

薄壁回转体零件镍锰合金电铸的质量控制^{*}

杨建明 朱 荻 王 昆

【摘要】 利用可以电铸回转体零件的装置,开展了薄壁回转体零件的镍锰合金电铸试验。通过采用优化象形阳极、选择合理的电铸工艺条件以及向电解液中加入添加剂等措施,很好地消除了电铸层的针孔,改善了电铸层的沉积分布,电铸层表面的粗糙得到了控制,电铸层的内应力较小。

关键词: 电铸 质量控制 镍锰合金 回转体零件

中图分类号: TQ153.4⁺³

文献标识码: A

Quality Control of Ni-Mn Alloy Electroforming of Thin-wall Revolving Part

Yang Jianming¹ Zhu Di² Wang Kun²

(1. Huaihai Institute of Technology 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

The electroforming of Ni-Mn alloy for the thin-wall revolving part was carried out with a device that could be used to electroform a revolving part. By way of using a conformal anode, the selection of the suitable conditions of electroforming, and adding of an additive to the electrolyte, the pores of the electroformed layers were fully eliminated, the deposition distribution of the layers was greatly improved, the rough phenomenon of the surface was controlled, and the internal stress in the layers was little.

Key words Electroforming, Quality control, Ni-Mn alloy, Revolving part

引言

电铸是在电解槽中的阴极芯模上电沉积金属而制取零部件的一种特种加工工艺,该工艺在制造形状复杂、薄壁、高精度的零件方面具有特殊的意义^[1~2]。但电铸层常常会出现针孔、麻点、粗糙及内应力等质量问题,形状较复杂的零件在进行合金电铸时,还由于阴极芯模表面的电场分布不均匀,使芯模不同位置处的沉积厚度及合金成分分布不均匀。对电铸层进行严格的质量控制,是电铸技术得到很好应用的关键问题。

本文针对薄壁回转体零件的镍锰合金电铸,通过采用特殊结构的象形阳极、合理的电铸工艺条件

等措施,研究控制合金电铸层质量的方法。

1 电铸试验

1.1 试验装置

设计了如图1所示的可用于回转体零件电铸的装置,为了改善电铸层的沉积分布,采用特殊结构的象形阳极。在阴极芯模周围间隔布置4个阳极筐,每个阳极筐面向阴极的一侧沿圆周间隔排列几个用非金属材料制成的象形围栏,镍块装入阳极筐中后,面向阴极的镍块就可按围栏内侧轮廓的形状形成象形阳极。象形围栏筐内一侧的轮廓形状,则按照所形成的阳极能使阴极表面电场分布尽可能均匀的要求进行了专门设计^[3]。

收稿日期:2005-10-31

^{*} 国防预研基金资助项目(项目编号:J1500E002)

杨建明 淮海工学院机械工程系 教授 博士,222005 江苏省连云港市

朱 荻 南京航空航天大学机电学院 教授 博士生导师,210016 南京市

王 昆 南京航空航天大学机电学院 博士生

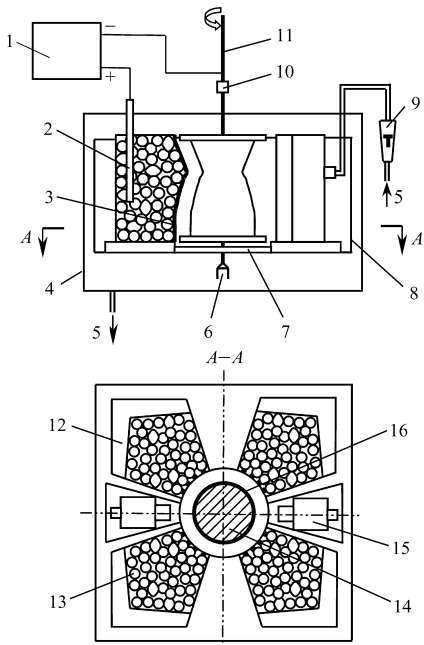


图1 回转体零件电铸试验装置

Fig. 1 Device used for electroforming of the revolving parts

1. 电铸电源 2. 导电排 3. 象形围栏 4. 集液槽 5. 电解液
6. 顶尖 7. 定位盘 8. 电铸槽 9. 流量计 10. 连接套 11. 传动轴
12. 阳极筐 13. 阳极镍块 14. 阴极芯模 15. 喷嘴
16. 电铸层

阴极芯模由单相齿轮减速调速电动机驱动旋转,转速为 $0\sim 36\text{ r/min}$ 无级可调。在阳极筐间隔内对面设置2个喷嘴,电解液供应与循环系统将电解液从喷嘴沿阴极的径向冲向阴极表面,电解液从电铸槽溢出后经集液槽流回储液槽。喷嘴的冲液和阴极旋转两者共同作用,可达到搅拌电解液的目的。本研究中电铸电源采用输出电流为矩形波的脉冲电源。

