

文章编号: 1000-582X(2012)10-030-08

Zr-4 合金管砂带随形磨削实验分析

黄云^{1a,1b}, 张磊^{1a,1b}, 黄智^{1a,1b}, 郭强²

(1a. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

1b. 重庆大学重庆市材料表面精密加工及成套装备工程技术研究中心, 重庆 400021;

2. 国核宝钛锆业股份公司坯料与板带制造厂, 陕西宝鸡 721013)

摘要: 采用 3 种不同磨料的砂带对 Zr-4 合金管进行了磨削工艺试验, 探究了磨粒与工件间的交互生成机理, 得到了 Zr-4 合金材料砂带磨削过程中材料去除率和表面粗糙度的主要影响因素。借助先进的测试设备, 对磨削后的砂带磨粒磨损形貌、工件表面形貌进行了观测, 并对 Zr-4 合金表面烧伤层金相组织及显微硬度变化规律做了分析研究。试验结果表明: 砂带线速度、磨削压力、接触轮硬度和磨料种类对材料去除率和表面粗糙度均有较大的影响, 其中砂带线速度影响最为显著; 锆刚玉和氧化铝磨粒的粘附磨损较为严重, 碳化硅磨粒主要以磨耗磨损为主; 工件烧伤时材料表层金相组织发生变化, 使得 Zr-4 合金物理机械性能下降。试验及研究结果为寻求高效、高精度 Zr-4 合金砂带磨削加工工艺提供了试验和理论依据。

关键词: Zr-4 合金; 砂带; 磨削; 材料去除率; 表面粗糙度; 材料实验; 磨粒磨损

中图分类号: TG580.68

文献标志码: A

Experimental analysis of the abrasive belt follow-up grinding of Zirconium-4 alloys tubes and pipes

HUANG Yun^{1a,1b}, ZHANG Lei^{1a,1b}, HUANG Zhi^{1a,1b}, GUO Qiang²

(1a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

1b. Chongqing Engineering Research Center for Material Surface Precision Machining and Whole Set Equipments, Chongqing University, Chongqing 400021, China;

2. State Nuclear Bao Ti Zirconium Industry Company. Billets and Plates Manufacture Plant, Baoji 721013, Shanxi, China)

Abstract: Abrasive belt grinding experiments of Zr-4 nuclear power tube are carried out by using three different abrasive belts with same size, and the interactive generating mechanism between abrasive and workpiece is analyzed, the main factors of material removal rate and surface roughness of Zr-4 alloys are obtained. With the help of the advanced test facilities, the abrasive grain abrasion and surface topography of the workpiece are observed. The metallographic structure and microhardness of the layer of burnt surface during Zr-4 alloys Grinding are analyzed. Some conclusions are given as follows: the material removal rate and surface roughness are mainly affected by the factors of belt speed, grinding pressure, hardness of the contact wheel and abrasive type, of which, the belt speed is the strongest factor. The adhesion wear of the Zirconium corundum and aluminium oxide abrasive grit is more serious, the most important wear form of silicon carbide is abrasion wear. With the onset of grinding burn, the mechanical

收稿日期: 2012-03-05

基金项目: 重庆市科技攻关计划项目(CSTC2007AB3004)

作者简介: 黄云(1962-), 男, 重庆大学教授, 主要从事机械制造及砂带磨削应用技术方向研究, (E-mail)yunhuang@samhida.com。

properties of Zr-4 alloys are deteriorated obviously. The results provide a theoretical and experimental basis for technical optimization in the grinding of Zr-4 alloys with efficiency and high quality.

Key words: Zr-4 alloys; abrasive belt; grinding; material removal rate; surface roughness; material test; abrasive wear

Zr-4 合金具有优异的核性能,它的热中子俘获截面小,耐辐照性能好,在 300~400 °C 高温高压水和水蒸汽中有很好的抗腐蚀性能,结合它优良的力学性能和机械加工性能,使其成为核动力压水堆和石墨水堆极为理想的燃料元件包壳材料和结构材料^[1-3]。因此,锆管加工质量的高低是核反应堆能否安全可靠运行的关键。

热挤压是锆合金管材生产中最常使用的制备空心管坯的加工方式,用这种方法制备的管坯不仅壁厚尺寸和内表面质量难以保证,而且此种加工方式对金属和工模具的损耗较大^[4],一旦润滑剂使用不当或润滑效果没有达到设计要求,管坯外表面上往往会有大量的凸出于表面的棱状纵向条纹和表面坑状缺陷,同时整个管坯外表面被一层致密的氧化膜所覆盖。工业化生产时,为了提高生产效率并使锆合金获得细小的内部组织,从而获得良好的力学性能,热挤压管坯的尺寸往往都比较大。由于成品包壳管壁厚尺寸普遍在 0.3~0.7 mm 之间,对合金内部组织和管件内外表面粗糙度要求极高。因此,为了保证包壳管的冷加工和真空退火质量,Zr-4 合金管坯在进入包壳管生产厂之前必须要对其内外表面做相应的处理以除去内表面的挤压缺陷和油污,外表面的致密氧化膜、棱状条纹以及坑状瑕疵等宏观缺陷,并达到规定的管坯壁厚和表面粗糙度。目前国内主要引进美国金刚石深孔珩磨技术来实现对 Zr-4 合金管坯内表面缺陷的修磨和几何尺寸的修整,修磨后的内表面粗糙度可达 $Ra0.32 \mu\text{m}$,但此法在提高管件壁厚等几何精度方面的能力有限,管坯壁厚主要依赖于对外表面的机械修磨来加以保证。

