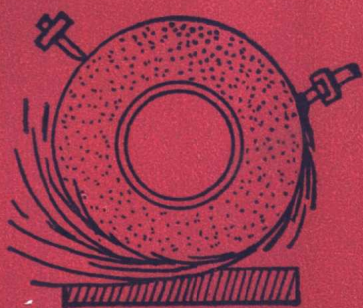


1

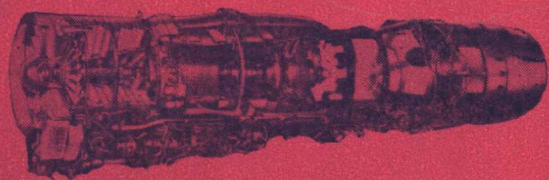
机械制造
实用新技术丛书



栗 祜 主编

缓进磨削工艺

金小波 编著



国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之一

缓进磨削工艺

粟 枯 主编

金小波 编著

国防工业出版社

TG 580.6

8.3

缓进磨削工艺

内 容 简 介

本书介绍了缓进磨削工艺的全过程。

书中对缓进磨削的工艺过程、机床特点、磨削所用砂轮和修整砂轮作了详细介绍。着重介绍生产实践中的经验，同时介绍了国外缓进磨削的现状。

本书可供机械制造工厂的工程技术人员在生产实践中参考。也可供高等院校、中等专业学校机械制造专业的师生参考。

缓 进 磨 削 工 艺

机械制造实用新技术丛书之一

栗 枯 主编

金小波 编著

责任编辑 宋桂珍

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 3¹/₄ 84千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数：0,001—8,300册

统一书号：15034·2802 定价：0.66元

科技新书目：84—121

国防工业出版社

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造工业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造行业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝MK202发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；

2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；

3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由粟祐同志主编。参加审校工作的主要有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等同志提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖治、陈少中、任家耕和贾克琴、张汉生等

同志。

缓进磨削是近年来新发展的磨削方法，它弥补了普通磨削效率低、精度低、成型困难等缺点，使机械加工能力日趋完善。本书系统地介绍了缓进磨削原理、机床特点、缓进磨削工艺及零件表面质量。

本书由金小波编写，唐宏霞审校，栗祜终审定稿。

最后，谨对在本项技术与试验当中给予帮助的下列单位和同志表示衷心的感谢：航空工业部三〇三所，机械工业部机床研究所，北京第四机床厂，郑州磨料磨具磨削研究所，北京砂轮厂，武汉材料保护研究所，哈尔滨国营东安机械厂以及楼朝尧、叶宏坚、张学儒、胡永金、杰显荣、窦建辉等同志。

作者于西安国营红旗机械厂

目 录

一、前言	1
(一) 缓进磨削工艺的产生	1
(二) 缓进磨削的工艺特点	2
(三) 缓进磨削与往复磨削的比较	5
(四) 国内外缓进磨削的应用	8
二、缓进磨削机床及其特点	11
(一) 主轴	21
(二) 工作台	23
(三) 冷却冲洗系统	24
(四) 砂轮修整装置	27
(五) 修整砂轮时的补偿装置	30
(六) 操纵和程序控制	33
三、缓进磨削工艺	37
(一) 典型零件加工	37
(二) 涡轮叶片加工时的装夹与定位	42
(三) 砂轮的选择	46
(四) 砂轮修整器	55
(五) 砂轮的修整	76
(六) 冷却液	85
(七) 工艺参数与程序选定	89
四、零件表面质量	92
五、缓进磨削工艺国内存在的问题和国外研究动向	96

