱，其毫米波的波长更短。与金属背板相比，陶瓷背板对信号无干扰，且拥有其他材料无可比拟的优越性能，手机背板市场面临着重新洗牌，氧化锆陶瓷背板将脱颖而出，未来氧化锆陶瓷手机壳市场将会呈井喷式发展。氧化锆陶瓷制作手机壳中框属于新应用，目前在机械加工行业急需攻克陶瓷手机壳的成熟加工工艺。

有效地提高销售利润率是每个手机制造企业最难解决的问题。在取得市场占有率的同时，培养用户忠诚度是有效提高产品利润率的关键，这需要企业有足够的技术积累和创新能力，在创新的同时，有效地控制产品生产成本尤为关键。

国内某企业的手机产品多年采用陶瓷机身^[1]，陶瓷加工工艺一直不成熟，首件成品率仅为35%左右，企业相关产品一直无法大规模量产。本文以新研发的陶瓷手机中框零件为例，探讨陶瓷材料的加工方案。针对目前陶瓷加工中遇到的问题，分析并寻找规律，优化加工工艺，涉及机床机械、数控系

统、NC程序、刀具和测量设备等方面，提升零件加工质量，解决陶瓷加工中的工艺难题，全面提升产品的成品率，助力国内手机提升在市场上的竞争力，为5G时代的到来扫平障碍。

2 陶瓷材料介绍

陶瓷材料如图1所示，是以无机非金属天然矿物或人造化合物为原料，经粉碎、成形和高温烧结而制成的非金属材料。陶瓷主要分为传统陶瓷和特种陶瓷两类。



图1 陶瓷材料

传统陶瓷以黏土（包括陶土、瓷土和高岭土等）、石英及长石等天然矿物为主要原料，经粉碎、成形和烧结而成。因具有耐火、耐酸碱、抗氧化、电绝缘性好和易于清洗等优点而被广泛应用^[2]。

特种陶瓷以氧化铝、氧化镁、氧化锆、氧化铅、氧化钛、碳化硅、碳化硼、氮化硅和氮化硼等人造化合物为原料，采用传统的或特殊的方法进行

粉碎、成形，经高温烧制而成。有的在烧成后还要进行机械加工或极化处理，以达到对尺寸和形状的精密要求，或使产品具有特定的铁电性能等。

手机上的陶瓷材料主要是氧化锆，由于陶瓷硬度高，耐腐蚀，耐高温，具有良好的物理特性，因此适合制作细小复杂的零件。

3 手机壳用陶瓷材料

在所有的陶瓷材料中，由于氧化锆陶瓷除了具有高强度、高硬度、耐酸碱、耐腐蚀及高化学稳定性等优点外，同时还具有耐磨、耐刮擦、无信号屏蔽、散热性能优良及外观效果好等特点，因此成为继塑料、金属和玻璃之后一种新型的手机机身材质^[3]。氧化锆陶瓷手机背板如图2所示。



图2 氧化锆陶瓷手机背板

陶瓷材质的手感和玻璃十分相似，但是由于陶瓷比玻璃硬很多，其莫氏硬度仅次于蓝宝石，所以陶瓷机身的手机耐磨、耐刮擦，偶尔跌落也不容易摔碎，可以说是一种比较理想的后盖材质。目前氧化锆陶瓷在手机中的应用主要是背板和指纹识别盖板两部分。氧化锆陶瓷首次应用到手机壳中框中，与原有的加工工艺完全不同，是一种全新的制造工艺，生产流程还没有完善，良品率非常低，导致陶瓷机身的手机产能很低，价格较高，无法实现大规模的量产，零件在开始生产时成品率只有35%，通过对现有生产工艺进行优化，可将成品率提升到