砂带磨削具有磨削、研磨和抛光等多重作用,磨削效率高,磨削表面质量好,磨削工艺灵活性大、适应性强等磨削加工性能,能够很容易地实现对锆管外表面的精整加工^[5-8]。国外核电技术先进国家目前主要采用砂带磨削技术对锆管管坯外表面进行修磨处理。在国内,尽管应用砂带磨削技术的历史较长,但发展迟缓,锆合金燃料包壳磨削技术长期依赖受制于国外,一直没有能够适用于核电锆管精度要求的国产自动砂带磨床设备及配套工艺^[9]。

通过 3 种磨料同种粒度的砂带采用不同工艺对

Zr-4 管坯进行磨削实验,分析了砂带线速度、接触轮硬度等工艺参数对工件表面材料去除率、工件表面粗糙度和砂带磨粒磨损情况的影响。探究了核电锆管管坯砂带修磨工艺,给出了 Zr-4 合金管砂带磨削较优推荐工艺参数,旨在为 Zr-4 合金管寻求高效、高质的磨削加工工艺方面提供实验和理论依据。

1 磨削工艺实验研究

1.1 实验装置

鉴于在恒进给磨削过程中由于管材形状误差的原因锆管壁厚容易出现超负差的现象,本实验是在如图 1 所示的数控砂带随形外圆修磨机上进行的。该机床配备了伺服数控系统和壁厚在线检测系统,能够根据待加工工件的特点进行相应的数控编程进而控制机床运动,在加工过程中数控系统能够同时接收检测系统接收到的壁厚实时信号并经分析处理后通过反馈控制浮动抬刀机构的输出压力来加厚或者减薄磨削层的厚度,从而使磨头的位移曲线与锆管表面的轮廓曲线有较高的相似性和同步性。此外,也可以通过手动调节弹簧支撑机构来大幅调节磨头与工件之间的接触压力,以适应对不同管径尺寸加工的要求。

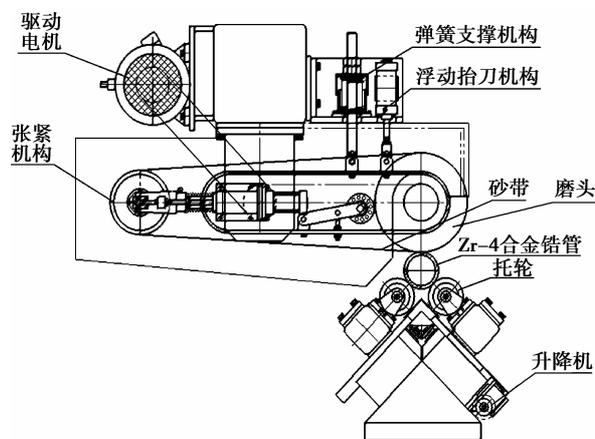


图 1 数控砂带外圆随形修磨机加工示意图

1.2 实验条件

该实验采用顺磨方式,实验条件见表 1。

表 1 实验条件

名称	参数
Zr-4 合金成分 (wt%)	Sn 1.50 Fe 0.20 Cr 0.09 Zr 97.93 其它 0.28
管件规格	1 642 mm×61.4 mm×12.5 mm (管长×管径×管厚)
砂带规格	100 mm×2540 mm(宽×周长)
砂带线速度(V_s)	6~18 m/s
磨削力 $F(N)$	15, 30, 45, 60, 75, 90
接触轮硬度(Hs)	45, 70, 90
砂带型号及磨料种类	RB 315 YX(碳化硅) 577F(锆刚玉) KK812X(氧化铝)
磨料粒度	P80
冷却条件	湿磨

Zr-4 合金管坯在进行外表面砂带修磨之前已经过矫正、切端和管内表面修磨、去毛刺和清洗等预处理。内表面的尺寸、公差和表面粗糙度均已达到技术协议规定的质量要求。

2 实验方法

实验首先通过单因素实验,测试砂带修磨 Zr-4 合金管过程中影响管件表面材料去除率、表面粗糙度和砂带磨粒磨损情况的主要因素,然后分析不同条件下砂带修磨 Zr-4 合金管坯的质量情况。