一、前 言

(一) 缓进磨削工艺的产生

在机械制造业中,零件的加工方法离不开车、铣、刨、磨。其中,车、铣、刨用来粗加工零件的各种表面。磨削用于精加工零件,以达到高精度和高光度的要求。对于旋转表面可以用外圆和内圆磨削加工;对于平面可以用往复平磨加工;对于型面的精加工则必须将砂轮外圆表面修整成相应的型面才能实现。磨削型面的方式若用往复磨削是比较困难的。一般往复磨削的余量在0.3毫米左右,砂轮的线速度为 $25\sim 35$ 米/秒,工件往复速度在 $3\sim 30$ 米/分的范围内,工作台每往复一次砂轮的进给量仅有百分之几或千分之几毫米。若砂轮进给率为0.01毫米/每往复一次,那么加工0.3毫米的余量需要工作台往复30次,虽然工作台往复速度快,但终因砂轮进给量小致使磨削效率不高。

早在五十年代,国外就有人研究如何提高磨削效率,在平面磨削中,他们把砂轮线速度提高到 50 米/秒,工作台的往复速度提高到 40 米/分,每往复一次的砂轮进给量提高到0.05毫米。这样,磨削效率可提高一些。例如,使用直径500毫米、宽50毫米的砂轮时,金属切削率可以达到 100 厘米³/分。但是,由于提高砂轮线速度需要高强度的砂轮,因此增加了砂轮制造的困难。特别是加工高强度材料,例如合金工具钢时,往往超过了砂轮所允许的有效硬度,易于造成震纹或砂轮碎裂等现象。此外,当磨削时,由于高速离心力的作用,砂轮和零件之间产生附着高压气流,随着砂轮表面速度的增加,压力也随之增加。其大小在砂轮表面速度为 40 米/秒时约为8个大气压。冷却液正常平稳的流动受高压气流的影响而产生飞溅不易进入磨削区,从而降低了冷却效果,甚至会产生干磨,导致零件烧伤。如欲在零件和砂轮之间的接触点给入

适当的冷却液，势必要大大地提高冷却液的压力，从而需要一个非常复杂的高压冷却系统。可是高压冷却泵往往使冷却液产生过量的泡沫，大大降低了冷却效果，这又是磨削中所难以采用的。由于这样一些原因，高速磨削在平面磨削中受到了一定的限制。至于在外圆磨削中，由于砂轮线速大而法向切削力相对较小，例如磨削细长轴时可以减少零件变形，因此高速磨削得到了发展。

在成型磨削中，采用高速磨削还有另外一个缺点，那就是由于砂轮表面速度的提高，使得修整后的砂轮表面会更加光滑，导致砂轮切削效果的降低。在这种情况下，只有用增加金刚石对砂轮的修整率来补偿。但这又会造成金刚石的过早磨损。所以在修整砂轮时，必须降低砂轮速度才能避免这种现象。

五十年代末，在平面磨削中，终于探索出了一条新的途径，即砂轮的线速度保持常规磨削时的情况不变，而加大切深量，工作台缓速运动，一次进给，使砂轮像铣削那样工作，而取得磨削的精度与光度，逐步发展成了现在的大切削深度、缓进给速度的缓进磨削工艺。其砂轮线速仍保持在25米/秒左右，切削深度根据加工的材料不同，可由一毫米到十几毫米，甚至几十毫米。工作台的进给速度不是每分钟几米到几十米，而是每分钟十几毫米到几百毫米。这种磨削方法，也有人称之为强力磨削的一种，但比较确切的含意是缓速进给磨削。

（二）缓进磨削的工艺特点

1. 大切削深度：砂轮一次切入量比较大，深度可达几毫米到十几毫米，这样砂轮与零件接触弧就增长了（见图 1-1）。例如，直径 400 毫米的砂轮，当切深 $t = 1$ 毫米时，接触弧长 L 为 19.78 毫米；当 $t = 5$ 毫米时， L 为 44.80 毫米。而当 $t = 0.01$ 毫米，即往复磨削切削深度时，接触弧仅为 2.33 毫米。所以缓进磨削接触弧比一般往复磨削接触弧长 10~20 倍，从而砂轮上同时参加磨削的磨粒就增多了，磨削力和磨削热都比较大，磨屑也因接触弧的增长而由粒状变成丝状，这些问题都给缓进磨削工艺带来了一些特殊的要求。

