

文章编号: 1674-8190(2024)03-174-08

# 直升机起落架轮轴碳化钨磨削工艺研究

徐帅, 张金辉

(昌河飞机工业(集团)有限责任公司 机加中心, 景德镇 333000)

**摘要:** 受超声速火焰喷涂工艺方法的限制, 喷涂碳化钨的轮轴必须通过磨削工艺保证表面质量和尺寸精度, 然而轮轴的弱加工刚性和涂层的高耐磨性导致磨削过程中易出现让刀、颤刀等现象, 造成零件磨削质量不合格。首先采用正交试验法研究四种精磨工艺参数对磨削表面粗糙度的影响, 然后研究装夹工具和磨削策略对零件圆柱度的影响, 最后加工并收集15件轮轴的各段外圆尺寸并计算其过程能力指数。结果表明: 选择高砂轮线速度、小切深以及适中的砂轮轴向进给速度与工件线速度可以获得粗糙度为 $0.4\ \mu\text{m}$ 的零件表面, 增加装夹工具的夹持长度和刚性并采用“粗磨—精磨—光磨”策略可保证零件外圆的圆柱度不大于 $0.01\ \text{mm}$ , 轮轴过程能力指数的计算结果不小于1.33, 整个磨削工艺可靠、稳定。

**关键词:** 碳化钨; 起落架轮轴; 磨削; 过程能力指数

中图分类号: V262

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.18

## Research on tungsten carbide grinding technology of helicopter landing gear wheel axle

XU Shuai, ZHANG Jinhui

(Machine Center Department, Changhe Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333000, China)

**Abstract:** Due to the limitation of the supersonic flame spraying process method, the axle sprayed with tungsten carbide must ensure the surface roughness and dimensional accuracy through the grinding process, but the weak machining rigidity of the axle and the high wear resistance of the coating lead to the phenomenon of making the cutting tool and shaking the cutting tool in the grinding process, resulting in the unqualified grinding quality of the parts. Firstly, the influence of four fine grinding process parameters on the grinding surface roughness is studied by orthogonal experimental method. Then, the influence of clamping tools and grinding strategies on the cylindricity of parts is studied. Finally, the outer dimensions of the individual sections of the 15 axles are machined and collected and their process capability indices are calculated. The results show that the surface of the part with roughness of  $Ra0.4$  can be obtained by selecting high grinding wheel linear velocity, small depth of cut and moderate grinding wheel axial feed rate and workpiece linear velocity, increasing the clamping length and rigidity of the clamping tool, and adopting the strategy of "coarse grinding-fine grinding-smooth grinding" to ensure that the cylindricity of the outer circle of the part is not more than  $0.01\ \text{mm}$ . The axle process capability index is not less than 1.33, and the entire grinding process is reliable and stable.

**Key words:** tungsten carbide; landing gear wheel axle; grinding; process capability index

收稿日期: 2023-07-17; 修回日期: 2023-11-23

通信作者: 徐帅(1994—), 男, 硕士, 助理工程师。E-mail: 1789067464@qq.com

引用格式: 徐帅, 张金辉. 直升机起落架轮轴碳化钨磨削工艺研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 174-181.

XU Shuai, ZHANG Jinhui. Research on tungsten carbide grinding technology of helicopter landing gear wheel axle[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 174-181. (in Chinese)

## 0 引言

起落架是直升机安全降落、起飞的重要承力部件,功能是吸收着陆能量,控制着陆载荷,提供适当的刚度和阻尼防止全机发生地面共振<sup>[1]</sup>。为提高某型号直升机起落架筒轴类零件在海洋环境下的使用寿命,设计人员在研制阶段将起落架筒轴类零件的表面处理工艺由传统的电镀硬铬镀层调整为碳化钨涂层。相比电镀硬铬镀层,碳化钨涂层的硬度更高、耐磨性及耐腐蚀性更好<sup>[2]</sup>。制备碳化钨涂层的技术有等离子喷涂技术<sup>[3-4]</sup>、冷喷涂技术<sup>[5]</sup>、爆炸喷涂<sup>[6]</sup>以及超声速火焰喷涂技术<sup>[7-11]</sup>。相比其他喷涂技术,超声速火焰喷涂制备的碳化钨涂层致密性高、孔隙率低、结合强度高。由于超声速火焰喷涂技术的沉积速度和沉积效率不高<sup>[12]</sup>,导致沉积后的涂层表面粗糙度较高,无法直接使用,需要对涂层进行二次加工。

