

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.11.013

旋压钛筒体尺寸精度的质量控制方法研究

张淑鸽*, 冯庆, 张乐, 贾波, 李博, 訾茂德, 王超, 陈元园, 李耀辉
(西安泰金新能科技股份有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 分析了电解铜箔的核心设备阴极辊结构, 提取出其影响质量的关键结构件纯钛筒体的直线度、椭圆度两个重要参数, 对此参数影响因素进行实验和大量数据积累分析, 制定出控制直线度和椭圆度的最佳方案。结果表明: 在保证旋压芯模直线度和椭圆度 $< 0.1 \text{ mm}$ 情况下, 通过修正钛环坯定位环内径偏差, 对称性增加碾压轮数量, 对钛环坯整体加热, 在加工过程中对钛环坯局部针对性加热, 钛筒体成形后对钛筒局部进行钻孔, 敲打时效处理等工艺方法, 大幅度提高了超大规格钛筒体的椭圆度和直线度。在改善芯模形状公差条件下, 采用 6 个碾压轮、加工过程中局部加热的方法, 是提高纯钛筒体的直线度和椭圆度最有效的方式。但是未考虑钛环坯加工过程中的热变形, 碾压轮加工时的热变形; 在钛环坯不同旋压状态下, 碾压轮与钛环坯表面的摩擦力等影响因素。今后, 需对这些影响因素, 进行大量试验分析, 研究更有效的工艺控制方法, 来进一步提高超大规格钛筒体的成品质量, 从而对进一步提高铜箔质量做出有意义的尝试。

关键词: 电解铜箔设备; 强力旋压; 纯钛筒; 直线度; 椭圆度

中图分类号: TH162+.1

文献标识码: A

Research on quality control methods for dimensional accuracy of spinning titanium cylinder

Zhang Shuge*, Feng Qing, Zhang Le, Jia Bo, Li Bo, Zi Maode, Wang Chao,
Chen Yuanyuan, Li Yaohui
(Xi'an Taijin Xinneng Technology Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: The structure of cathode roll, the core equipment of electrolytic copper foil, is analyzed, and two important parameters, straightness and ellipticity, which affect the quality of pure titanium cylinder, are extracted, through experiment and data accumulation analysis, the best scheme of controlling straightness and ellipticity is found. The results show that when the straightness and ovality of spinning mandrel are less than 0.1 mm , through modifying the inner diameter deviation of the positioning ring, increasing the number of roller roller in symmetry, heating the whole titanium ring blank, heating the part of the titanium ring blank in the process, forming the titanium cylinder, the ovality and straightness of the super-large titanium cylinder are greatly improved by drilling the part of the titanium cylinder and knocking aging treatment. It is the most effective way to improve the straightness and ovality of the pure titanium cylinder by using 6 roller wheels and local heating in the process. However, the thermal deformation in the process of titanium ring blank and the friction between the roller and the surface of titanium ring blank were not considered. In the future, it is necessary to carry out a lot of tests

收稿日期: 2024-04-09

修回日期: 2024-05-30

作者简介: 张淑鸽(1981—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为电解铜箔设备技术质量分析, email: lxh8311@163.com

基金项目: 陕西省重点项目(2022SSPY-06)

and analyses on these factors, and to study more effective process control methods, so as to further improve the quality of the finished products of the super-large titanium cylinder, therefore, it is a meaningful attempt to improve the quality of copper foil.

Keywords: electrolytic copper foil equipment; power spinning; pure titanium cylinder; straightness; ovality