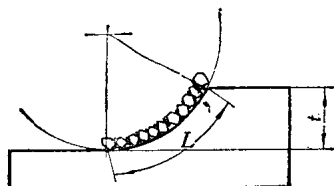


图1-1 砂轮与零件接触弧

t —切削深度； L —接触弧长。

由于切削深度大，磨削同样长度的零件缓进磨削要比往复磨削工作台行程长些（见图 1-2）当 $t_1 > t_2$ 时， $b > a$ ，在缓进磨削深切过程开始时，砂轮是缓速由浅入深的，当切深愈大这段行程愈长，虽然这段行程是必要的，由于工作台送进速度低，确实影响了缓进磨削的工作效率。

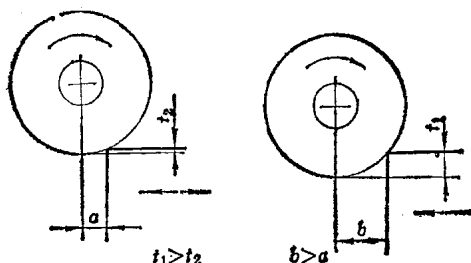


图1-2 往复磨削与缓进磨削工作行程的比较

2. 缓进给速度：由于缓进磨削切削深度大，磨削力、磨削热也都很大，这样就限制了工件的送进速度。一般难加工的材料限制在 30~150 毫米/分，缓速进给对减少砂轮的磨损是有一定好处的。

砂轮的磨损是由两方面原因形成的，一是砂轮在磨削过程中磨粒的磨损；二是砂轮在接触零件时的撞击。特别是砂轮的型面 R （见图 1-3）极易损坏，通常把这种损坏叫做边角磨损。在砂轮磨损中边角磨损起着主要作用，在往复磨削中每往复一次砂轮将与工件撞击两次，而且撞击速度比较高。例如，磨削 0.3 毫米

余量时，若每往复一次进给0.02毫米，则总共要撞击三十次，砂轮型面很快就会被磨损坏了。缓进磨削是大切深、一次进给，特别是进给速度比较低，砂轮只是在低速情况下仅与工件接触一次，因此砂轮撞击磨损比较小，型面上 R 不易损坏，砂轮型面保持性好。所以缓进磨削适用于难切削材料的型面加工，这是往复磨削和其他切削加工都难以实现的。

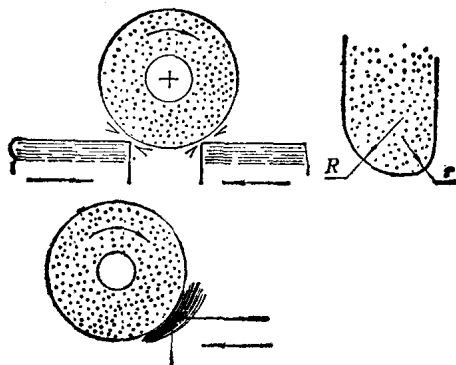


图1-3 砂轮的磨损

3. 强迫冷却：由于缓进磨削切深大，砂轮与零件接触弧长，同时工作磨粒多，每一个磨粒又都是一个切削刃，磨削的长度长，屑成丝状，金属在撕裂变形过程中产生很大的热量（见图 1-4），甚至可以将磨屑熔化形成焊珠（见图 1-5）并使零件表面烧伤。因

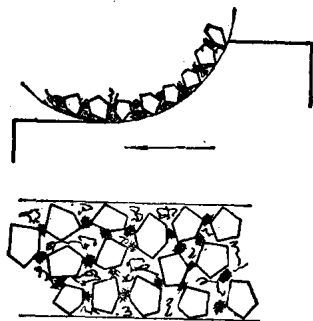


图1-4 磨屑在砂轮中的形成情况

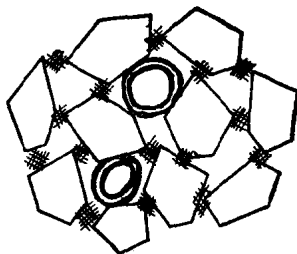


图1-5 砂轮中的焊珠

此缓进磨削应配有强冷却，这包括两方面内容：

(1) 冷却液应以一定压力和流量送入磨削区而起到强冷却作用，将砂轮磨削长度上所产生的热量迅速带走而不传入零件，同时冲掉附着在砂轮表面上一部分丝状磨屑。一般冷却压力为3个大气压。