由于碳化钨涂层的高硬度和高耐磨性,只能使用金刚石砂轮对其进行磨削加工<sup>[13-14]</sup>。因此,研究者针对不同种类碳化钨涂层,开展了许多的磨削工艺研究。柏洪武等<sup>[15]</sup>选择了材质为Q345,规格为57 mm×26 mm×6 mm的方块为涂层基体,对比了四种碳化钨的物相组成、硬度、耐磨性能和耐腐蚀性能;徐成等<sup>[16]</sup>使用一块材质为45钢,尺寸为60 mm×20 mm×15 mm的方块作为WC-10Co-4Cr涂层的基体验证了不同的磨削液和砂轮参数对于涂层表面粗糙度的影响;Zoei等<sup>[17]</sup>使用的基体是一块材质为AISI100的20 mm×20 mm×4 mm的长方体,研究了不同磨削参数对于HVOF喷涂WC-10Co-4Cr涂层的耐磨性以及残余应力的影响,发现在合理的磨削参数下,涂层的耐磨性得到了提高。以上研究采取的磨削方式均为平面磨,选择的涂层基体均为长方体。考虑到碳化钨涂层应用广泛,喷涂的基体不仅限于长方体,关艳英等<sup>[18]</sup>选择一根材质为Ti-6Al-4V,规格为25.4 mm×120 mm的实心轴作为WC-17Co涂层的基体开展了外圆磨研究。

以上研究旨在探索出碳化钨涂层的磨削机理以及最佳的磨削参数,没有考虑基体刚性对于磨削结果的影响,所使用的基体均为实心结构,加工刚性强,磨削时不会发生振动。然而起落架筒轴类零件拥有大长径比、大尺寸及薄壁的结构特点,由于加工刚性弱,磨削其表面碳化钨涂层时,加工

质量难以达到设计要求。因此,本文将选取起落架部件中加工刚性最差的轮轴为研究对象,以表面粗糙度和圆柱度为研究目标,探索磨削参数、装夹工具和磨削策略对于零件磨削质量的影响,以为大尺寸高精度薄壁筒轴类零件的碳化钨磨削工艺研究提供更多的参考。

## 1 零件及试验设备

### 1.1 零件简介

起落架轮轴属于对称式空心阶梯轴类零件,共有5段,其中有两组对称段,如图1所示。设计要求零件表面粗糙度为0.4 μm,每段外圆的圆柱度不超过0.01 mm。而零件长径比达10,最小壁厚仅4.5 mm,加工刚性差,加工过程中易产生让刀、颤刀等现象,导致磨削质量差,此外,超声速火焰喷涂碳化钨涂层洛氏硬度高达65~70,耐磨性极强,磨削过程中会产生大量的磨削热及磨削力,增加了磨削工艺的难度。

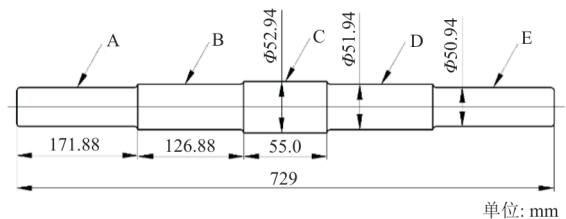


图1 轮轴示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the axle

### 1.2 试验设备

本文使用的数控磨床为B2-GP32,如图2(a)所示,配备高硬度的金刚石砂轮如图2(b)所示,以及高精度在线测量仪如图2(c)所示。为了提高零件的装夹效率并增强零件的加工刚性,自制了两个辅助工装:装夹辅助支撑块和吸振装置,分别如图2(d)~图2(e)所示,它们在磨床上的应用如图2(f)所示。高精度筒轴类零件磨削时通常采用两顶的装夹方式,因此,需要工人在固定零件一端后,一手托着零件,另一只手操作设备移动尾部支座的顶尖靠住零件,装夹难度较大。装夹辅助支撑块由一个V型块和一个安装底座构成,在实际装夹中代替工人托住零件,调节螺钉可使零件圆心与磨床主轴基本同心,工人只需操作磨床移动顶尖顶紧零件即可,降低了装夹难度,提高了装夹效

率。吸振装置由四个部分组成,主要部分为吸振垫片和支撑垫片。吸振垫片直接与零件接触,其材质为耐磨橡胶,作用是在磨削过程中对零件提供弹性支撑,以减缓零件的径向振动,从而达到稳定磨削的目的;支撑垫片材质为 45A,其作用是固

