

中国机械工程学会生产工程分会磨削专业委员会

第七届全国磨削及表面质量研讨会论文集

主办单位

中国机械工程学会生产工程分会磨削专业委员会

承办单位

重庆大学机械传动国家实验室

重庆大学砂带磨削研究室

华中理工大学机械一系

1992年10月于重庆

中国机械工程学会生产工程分会磨削专业委员会

第七届全国磨削及表面质量研讨会论文集

主办单位

中国机械工程学会生产工程分会磨削专业委员会

承办单位

重庆大学机械传动国家实验室

重庆大学砂带磨削研究室

华中理工大学机械一系

江苏工业学院图书馆
藏书章

1992年10月于重庆

前 言

本书汇集了中国机械工程学会生产工程分会磨削专业委员会第七届全国磨削及表面质量研讨会宣读交流的论文66篇。这些论文反映了近年来我国磨削加工领域的最新进展。这些论文涉及到磨削机理、磨削新工艺、磨具、磨料和设备以及磨削控制、磨削参数的计算机最优化、磨削的质量的控制与检测等诸方面的科研成果和技术进步。

本次大会得到了重庆大学机械传动国家实验室、重庆大学砂带磨研究室，华中理工大学机械一系的大力支持。

重庆大学机械传动国家实验室梁锡昌教授和重庆大学砂带磨削研究室黄云副教授，为本次大会的筹备和组织以及本书的编辑作了大量工作。詹捷、叶晓秋、龙成林同志为本书的编辑付出的辛勤的劳动，在此谨表谢意。

目 录

一、砂带磨削

1. MS-9101工控机用于五坐标联动数控砂带磨床 全荣 阮金祥 魏源迁 杨清好 陈尔昌 陈日曜 (1)
2. 接触板式平面砂带磨削砂带磨损的研究 邓朝晖 许世良 罗重常 (7)
3. 砂带磨削石棉刹车毂的试验研究 吕树滨 单瑞兰 (14)
4. 砂带磨削技术在实际生产中应用 卢志贤 (19)
5. 汽轮机叶片的数控砂带磨削 钟华珍 吴秀英 石东平 陈尔昌 (24)
6. 大有发展前途的砂带磨削工艺 赵广兴 (28)
7. 砂带磨削——机械加工的奇葩 裴 英 (31)
8. 砂带平面磨削研究初探 阎作奎 丁儒林 王娟君 李久强 (37)
9. 砂带去毛刺技术——硅钢片去毛刺机 孙海林 (42)
10. 砂带外圆纵磨磨削精度的试验研究 耿 直 韩德功 (46)
11. P磨料砂带磨削性能试验 吴耀宇 崔恒泰 (52)
12. 浅谈砂带磨削的冷却润滑与除尘问题 王安澜 (55)
13. 190型柴油机缸盖平面强力砂带磨削试验研究 许世良 秦玉忠 刘禄祥 邓朝晖 惠蓉 罗重常 (62)
14. 用砂带磨削代替精车与精刨 鲁志勤 (66)
15. 砂带磨削的新发展 徐发仁 朱派龙 黄 云 (70)
16. 砂带的微刃刀——磨粒简述 朱派龙 黄 云 徐发仁 (75)
17. 砂带的载体——基底综述 朱派龙 徐发仁 黄 云 (84)
18. 高硬度小孔珩磨加工工艺分析 张 毅 徐发仁 (90)
19. 电解砂带磨削技术 黄 云 朱派龙 徐发仁 (95)

二、磨削质量控制与检测

20. 高速高效低粗糙度磨削工艺参数的最优化 李修毅 尹向东 许世良 周海萍 (100)
21. DWGW-JG1型激光功率谱在线检测砂轮磨损装置的研究 李汉中 杨勇生 王 勇 (105)
22. 磨削状态的信号功率谱分析与在线监视 甘启义 刘 飞 徐宗俊 汤子琳 (109)
23. 气电式磨削主动量仪基础试验研究 王 军 王 波 刘 瑾 胡 明 (114)
24. 气电式磨削主动量仪的研究 刘 瑾 张庆云 胡 明 王 波 (119)
25. 缓磨烧伤前后接触弧区工件表层温度畸变过程的计算机仿真 徐鸿钧 徐西鹏 董俊书 张幼楨 (123)

26. 砂轮形貌的计算机采样 ····· 顾 超 徐载熊 施雷飏(129)
27. 微小凹球柔性成形研磨加工及精度分析 ·····
 谢良富 朱 峰 张鸿海 陈日曜 江 军 李尚平(134)
28. 曲轴磨削加工中圆度临床测量的试验研究 ·····
 沈德和 金 巍 施 杰 朱训生(140)
29. 缓进深磨烧伤色斑与氧化膜结构的研究 ·····
 徐鸿钧 李 迎 徐西鹏 董俊书(144)
30. 轴承沟道磨削变质层与磨削工艺参数的研究 ····· 林述温 莫开旺(148)
31. 成形磨削烧伤机理的研究 ····· 陈 明 浦学锋(153)
32. 300M超高强高钢磨削烧伤的研究 ·····
 任敬心 康仁科 吴小玲 陈景蕙 郭新安 徐庆九 罗顺清 戴顺安(160)
33. 精研磨及消除方法 ····· 孙 捷 马忠荣 田艳红 张治中(167)
34. 摆线齿轮成形磨削精度的分析 ····· 詹 捷 黄天铭 严 勇(171)
35. 利用Barkhausen效应对磨削表面质量进行检测 ····· 庄又青(175)
36. 精密磨削的表面粗糙度测量 ····· 郭兴明 梁锡昌 陈小安(180)
37. 外圆磨削表面波纹度的产生及抑制 ·····
 孙桂静 张鸿海 游汉涛 陈日曜(186)