电解铜箔是覆铜板(CCL)、印制电路板及锂离子电池电子产品制造的基础材料之一^[1-2]。电解法生产铜箔是近些年发展起来的一种高效铜箔生产方法^[3-4],具有成本低优势,是目前市场上的主流铜箔产品,主要采用辊式阴极和不溶性阳极以连续法进行生产^[5]。随着电子产业的快速发展,全世界对铜箔的需求量大大增加,并且对铜箔的性能品质提出了更高要求,铜箔向极薄、极韧性方向发展。铜箔厚度也从35 μm 转化为18、12、9、6 μm 甚至极薄化^[6]。随之,对电解铜箔装备也提出更高要求。在铜箔的生产过程中,毛箔的生产是一个重要环节,是后面进行后处理的关键环节^[7]。而钛阴极辊是电解制造铜箔的核心设备,被称为电解铜箔生产的心脏^[8]。2016年之前,国内钛阴极辊等电解铜箔装备的核心部件大量依赖进口。由于技术原因,多年来国内阴极辊制造一直滞留在2000 mm直径以内,2700 mm直径钛阴极辊技术和市场长期被国外企业垄断^[9]。随着铜箔行业的竞争越来越大,通过提高铜箔生产率来增加产量,成为企业追求更大利益的重要途径^[10]。所以近几年,国内各大铜箔企业不断扩张产能,钛阴极辊设备供给也更加紧张^[11]。为了扭转这种被动局面,近几年来,我国也加大了钛阴极辊设备的制造研制,实现了自主制造,使钛阴极辊从性能到规格都有了突飞猛进的发展。

钛阴极辊规格按直径划分,从 $\Phi 1000$ mm、 $\Phi 1500$ mm、 $\Phi 2000$ mm、 $\Phi 2700$ mm、 $\Phi 3000$ mm,已经发展到 $\Phi 4000$ mm。随着大规格钛阴极辊的投入生产,铜箔产能大幅度提升。同时,铜箔向超薄、超韧性方向发展。高品质铜箔的生产,主要依赖于工艺技术和与之相配套的设备技术的进步^[12]。这样,对制造铜箔的关键设备阴极辊,尤其是大规格钛阴极辊提出了更高要求。

1 影响电解铜箔质量因素分析

电解铜箔是在阴极辊连续转动中,铜离子电沉

积在阴极辊图面,被剥离后而形成。电解铜箔是在钛筒图面沉积而成,钛筒是阴极辊的核心部件,阴极辊钛筒是电解铜箔之母^[8]。所以,阴极辊辊面质量直接决定着生成的铜箔质量。钛筒的直线度、椭圆度等几何精度,钛筒的晶粒度大小,组织均匀性,导电的充分均匀性等因素,直接决定生成的铜箔尺寸均匀性,组织均匀性。所以,钛筒体在加工过程中,对钛筒体直线度和椭圆度的控制,是重中之重。

由于旋压加工时金属是逐点变形,且无切削,有利于金属变形并提高材料利用率^[13]。所以,国内阴极辊所用纯钛筒体均通过强力旋压制作而成。在旋压过程中,是将轧制的纯钛厚环坯,装配到芯模上,通过与其图面贴合的碾压轮,在一定参数下,对环坯厚度一遍一遍的减薄、长高,强力挤压而成。由于钛及钛合金变形热效应较大,导热性差,旋压时,芯模温度低,与芯模接触的环坯内图面温度迅速下降,而环坯图面因变形热而温度升高,图面与内层产生很大的温度梯度^[14]。成形后,会产生变形和内部组织不均匀。尤其对于大规格钛筒体,直径大、壁薄、高度高、刚性差、变形量大。在旋压过程中,要保证直线度和椭圆度几何精度,又要保证材料组织性能,过程中存在很多难点,加工过程复杂不易控制。

强力旋压是在普通旋压的基础上发展起来的变薄旋压技术。按变形金属流动方向与旋轮进给运动方向是否一致,将筒形件旋压运动方式分为正旋和反旋^[15-17]。由于阴极辊所用钛筒体为超大规格,为了提高旋压设备的生产利用率,所以多数采用反旋强力旋压而成。反旋时,工件长度往往都大于模具的长度和机床的有效行程,工件一端固定,另一端为自由端,碾压轮从自由端向固定端移动,工件通过连续被挤压,挤压区材料向自由端连续移动,慢慢变薄变长。此过程,工件从开始起旋,到碾压轮挤压到计算减薄尺寸,稳定挤压,最后旋压结束。经历了三个旋压过程。每个过程分为3个区域,如为成形区,成形区,已成形区^[18],旋压过程工件挤压区材料状态、

材料温度、移动速度、工件贴模率大小、摩擦力大小均不相同。加之,环坯的整体性使环坯的不均匀变形受到互相限制。单纯从弹塑性变形力学方面去分析控制工件强力旋压变形,未能完全反应实际加工情况,和实际加工变形相差较大,满足不了生产所用强力旋压钛筒形件尺寸要求。