80%以上。

4 陶瓷手机壳零件加工工艺分析

4.1 零件图样及装夹方式

陶瓷手机壳零件如图3所示，零件加工装夹方式如图4所示。

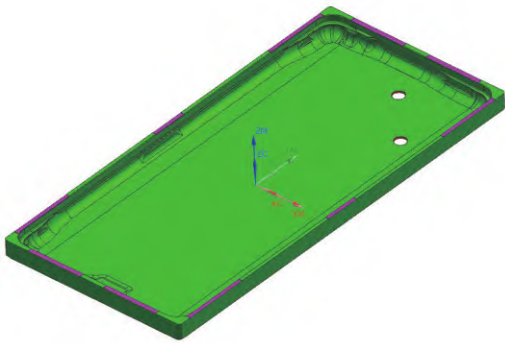


图3 陶瓷手机壳

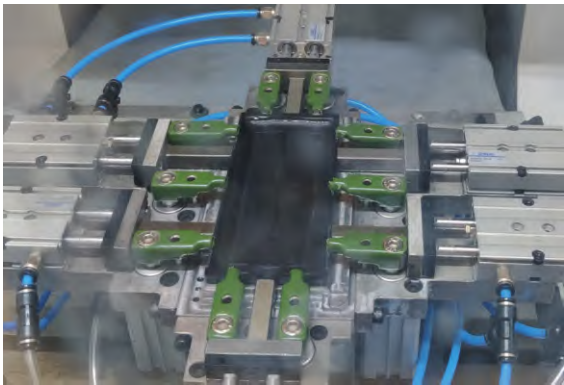


图4 零件加工装夹方式

4.2 加工设备及部分切削参数

陶瓷手机壳零件的加工设备为SINUMERIK数控系统高速钻削中心，主要加工内容有平面铣削、轮廓铣削和圆角加工，切削参数见表1。

表1 切削参数

刀号	名称	刀具规格	转速/ (r/min)	进给量/ (mm/r)	刀具寿命/min
T02	金刚石圆柱形打磨头	TC-D12R2-10H-40L-80#	20000~22000	2000~6000	25
T03		TC-D8R0.2-1.47H-D6.5-6.8H-D8-40L-100#			50
T04		TC-D10R2-10H-D10-40L-150#			25
T05		TC-D8R0.2-8H-D6-40L-100#			
T06		TC-D12-R1-15H-D10-50L-150#		3000~5000	50
T07		TC-3.5R0.3-2H-D3-45-150#-450#			
T08		TC-D1R0.1-1H-D6-40L-300#		500~2000	