1)在法向磨削压力 F_n 不变的情况下,改变砂带线速度 V_s (6~18 m/s),对管件进行磨削,测量管件磨削前后质量的变化情况和表面粗糙度 R_a 值,计算材料去除率;

2)在砂带线速度 V_s 不变的情况下,改变法向磨削压力 F_n (500~1 200 N),对管件进行磨削加工,测量管件磨削前后的质量变化情况和表面粗糙度 R_a 值,计算材料去除率;

3)在磨削压力 F_n 和砂带线速度 V_s 均不变的情况下,更换不同硬度的接触轮,测量管件磨削前后的质量变化情况和表面粗糙度 R_a 值,计算材料去除率;

4)改变砂带磨料种类,采用碳化硅、锆刚玉和氧化铝磨料砂带作对比实验,测量管件磨削前后的质量变化情况和表面粗糙度 R_a 值,计算材料去除率,对比不同磨料的磨削效果;

5)采用多因素正交实验方法综合研究砂带线速

度、磨削压力、接触轮硬度和工件进给速度对 Zr-4 合金管坯砂带修磨质量的影响规律。

3 实验结果分析

3.1 材料去除率的影响因素研究

3.1.1 砂带线速度对材料去除率的影响

实验过程中发现,当砂带线速度超过 20 m/s 时,由于磨削热的原因锆管表面在三个工作行程内就会出现烧伤现象,而此时工件的表面粗糙度和尺寸精度均未达到设计要求。为了探究在有效砂带线速度下,工件表面材料去除率随砂带线速度 V_s 的变化规律,笔者取定 V_s 在(6~18)m/s 的范围内变动。

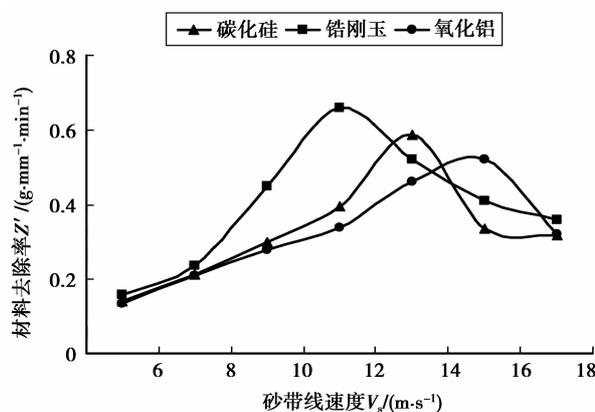


图 2 砂带线速度与标准材料去除率的关系

图 2 为磨削压力 $F_n=500$ N 时,不同的砂带线速度与标准材料去除率 Z' 的关系。由图可见,砂带线速度提高后的直接效果就是材料去除率 Z' 的增加,但当 V_s 超过某一临界值时, Z' 就会迅速下降。

前期材料去除率增加的主要原因是砂带线速度增加使单位时间内参与切削的磨粒数量增加,并且高速条件下的钝化磨粒同样具有较强的切削能力,所以材料去除率增加;后期材料去除率减小是因为不断增加的磨削速度使弹性砂带上的磨粒受工件表面的反冲击频率增大,弹性砂带退让也增大,引起了砂带磨粒切削实际切入深度减小。只有当以上两种因素的影响处于相对平衡时,材料去除率达到最大值。

为了获得较高的修磨效率即材料去除率,不同磨料砂带均存在各自最佳的线速度值,碳化硅磨料砂带线速度值约为 14 m/s,锆刚玉磨料砂带约为 12 m/s 时,氧化铝磨料砂带约为 16 m/s。

3.1.2 磨削压力对材料去除率的影响

图 3 为砂带线速度为 10 m/s 时, Z'_{∞} 随磨削压力 F_n 的变化曲线。由图可知, 随磨削力 F_n 的增加 Z'_{∞} 有一个较为明显的增长趋势。这是因为随着磨削压力的增加, 单位时间内参与磨削的单颗磨粒平均载荷增加, 切入工件更深, 材料去除更多。

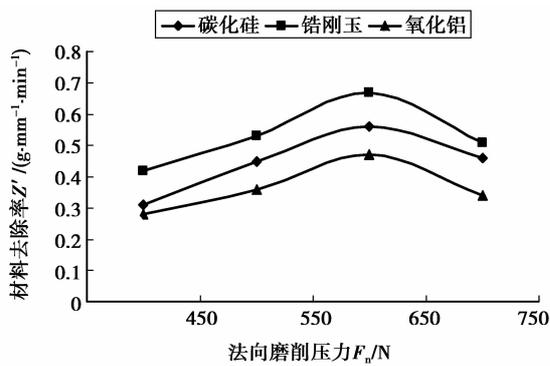


图 3 磨削压力与标准材料去除率的关系

但磨削压力并不是越大越好, 由于管件的修磨采用无心外圆磨削的方式, 压力越大, 磨头系统对工件形位误差的敏感性增强, 机床振动加剧, 磨粒破碎加快、脱落严重, 砂带切削能力受到很大的制约, 材料去除率反而会下降; 压力增大, 磨削区温度急剧升高, 工件很容易烧伤。实验中笔者发现当磨削压力为 650 N 左右时, 工艺系统稳定, 且能获得较高的材料去除率同时又不会烧伤工件。