定吸振垫片。使用吸振装置前后的轮轴粗磨效果如图 3 所示,可以看出:使用吸振装置可消除因零件加工弱刚性引起的表面振纹,显著提升了零件的磨削表面质量。



图 2 试验设备  
Fig. 2 Test equipment

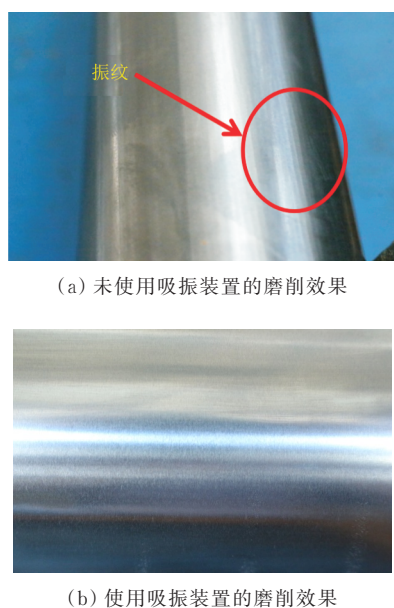


图 3 使用吸振装置前后的磨削效果对比  
Fig. 3 Comparison of grinding results before and after using a vibration absorption device

## 2 工艺参数对零件粗糙度的影响

为保证加工质量、提升加工效率,本文选择粗磨—精磨策略,加工余量分别为 0.27 和 0.03 mm。磨削参数在磨削加工中的重要性不言而喻,本文考虑了砂轮线速度、工件线速度、砂轮轴向进给速度以及切深四个磨削参数对于磨削效果的影响。粗磨的目的是去除加工余量,因此其磨削参数设置为低切削速度、高进给及大切深;精磨的目的是保证加工精度,因此其磨削参数设置为高切削速度、低进给及小切深,具体参数如表 1 所示。

表 1 粗磨和精磨参数  
Table 1 Coarse and fine grinding parameters

磨削精度	砂轮线速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	工件线速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	砂轮轴向进给速度/ ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	切深/mm
粗磨	35	0.3	3.5	0.015
精磨	35~45	0.3~0.4	2.5~3.5	0.005~0.010

为了达到设计要求的表面粗糙度,本文采用正交试验法探究四种磨削参数对于零件精磨质量的影响,每个参数有三种水平,如表2所示。每组试验的加工余量均为0.03 mm,评价指标为表面粗糙度,试验结果如表3所示。同时,计算四种磨削参数相对于表面粗糙度的极差值 $R$ ,如表4所示。 $R$ 值的大小能反映出各个参数的影响程度, $R$ 值越大,该参数的影响越大。

表2 正交试验因素水平表  
Table 2 Orthogonal test factor level

水平程度	砂轮线速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	工件线速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	砂轮轴向进给速度/ ( $mm \cdot s^{-1}$ )	切深/mm
水平 I	35	0.30	2.5	0.005 0
水平 II	40	0.35	3.0	0.007 5
水平 III	45	0.40	3.5	0.010 0

表3 不同磨削参数下的精磨效果  
Table 3 Fine grinding effect under different grinding parameters

试验组	砂轮线速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	工件线速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	砂轮轴向进给速度/ ( $mm \cdot s^{-1}$ )	切深/ mm	粗糙度/ $\mu m$
1	35	0.30	2.5	0.005 0	1.6
2	35	0.35	3.0	0.007 5	1.6
3	35	0.40	3.5	0.010 0	1.6
4	40	0.30	3.0	0.010 0	1.6
5	40	0.35	3.5	0.005 0	0.4
6	40	0.40	2.5	0.007 5	0.8
7	45	0.30	3.5	0.007 5	0.8
8	45	0.35	2.5	0.010 0	1.6
9	45	0.40	3.0	0.005 0	0.4

表4 基于不同磨削参数的粗糙度极差值  
Table 4 Roughness range values based on different grinding parameters

参数	粗糙度/ $\mu m$			
	水平 I	水平 II	水平 III	极差
砂轮线速度	4.8	2.8	2.8	2.0
工件线速度	4.0	3.6	2.8	1.2
砂轮轴向进给速度	4.0	3.6	2.8	1.2
切深	2.4	3.2	4.8	2.4