(2) 冷却液还用来冲洗砂轮表面，磨削后的砂轮表面上附着的切屑在磨削区被冷却液代走一部分，但是卷曲在磨粒空隙中的切屑不易带走，当这些磨粒再参加磨削时，新的切屑就容纳不下了，切屑之间的挤压变形也会发出更大的热量使切屑熔成焊珠，同时烧伤零件表面。因此在砂轮重复参加工作之前要用高压冷却液，通过一个缝隙喷嘴以较高的速度冲洗砂轮表面，再次强有力的清洗砂轮表面的切屑。一般冲洗压力为8个大气压。

在一般磨削加工过程中，冷却作用不太突出，因而往往不被重视，但在缓进磨削工艺中，其他条件再好，如果忽视冷却效果会使加工失败，若能充分发挥冷却作用，则可提高加工质量从而提高生产效率。

(三) 缓进磨削与往复磨削的比较

从生产效率上看，在余量比较小的情况下，例如仅有0.3~0.5毫米，往复磨削工作台运动速度比较快，生产效率是高于缓进磨削的。当余量很大如十几毫米时，往复磨削工作台的往复次数增多，砂轮与零件撞击次数增多，砂轮磨损快，在磨削十几毫米余量过程中必须多次修整砂轮，这些都严重地影响了生产效率。缓进磨削工作台进给速度虽慢，但只一次，砂轮型面保持性好，总的效率是高的。特别是对型面加工，缓进磨削明显地优于往复磨削，从而得到广泛的应用。

在动力方面，缓进磨削磨削力大，因此机床主轴功率比较大，一般为10~15千瓦，个别可达44千瓦，如西德布洛姆(Blohm)公司的HFS-525型，工作台驱动功率约3千瓦。而往复磨床主轴功率约为3~5千瓦，工作台多用油压驱动。

在砂轮方面，普通的往复磨削一般都采用中软以上砂轮，以

340101

求得更高的砂轮寿命。缓进磨削砂轮线速不高，只是砂轮与零件接触弧长，磨削力大些，对砂轮的强度没有特殊要求。一般情况缓进磨削比往复磨削所用砂轮软些，多用超软级，并具有一定的气孔率。图 1-6 是往复磨削与缓进磨削在工作时的简单比较示意图。表 1-1 是往复磨削与缓进磨削性能参数的比较。

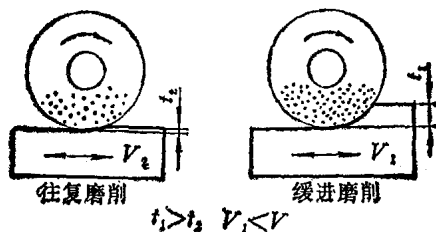


图1-6 往复磨削与缓进磨削

表1-1 往复磨削与缓进磨削的比较

性能参数	往 复 磨 削	缓 进 磨 削
切削深度	小 (<0.02)	大 (几~十几毫米)
磨削弧	小 (2~4毫米)	大 (19~45毫米)
主轴动力	小 (3~5千瓦)	大 (10~15千瓦)
砂轮	中软或硬	超软
适用范围	小余量的平面磨削	大余量的型面磨削

综上所述,缓进磨削综合了铣削和磨削所具有的某些特点,解决了常规磨削所不能解决的一些难题,因此它在机械制造业中一问世,就具有强大的生命力。特别是随着机械制造业的发展,材料的切削性能越来越差,零件精度越来越要求越高,而且多采用型面配合其优点更为突出。其优点是:

1. 生产效率高,一般比普通磨削高 3~5 倍,粗、精磨可以在一道工序中完成。目前在机械制造业中,一种普遍的倾向是采用精铸和精锻毛料,以避免不必要的金属切削操作程序,缓进磨削正好适应了这种趋势。

2. 对难切削的材料,如耐热合金等,不仅可以进行平面磨

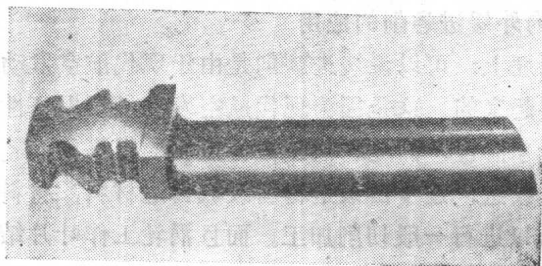
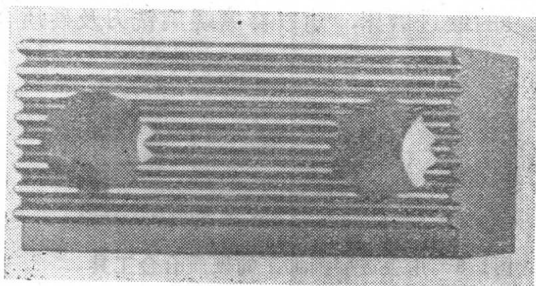
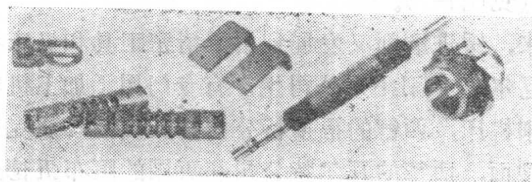
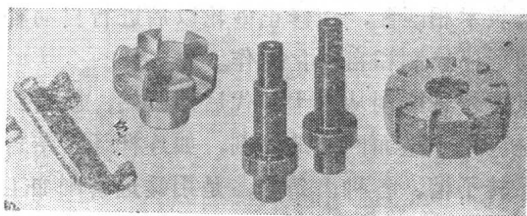
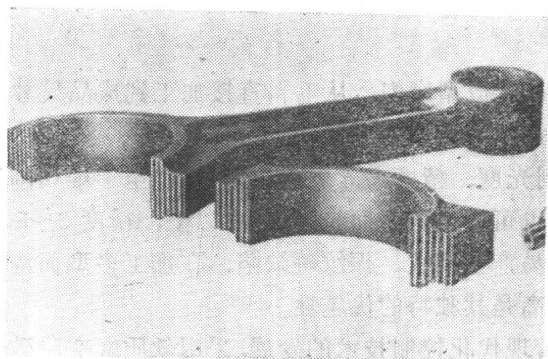


图1-7 用缓进磨削加工的典型型面

削，还可以进行成型磨削，从毛料直接加工到成品尺寸，不需预加工，这是常规磨削做不到的。

3. 磨削光度、精度高，表面质量好。甚至于难切削的铸造镍基耐热合金也可以达到表面光洁度 $\nabla 8$ 以上，精度 $2\sim 5$ 微米。磨削后表面不易产生裂纹、振纹等缺陷，在加工多型面沟槽时，槽宽精度比较高是其独特的优越性。

4. 随着现代化控制技术的发展，采用软质大空隙砂轮和金刚石修整轮修整技术相匹配，在修正砂轮以后进行自动补偿，实现了型面磨削的程序控制和自动化操作。

这些优点使缓进磨削从六十年代后期开始，就得到了广泛的应用，特别是应用于型面凹槽的磨削，如连杆牙形结合面、卡盘导向槽、油泵转子槽、各种齿条等，是用缓进磨削加工出来的一些典型零件（见图1-7）。

近几年来，缓进磨削又发展到用于精密工具和机床导轨的加工。如西德厄尔布（ELB）公司生产有专门用于加工机床导轨的大型缓进磨削机床，西德的福斯特公司和英国的马屈克斯公司用于磨削拉刀型面，西德的瓦尔特公司和英国的阿布伍德公司生产有专门磨削工具的缓进磨床，用以修磨螺旋铣刀及硬质合金块等（见图1-8）。