1.2 试验条件与方法

根据相关的研究^[4~5],确定零件进行镍锰合金电铸的工艺条件如表1所示,其中阴极电流密度为电铸电源的输出电流与阴极表面积之比。电解液配制后进行低电流密度电解和活性炭净化处理,电铸工艺流程为:芯模预处理→电沉积→脱模。

2 电铸件质量控制

2.1 电铸层出现针孔及其解决措施

试验后,将已脱模的电铸件对光进行观察,通常可以观察到电铸层存在透光的针孔(或称为气孔),这是由于阴极表面析氢造成的。电沉积过程中,阴极上析出的氢气聚集成气泡,这些气泡有可能吸附在阴极上而形成贯通电铸层整个厚度的针孔。采用氨基磺酸盐电解液时,由于该电解液具有较高的表面张力,针孔的数量有可能较多。

表1 镍锰合金电铸的工艺条件

Tab. 1 Conditions of Ni-Mn alloy electroforming

电解液	氨基磺酸镍质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	430~600
	氨基磺酸锰质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	12~28
	氯化镍质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	15~25
	硼酸质量浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	30~35
	pH值	4.0~4.1
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	50
脉冲电流	脉宽/ μs	10
	脉间/ μs	10
	阴极电流密度/ $\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$	3

消除电铸层的针孔是控制电铸件质量的一个重要方面。为减少和消除电铸层的针孔,采取以下2项措施进行了试验,其实质都是使阴极上产生的氢气气泡尽可能脱离阴极表面。

(1) 改变电解液流量和阴极转速

从已有的研究结果可知,利用冲液装置开展镍锰合金电铸试验所得到的试片上并未出现针孔^[5],说明电解液对阴极表面充分的冲刷搅拌作用可以很好地去掉阴极上的氢气气泡。在试验时改变电解液流量和阴极转速,每组参数分别电铸了几个零件,观察各电铸件的针孔情况并进行对比,结果如表2所示。

由表2结果可以看出,当阴极转速为 8 r/min 时,电解液流量增大可使电铸层针孔减少,流量可达 $2\,500\text{ L/h}$ 时针孔大大减少甚至完全消除。但电解液流量为 $2\,500\text{ L/h}$ 而阴极转速增大为 16 r/min 时,电铸层又有较多的针孔。这是因为增大电解液流量可以增大冲液速度,较强的冲刷作用有助于氢气气泡脱离阴极表面,但当阴极转速较高时,某一位置氢气气泡受到的溶液冲刷时间缩短了,不利于气泡的充分去除,阴极转速的增大又不足以使气泡很好地脱离阴极表面,因而此时电铸层的针孔也较多。

表2 不同搅拌条件下电铸层的针孔情况

Tab. 2 Numbers of pore of the layers electroformed under different agitation

搅拌条件		电铸件数量/个	试验结果
电解液流量/ $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$	阴极转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$		
1 500	8	3	针孔最多
2 000	8	4	针孔较多
2 500	8	3	一件未发现针孔,二件各有一个针孔
2 500	16	2	针孔较多

(2) 电解液中加入添加剂

向电解液中加入十二烷基硫酸钠作添加剂进行试验。十二烷基硫酸钠是一种表面活性物质,可以降低溶液的表面张力,增强溶液对阴极表面的润湿能力,使氢气泡在阴极表面的附着力降低而容易脱离阴极表面,从而起到消除电铸层针孔的作用。

试验时向电解液中加入了 $0.1 \sim 0.3 \text{ g/L}$ 的十二烷基硫酸钠,电解液流量选用 2000 L/h ,阴极转速为 8 r/min 。电铸所得到的 2 个电铸件均未发现针孔,表明十二烷基硫酸钠可以有效地防止镍锰合金电铸层出现针孔。

添加的十二烷基硫酸钠在电解液的循环和电沉积过程中会有一定的消耗,因此需定期补充才能保证其效果。

2.2 电铸层表面的粗糙及其控制

电沉积过程中,沉积层是通过金属电结晶、结晶生长而形成的,沉积表面存在微观粗糙不平。表面粗糙又引起表面局部电流密度分布不均匀,使不同部位的沉积量不均匀,结果加剧了表面的粗糙程度,即沉积表面会随着沉积层厚度的增加而逐渐变得粗糙。如果电解液被杂质离子或悬浮质点污染,或电解液的 pH 值过高,或电流密度的大小与电解液不相适应,则会在沉积表面形成粗糙的树枝状。采用氨基磺酸盐电解液得到的沉积层比其他电解液的沉积层表面要光滑。