从表4可以看出:切深对于零件表面粗糙度的影响最大,砂轮线速度次之,砂轮轴向进给速度与工件线速度的影响最小。因此,在磨削过程中,应选择较高的砂轮线速度,较小的切深以及合适的

砂轮轴向进给速度与工件线速度。综合分析表3和表4,只有试验组5和试验组9的表面磨削质量符合设计要求,而且试验组9的砂轮线速度高于试验组5。因此,本文选择试验组9的参数作为轮轴实际生产加工的磨削参数。

### 3 装夹工具及磨削策略对零件圆柱度的影响

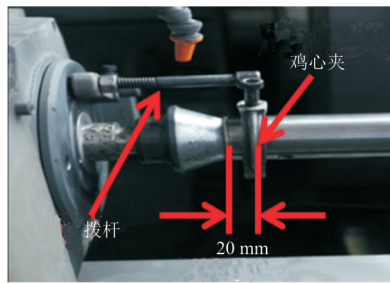
#### 3.1 拨杆对于零件圆柱度的影响

轮轴属于对称式阶梯轴零件,适用于分段对称磨削的方式,具体路径为C→D→B→A→E。磨削时采用两顶的装夹方式,为了驱动零件旋转,其中增加两个夹持部件,分别是“鸡心夹”和拨杆,如图4(a)所示,这使得零件装夹方式看起来像“一夹一顶”。在磨削完C段外圆,测量发现其呈椭圆状,圆柱度大于0.02 mm,这表明零件在磨削过程中出现了跳动。根本原因是拨杆的长度过短,夹持长度只有20 mm,导致零件转动时稳定性不足。于是本文更换了一根材质相同的长拨杆(如图4(b)所示),并增加轮轴的夹持长度,磨削表面椭圆问题虽有所改善,但仍大于0.01 mm。观察发现,是因为长拨杆发生了弯曲变形,导致其对零件加工刚性的强化效果有限。拨杆的受力变形简化图如图5所示,变形公式<sup>[19]</sup>如下:

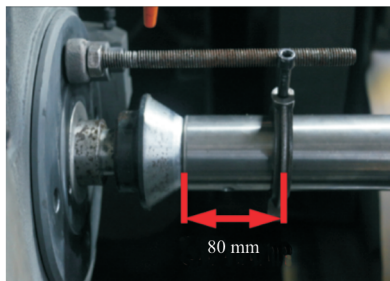
$$w = -\frac{Fa^2}{6EI}(3L - a) \quad (1)$$

式中: $w$ 为挠度; $F$ 为载荷; $E$ 为拨杆的弹性模量; $I$ 为截面惯矩; $L$ 为拨杆总长; $a$ 为跨度,负号表示挠度的方向向下; $F$ 与 $a$ 的乘积为轮轴驱动扭矩。

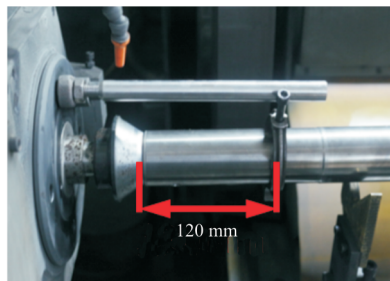
由公式(1)可知,在其他变量不变的情况下,随着 $L$ 和 $a$ 的增加,拨杆的变形亦随之增加。为了保证拨杆的刚性,本文使用弹性模量更大的45A作为拨杆的材质(如图4(c)所示),并进一步增加了夹持长度,最终将零件圆柱度控制在0.005 mm以内。以上三根拨杆对于零件C段圆柱度的影响结果如表5所示,可以看出:随着夹持距离的增加以及拨杆自身刚性的增强,零件外圆的磨削质量亦随之增强。



(a) 拨杆 1



(b) 拨杆 2



(c) 长拨杆 3

图 4 三种拨杆

Fig. 4 Three kinds of levers

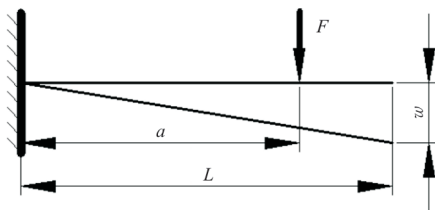


图 5 拨杆受力变形图

Fig. 5 Deformation diagram of lever

表 5 拨杆对于轮轴圆柱度的影响

Table 5 Effect of the lever on the cylindricity of the axle

拨杆	材质	夹持长度/mm	C段圆柱度/mm
拨杆 1	0Cr17Ni2	20	大于 0.02
拨杆 2	0Cr17Ni2	80	0.010~0.015
拨杆 3	45A	80	0.005~0.010
拨杆 3	45A	120	小于 0.005