图1-8 用缓进磨削加工的硬质合金工具

（四）国内外缓进磨削的应用

从某种角度上，可以说缓进磨削是由于现代航空发动机制造的需要而发展起来的。这是因为现代航空发动机要提高性能，就必须提高涡轮前温度，而随着涡轮工作温度的提高和涡轮工作叶片材料的不断改进，逐步由锻造材料改成铸造材料，材料硬度提高了，致使难以进行一般切削加工。而且涡轮工作叶片结构也改

进成带冠叶片并带有精度要求较高的封严齿,以减少气流损失,提高涡轮效率。涡轮叶片的安装榫齿是主要承力面,精度要求较高,过去采用的铣削或拉削的办法都已经无法使用,普通磨削又难于保证型面精度,所以铸造涡轮叶片的加工不得不探索新的方法,缓进磨削应运而生,成了现代航空发动机制造中所不可少的技术。目前世界各国航空发动机涡轮叶片的制造,已普遍地采用了这一工艺。如英国罗尔斯·罗伊斯(R.R)公司1967年从西德厄尔布公司引进缓进磨床,到1977年已拥有各种缓进磨床达40台。包括西德厄尔布公司的双轴缓进磨床SS-13,单轴缓进磨床WO6,瑞士梅格勒(Mägerle)磨床,英国阿布伍德(Abwood)磨床,形成了数条缓进磨削生产线。在一些新的机种,如RB211叶片生产线上建立了精密定位-缓进磨削-电感测量的全新工艺路线。加拿大普拉特·惠特尼(PWC)公司生产的PT-6和JT-15D小型发动机,也于1980年建立了缓进磨削生产线,采用西德布洛姆公司的HFS-3090和310DK两种型号的磨床加工涡轮叶片的榫头,用SRS-1000型磨床加工叶冠,叶片的榫齿精度为0.015毫米,错齿要求0.013毫米,光度 $\nabla 8$ 。榫头进气边侧封严齿、锁片槽、叶冠封严齿精度要求虽然不高,但加工余量达到了2~4毫米。至于其他的航空发动机制造商,如美国制造大中型发动机的通用电气(GE)公司、普拉特·惠特尼(PWA)公司、制造小型发动机的艾利逊(Allison)公司、英康明(AVCO Lycoming)公司以及法国的透博梅卡(Turbomeca)公司、国营航空发动机研究和制造公司(SNECMA)等都在六十年代后期到七十年代中期建立了缓进磨削的生产线。

我国于1974年开始研究缓进磨削工艺(是用M7132A磨床改装的),1977年首先在2.3万千瓦燃气轮机涡轮叶片榫齿加工上获得成功。叶片材料为IN738,总余量6.7毫米,分六次磨削,中间修整砂轮三次,磨出了合格产品,合格率达90%以上。同时于1977年底由北京第四机床厂研制了我国第一台缓进磨床B₄-002,磨头动力配有22千瓦交流电机,转数1450转/分,工作台采用滚珠

丝杠传动, 进给速度为 $20 \sim 200$ 毫米/分, 并配有 2000 升的冷却过滤系统。对解决一些难加工的型面起到一定作用, 如加工机车连杆结合型面、卡盘爪、金属刻线尺, 用缓进磨削代替铣、刨加工, 使粗精加工合并一次完成。

由于目前国内缓进磨床的生产仍处于研制阶段, 而很多生产单位又急需, 因此自行改装了一些现有设备。

如西安红旗机械厂将导电磨床 DM-3 的砂轮导电等电路拆掉, 在冷却液槽口加装一压力泵, 将电解液换成缓进磨削的冷却液, 仍用原机床工作台的丝杠传动, 用来加工 K3 材料的铸造涡轮叶片的榫齿, 解决了长期以来质量不稳定、铣刀消耗量大等问题。