为了提高大规格钛筒体成品直线度和椭圆度,本文采用工艺设计求解的逆向性特点,从满足生产要求的钛筒形件出发,推断出得到高质量筒形件的加工过程和方法^[19]。针对大规格钛筒体加工过程的特点,在弹塑性力学理论基础上,按照塑性变形理论公式,参考公式中的相关影响因素,通过对生产加工中钛筒体在不同形态下,测量分析对比,研究出钛筒体形态的生产加工最佳控制方案,提高钛筒体最终成品质量。

2 弹塑性变形理论公式

强力旋压是通过碾压轮局部连续挤压变形加工而成,可按材料弹塑性变形分析。根据塑性变形体积不变原理得到:

$$\pi R_0^2 h_0 = \pi R_1^2 H_1 \quad (1)$$

式中: h_0 为钛环坯高度; R_0 为钛环坯内径, H_1 为钛筒高度; R_1 为钛筒外径。

$$(r_0 + \delta)^2 h_0 = R_1^2 H_1 \quad (2)$$

式中: r_0 为芯模外径; δ 为钛筒厚度。

旋压钛筒外径公式为:

$$R_1^2 = \frac{h_0}{H_1} (r_0 + \delta + \delta_0)^2 \quad (3)$$

式中: δ_0 为芯模与环坯间隙

旋压钛筒内径公式为:

$$r_1^2 = \frac{h_0}{H_1} (r_0 + \delta_0)^2 \quad (4)$$

上式中,未考虑芯模和钛环坯热膨胀量。由于芯模材质和钛环坯材质不同,在连续旋压加工过程中,芯模和钛环坯受热膨胀量不同。按不同材料线膨胀系数和温度变化来计算热膨胀量,公式(3)旋压钛筒外径可改写为下列公式:

$$R_1^2 = \frac{h_0}{H_1} [(1 + \Delta r) r_0 + \delta]^2 \quad (5)$$

公式(2)旋压钛筒内径公式可改写为:

$$r_1^2 = \frac{h_0}{H_1} [(1 + \Delta r) r_0 + \delta + \delta_0]^2 \quad (6)$$

$$\Delta r = \alpha_1 (T_1 - T_0) \quad (7)$$

式中: α_1 为芯模线膨胀系数; T_1 加工时温度; T_0 为室温。

其中钛环坯与钛筒间隙 δ_0 会随着加工温度和连续不断的挤压变形进行变化。由于旋压时,旋轮与环坯间不仅有滚动摩擦,还有滑动摩擦。与环坯为点接触,近似逐点变形,环坯受轴向、切向、径向三向变形力的作用。在芯模的支撑导向下,其切向变形力对钛筒形件成品质量影响较大。旋压时,变形区滑移面错移,若均匀流动时,则滑移面各滑移层的方向与变形方向一致。即可近似于切向变形。

旋压变形力 P ^[20]

$$P = f(t_0, \sigma_s, \psi_t, f, r_p, a_p, a, D, \Delta t) \quad (8)$$

式中: t_0 毛坯厚度; σ_s 材料屈服强度; ψ_t 毛坯壁厚减薄率; f 旋压碾压轮每转进给量; r_p 旋压圆角半径; a_p 碾压轮接触角; a 芯模半锥角(对锥形件而言); D 被加工零件的直径; Δt 对正旋律偏离程度(对锥形件而言)。

旋压力 P 沿切向分力 P_t 、径向分力 P_r 、轴向分力 P_z 的三分力之间关系如下^[21]:

$$\frac{P_t}{f} = \frac{P_r}{(1 - \frac{\zeta}{3\psi_t}) \sqrt{\frac{D_p f}{\tan a_p}}} = \frac{P_z}{(1 - \frac{\zeta}{3\psi_t}) \sqrt{D_p f \tan a_p}} = \Delta t p_a \quad (9)$$

式中: P_a 为平均单位压力; D_p 为旋压轮直径; $\zeta = \frac{f \tan a_p}{t_0}$; $\Delta t = t_0 - t_f$; t_f 为旋压后工件的厚度; ψ_t 为壁厚减薄率,如下式所示;

$$\psi_t = 1 - \frac{t_0}{t_f} \quad (10)$$

由以上各式可以看出,旋压时,筒形件旋压力与变形量为非线性单值关系,变形量与进给量、摩擦力、碾压轮接触角大小、碾压轮直径大小、毛坯壁厚变薄率,芯模间隙、芯模与毛坯膨胀量、毛坯厚度、加工零件直径、旋压道次等整个加载过程有关,变形复杂。