### 3.2 磨削策略对于零件圆柱度的影响

磨削完轮轴剩余对称段外圆后,发现均出现锥度缺陷,即每段外圆靠近中部(C段)的尺寸均比靠近端面的大,最大值可达 0.03 mm,经过分析发现这与磨削的进刀方式有关。以 D 段外圆为例,为保证磨削效率,采用了往复磨削的方式,即在进刀点 1(靠近中部端)进刀,磨削完整段后再从进刀点 2(靠近端面端)进刀,如图 6 所示。

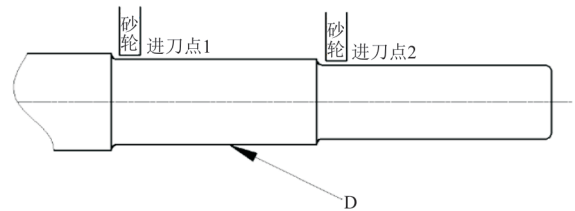


图 6 轮轴 D 段外圆进刀方式

Fig. 6 Cylindrical feed mode of D section of the axle

当砂轮从进刀点 1 进刀时是直接径向切入零件,径向切削力较大,而且对于轮轴零件来说,越靠近中部,其刚性较弱,因此零件在进刀点 1 处产生明显径向让刀现象;而在进刀点 2 处,零件刚性较好,且砂轮在零件外进刀,径向力较小,零件径向让刀现象不明显,从而导致锥度缺陷。针对上述问题,本文从以下三个角度对加工策略进行优化。

1) 统一采用单向式磨削方式。即给定一定切深,在指定进刀点进刀,磨完该段外圆后,砂轮在无切深的情况下“光磨”返回至初始进刀点。

2) 统一进刀点,从每段外圆靠近中部端进刀。

3) 增加光磨工步,即精加工完成后,零件单边留 0.005~0.010 mm 用于光磨,在保证砂轮径向位置不变的情况下,光磨零件 2~4 次,平衡让刀量。

使用优化后的磨削策略后,零件锥度问题得到有效改善,每段外圆的圆柱度可控制在 0.005 mm 范围内。

## 4 零件过程能力管控

### 4.1 零件过程能力指数计算

为保证零件磨削尺寸的稳定性,降低零件的不合格率,本文引入过程能力分析。过程能力是

指过程的加工质量满足技术标准的能力,被用来衡量过程加工内在一致性<sup>[20]</sup>。过程能力指数( $C_{pk}$ )是过程能力的量化, $C_{pk}$ 值越大,表明产品尺寸的离散程度相对于技术公差范围越小,产品的不合格率越小。但是从经济和质量两方面的要求来看, $C_{pk}$ 并非越大越好,应当在一个适当的范围内取值,一般不小于 1.33。 $C_{pk}$ 的计算公式如下:

$$C_{pk} = \min \left( \frac{U_{SL} - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - L_{SL}}{3\sigma} \right) \quad (2)$$

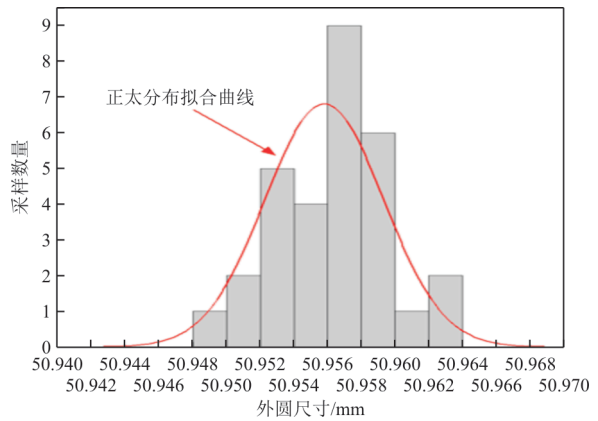
式中: $U_{SL}$ 和 $L_{SL}$ 分别为设计要求的零件尺寸的上限值和下限值; $\bar{X}$ 为样本均值; $\sigma$ 为样本的标准差。

本文收集并统计 15 根轮轴的外圆尺寸数据,共 5 组,每组样本数均为 15,如表 6 所示。其中,A 段与 E 段的外圆尺寸的设计上下限一致,B 段和 D 段一致。