三、砂轮磨削工艺

38. 磨齿新技术的研究 ····· 梁锡昌 邵 明(188)
39. 复杂曲线齿轮成形修整滚轮的数控加工工艺 ·····
 尹佑盛 梁锡昌 黄代贤 刘恒学(195)
40. 二齿差摆线齿轮成形磨齿新技术研究 ·····
 黄天铭 严 勇 梁锡昌 詹 捷(198)
41. 凹弧型立铣刀刃磨新工艺 ····· 郭振东(203)
42. 薄板零件磨削经验 ····· 万奕金(206)
43. 在大型二齿差摆线齿轮成形磨齿中的砂轮修整 ····· 严 勇 梁锡昌 黄天铭(209)
44. 摆线齿轮高效磨齿工艺研究 ····· 严 勇 汤子琳 甘启义(212)
45. 成形磨削技术发展现状 ····· 严 勇 黄天铭 汤子琳(216)
46. 树脂结合剂CBN砂轮磨削内孔的一些研究 ·····
 吕玉山 孙建章 刘孝慈 张庆云(220)
47. 氧化锆陶瓷拉伸试件的精密磨削 ····· 戴 勇 张幼桢(224)
48. 无缝钢管内壁高效磨削设备的研制 ····· 宋振武 杨旭磊 赵新品(228)
49. 浅论立铣刀刃磨及装备现状与发展 ····· 胡 河(234)
50. 陶瓷结合剂立方氮化硼砂轮磨削螺纹型面的研究 ····· 吕新安(240)
51. 基因遗传算法及在磨削参数优化中的应用 ·····
 朱 峰 陈吉红 张鸿海 黄国葵 陈日曜(244)
52. 精密外圆磨削加工补偿控制研究 ·····
 李国松 刘国良 薛秉源 何秀寿 顾开颜(251)

53. 球轴承沟道磨削工艺参数最优化的研究 王健强 莫开旺(256)
54. 高精度薄型淬硬大齿轮的制造技术 田昌明(262)
55. CBN砂轮磨削300M超高强度钢的试验研究

康仁科 任敬心 郭新安 吴小玲 陈景蕙 戴顺安 罗顺清(267)

56. 砂瓦特性对立轴平面强力磨削性能影响的试验研究
- 高 航 郑焕文 宋振武(273)

57. 功能磨加工的理论与实践
- 吕玉山 刘孝慈 吴连生 孙秀兰 王 军 张庆云(279)

四、磨料、磨具及磨削

58. 数控磨床配套用高精度螺纹金刚石滚轮修整研制
- 严文浩 朱 进 邢先占 崔仲鸣(285)

59. 聚晶金刚石用于金刚石砂轮整形的试验研究 冯克明(288)

60. 金刚石砂轮的整形与修锐试验研究 陈玉华 任敬心 康仁科(293)

61. 立方氮化硼磨具修整技术研究 严文浩 崔仲鸣 刘新才 楚保庆(298)

62. CBN磨料新技术革命 严 勇 詹 捷 汤子琳(303)

63. 铸铁结合剂金刚石砂轮研究 王 鹏 吕振东(306)

64. 树脂结合剂CBN砂轮的液压喷射修锐 薄化川 庞贺伟(312)

65. 金刚石砂轮的电解修整及磨削对工程陶瓷磨削的影响
- 吴玉厚 郑焕文 蔡光起(318)

66. 三维曲面的激光精密加工 丁明亮 梁锡昌 熊见芬(324)

Ms-9101 工控机用于五座标联动数控砂带磨床

全 荣 (博 士 生) 阮 金 详 (讲 师)
魏 源 迁 (博 士 生) 杨 清 好 (讲 师)
陈 尔 昌 (教 授) 陈 日 曜 (教 授)
(武 汉 华 中 理 工 大 学)

摘 要

本文介绍了用MS-9101工控机将一台XK-5040数控铣床改造成一台开环式五座标联动数控砂带磨床的过程,给出了系统的硬件、软件框图及其在汽轮机扭叶片型面加工中的应用。