4.3 编制程序的注意事项

在陶瓷手机壳零件的加工中，由于零件形状复杂，无法使用手工编程，因此为了提高加工效率及加工质量，选用NX1872进行CAD/CAM加工编程，刀具路径如图5所示。

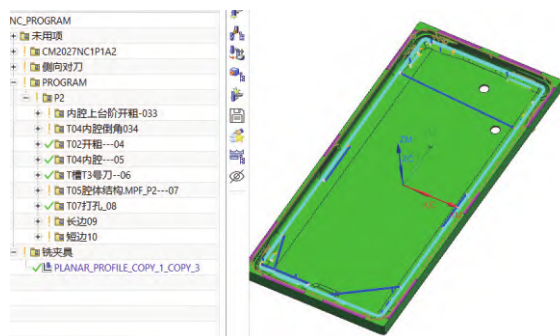


图5 刀具路径

4.4 生产过程中的主要问题

零件加工质量稳定性差，易出现加工缺陷（见图6），主要问题为尺寸精度偏差大，出现流线纹理、接刀痕、拉丝、刀圈纹、明暗纹及加工振纹等。缺陷分布如图7所示。

经过现场零件加工表现，结合加工工艺进行分析，得出以下结论。

1) 陶瓷材料为新型材料，其加工工艺处于探索阶段，目前没有成熟的加工工艺可供借鉴。

2) 陶瓷材料的加工特性对加工设备、刀具和夹具的要求较高。

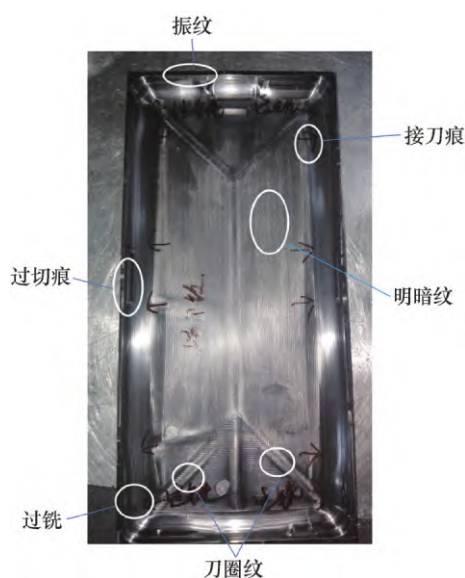


图7 缺陷分布

3) 表面质量差，加工表面存在众多加工缺陷，如尺寸精度偏差大，存在过切痕、明暗纹、刀圈纹及振纹等。

4) 材料首件成品率极低，仅为35%左右。

5) 受陶瓷材料烧制工艺的影响，磨头使用寿命不可估计，难以保证尺寸精度。

零件在加工中重点要解决加工缺陷问题，克服尺寸精度不稳定难题，提高产量和成品率，降低返修率，需要对加工设备、加工工艺、装夹方案和刀具等进行全面优化。

5 加工中的影响因素和主要措施

5.1 加工质量影响因素及解决问题的流程

在零件加工时，影响加工质量的因素众多，涉及机床机械精度、数控系统参数匹配度、加工程序的质量、刀具的选择及测量设备的精度等，各个环节出现问题都会引起零件加工质量不稳定。加工质量影响因素如图8所示。

解决问题的流程如图9所示，按照流程图对加工问题进行逐一分析，寻求解决办法。

5.2 刀具对加工的影响

在生产时发现刀具磨损严重。氧化铝陶瓷硬度等级9.0，能加工的材料只有金刚石砂轮，与传统加工工艺不同，金刚石砂轮磨损速度较快。磨头的磨损如图10所示。

(1) 刀具制造工艺 目前磨头制造工艺有两种：烧结工艺和电镀工艺。烧结工艺是胎体金属和

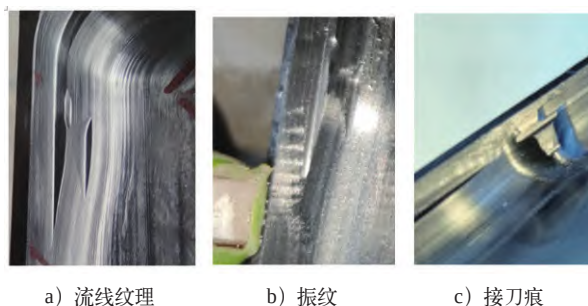
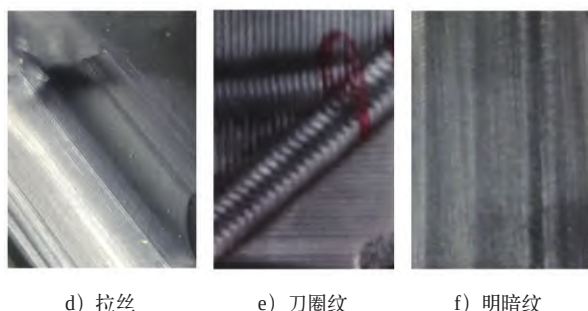