又如贵阳某厂用龙门铣改装, 利用床身和悬梁, 磨头可以上下移动, 工作台用丝杠传动, 两个磨头一个用于粗磨, 一个用于精磨。由于龙门铣工作台长可以一次加工 6 片, 解决了 M17 材料涡轮叶片的榫齿加工。

又如有的用 M7130 改装, 主轴用 7.5 千瓦电机, 工作台仍用油压, 通过节流阀控制实现低速, 修整轮放置在工作台上, 调整被加工面使之与修整轮等高, 从而保证零件尺寸稳定, 用于 K3 材料单面齿形的涡轮叶片的加工。

为了解决产品零件的加工以及发展我国缓进磨削工艺, 原无锡动力机械厂引进了西德厄尔布公司双轴缓进磨床 SS-013, 机床型号比较大, 适用于大叶片的榫齿加工, 主轴功率 20 千瓦, 砂轮最大外径 $\phi 500$ 毫米。西安红旗机械厂在引进“斯贝”发动机的同时引进了双轴缓进磨床 SS-13, 它适用于一般航空发动机涡轮叶片的榫齿加工, 主轴功率 15 千瓦, 砂轮直径 450 毫米。还引进了单轴缓进磨床 WE06, 用于加工非对称型面。组成了一套缓进磨削生产线, 以适应铸造涡轮叶片的榫齿和其他成型面的加工。也有些单位在外国来华展览会上买到一些展品, 如瑞士梅格勒 (Mägerle) 精密磨床, 既可以往复磨削又可以缓进磨削。往复磨削时, 工作台油压驱动。而缓进磨削时, 工作台驱动有两种方式: 一种是在油路中加节流阀使工作台缓进给, 一种是另加一直流电

机丝杠传动实现工作台缓进给。

二、缓进磨削机床及其特点

缓进磨削工艺要用于生产，就必须有相应的设备适应工艺要求，根据缓进磨削切深大，缓进给，强冷却，同时又要提高生产效率的特点，近几年来国外对各种用途的缓进磨床进行了研制。西德厄尔布公司在常规型面磨床的基础上，采用工作台缓进，增强砂轮主轴，加强冷却等各种措施，于1959年研制成功了第一台自动控制缓进型面磨床。六十年代中期开始应用于生产，其后，欧美各国机床制造商相继仿制和发展，迄今为止，已经出现了适应不同用途的多种型号。其中比较成功的如西德布洛姆公司的HFS-310卧轴矩台平面磨床，其纵横和垂直运动都采用闭式无间隙滚动导轨和高精度滚动轴承。砂轮架采用双层壁立柱式，同时配备有步进电机自动程序控制装置、金刚石修整轮和高速钢修整轮的自动修整补偿装置以及横进给拖板自动测量装置。工作时的磨削面积为 1000×300 毫米，垂直进给 12 毫米，工作台缓速进给为 300 毫米/分。采用陶瓷结合剂的氧化铝砂轮，线速度为 $26 \sim 33$ 米/秒，砂轮电机 30 千瓦。高压冷却冲洗装置容量为 1600 升，压力为 18 公斤/厘米²。磨削未淬火的 90Mn8V 合金钢时， $16 \times 12 \times 190$ 毫米（宽 $\times$ 深 $\times$ 长）的凹槽，一次走刀时间一分钟，金属去除率达 60 厘米³/分。用于 PT6 型涡轮叶片枞树型棒头的磨削，一次装夹 6 ~ 8 片，每天产量达 300 片。

布洛姆公司的 HFS-525 型缓进磨床是一种规格更大的机床，工作台尺寸为 2500×450 毫米，也采用预加载荷无间隙滚动导轨。液压系统采用可逆式变量叶片泵和闭式油路，常规磨削时工作台速度为 $3 \sim 45$ 米/分，磨头主轴为无级变速（ $50 \sim 2650$ 转/分），所使用的液压马达为 44 千瓦，垂直进给用同步电机。加工精度在 2000