在优化碾压轮接触角、半径尺寸;忽略摩擦力基础上,参考以上影响因素,根据实际生产情况,对强力旋压 4000 mm 钛筒形件,做以下分析研究。

3 控制直线度和椭圆度方案探索

针对正常旋压后,4000 mm 钛筒直线度和椭圆

度普遍较大问题,通过以下方法进行问题探索,从而找出解决方案。

3.1 旋压后直线度和椭圆度数据

根据旋压特点,在旋压工作平台上周均布标记1到6个位置编号。对应的,按照旋转工作平台上标记的位置编号,在环坯底部和圆周方向上同位置处标记上相同的位置编号。钛筒体旋压成形后,按旋

压时标记的6处位置编号,相邻位置间,形成一个区域,把钛筒体划分为对应的6个区域。然后,把每个区域内,均分为3部分,3部分编号分别(1)、(2)、(3)。对3个同规格钛筒体,按划分的6个区域,分别测量每个区域内的3个部分,得出以下数据,如图1所示。

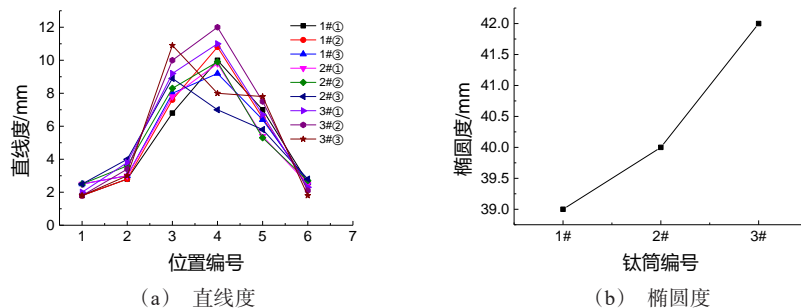


图1 旋压后直线度和椭圆度

Fig.1 Straightness and ellipticity after spinning

从图1数据可以看出,3个钛筒中,划分的6个区域中,3区、4区、5区的直线度均较大,其中4区域的直线度最大,3区的直线度较大些,5区直线度相对3区和4区较小些。4区中编号(2)处直线度达到最大值。观察钛筒体,发现此3处区域,钛筒体上端面均有翻边,翻边长度和宽度均较大,对应4区编号(2)处翻边最大。然后,再按照区域编号,查看此3处旋压平台和芯模。发现此3处对应的芯模靠上端部分,直线度和圆跳动均较大,在4区编号(2)处及其相邻部分,直线度和圆跳动达到最大值。这样就导致在旋压时,环坯和芯模此处接触的间隙较大,芯

模对环坯的支撑导向不够,使环坯在不断长高过程中,受重力影响,此处随意外翻。

3.2 改善芯模形状公差后直线度和椭圆度数据

对芯模靠上端处直线度和椭圆度进行修正。修正后均 <0.1 mm,旋压出来的钛筒体直线度最大为7.8 mm,椭圆度25 mm。钛筒体的直线度较修正前减小了约35%,椭圆度较修正前减小了约43%,改善较多。但是,7.8 mm直线度,25 mm椭圆度,对于钛筒体几何精度要求来说,依然较大。具体数据如图2所示。