图6 加工缺陷

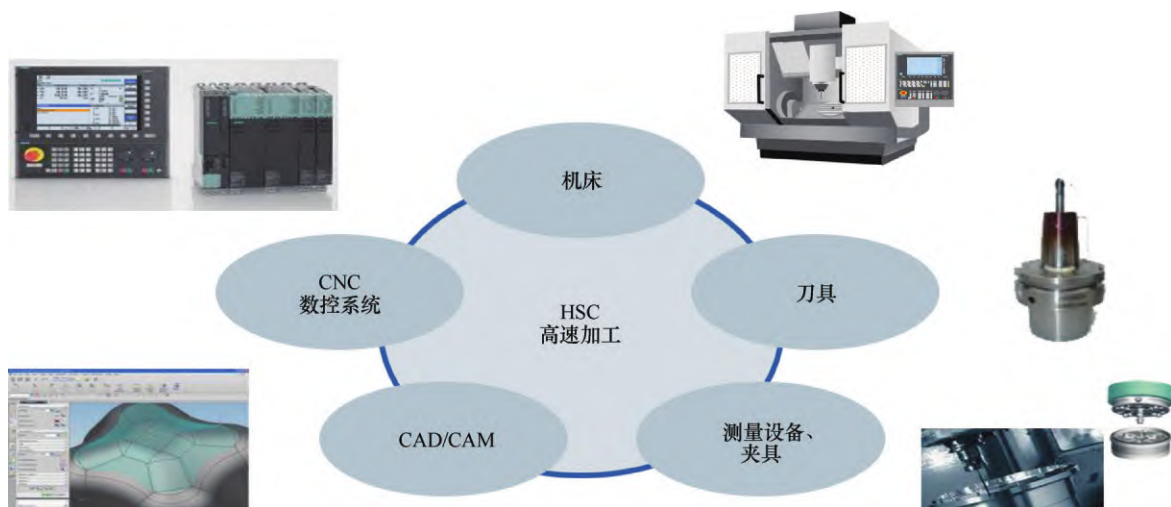


图8 加工质量影响因素

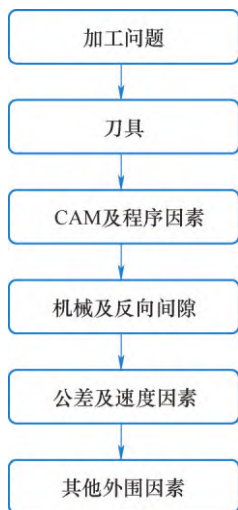


图9 解决问题的流程

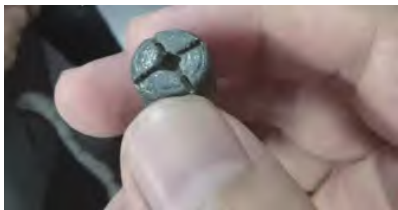


图10 磨头磨损

金刚石颗粒间有化学键连接，同时包裹度高，金刚石不易脱落，因而耐磨性好，寿命长。电镀工艺胎体金属对金刚石颗粒是机械包裹，把持力不如烧结的，耐磨性和寿命也不如烧结的，但比烧结的锋利。另外，某些细长、尖细的产品不适合烧结工艺，它会使基体变形。烧结温度高，也会使金刚石性能降低。目前采用的是电镀工艺。

(2) 振纹与接刀痕现象分析 运行程序加工一

件零件后，测量T4号磨头与T5号磨头，发现两把刀具磨损量不一致，误差相差0.01mm。刀具的测量如图11所示。



a) 加工前磨头尺寸



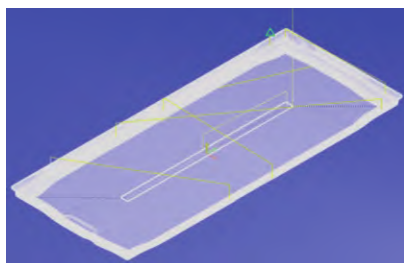
b) 加工后磨头尺寸

图11 刀具的测量

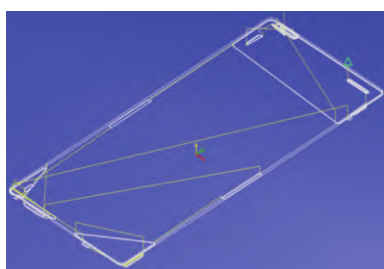
分析加工程序发现，加工中有两把刀具同时作用于同一个加工表面，两把磨头磨损量不一致时，在工艺凸起位置，精加工磨头无法加工到待加工表面，从而在加工表面引起接刀痕现象。