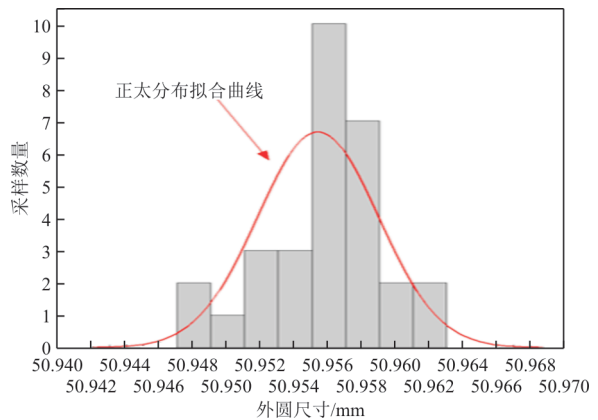
表 6 轮轴各段外圆尺寸  
Table 6 Outer circle size

样本编号	A 段尺寸/mm	E 段尺寸/mm	B 段尺寸/mm	D 段尺寸/mm	C 段尺寸/mm
1	50.963	50.959	51.949	51.952	52.954
2	50.957	50.955	51.956	51.956	52.959
3	50.951	50.95	51.953	51.948	52.948
4	50.957	50.952	51.948	51.951	52.95
5	50.952	50.953	51.953	51.953	52.956
6	50.948	50.958	51.958	51.956	52.954
7	50.952	50.955	51.955	51.952	52.962
8	50.955	50.958	51.958	51.957	52.951
9	50.958	50.957	51.959	51.962	52.953
10	50.958	50.962	51.956	51.958	52.958
11	50.956	50.957	51.962	51.955	52.957
12	50.959	50.956	51.957	51.956	52.955
13	50.954	50.956	51.956	51.957	52.956
14	50.956	50.961	51.958	51.96	52.958
15	50.957	50.952	51.955	51.955	52.955

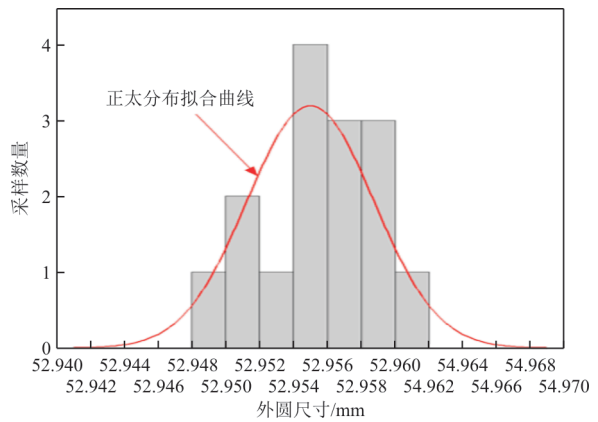
由于增加样本数可提高  $C_{pk}$  值的可靠性,因此,本文将上下限尺寸相同的两段外圆尺寸数据(A 段和 E 段、B 段和 D 段)进行合并,得到 3 组样本数据,数量分别为 30、30、15,数据的分布如图 7 所示,这三组数据符合正态分布。根据公式(2),可得到  $C_{pk}$  值、标准差和均值如表 7 所示,可以看出:轮轴外圆的  $C_{pk}$  值均大于 1.33,达到 4 西格玛水平,证明了整个磨削工艺的可靠性与稳定性。



(a) A、E 段外圆



(b) B、D 段外圆



(c) C 段外圆

图 7 轮轴外圆尺寸分布情况

Fig. 7 Distribution of the outer circle of the axle

表 7 轮轴各段外圆尺寸及过程能力指数  
Table 7 Outer circle size and process capability index of each section of the axle

样本编号	样本均值	标准差	设计上限	设计下限	$C_{pk}$
1	50.955 8	0.003 52	50.94	50.97	1.35
2	51.955 4	0.003 59	51.94	51.97	1.36
3	52.955 1	0.003 69	52.94	52.97	1.35

## 4.2 零件过程能力指数提高措施

根据公式(2),提高 $C_{pk}$ 的途径主要有两种:减少中间偏移量,即样本均值与上下限的平均值之差;减小标准差 $\sigma$ ,如图8所示。采取减少中心偏移量的措施,在技术上、操作上均较容易实现,也不必投入太多的人力、财力和物力,因此是提高 $C_{pk}$ 的首选措施。只有当中心偏移量已为零而 $C_{pk}$ 仍达不到要求时,才考虑减小标准差来提高过程能力,并从人、机、料、法、环五个方面来进行改善,但技术难度较大,需要较多的投入。