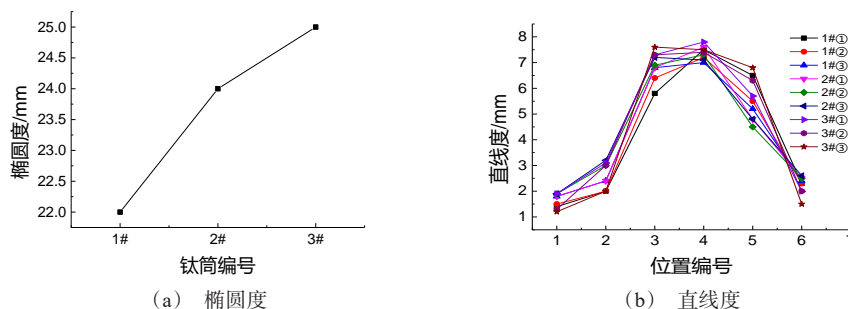


图2 芯模修正旋压后直线度和椭圆度

Fig.2 Straightness and ellipticity after core mold correction and spinning

从图2数据可以看出,3个钛筒中,6个区域的直线度和椭圆度较芯模修正前整体减小。直线度减小25%,椭圆度减小38%,效果明显,但是3区和4区的直线度依然很大。按工作台上对应的区域编号,再次对芯模进行检测,发现芯模底部的3区和4区部位,此处对应的定位环内径偏差较大。这样就导致在旋压时,芯模和定位环固定不牢固,在旋转过程中,整个芯模松动,随着环坯一起旋转,对环坯固定

支撑力减小。使环坯随机延伸长高。

3.3 定位环内径偏差调整后直线度和椭圆度数据

按此处定位环与芯模间隙尺寸,找相同厚度的铜带,塞入定位环与芯模间。旋转工作台,再次测量。芯模与定位环固定良好后。选用同规格环坯,旋压钛筒体。按4.1步骤测量筒体,具体数据如图3所示。

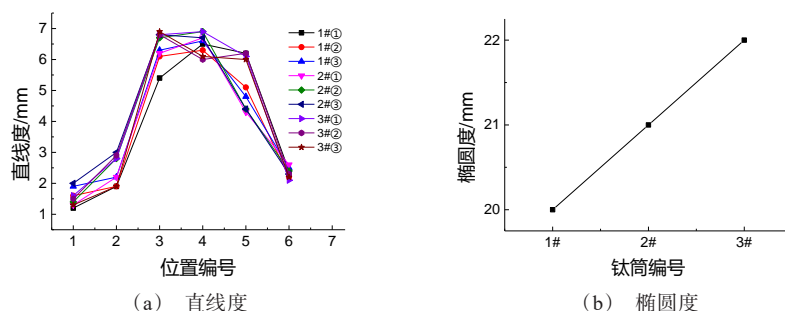


图3 定位环内径偏差调整后直线度和椭圆度

Fig.3 Straightness and ellipticity after adjusting the inner diameter deviation of the positioning ring

从图3数据可以看出,3个钛筒中,直线度和椭圆度较芯模修正后整体均减小,直线度减小9%,椭圆度减小12%。效果较明显,但是1区和6区局部直线度有变大趋势,且3区、4区、5区较1区、2区、6区直线度依然比较大。3个钛筒中,直线度最大值与最小值差值5.7 mm,偏差依然较大。而且,3区、4区、5区直线度大的部分,与1区、2区、6区直线度较小部分,圆周方向长度接近,近视于成对称分布。筒体尺寸均匀性较差。由于超大规格钛筒体尺寸较

大,且薄壁。旋压时,采用3个碾压轮旋压,3个碾压轮圆周60°设置。由于环坯直径较大,所以旋压时,环坯被碾压区域与未碾压区域距离较大,挤压变形量较大,经过多次道次旋压后,变形量大的区域变的更大,导致钛筒体成品直线度更大。