关键词: 数控, 砂带磨床, 工控机, 叶片

一、引言

叶片是汽轮机、燃汽轮机、烟气轮机、压汽机、水轮机、航空发动机和船舶推进装置等的关键部件,对它的加工的研究,将在能源、交通、国防等领域产生重要的影响。由于叶片的形状复杂,加工困难,特别是叶片型面部分,通常是由复杂曲线组成的空间复杂曲面,对它的加工,国内一直以手工打磨为主,这不仅效率低,精度难以保证,而且劳动强度大、工作环境恶劣。为此,我们在进行了大量的可行性分析和试验研究后,运用MS-9101工控机将一台XK-5040数控铣床改造成一台开环式五座标数控砂带磨床,成功地实现了叶片型面的精加工,不仅达到了图纸规定的精度要求,而且提高了加工效率2—3倍,改善了劳动环境,降低了叶片的制造费用,为我国叶片型面的加工探索出了一条新路。

二、设计思想

本文的数控砂带磨床是基于四川东方汽轮机厂的710型扭叶片型面的加工而设计的,该叶片型面的精度为0.2毫米,而数控机床的精度一般为0.005—0.100毫米之间,为降低设备制造费用,我们采用开环式数控系统(如图1所示)。

在开环式控制系统中,没有位置检测反馈装置,因而机床的定位精度就取决于伺服机构、机械传动机构(如丝杠)和机床本身的精度,由于XK-5040是数控机床,它的定位精度是有保证的,实践证明能满足使用要求。

经文献[1]的分析、计算,要完成扭叶片型面的加工至少需要五个座标,最少需要四座标联动,经计算机模拟,决定采用五座标联动结构,坐标轴的配置如图2所示。即:工件纵向运动(X轴)、刀具(接触轮和砂带)横向运动(Y轴)、刀具垂直进给(Z轴)

工件旋转进给(A轴)、刀具摆动进给(B轴)。

为了满足五坐标联动数控砂带磨床控制的需要,我们选用了北京工控机厂的S-100总线MS-9101工业控制双板计算机。MS-9101工控机是根据微机应用于工业现场的需要而设计的,尽可能地提供了实时的硬件软件,便于编制和运行实时程序,并着重增强了抗干扰能力。

三、工作原理和硬件框图

图3,即为开环式五坐标联动数控砂带磨床系统框图。图中,电液脉冲马达X、Y、Z、A及其功放是原XK-5040系统的保留部件,步进电机B及其功放是新配备的部件。

MS-4502是一块智能步进电机接口板,能同时控制四台三相步进电机。

MS-2102是一块串行/并行/定时接口板,在系统中用于IBM-PC/XT与MS-9101工控机的通讯。

电液脉冲马达Z、Y、X、A的最大输出扭矩分别为:3.3、1.7、1.7、1.7,单位是 $\text{Kg} \cdot \text{M}$,其每个脉冲输入时液动机的转角为 1.2° ,对于X、Y、Z方向的拖动工作台,电液脉冲马达通过传动机构,最后的输出脉冲当量均为 $0.01\text{MM}/\text{脉冲}$,而A向的回转工作台,由计算机控制电液脉冲马达A经1:144蜗杆蜗轮带动工作台回转,使其一个脉冲当量等于回转工作台转角 $30''$ 。新安装的步进电机B的最大输出扭矩为 $1.2\text{Kg} \cdot \text{M}$,脉冲当量为 0.6° ,经过1:90的蜗杆蜗轮传动,一个脉冲当量等于 $24''$ 的转角。

整个系统的工作原理是:首先在IBM-PC/XT上进行曲面拟合和数据的前置处理,将前置处理后的数据由IBM-PC/XT经MS-2102的串行口传送给MS-9101工控机由工控机进行插补运算、刀具半径补偿等运算,最后由步进电机接口板对各电机实现脉冲分配,使砂带沿着叶片长度方向分段进行磨削加工。

四、加工程序设计

叶片的加工过程是:砂带沿着叶片长度方向分段进行磨削加工。由于叶片型面是空间复杂曲面,故在软件设计时应包括:(1)、曲面拟合;(2)、数据前置处理;(3)、数据后置处理。

曲面拟合是利用各种样条函数来确定曲面空间位置的数学模型,使其在一定的精度范围内,给出曲面上各点的座标值。

数据前置处理:由于曲面拟合得到的数据是三维空间的座标值,而数控加工是五坐标联动,因此,要将三维数据转换成五维数据。此五维数据直接影响刀具的空间运动,故在数据的前置处理过程中,要特别注意刀具和工件的干涉问题。

数据后置处理:将前置处理所得到的数据进行插补运算、刀具半径补偿等,从而控制加工过程。

图4和图5给出了五坐标联动数字积分法直线插补在第一象限的程序流程图其它程序从略。

五、结束语

开环式五坐标联动数控砂带磨床不仅能用于汽轮机等的扭叶片型面的加工,而且也可加工其它具有复杂曲面的零件。对于零件精度要求不高时,采用开环式系统能满足加工精度要求,但当零件精度要求较高时,则需要采用闭环式控系统。用MS-9101工控机将XK-5040数控铣床改造成开环式数控砂带磨床,成本低,性能稳定,能广泛应用于复杂曲面的精加工。

参考文献

- [1] 杨楚明, 叶片多坐标控制锥形铣刀铣削加工和多坐标控制砂带磨削加工研究, 华中理工大学博士论文, 1988年。
- [2] 阮金详, 五坐标数控砂带磨削机床数控装置的研制, 华中理工大学硕士论文, 1990年。
- [3] 北京市工控机厂, MS-9101工控机使用说明书, 1988年。
- [5] J. Petrs, B. Rowe, CAD/CAM Boosts Productivity in Steam Turbine Blade Manufacturing, Manufacturing Engineering, March 1985.
- [6] G. C. Loney and T. M. Ozsoy, NC Maching of Free Form Surface, CAD, Vol. 19, No. 2, March 1987.