程序轨迹如图12所示，T4号磨头与T5号磨头加工路径相差较大，两把磨头磨损量区别较大。根据

加工工艺要求，加工侧壁的两把刀需要同时作用于同一个侧壁，当磨损量不一致时，会在侧壁留下接刀痕现象（见图13）。



a) T4号磨头刀路



b) T5号磨头刀路

图12 程序轨迹



a) 侧壁接刀痕现象



b) 局部放大

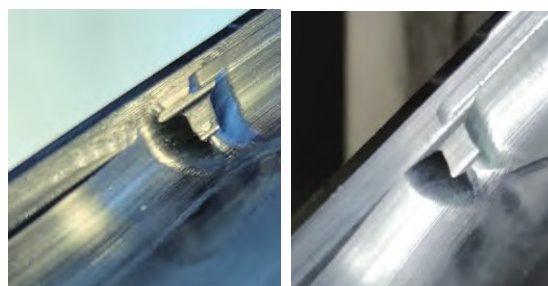
图13 接刀痕现象

(3) 解决侧壁振纹与接刀痕问题的措施 更换磨头制造工艺，采用烧结工艺的磨头，增加磨头耐磨性。改变加工程序，通过CAM软件将侧壁程序尽可能输出在零件中差位置，保证首件成品率。在首件加工结束后，增加机内刀具对刀仪测量工序，及时将刀具磨损值补偿，保证产品的稳定性。工艺优化前后零件表面对比如图14所示。

5.3 程序对加工的影响

加工中的要求通常可以概括为高效率、高品质和高精度。这三者通常难以兼得，需要有所取舍。

在实际加工中，因陶瓷手机壳产品的特殊用途，故加工表面的平滑度和加工尺寸精度要求较高，在这个基础上尽可能提高生产效率，加工程序



a) 优化前

b) 优化后

图14 工艺优化前后零件表面对比

优化是提升生产质量的关键。根据现场情况需要对加工程序进行优化，程序优化流程如图15所示。

(1) 程序精度对加工的影响 程序精度对比如图16所示，左侧图形为CAM软件生成的4位小数（小数点后为4位）程序模拟而成，工件表面较平顺；而右侧图形为3位小数程序模拟而成，可明显看出工件表面有拉丝纹路。

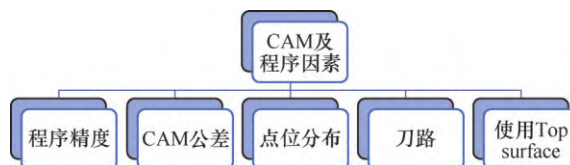


图15 程序优化流程

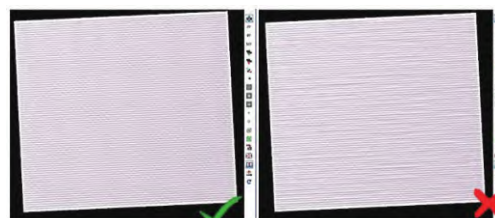
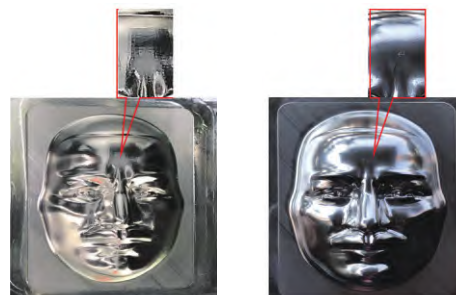


图16 程序精度对比

(2) 程序公差对加工表面的影响 CAM后处理生成的NC加工程序，会直接影响加工表面的质量，不同公差的程序，在加工表面产生不同的加工效果。程序公差对比如图17所示。