3.4 增加碾压轮数量后直线度和椭圆度数据

选用同规格环坯,采用5个碾压轮,5个碾压轮圆周均布分布,对环坯进行旋压。按3.1步骤测量旋压钛筒体,具体数据如图4所示。

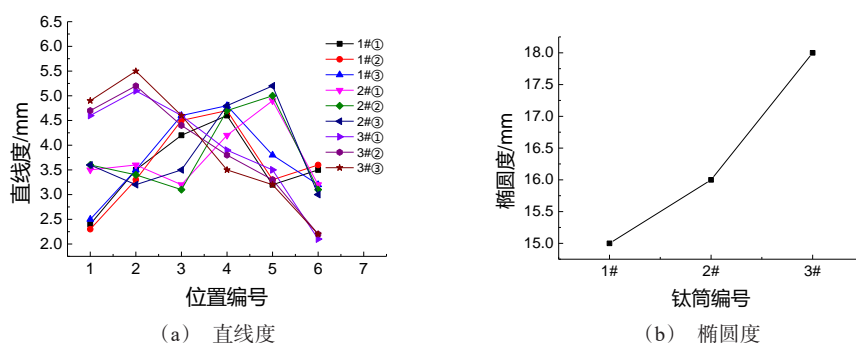


图4 碾压轮数量调整后直线度和椭圆度

Fig.4 Straightness and ellipticity after adjusting the number of rolling wheels

从图4数据可以看出,3个钛筒中,直线度最大值减小20%,椭圆度减小25%。3个钛筒直线度,1区、2区、3区直线度较增加碾压轮数量前均增大,3区、4区、5区直线度较增加碾压轮数量前均减小。直线度最大值与最小值差值为3.4 mm,较增加碾压轮数量后减小2.3 mm,6个区域整体比较均匀,一致性良好。但是6个区域内,3个编号中,均有部分直线度依然偏大,偏大部位局部出现轻微皱褶,偏大范围较之前缩小,偏大部位在圆周上随机出现,无规律

性。由于钛材导热性较差,在强力挤压时,表面温度不均匀,变形区与未变形区温差较大,导致局部材料无法正常变形。经过多道次旋压后,累积在圆周局部。所以,加工时,采用环坯表面整体加热。

3.5 环坯图面整体加热后,再进行旋压,成形后直线度和椭圆度数据

针对3.4中问题,用多个加热枪,对环坯图面进行加热。加热温度到300℃时,对环坯进行旋压。成形后,对筒体进行测量。具体数据如图5所示。

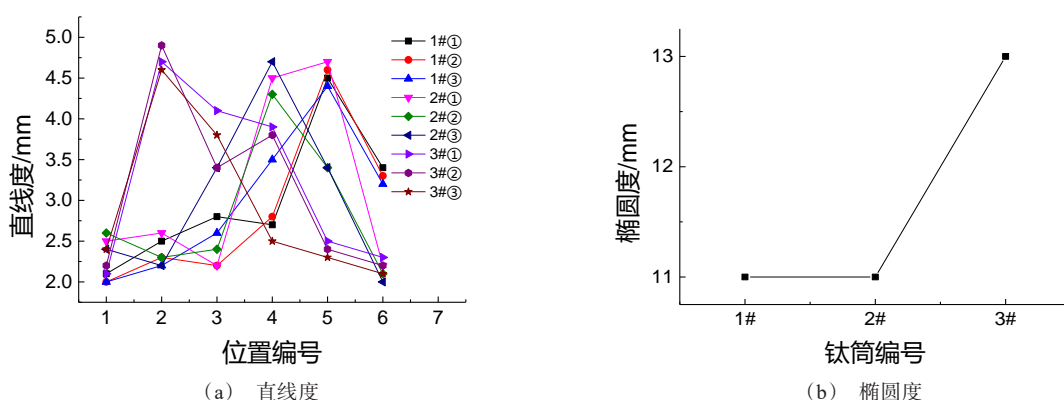


图5 环坯表面整体加热旋压后直线度和椭圆度

Fig.5 Straightness and ellipticity after overall heating and spinning of the surface of the ring blank

从图5数据可以看出,3个钛筒中,直线度和椭圆度均减小,直线度减小11%,椭圆度减小26%。直线度减小较多。6个区域直线度均较加热前减小,直线度最大值与最小值差值为2.8 mm,较加热前差值减小0.6 mm,6个区域中,4个区域直线度最大值 ≤ 3.9 mm,2个区域直线度最大值 ≤ 4.9 mm,筒体整体直线度较均匀。椭圆度受局部变形影响,减小较少。按测量位置分析,发现筒体局部变形较大部位均出现在筒体上下两端。

3.6 环坯图面整体加热后,旋压时,对环坯上下端再次加热,旋压后直线度和椭圆度数据

针对3.5中问题,在环坯图面整体加热,温度达到300℃后,进行旋压。旋压过程中,同时用加热枪对环坯上下端加热,使环坯上下端温度为380℃。旋压成形后,对筒体进行测量,具体数据如图6所示。

从图6数据可以看出,3个钛筒中,直线度和椭圆度均减小。直线度减小38%,椭圆度减小63%。6

个区域直线度均较上下端加热前减小,直线度最大值与最小值差值为1.9 mm,较上下端加热前差值减小0.9 mm,6个区域直线度很均匀,直线度最大值为3.0 mm,最小值1.1 mm。3个钛筒,直线度 < 2.5 mm部位,占整个钛筒体85%,筒体直线度和椭圆度整体减大幅度较大。筒体成形尺寸均匀,一致性良好。