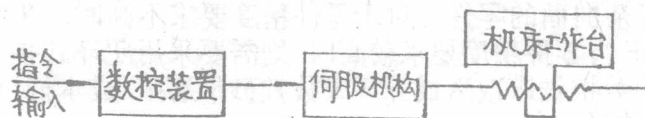


图 1 开环控制系统框图

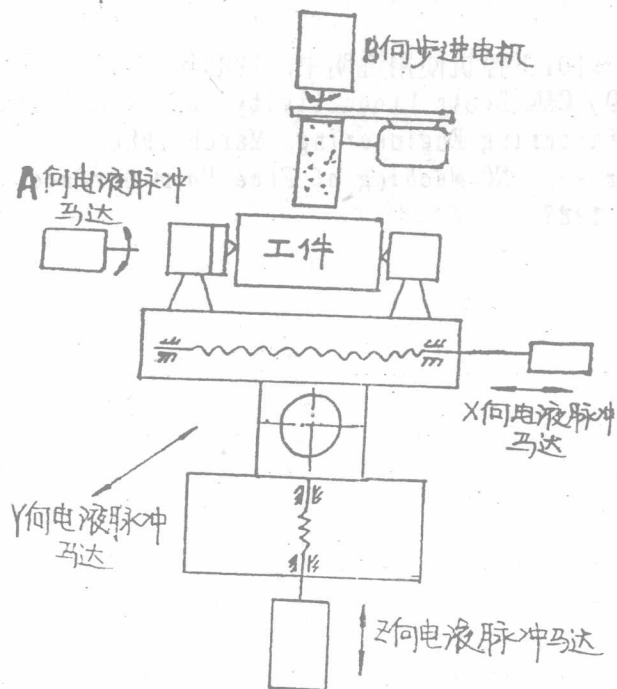


图 2 电机分布示意图

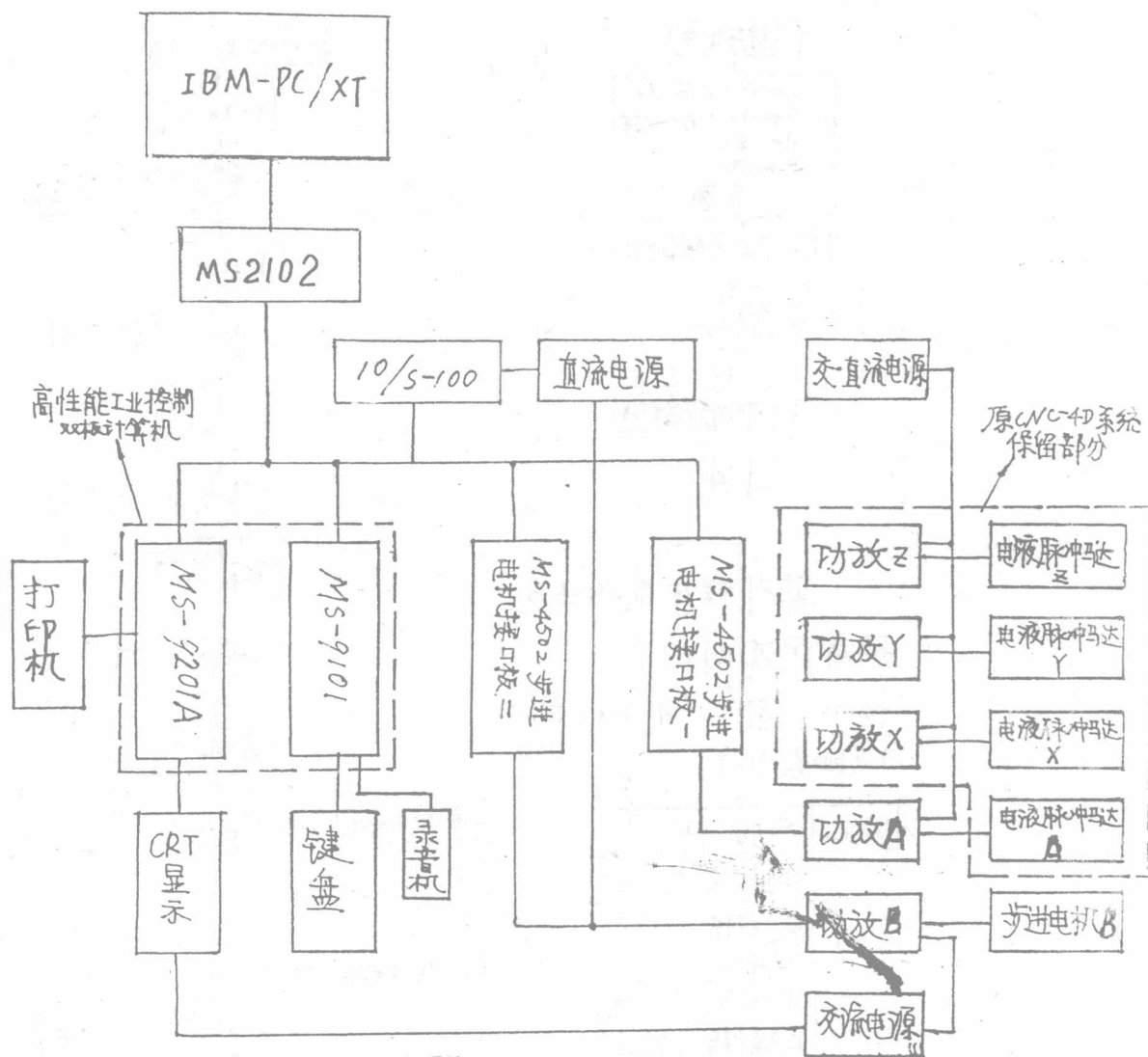


图3. 五座标数控系统 CVC-5J.

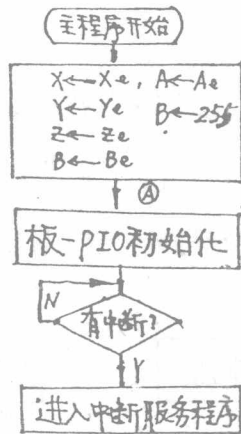


图 4

插补程序见附录3.

程序需说明的有:

板一和板二 (MS4502) 的口

地址表如下:

表 1

端口	名称	板一	板二
PIO ₁	口A数据	C0	B0
	口B数据	C1	B1
	口A命令	C2	B2
	口B命令	C3	B3
PIO ₂	口A数据	C4	B4
	口B数据	C5	B5
	口A命令	C6	B6
	口B命令	C7	B7

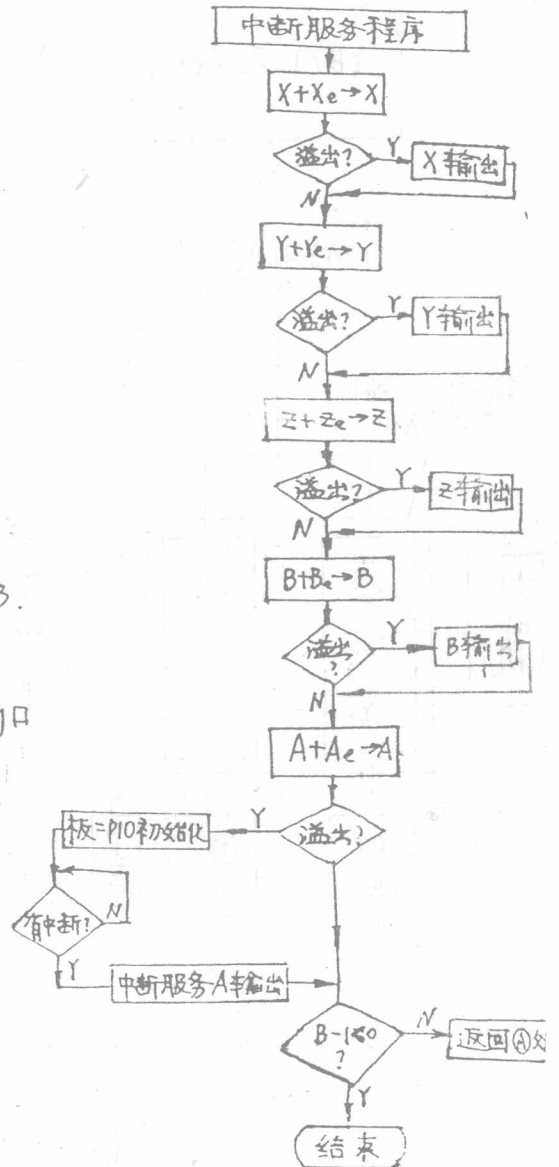


图 5

接触板式平面砂带磨削砂带磨损的研究

湖南大学 邓朝晖(硕士) 许世良(工程师) 罗重常(教授)

摘要本文借助扫描电子显微镜(SEM)分析了接触板式砂带磨削砂带磨损机理, 辅助砂带磨损高度 δ 的测量实现了砂带磨损平面面积率 η 的定量计算, 并进行了 η 对一次磨削后残留量 Δ 的影响试验。得出了一些重要结论。

关键词砂带磨损、扫描电镜分析、磨损平面面积率、残留量

砂带磨削这一新工艺在国外发展十分迅速并广泛得到应用, 在我国也得到逐步推广应用, 并把湖南大学平面砂带磨削新技术列为我国八五计划重点推广项目。砂带磨削具有金属切除率高、适应性强、机床结构简易、磨削温度低等许多优点, 然而砂带一般不进行修整, 砂带磨损与磨削效率、加工精度、表面质量和生产成本等密切相关, 因此它成为国内外研究的重大课题。本文对接触板式平面砂带磨削的砂带磨损中有关问题进行了试验研究, 得出一些重要结论。