电铸时由于沉积时间长、沉积厚度大,电铸层沉积表面的粗糙现象比电镀时要突出。图 2 为电铸镍锰合金试片(厚度 $60 \mu\text{m}$ 左右)沉积表面的 SEM 形貌照片^[4],可以看到表面呈现细小致密的颗粒状结晶形态,颗粒的大小约在 $1 \mu\text{m}$ 以下。

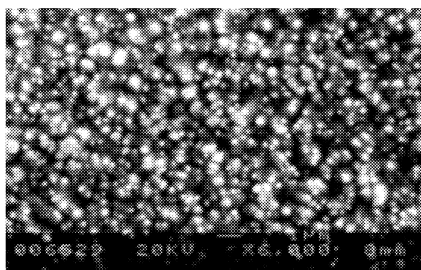


图 2 脉冲电铸镍锰合金沉积表面 SEM 形貌
Fig. 2 SEM picture of the surface of the pulse electroformed Ni-Mn layer

试验得到厚度在 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 之间的各电铸件都可以看到不同程度的粗糙情况,表面大多呈宏观的凸瘤状沉积形貌。电铸件厚度越大,凸瘤越粗大。如果芯模表面(即起始沉积表面)较粗糙,或沉积过程中沉积表面粘附上溶液中的阳极杂渣等物时,则电铸层的粗糙情况更严重。

电铸件可能在沉积结束后还要进行表面的机械加工,此时表面的粗糙可予以去除。但如在沉积过程中表面达到了较严重的粗糙情况,则会影响电铸的正常进行,必须加以控制。有的电铸件表面可能不再进行机械加工,则更需严格控制。

电镀时通常可在溶液中加入整平添加剂以降低电沉积表面的粗糙程度。在进行镍锰合金试片的电铸试验时,向电解液中加入了某磺酰亚胺类有机添加剂,当加入量为 1 g/L 时沉积表面变得很平整,如图 3 所示。不过,由于这类添加剂往往会对电沉积层的机械性能产生不利的影响,因此电铸时一般不宜使用这类添加剂来整平表面。本研究中进行零件电铸时,对芯模表面作精细抛光和清洗、彻底清除电解液内的杂渣,即可避免出现严重的粗糙。要进一步改善电铸件的表面质量,则可采用在沉积过程中对沉积表面实施机械摩擦的方法,这方面的研究正在进行中。

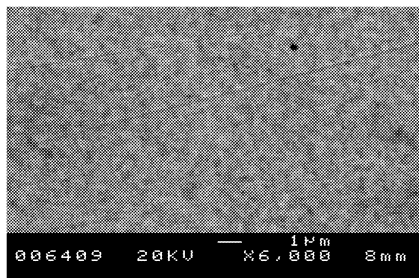


图 3 加添加剂时电铸镍锰合金沉积表面 SEM 形貌
Fig. 3 SEM picture of the Ni-Mn layer electroformed with the additive

2.3 电铸层的沉积分布

对电铸件用电火花线切割的方法沿轴向进行等间距取样,测定各处样品的平均厚度、锰质量分数及显微硬度,以了解电铸层的沉积分布。根据测试结果得到电铸层各处的厚度、锰质量分数及显微硬度分布如图 5 所示,图中同时给出了阴极电流密度的分布^[5]。相对厚度和相对锰质量分数为每处样品的厚度、锰质量分数与该电铸件所取全部 7 个样品的厚度、锰质量分数的平均值之比,相对电流密度为某取样点处的阴极电流密度与全部取样点处阴极电流密度的平均值之比。

由象形阳极轮廓设计过程可知,即使采用经过优化设计的象形阳极,具有复杂轮廓形状的阴极表面电流密度分布仍然不可能达到完全均匀^[5]。因此,如图 4 沉积后的电铸层厚度、锰质量分数及显微硬度分布仍不均匀。由图 4c 可知锰质量分数最大处约为最小处的 2.03 倍,相比而言^[3,6],本研究采用优化象形阳极的方法后,在改善电铸层的沉积分布方面取得了较好的效果。某类电铸镍锰合金产品的技术要求中,给定锰质量分数范围为 $0.1\% \sim 0.4\%$,即