由于阴极辊所用的为钛筒体中间部分,所以为了使钛筒体中间部分直线度和椭圆度更小,需对旋压成形后的钛筒体直线度和椭圆度做进一步优化。

3.7 进一步优化钛筒体形态提高直线度和椭圆度

通过3.5和3.6分析,筒体上下端变形是最大的,这与强力旋压过程有关。所以,针对此问题,对选压成形后的钛筒体进行微校形和时效处理。从筒体轴向中心位置开始向上下端测量,保证所用筒体长度后,划线;从划线位置开始,距离100 mm处,在筒体上下端变形较大部位,钻孔,孔径为20 mm。以此为基准点,圆周均布钻14个直径为20 mm通孔。用加热枪加热到480℃后,用木质榔头从变形最大位置

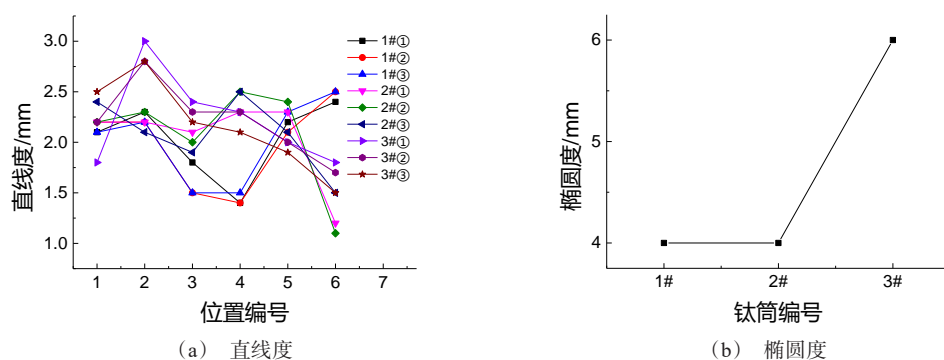


图 6 环坯表面整体加热,上下端再次加热,旋压后直线度和椭圆度

Fig.6 Straightness and ovality after spinning, the whole surface of ring blank is heated, and the upper and lower ends are heated again

开始,圆周依次敲打通孔边缘多次。放置于待加工区,每隔 1 天,按相同方法对钛筒体进行多次敲打。放置 7 天后,根据使用尺寸,切割钛筒体上下端头。

测量切头后钛筒体直线度和椭圆度。具体数据如图 7 所示。

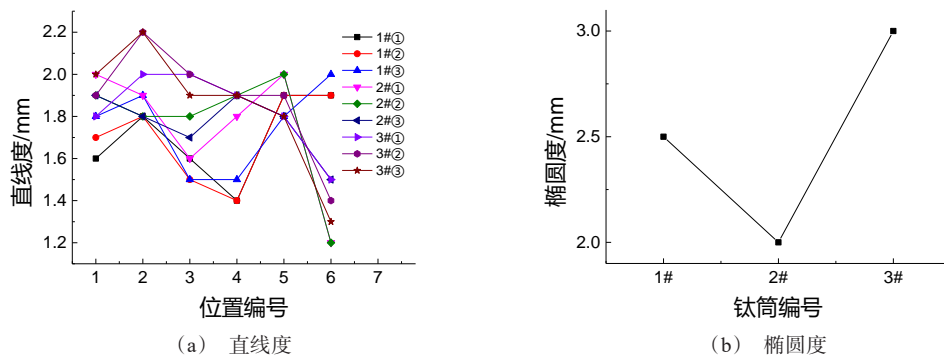


图 7 优化钛筒体形态后直线度合和椭圆度

Fig.7 Straightness and ovality after optimizing the shape of titanium cylinder

从图 7 中可以看出,在钛筒体直线度最大位置钻孔,以此为基准,圆周均布钻孔,通过反复加热敲打通孔周边,放置一段时间后,切割钛筒体上下端头。经测量,直线度最大值 2.2 mm,最小值 1.0 mm,椭圆度最大值 3.0 mm,较旋压后均有减小趋势,直线度最大点减小 21%,椭圆度减小 41%,减小较多。而且,3 个钛筒,直线度 < 2.0 mm 部位占整个钛筒体部位的 81%,筒体整体直线度均匀性大幅度提高。