以往的国内外文献表明, 砂带寿命期内, 砂带磨损过程一般分为二个阶段即以磨粒破碎磨损为主的初期快速磨损阶段和以磨粒磨耗磨损为主的稳定磨损阶段; 磨削作用直接引起磨粒顶端的破碎磨损, 在磨削过程中磨粒顶上产生不断扩大的磨损平面, 随磨削过程的继续进行, 磨粒高度逐渐减低, 被磨成平顶的磨粒数目稳定增加, 磨损平面面积率达到一定限度, 磨削力急剧上升, 金属切除率急剧下降, 砂带视为失效, 此时粘结层和磨削切削刃顶部等高磨粒往往从粘结层中脱落。

1、砂带磨损的几个参数及相互关系

对于砂带磨损的研究, 理论上分析以下几个主要参数及其相互关系: 砂带磨损高度 δ 、磨粒切削分布率 ξ 、磨损平面面积率 η 、砂带损耗量 δ_0 。

1.1 砂带磨损高度 δ

砂带磨损高度 δ 随累积金属磨除量 Q (或磨削时间 t)的增加而增加, 典型 $\delta-Q$ 曲线如图1所示在砂带寿命初期, 磨损高度 δ 随 Q 的增大而急剧增加, 此阶段很短, 在稳定磨损阶段, δ 随 Q 的增加而缓慢增加, 两者变化近似线性, 此时砂带磨损高度 δ 为:

$$\delta = \delta_0 + W_L \cdot Q \quad (1)$$

式中 δ_0 为稳定磨损区的起始磨损高度; W_L 为稳定磨损阶段的磨损率($\mu\text{m}/\text{mm}^3$); Q 为累积金属磨除量(mm^3)。

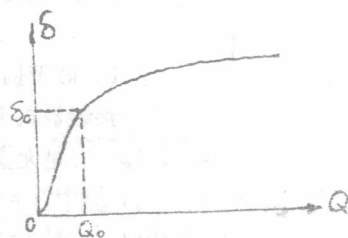


图1 典型 $\delta-Q$ 曲线

1.2 磨粒切削分布率 ξ

砂带磨粒切削分布率 ξ 是一个非常重要参数, 决定了工具的磨削性能、加工精度等。用触针法对砂带使用之前和达到寿命终点时工作表面轮廓进行对比测定, 可得到图2的砂带工作表面轮廓曲线。砂带使用之前, 工作表面是由高度参差不齐的锋利切削刃组成, 砂带磨损后, 工作表面是由一系列带有高度趋于一致的磨损小平面的磨粒切削刃组成。

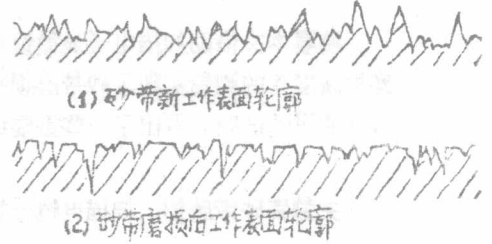


图2 砂带新旧工作表面轮廓

1.3 砂带磨损平面面积率 η

在磨削过程中, 由于磨粒与工作表面的滑擦作用, 磨粒与磨削区的化学反应以及磨粒的塑性变形作用, 使磨粒逐渐变钝, 在磨粒上形成磨损小平面。这些磨损小平面的面积之和 Σa_1 与砂带表面面积的 S 的比值即为 η , 表示为:

$$\eta = \frac{\Sigma a_1}{S} \quad (2)$$

假定新磨粒切削刃是顶角为 2θ 的圆锥体, 磨粒磨耗磨损后变为截顶圆锥, 推导可得到 η 与砂带磨损高度 δ 之间关系为:

$$\eta = \frac{\pi}{3} \xi \tan^2 \theta \cdot \delta^3 = \frac{\pi}{3} \xi \tan^2 \theta (\delta_0 + W_L Q)^3 \quad (3)$$

利用 $C = \frac{\pi}{4 \tan \theta}$ (忽略摩擦角 β), 上式可得:

$$\eta = \frac{0.64}{C^2} \cdot \delta^3 \cdot \xi \quad (4)$$

式中 C 为切屑变形分力比, 通过实验可测定; ξ 可借助扫描电镜分析定量化; δ 可实验测定, 由此实现了 η 的定量计算。

1.4 砂带损耗量 δ_b

对于接触板式平面砂带磨削, 可把磨耗率定义为单位切削长度 (L_s) 的砂带损耗量 (δ_b) 即 δ_b/L_s , 它是无量纲磨粒切深 h_g 的函数: $\delta_b/L_g \propto H_g^a$, 通过试验可知 $a \approx 1$, 则导出: $\delta_b \propto V'/L_s$, 式中 V' 为单位宽度砂带的金属切除量, L_s 为砂带周长。