3.1.3 磨料种类对材料去除率的影响

不同种类的磨粒不论在微观结构、抗破碎性、磨损机理以及与被加工材料的亲和性等方面都会表现出极大的差异性, 因此磨料种类不同, 材料去除率能力和砂带使用寿命各不相同^[10]。由图 2 和图 3 可知, 同等条件下, 锆刚玉砂带比碳化硅砂带的相对金属切除率高 20% 左右, 比氧化铝砂带的高 45% 以上, 这是因为锆刚玉的硬度略大于碳化硅并远高于氧化铝, 机械强度高, 性脆而锋利, 磨粒即时破裂后可形成新的锋刃, 切削能力强。然而砂带磨削产生的磨屑是一些形状各异的微细颗粒, 微细颗粒在脱离磨削区的瞬间会吸收大量的热能, 这些热量足以使它与空气中的氧气发生氧化反应而生成锆的氧化物。锆刚玉是以氧化铝、氧化锆为原料在电弧炉中经高温冶炼而成, 而这两种材料成分的晶格结构与磨屑氧化物的相同, 二者的亲和性极强。因此随磨削时间延长, 无论是锆刚玉磨料砂带还是氧化铝磨料砂带均会出现相当严重的堵塞现象。碳化硅磨粒与锆合金的亲和力远不如氧化铝和锆刚玉磨粒强,

因而磨屑在磨粒上的粘附力不强, 砂带的粘附不像刚玉类砂带那样严重。

3.2 Zr-4 合金包壳管表面粗糙度的影响因素

Zr-4 合金管的表面粗糙度在很大程度上影响其耐腐蚀性能。管件表面越粗糙, 越易使腐蚀性气体或液体通过表面的微观凹谷渗入到金属内层, 造成其表面腐蚀。因此, 减小零件表面粗糙度值, 可以有效提高零件的耐腐蚀性能。管件外壁磨削表面的创成过程是砂带磨粒在工件表面的微量切削而形成的累积效应, 加工过程中影响工件表面粗糙度的因素众多, 磨削过程的物理关系难以精确表述^[11-12]。

3.2.1 接触轮硬度对 Zr-4 合金锆管表面粗糙度的影响

接触轮越软, 相同磨削压力的情况下, 接触轮的变形程度越大, 与工件的接触面积越大。与此同时, 磨削区中参与磨削的砂带的变形程度较大, 砂带变形的直接结果就是磨粒会向砂带变形程度最大的地方倾斜, 从而改变加工过程中磨粒的切削方向。如图 4 磨削区两侧的磨粒集中向磨削区的中部倾斜, 只有单侧的磨粒切削刃会以其较大的负前角参与对工件的切削过程当中, 而相对一侧的磨粒则主要在工件表面起到挤压、滑擦以及初步耕犁的作用, 只有少数变形较小的磨粒切削刃能够切除材料, 由于材料

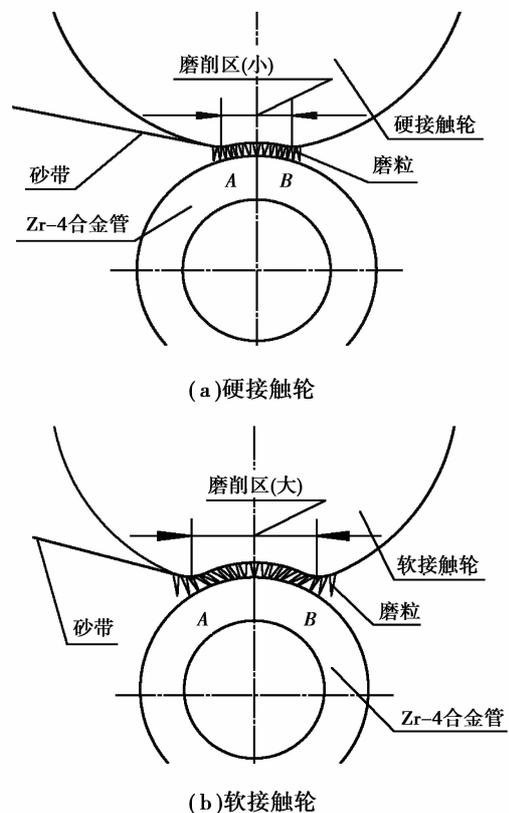


图 4 不同硬度接触轮与砂带磨粒接触情况示意图

去除率小,工件表面粗糙度值能够达到较低的水平。若接触轮的硬度越大,其变形越小,与工件的接触面积越小,虽然磨粒与工件实际接触时间 t_s 变小,但单颗磨粒对工件的压力变大,有效切削深度增大,因而切除率也越高,磨削精度较高,但加工表面粗糙度却相应地增大。