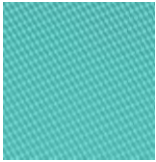
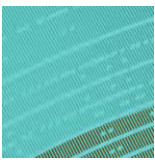
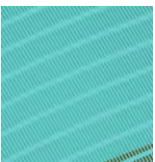
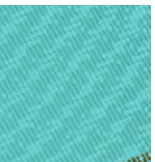
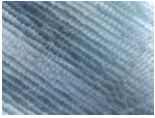
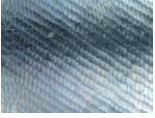
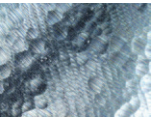
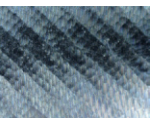
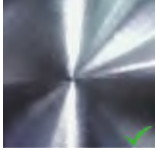
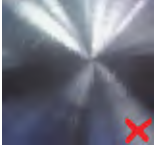
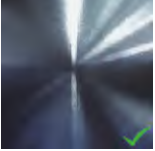
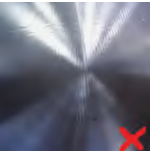
a) CAM公差为8μm

b) CAM公差为1μm

图17 程序公差对比

(3) 切削试验 为了进一步验证程序公差、点步距及加工策略对加工表面的影响，在相同的加工工况、转速、进给量和行步距下，对相同材质的材料进行切削加工试验，试验参数及效果见表2。

表2 切削加工试验参数及效果

加工程序	程序1	程序2	程序3	程序4	程序5	程序6
转速/ (r/min)	8000	8000	8000	8000	8000	8000
进给量/ (mm/r)	800	800	800	800	800	800
行步距/mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
点步距/mm	0.1	0.1	1	1	0.1	0.1
公差/mm	0.006	0.006	0.006	0.002	0.002	0.06
加工策略	在平面上-直线	在平面上-样条	在平面上-直线	在平面上-直线	在部件上-直线	在平面上-直线
加工时间/s	864	879	840	854	965	902
点位图片						
零件表面						
加工效果						

对程序1、程序2和程序3进行比较，加工策略和点步距不同，对程序生成的点位分布影响较大。点步距只会影响程序点位分布距离，对表面效果影响不明显。点位分布均匀，呈网格状分布时，加工表面效果更佳。

对程序1和程序6进行比较，加工策略和点位分布相同时，程序公差越小，表面效果越佳，加工时间越短。

对程序3和程序4进行比较，程序公差和点步距的设置，直接会影响程序点位的输出，公差设置过小时，会影响程序点位的输出。

对程序4和程序5进行比较，在步距、公差设置相同时，不同的加工策略也会直接影响程序点位的输出，程序点位的排列不佳时，会严重影响表面质量，增加程序的加工时间。

综上所述，在CAM软件生成时，应选择适合的加工策略、点步距和进给量，优化NC程序的点位分布。好的点位分布可以提高加工表面质量，缩短加工时间。反之，表面质量会变差。

(4) 解决流线现象的主要措施 流线现象如图18所示。陶瓷模具加工刀路点位分布与侧壁流线现象有直接关系。

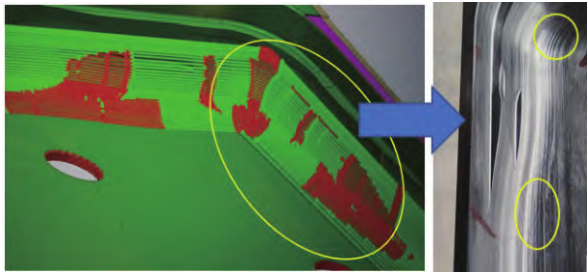


图18 流线现象

优化加工刀路，将CAM软件点间距设置成0.2mm，程序公差设置成0.006mm，可使用甄优曲面优化功能代替精优曲面优化功能进行切削。甄优曲面优化功能会对程序中不理想的点位、刀路进行重新优化，程序优化后，流线纹理完全消失。程序优化前后加工效果对比如图19所示。



a) 程序优化前点位分布

b) 程序优化后点位分布



c) 点位优化前加工表面

d) 点位优化后加工表面

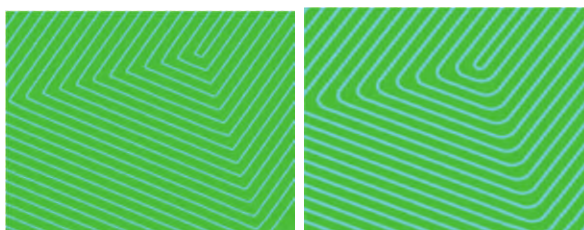
图19 程序优化前后加工效果对比

(5) 刀圈纹现象分析 刀圈纹是加工中十分常见的问题，在机床直线进给或拐角处，可能会产生规则性或无规则的刀圈纹、渐变刀圈纹、单一刀圈纹和拐角刀圈纹等，刀圈纹的形状酷似奥迪汽车的品牌标志。