由此, 接触板式砂带平面磨削中的 δ_b 为:

$$\delta_b = \lambda \frac{a_p L_w}{L_s} \quad (5)$$

式中 λ 为砂带损耗系数; a_p 为磨削深度; L_w 为工件长度。

δ_0 在磨削初期对磨削残留量 Δ 影响较大(λ 值较大),在砂带稳定磨损阶段 δ_0 值较小(λ 值较小),对 Δ 的影响很小,此时影响 Δ 的砂带磨损的有关参数中较大的是 η 。

2、试验条件

砂带磨削试验是在M7132K平面磨床改装的两工位砂带平面磨床的三辊轮接触板式精磨头上进行的。

砂带为国产 Al_2O_3 , 80*(二砂产);干磨,顺磨;试件材料为45钢正火;磨削用量为: $a_p=0.12mm$, $V_r=1.5m/min$, $V_s=16.4m/s$ 。

3、砂带磨损机理的扫描电镜(SEM)分析

分别在砂带未磨损时、砂带累积金属磨除量 Q 为660、1340、2620、3300 mm^3 时对砂带取同样制作样本进行扫描电子显微镜(SEM)分析,以进一步揭示砂带磨损原理。试验图片如图3~图7所示,图中每图的左图是砂带局部形貌图,而对应的右图是左图中某一颗典型磨粒的形貌图。从这些SEM图片中可以得出如下结论:

- 1) 砂带未磨损时,磨粒形状各异,大都近似为圆锥体,粘结层无裂纹(如图3所示)。
- 2) 在砂带磨损过程中,当粘结层或磨粒承受的应力超过粘结剂强度时,出现了粘结层的裂纹现象(如图4~图7所示),随着裂纹的逐渐扩大,磨粒极易脱落,严重时磨粒大量脱落使砂带失效。
- 3) 磨削作用直接引起磨粒的微破碎和压碎,单颗磨粒上产生许多新切削刃,磨粒高度降低,致使磨粒的切削作用下降,磨粒变钝而失效,如图4、图6的左图所示;磨粒破碎发生在磨粒“后缘”(磨粒上不能够首先遇到工件部分),还常沿磨粒的微孔和裂纹处发生。磨粒破碎后虽残留在树脂穴窝中,但已破碎成几个小块(如图4、6、7的左图)。
- 4) 由于结合剂的粘结作用发生了变化导致磨粒松动和最终脱落,当然也有磨粒的部分脱落现象,随着磨削时间延长,累积金属磨除量 Q 的增加,砂带到达失效时,砂带表面会出现更多的磨粒脱落而留下的空洞。
- 5) 粘盖磨损的发生,在单颗磨粒的SEM形貌图片(图4~图7的右图)中可清晰见到切屑粘焊在磨粒上,这是由于高温下的粘焊效应或由于磨粒与金属之间发生的化学作用,使微细切屑粘焊在磨粒刀刃上,切屑残留在磨粒表面上会阻碍切削作用,导致砂带磨削能力降低。
- 6) 砂带在磨损过程中最主要的磨损形式是磨耗磨损(摩擦磨损),磨粒上形成磨损小平台(小平面)。在砂带磨削过程中,由于磨粒与金属表面的滑擦作用,同时处于塑性流动(塑性变形)状态,使磨粒逐渐钝化,在磨粒上形成磨损小平面,显然,这种磨损形式伴随整个磨削过程。从单颗磨粒形貌的SEM图片(图4~图7的右图)中可见,磨损小平面大多是波纹磨损面(图上有与磨损方向一致的滑擦条纹),随 Q 的增大,波纹状态变化规律是从明显——更明显——不够明显——波纹状小,最后磨损小平面变得更加光滑,此时磨损小平面面积较大。从砂带各时间的形貌SEM图片中可见磨粒残留于树脂穴窝中的几个小块上都有磨损小平台。

可认为，砂带磨损形式主要是磨粒磨耗磨损，伴随着破碎磨损、粘盖磨损、粘结裂纹和磨粒脱落形式。砂带各个寿命期间实际磨粒切刃分布率有所变化，通过SEM定量分析，可得 ξ 一般为1~3个/ mm^2 。

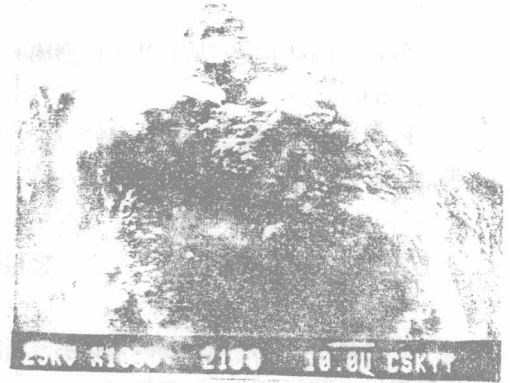
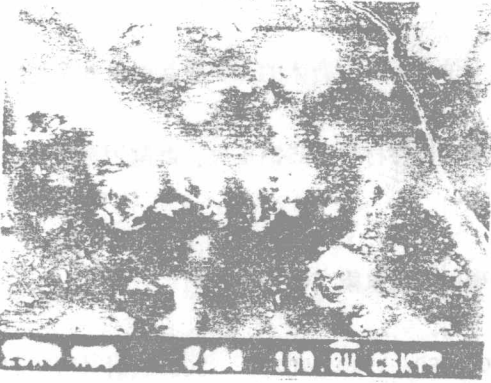