同样,接触长度的大小在很大程度上影响磨削温度的高低。接触长度增加时,冷却液难以进入接触区,通过冷却液带走的热量则显著减少。同时,接触长度增大,工件热传递的路径增长,磨削区的热量很难散发出来,引起磨削区温度升高。

接触轮硬度不同的情况下,管坯表面粗糙度随磨削时间 t_s 的变化曲线如图 5 所示。

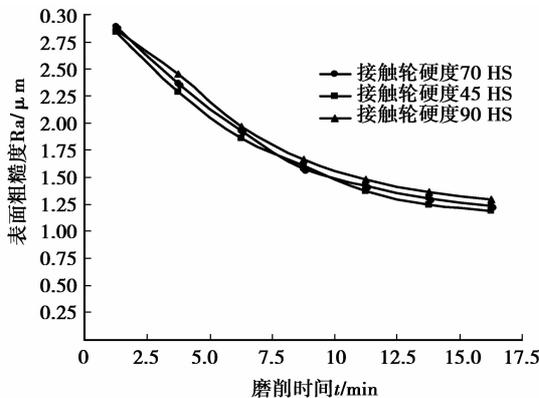


图 5 接触轮硬度与表面粗糙度的关系曲线

实验结果与理论分析相吻合,磨削时间一定的情况下,接触轮硬度越高工件表面粗糙度越高,硬度越低,工件表面粗糙度越低。为了既能保证工件砂带磨削的尺寸精度又能获得较为理想的表面质量,同时尽量延长设备维护周期,接触轮硬度的选择要适中。实验发现当接触轮硬度为 70 HS 时,磨削质量完全能够满足设计要求。

3.2.2 磨削压力对 Zr-4 合金管表面粗糙度的影响

如图 6 所示,表面粗糙度随着磨削压力的增加而降低。当磨削压力较小时,降低地较快;当磨削压力较大时,降低变得缓慢。表面粗糙度值的降低直接与参与磨削的磨粒数 NG (The Number of Grains) 和磨粒的形状有关。 NG 随着磨削压力的增加而增加,然而,磨粒的形状一方面与接触压力有关,另一方面与磨削时间有关。当磨削压力大时,磨粒的快速磨损使表面粗糙度降低的缓慢。但压力的增大,会使磨粒的激振频率升高,使振动加剧,磨粒脱离严重, NG 减小。

在较小的磨削压力下,磨削时间长一点的比磨

削时间短的表面粗糙度要好。这是因为在较小的磨削压力下,磨粒的磨损率较小,并且能保持较长时间的切削性,磨削时间长可以对表面多次磨削,使表面粗糙度值降低,但磨削效率会下降。然而在大的磨削压力下,最终表面粗糙度值的大小与磨削时间的关系不明显。

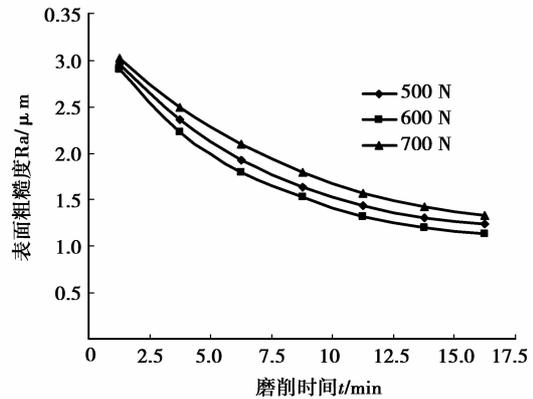


图 6 磨削压力与表面粗糙度 Ra 值的关系曲线

3.3 砂带磨损研究

3.3.1 磨粒磨损量实验分析

砂带磨削过程中包括诸多不同形状磨粒的切刃对工件表面产生的综合切削,由于磨粒的形状不规则,并且是随机的分布在砂带上,使得磨粒的磨损机理非常复杂^[13]。

为了探寻磨削过程中砂带磨损的规律,实验采用直接测量方法,通过测量每次进给后砂带同一标记位置处的实际厚度值来计算砂带磨粒高度的变化情况。图 7 为采用不同磨削参数时砂带磨损量随时间的变化曲线。