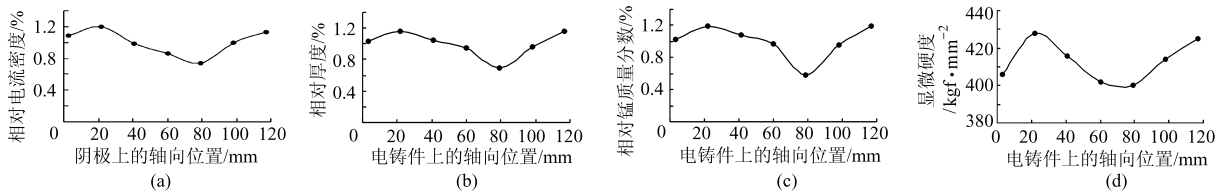


图4 阴极电流密度分布及电铸层沉积分布

Fig. 4 Distribution of current density on cathode and deposition of the layers

(a) 阴极电流密度分布 (b) 电铸层厚度分布 (c) 电铸层锰质量分数分布 (d) 电铸层显微硬度分布

锰质量分数允许有 4 倍的变化量,因而本研究得到的锰质量分数分布的均匀性可以满足其生产要求。

2.4 电铸层的内应力

电铸层通常会产 生一定的内应力,应力的产生与电沉积层形成过程中结构组织所发生的变化有关,包括晶格参数、沉积层中晶粒尺寸及晶粒间距离的变化^[7]。首先,沉积层表面的晶格参数与内部不一样,电沉积过程中由于表层晶格不断转变为内层,内部会出现用于改变晶格参数的作用力,即内应力。如果晶格中夹杂局外原子,也可能引起晶格变形,产生内应力。其次,电沉积形成的非常细小的晶粒属于非平衡体系,它们自发地趋于合并成为较大的晶粒,并伴随着体积的减小,晶粒尺寸这类变化也自然会引 起内应力。再者,电沉积时表面活性物质和其他局外物质在沉积层中的夹杂,会使晶粒间距离发生变化。随着沉积层的加厚,这些晶粒从表面转入内部后,所夹杂的局外物质将通过扩散进行重新分布,也会引起内应力。

影响电铸层内应力的因素有电解液的种类、纯度、温度、pH 值和添加剂情况,以及沉积电流密度和电流波形等。采用氨基磺酸盐电解液得到的沉积层内应力要比其他电解液的沉积层小,采用脉冲电流也有利于降低沉积层的内应力。

电铸层中存在内应力会导致几何变形,可能因收缩或翘曲而使脱模困难。较大的内应力会使电铸层发生开裂,或早期从芯模上自行脱落。在电铸件需要后续机械加工的情况下,存在的内应力会由于切

削热的影响而可能使电铸件产生进一步的变形甚至破坏。

由电铸件脱模时可以知道,电铸层对芯模有一定的包裹力,脱模后电铸层发生收缩而使电铸件内径略微变小,说明电铸层存在内应力,且为拉应力。另外,在对电铸件进行线切割取样时,曾分别从电铸件两端沿着轴线向中间切割,线切割轨迹如图 5 中粗实线所示,只是两端切缝并未完全切通。观察几个电铸件经线切割取样后切缝的变形情况,可以发现切缝的变形(张开或闭合)很小,由此可定性判断在本研究采用的电铸条件下电铸层中存在的内应力并不大。

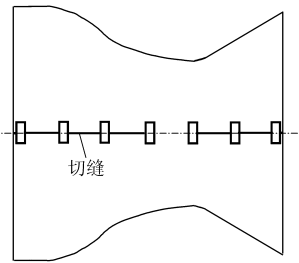


图5 电铸件取样时的电火花线切割轨迹
Fig. 5 Track of WEDM for the sampling on the electroform

3 结束语

镍锰合金电铸时的各种工艺条件对电铸过程及电铸件的质量都有很大的影响,对此应加以严格的控制。形状较复杂的薄壁回转体零件进行镍锰合金电铸时,采用优化的象形阳极,对阴极芯模进行正确的预处理,电解液选用合理的配方、温度、搅拌条件、添加剂及净化处理等,可以较好地消除电铸层的针孔缺陷,改善电铸层的沉积分布和表面质量,降低电铸层的内应力,从而满足合金电铸件的生产要求。

参 考 文 献

- 1 Вансовская К М, Волянюк Г А. 工业电铸[M]. 林能春,邓传玉,译. 北京:兵器工业出版社,1991.
- 2 McGeough J A, Leu M C, Rajurkar K P, et al. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing [J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(2): 499~514.
- 3 杨建明,朱荻,王昆. 电沉积技术中象形阳极的形状设计[J]. 机械设计与研究,2004(5):56~57.
- 4 Malone G A, Winkelman D M. High performance alloy electroforming[R]. NASA-N89~16 041, 1989.
- 5 杨建明,朱荻,曲宁松,等. 镍锰合金的纳米晶电铸[J]. 机械科学与技术,2004,23(1):81~84.
- 6 刘宇. 电铸镍锰合金的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.
- 7 周绍民. 金属电沉积——原理与研究方法[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.