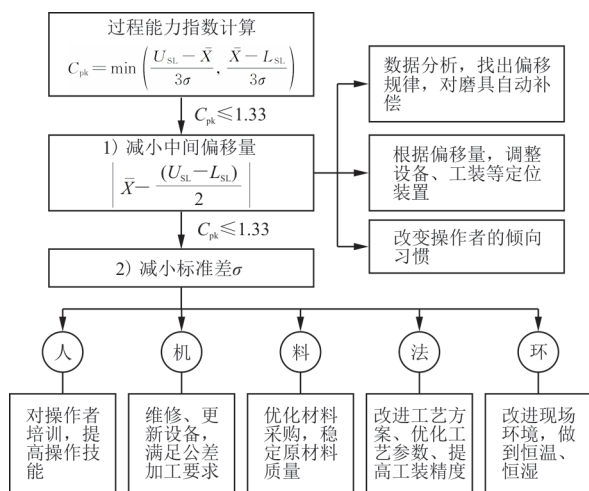


图8  $C_{pk}$ 提高策略

Fig. 8  $C_{pk}$  improvement strategy

观察表7发现零件样本均值大于设计均值,原因有:在实际生产过程中,如果砂轮损耗不足以使光磨后的零件表面质量和尺寸精度超差,工人一般不会对砂轮采取相应的修整以及径向位置调整的措施,这就导致零件外圆尺寸随着砂轮的磨损逐渐偏向上差;工人在磨削零件外圆时,会潜意识将零件尺寸往上公差加工。在后续的研究中将制定如下改进措施以进一步提高 $C_{pk}$ 值。

1) 磨削零件时,若发现连续三根零件尺寸在公差范围内持续增长,则及时调整砂轮径向位置或对砂轮进行修整。

2) 开展质量意识培训,引导工人建立以零件尺寸理论均值为目标的加工倾向。

## 5 结论

1) 本文通过正交试验探究出能保证零件粗糙度满足 $0.4 \mu\text{m}$ 的磨削参数,并揭示了四种磨削参

数对于轮轴表面粗糙度的影响程度:其中,切深对于零件表面粗糙度的影响最大,砂轮线速度次之,砂轮轴向进给速度与工件线速度的影响最小。

2) 根据轮轴磨削出现的椭圆问题,研究了装夹工具的影响,结果发现随着驱动拨杆自身刚性以及夹持距离的增加,零件圆柱度公差随之减少,并最终控制在 $0.005 \text{ mm}$ 以内。

3) 根据轮轴磨削出现的锥度问题,分析了磨削方式的影响,发现在零件让刀的影响下,进刀方式和进刀点不统一是造成零件锥度的主要原因。为消除零件让刀现象,开发了新的磨削策略——“粗磨—精磨—光磨”,进一步稳定了产品质量,并保证了轮轴外圆尺寸的过程能力指数不小于1.33。

## 参考文献

- [1] 向宗威,冯广,姜义尧,等. 飞机起落架结构间隙对摆振稳定性影响研究进展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 86-95.  
XIANG Zongwei, FENG Guang, JIANG Yiyao, et al. Research progress on the effect of structural clearance of aircraft landing gear on shimmy stability[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 86-95. (in Chinese)
- [2] 袁野. 超音速火焰喷涂碳化钨涂层与电镀硬铬层的对比研究[J]. 冶金管理, 2019(23): 33-35.  
YUAN Ye. Comparative study of supersonic flame-sprayed tungsten carbide coating and electroplating hard chrome layer [J]. China Steel Focus, 2019(23): 33-35. (in Chinese)
- [3] SENDEROWSKI C, BOJAR Z. Gas detonation spray forming of Fe-Al coatings in the presence of interlayer[J]. Surface & Coatings Technology, 2008 (15): 3538-3548.
- [4] 舒琴,何建洪,韩建兴. 热喷涂航空发动机用耐磨涂层的制备方法及性能研究[J]. 中国金属通报, 2020(9): 91-92.  
SHU Qin, HE Jianhong, HAN Jianxing. Research on the preparation method and properties of wear-resistant coating for thermal spraying aero engine[J]. China Metal Bulletin, 2020(9): 91-92. (in Chinese)
- [5] 柳敏志,李相波,程旭东. 冷喷涂技术的最新进展及应用研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(20): 175-177.  
LIU Minzhi, LI Xiangbo, CHENG Xudong. New development and application of cold spray technology[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(20): 175-177. (in Chinese)
- [6] 何昆. 爆炸喷涂碳化钨粉末及其涂层性能的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.  
HE Kun. A comparative study on WC powder end coatings deposited by detonation spray[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)
- [7] 郭力,江志顺,尚振涛. 超音速火焰喷涂WC-17Co涂层的