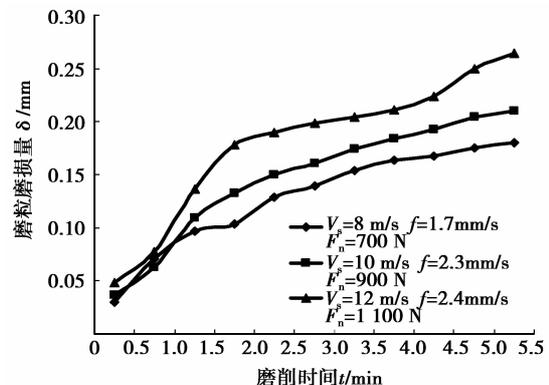


图 7 不同磨削参数下砂带磨损量随时间的变化

在相同加工质量的前提下,采用不同的磨削参数组合时砂带初期磨损的时间基本相同。可见,砂

带初期磨损时间的长短是砂带线速度、磨头进给速度和磨削压力共同作用的结果。磨削压力直接影响参与磨削的磨粒数量,压力过小砂带初期磨损时间加长,若过大会造成磨粒过载,出现大面积磨粒脱落现象。进给速度的增大将增大施加在单颗磨粒上的冲击载荷,突出于砂带表层的磨粒会在力的作用下崩脆甚至脱落。

砂带磨粒初期磨损高度随砂带线速度和磨削压力的增大而增加。为了分担负荷,使单颗磨粒不会因过载而脱落,同时参与磨削的磨粒数量必须随之增加。对于恒压磨削来说,增大磨削压力是最直接有效的方法。为了限制因磨削压力增大而造成磨削温度上升从而影响管件表面的修磨质量,磨削参数的选择必须要在综合考虑磨粒磨损和管件表面质量中寻求平衡。

3.3.2 砂带磨损表面形貌研究

磨料的微结构和使用条件对砂带磨粒的具体磨损形式和演变过程影响很大^[14]。为了提高砂带使用寿命和增加材料去除率,从微观角度来研究不同种类磨料的磨粒磨损形式,进而分析砂带磨损的变化规律^[15]。

砂带磨粒在与 Zr-4 合金的交互作用过程中,主要以磨耗磨损和粘附磨损为主。初期磨损主要以磨耗磨损为主,Zr-4 合金塑性好,随着磨料与 Zr-4 合金的交互作用的加剧,接触区的磨削热会迅速积聚,合金表面及磨屑被瞬间氧化,接近熔融状态的切屑会粘焊在磨粒尖刃上,粘附磨损所占的比例会显著增加。同时大量的磨屑会堵塞砂带磨粒间的容屑空间,导致磨削阻力增加,进而发生严重的粘附磨损,材料去除率明显下降。

图 8(a)~(c)分别为碳化硅磨料、锆刚玉磨料和氧化铝磨料与 Zr-4 合金发生交互作用后的磨损情况,从图 8(b)、(c)可以清晰看到 Zr-4 合金材料的切屑粘焊在磨粒尖刃上,发生了粘附磨损。锆合金氧化物与氧化铝在微观上有着相同的晶格结构,二者亲和性极强,会生成韧性更强的新物质粘附在切刃上从而使磨削能力严重恶化甚至丧失,而且磨粒越细小这种现象就会越严重,这就是导致细粒度含氧化铝磨料难以长久切削 Zr-4 合金材料的本质原因。