图3 砂带末磨损时的SEM图片

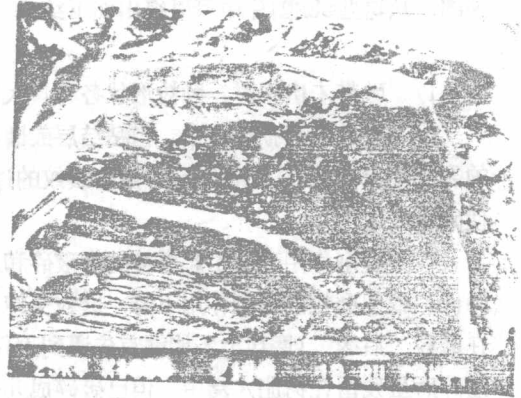
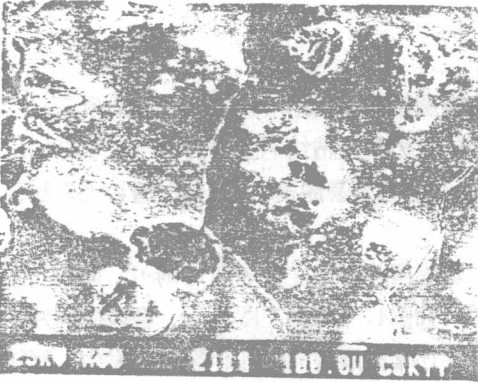


图4 $Q=600\text{mm}^3/\text{s}$ 时砂带的SEM图片

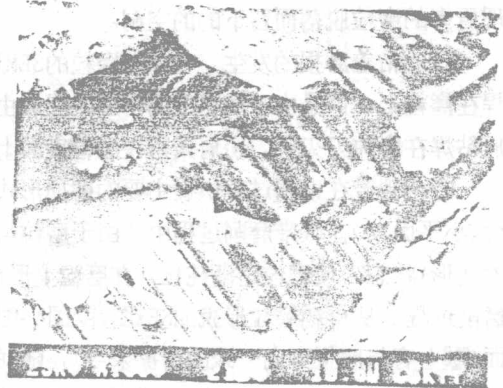


图5 $Q=1340\text{mm}^3/\text{s}$ 时砂带的SEM图片



图6 $Q=2620\text{mm}^3/\text{s}$ 时砂带的SEM图片

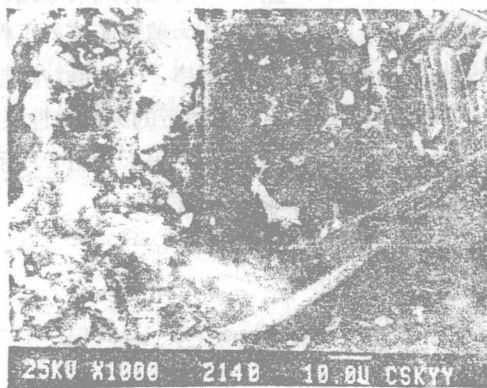
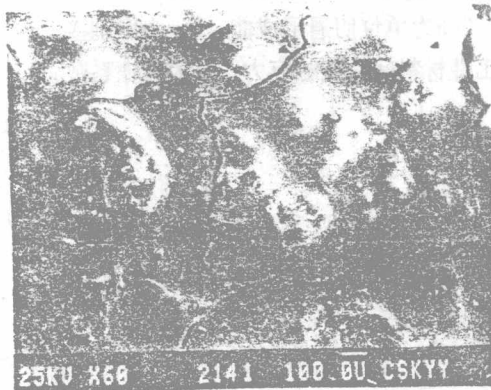


图7 $Q=3300\text{mm}^3/\text{s}$ 时砂带的SEM图片

4、砂带磨损过程试验

砂带磨削试验中，通过测定砂带厚度变化推算出砂带的磨损高度 δ 。
试验得出的 $\delta-Q$ 曲线如图 8 所示。

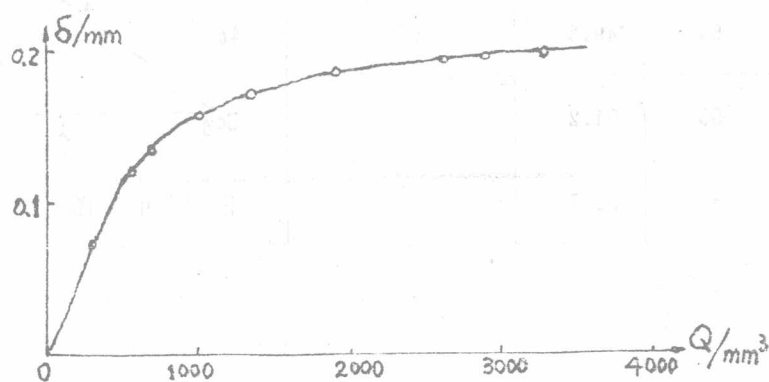


图8 $\delta-Q$ 曲线