4 结论

钛筒从旋压到加工成成品,对钛筒成品直线度

和椭圆度影响因素比较多,通过以上数据分析,可以得出以下结论:

(1)旋压芯模直线度和椭圆度、碾压轮数量对钛筒直线度和椭圆度影响较大,直线度较变化前减小了 20%~31% 左右,椭圆度较变化前减小了 25%~43% 左右,需要关注。

(2)环坯表面整体加热后,旋压时,对环坯上下端再次加热,直线度和椭圆度均减小。直线度最大减小 38%,椭圆度最大减小 63%,效果显著。

(3)旋压后,进一步优化钛筒体形态,在钛筒体直线度最大位置钻孔,以此为基准,圆周均布钻孔。

通过反复加热敲打通孔周边,放置一段时间后,切割钛筒体上下端头,直线度最大减小21%,椭圆度减小41%,减小较多,效果显著。

但在此过程中,未考虑钛环坯加工过程中的热变形,碾压轮加工时的热变形,碾压轮热变形后,碾压轮与钛环坯表面的加工量变化,碾压轮与钛环坯接触部位挤压变形时,周边其它材料的变形;在钛环坯不同旋压状态下,碾压轮与钛环坯表面的摩擦力等影响因素。今后,需对这些影响因素,进行大量试验分析,研究更有效的工艺控制方法,以进一步提高超大规格钛筒体的成品质量。

参考文献

- [1] 陈平华. 电解铜箔市场研究报告[J]. 世界有色金属, 2005(5): 19-27.
- [2] 祝大同. 世界及我国电解铜箔业的发展回顾[J]. 世界有色金属, 2003(8): 9-13.
- [3] Dobashi M, Taenaka S, Takahashi N, et al. Cathode Electrode Material and Rotating Cathode Drum for Electrolytic Copper Foil Production Using the Same[P]. US: WO 2001JP06897, 2002-05-30.
- [4] Kuba T, Fujishima K, Yamamoto N. Method of Producing Electrolytic Copper Foil and Apparatus for Producing Same[P]. US: 19920965115[P], 1994-07-05.
- [5] 王帅. 我国高电解铜箔技术现状与趋势前瞻[J]. 有色金属加工, 2023, 52(1): 9-11.
- [6] 王俊义. 我国电解铜箔技术现状与趋势[J]. 天津化工, 2024, 38(1): 23-25.
- [7] 万筱剑, 李铁才. 高精铜箔生产的张力控制[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 83-85.
- [8] 夏文梅, 吕殊. 电解制造铜箔用阴极辊的技术要求[J]. 印制电路信息, 2003(10): 20-25.
- [9] 谭立军, 姚泽坤. 纯钛焊件焊缝组织细化的热加工工艺研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(19): 28-30.
- [10] 路永明, 熊祎. 航天科技集团四院大力发展军民融合产品[J]. 国防科技工业, 2017(8): 41.
- [11] 金荣涛. 电解铜箔产业发展趋势[J]. 印制电路信息, 2003(2): 22-24.
- [12] 王建民. 国内高品质铜箔生产设备技术的发展[C]. 第九届中国覆铜板市场. 技术研讨会论文集, 2008: 261-267.
- [13] 单德彬, 童文舟, 许沂, 等. 塑性变形不均匀性对Ti-15-3冷强力旋压成形的影响[J]. 中国有色金属学报, 2000(6): 887-890.
- [14] 程言. 钛合金的特性及加工性能[J]. 现代教育科学, 中学教师, 2013(9): 149-149.
- [15] 王成和, 刘克璋. 旋压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [16] 日本塑性加工学会. 旋压成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [17] 陈适先, 贾文铎, 等. 强力旋压工艺与设备[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [18] 赵云豪. 旋压技术现状[J]. 锻压技术, 2005(5): 95-97, 100.
- [19] 赵昌葆, 郑双. 一种工艺设计综合知识表示方法及其应用[J]. 制造业自动化, 2011, 33(5): 29-32.
- [20] 孙存福, 陈企芳. 强力"变薄"旋压力的简易计算法[J]. 航空工艺技术, 1978(6): 5-10.
- [21] 李新和, 俞大辉, 周磊. «金属塑性成形原理»(旋压)实验指导书汇总(改)合集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1997.