对比图 8(a)可以看出碳化硅磨料在与 Zr-4 合金材料发生交互作用后其磨粒的磨损始终以磨耗磨损为主,磨粒上几乎没有粘结物的存在。

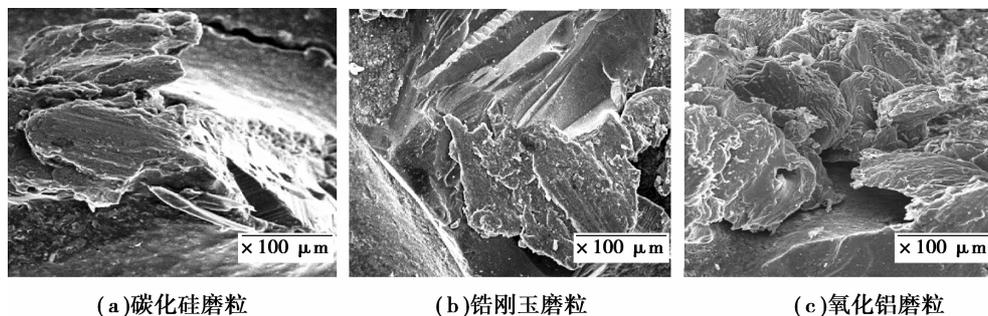


图 8 不同磨料砂带磨削 Zr-4 合金后的宏观磨损和磨粒磨损情况

3.4 Zr-4 合金砂带修磨表面微观形貌分析

从图 9(a)图中可以看出,经砂带修磨后的 Zr-4 合金管的表面上存在着粗细相间的沟槽状塑性磨削

划痕,沟痕两边的金属滑移隆起突出,磨削纹路清晰且较为完整。在磨削表面粗糙度 Ra 值较大的情况下,沟槽划痕较深,微细的磨料颗粒和磨屑会嵌入其

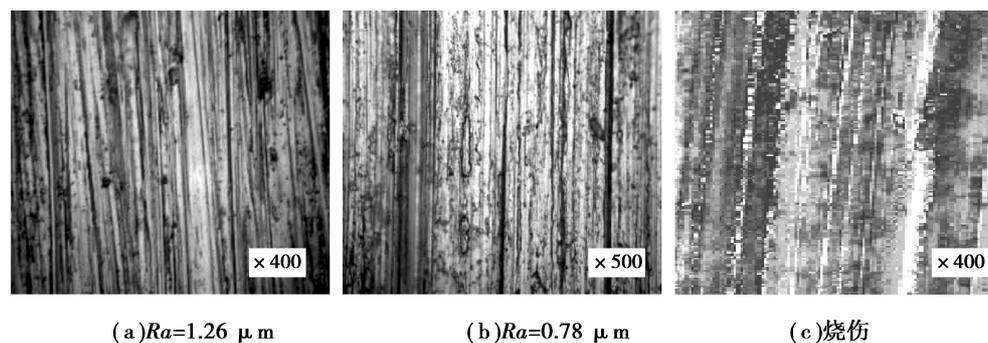


图 9 砂带修磨 Zr-4 合金管后的表面微观形貌

中。如图(b),当 Ra 值较小时,沟痕较浅且宽度均匀,内部基本上没有粘附物。图(c)为合金表面烧伤微观形貌图。图中工件表面的磨削纹路尚可分辨,但沟痕中填满了大量的灰黑色斑状凸起物,经 X 射线能谱仪分析后笔者发现凸起物中含有 O、Al、Si 和 Zr 等元素。

进一步分析后发现,Zr-4 合金表面烧伤层由涂覆层、氧化层和污染层三层组成。涂敷层主要由 Zr 的氧化物、碳化物, Si 或 Al 的氧化物等组成,它们以片状或球状的形式随机熔覆在工件表面,该层中没有发现以晶体形式存在的 Zr;氧化层由 Zr 的氧化物组成,主要是 ZrO_2 也有少量的 $ZrO_n (n \leq 0.5)$;基体和氧化层之间的过渡层称为污染层,该层中晶体 Zr 和氧化锆共存,氧以氧化物和气体过饱和间隙固溶体的形式存在,其含量随深度的增加而减少。过度层以片状或块状的金相形式存在,与基体有明显的分界面,其厚度与烧伤程度密切相关,烧伤越重,厚度越大。

为了尽可能的降低由于砂带修磨对管件表面耐腐蚀性能的损害,砂带磨料粒度不易太小,修磨结束后应充分清洗烘干管件内外表面。

4 磨削工件表面显微硬度分析

在砂带磨削过程中由于磨粒的滑擦、耕犁和切削作用,锆管管坯外表面发生了较为剧烈的塑性变形,金属内各滑移系之间位错的相互作用以及缺陷的形成共同引起了位错的塞积,使变形阻力大大增加,从而使晶体产生加工硬化,此外,微细的片状及颗粒状锆合金的化学活性极高,在磨削高温的作用下极易与大气中的氧、氮等发生氧化反应,从而在工件表面形成污染层;此外氧、碳和氮等元素会渗入到 Zr-4 合金表层,形成气体过饱和间隙固溶体,这些均会使 Zr-4 合金砂带磨削表面的硬度提高^[16]。

磨削过程中,锆合金的热敏感性较大,极易发生磨削烧伤,即工件表面变黑或出现鱼鳞状褶皱和塑性流变涂覆层。烧伤是工件基体材料在热影响下向表面扩散而被吸附进去的氧氮等氧化而形成的一层氧化膜,产生烧伤的工件表面,发生了急剧的塑性变形,表面层内,晶粒破碎、晶体畸变,烧伤层的显微硬度也发生变化。磨削烧伤会破坏工件表层组织,产生很大的热应力,严重时会导致产生表面裂纹,致使工件表面质量恶化,严重地影响工件的强度及使用价值。

由图 10 所示的显微硬度变化曲线可知,Zr-4 合金修磨过程中,烧伤表面层的硬度变化和未烧伤表

面层的显微硬度变化规律有着较大差异,烧伤表面次表层有一层约为 $150 \mu\text{m}$ 左右的软化层。另外,磨削表层显微硬度变化深度 h 随烧伤程度的增加而增加,表面轻微烧伤时 h 约为 $175 \mu\text{m}$,表面严重烧伤时, h 约为 $250 \mu\text{m}$ 。