刀圈纹在刀具移动方向出现变化的地方，且刀痕间距不尽相同，由于刀痕随移动距离逐渐减弱，所以判断振动发生在换向处。刀具在换向位置时，机床X、Y轴丝杠进行加减速运动，加减速速度设定引起轴移动时轻微的过冲及机械振动，导致出现入刀或拐角刀圈纹。

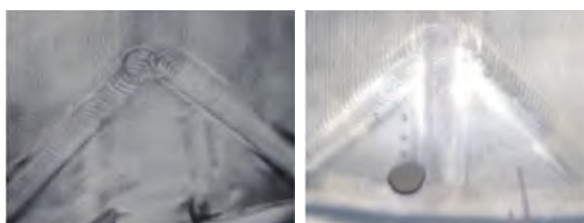
(6) 解决刀圈纹问题的主要措施 调整机床加减速参数，减小过冲和机械振动，在程序中增加系统指令Top surface，该指令可以平滑程序坏点、减

小机械冲击并消除轮廓误差等，优化加工路径，在程序拐弯处设置更多圆弧，让刀具在拐弯处平滑换向。刀路优化前后加工效果对比如图20所示，刀路优化后，刀圈纹基本消除。



a) 优化前刀路

b) 优化后刀路



c) 程序优化前加工表面

d) 程序优化后加工表面

图20 刀路优化前后加工效果对比

5.4 机械及系统参数对加工的影响

机械和系统参数设置也是影响加工质量的重要因素之一，可以按照图21所示的机械及系统参数优化流程逐一排查。

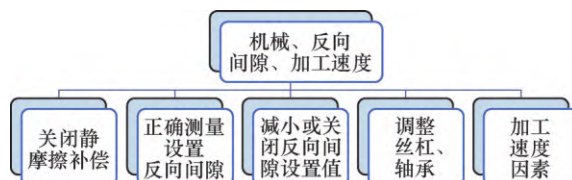


图21 机械及系统参数优化流程

(1) 机械及反向间隙对加工的影响 反向间隙对加工的影响如图22所示，在模具加工时，同一个



a) 调整前反向间隙大

b) 调整后反向间隙小

图22 反向间隙对加工的影响

程序，在相同的工况下，反向间隙补偿和静摩擦补偿对加工表面有很大影响。

(2) 速度不均匀对加工的影响 进行切削试验，研究系统参数对加工的影响。测试不同的最大轴冲击（系统参数MD32431）对加工速度的影响，使用相同的程序修改最大轴冲击（系统参数MD32431），监控加工轨迹的速度，通过系统功能监控（Trace）加工轨迹上的速度，监控文件使用专业软件AMWT分析可得图23所示的红黄蓝曲线，不同的颜色代表不同的速度，速度由快到慢依次为红、黄、蓝。由图23可知，系统参数对加工速度的变化有直接的影响。