- 高速磨削机理试验研究[J]. 中国机械工程, 2016(10): 1279-1286.
- GUO Li, JIANG Zhishun, SHANG Zhentao. Experimental research on HVOF sprayed WC-17Co coating at high speed grinding mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 2016(10): 1279-1286. (in Chinese)
- [8] KOGA G Y, WOLF W, SCHULZ R, et al. Corrosion and wear properties of FeCrMnCoSi HVOF coatings [J]. Surface and Coating Technology, 2019, 357: 993-1003.
- [9] GHADAMI F, ZAKERI A, AGHDAM A S R, et al. Structural characteristics and high-temperature oxidation behavior of HVOF sprayed nano-CeO<sub>2</sub> reinforces NiCoCrAlY nanocomposite coatings[J]. Surface and Coating Technology, 2019, 373: 7-16.
- [10] MAEKAI I A, HARMAN G A, ZEHAB-UD-DIN, et al. Resistance to slurry erosion by WC-10Co-4Cr and Cr3C2-25(Ni20Cr) coatings deposited by HVOF stainless steel F6NM[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 105: 105830-105839.
- [11] JALALI A M, TOLOUEI-RAD M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings[J]. Ceramics International, 2019, 45: 13934-13941.
- [12] LUDWIG G A, MALFATTI C F, SCHROEDER R M, et al. WC10Co4Cr coatings deposited by HVOF on martensitic stainless steel for use in hydraulic turbines: resistance to corrosion and slurry erosion[J]. Surface and Coating Technology, 2019, 377(C): 124918.
- [13] 徐成. 超音速火焰喷涂碳化钨涂层磨削热特性与磨削工艺优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- XU Cheng. Study on grinding thermal characteristics and grinding process optimization of tungsten carbide coating sprayed by high velocity oxygen fuel spraying [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [14] 张振宇, 周淳琛, 冯俊元. 不同线速度下无结合剂碳化钨的磨削机理及机械化学磨削试验研究[J]. 航空制造技术, 2022(9): 36-42.
- ZHANG Zhenyu, ZHOU Chunchen, FENG Junyuan. Grinding mechanism and mechanical chemical grinding experiment of binderless tungsten carbide at different linear speeds [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022 (9): 36-42. (in Chinese)
- [15] 柏洪武, 邱晓来, 刘长生. 超音速火焰喷涂4种典型WC基金属陶瓷涂层的组织和性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(9): 72-81.
- BO Hongwu, QIU Xiaolai, LIU Changsheng. Microstructure and property of four typical WC-based cermet coatings by high velocity oxygen fuel flame spraying[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(9): 72-81. (in Chinese)
- [16] 徐成, 高文理, 尚振涛. 碳化钨HVOF涂层高速磨削工艺参数优化试验研究[J]. 现代制造工程, 2019(10): 94-101.
- XU Cheng, GAO Wenli, SHANG Zhentao. Experimental study on optimization of high speed grinding process for tungsten carbide coating sprayed by HVOF [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(10): 94-101. (in Chinese)
- [17] ZOEI M S, SADEGHI M H, SALEHI M. Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC-10Co-4Cr coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307(1): 886-891.
- [18] 关艳英, 王俊斌, 成书民, 等. 钛合金火焰喷涂外圆磨削加工工艺研究[J]. 今日制造与升级, 2020(8): 71-73.
- GUAN Yanying, WANG Junbin, CHENG Shumin, et al. Research on cylindrical grinding process of titanium alloy flame spraying[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2020 (8): 71-73. (in Chinese)
- [19] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- LIU Hongwen. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [20] 陈维, 潘新, 刘峭巡. 基于SPC的螺栓加工过程控制[J]. 科技创新与应用, 2020(33): 11-15.
- CHEN Wei, PAN Xin, LIU Shaoxun. Bolt machining process control based on SPC [J]. Technology Innovation and Application, 2020(33): 11-15. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)