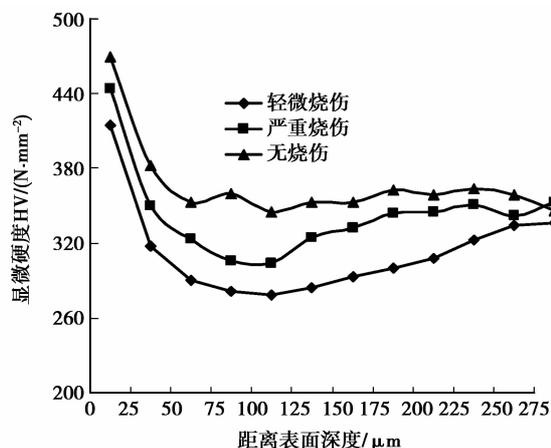


图 10 工件表层显微硬度变化曲线

5 结 论

1)砂带线速度 V_s 和法向磨削压力 F_n 是影响锆合金砂带磨削材料去除率的主要因素。虽然二者的增大均能使材料去除率得到较大的提高,但同时也会使磨削温度迅速上升。在不致引起表面烧伤的情况下,为了提高管件的修磨效率,砂带线速度和磨削压力应分别在 $8 \sim 12 \text{ m/s}$ 和 $600 \sim 700 \text{ N}$ 的范围内选取。

2)接触轮的硬度和磨削压力均会影响磨削区中磨粒与加工表面的接触形式,从而影响材料去除力和砂带使用寿命。除此之外,磨粒切削方向的改变,易引起磨粒的振动,从而影响工艺系统的稳定性。

3)Zr-4 合金砂带磨削过程中,磨粒在与工件接触时极易发生熔敷和粘结,磨料的化学磨损和粘附磨损较为严重。带有粘附物的磨粒在磨削区高温高压下会将粘附物重新涂附在已加工表面上,进一步加剧磨削温度的上升,造成工件烧伤。

4)砂带磨削会在工件表层产生形变层以及伴有较深划痕的粗糙表面,这样会加速管件的氧化腐蚀。为了提高锆合金产品的表面粗糙度,避免划痕存在,采用细砂带进行机械修磨是有效手段。

5)Zr-4 合金经过磨削后,其表面发生了较为明显地加工硬化,烧伤工件的次表面有软化层,磨削表层显微硬度变化深度 h 随磨削烧伤程度的增加而增加。

参考文献:

- [1] 李纓. 铈管精整检测生产线的工艺设计[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(Sup): 94-97.
LI Ying. Technological design of zircoloy tube finishing and testing production line[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2003(37): 94-97
- [2] Huang B Y. China materials engineering canon [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2006.
- [3] Motta A, Jeong Y H, Comstock R J, et al. Advanced corrosion-resistant Zr alloys for high burnup and generation IV application[J]. Department of Energy International Nuclear Energy Research Initiative DOE/ROK Project Number: www. nuclear. gov, 2003-020-K.
- [4] 刘建章. 核结构材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [5] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009.
- [6] Huang Y, Huang Z, Xu Q S, et al. The grinding force measure and analysis on the abrasive belt grinding to magnesium alloy[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353(1): 726-729
- [7] Li C H, Cai G O, Xiu S C. High efficiency abrasive machining process and its key technologies [C]. The 11th international conference on industrial engineering and engineering management. 2005(4): 516-519
- [8] 黄云, 黄智. 砂带磨削的发展及关键技术[J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2263-2267.
HUANG Yun, HUANG Zhi. Development and key technologies of abrasive belt grinding [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18): 2263-2267.
- [9] 马余选, 余兴旭. 核用铈合金管材外表面抛光装备的研制[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(1): 68-71.
MA Yuxuan, YU Xinxu. Development of a polishing equipment for polishing the outer surface of zirconium alloy tubing for nuclear reactor[J]. Rare metal material and engineering, 2000, 29(1): 68-71.
- [10] 王维朗, 潘复生, 陈延军, 等. 不锈钢材料砂带磨削试验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, 29(10): 91-95.
WANG Weilang, PAN Fusheng, CHEN Yanjun, et al. Investigation on abrasive belt grinding of stainless steel [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29(10): 91-95.
- [11] Bigerelle M, Najjar D, Iost A. Relevance of roughness parameters for describing and modelling machined surface[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(11): 2525-2536.
- [12] 修世超, 李长河, 蔡光起. 磨削加工表面粗糙度理论模型修正方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(8): 770-773.
XIU Shichao, LI Changhe, CAI Guangqi. Modification for theoretical model of ground surface roundness[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2005, 26(8): 770-773.
- [13] Mezghani S, Mansori M, Sura E. Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron[J]. Wear, 2009, 267(1/2/3/4): 86-91.
- [14] Jourani A, Dursapt M, Hamdi H, et al. Effect of the belt grinding on the surface texture: modeling of the contact and abrasive wear [J]. Wear, 2005, 259: 1137-1143
- [15] Deuis R L, Subramanian C, Yellup J M. Abrasive wear of aluminium composites: a review[J]. Wear, 1996, 201(1/2): 132-144.
- [16] 任敬心, 康仁科, 史兴宽. 难加工材料的磨削[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

(编辑 张小强)