速度优化前后对加工的影响如图24所示，当加工轨迹速度不均匀时，刀具作用于加工面时忽快忽

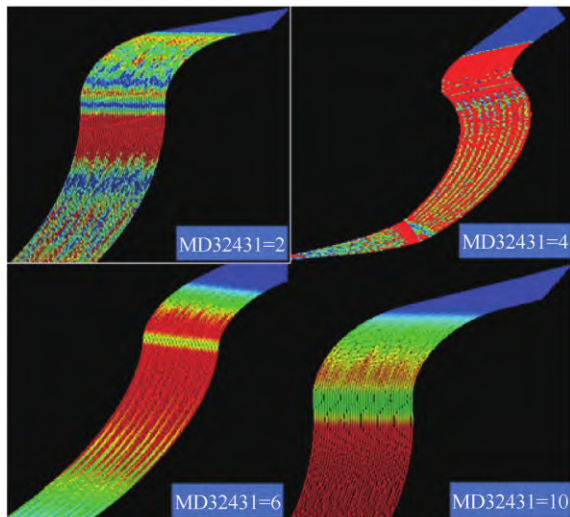
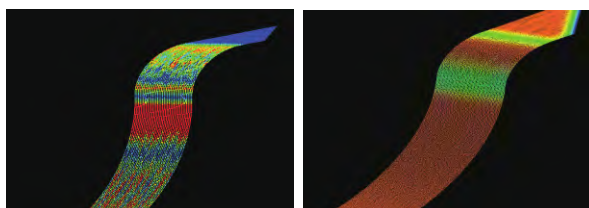
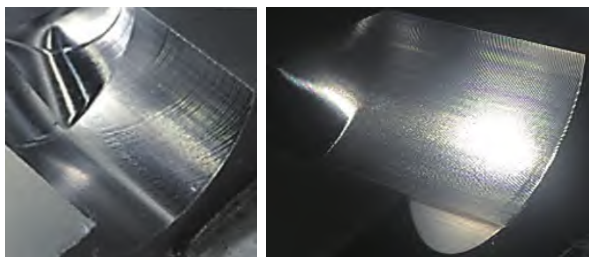


图23 系统参数对加工速度的影响



a) 优化前速度变化

b) 优化后速度变化



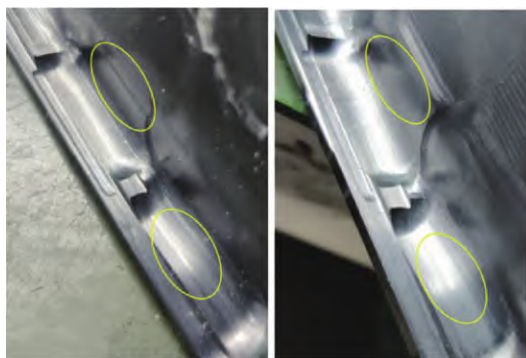
c) 速度优化前加工表面

d) 速度优化后加工表面

图24 速度优化前后对加工的影响

慢，加工表面会产生不均匀的纹理，这种现象被称为“拉丝现象”。这种现象可以通过改变系统参数和程序公差进行优化。

(3) 解决拉丝问题的主要措施 关闭静摩擦补偿，使用千分表或激光干涉仪精确检测反向间隙值（MD32450），重点检测Z轴，如果方向间隙过大（线轨应 $\leq 0.005\text{mm}$ ），则应进行必要的机械调整，如丝杠预拉伸及轴承调整等，如无法调整，可尝试设置值为实际反向间隙的一半，或关闭反向间隙进行试切。通过优化轨迹速度和程序公差，增加系统功能“Jerktime”，按照这个思路对现有加工设备进行优化，可有效地消除拉丝现象。拉丝现象消除前后加工效果对比如图25所示。



a) 参数优化前加工表面

b) 参数优化后加工表面

图25 拉丝现象消除前后加工效果对比

6 结束语

通过对加工设备、加工工艺及刀具的全面优化，克服了陶瓷材料的加工缺陷，将手机壳成品率由原来的35%提升到80%以上，产品已达到量产标准，降低了生产成本，目前该产品已经成功上市。陶瓷材质手机壳手感圆润、质地坚硬，耐磨、耐刮擦，不易摔碎，对信号无任何干扰，随着生产工艺的逐渐成熟，陶瓷手机壳将会受到消费者的广泛青睐。

参考文献：

- [1] 孟少农. 机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
- [2] 秦旭达，贾昊，王琦，等. 插铣技术的研究现状[J]. 航空制造技术，2011（5）：40-42.
- [3] 田荣鑫，史耀耀，杨振朝，等. TC17钛合金铣削刀具磨损对残余应力影响研究[J]. 航空制造技术，2011（1）：134-138.