

一种新型机床导轨自润滑材料的研制

李 秀 山

(一机部机床研究所)

摘 要

本文详细介绍了一种新型的机床导轨材料——FQ-1导轨板。该导轨板是由钢背、青铜球粉、聚四氟乙烯及填料复合而成。性能试验证明,它具有减摩、防爬、抗振等优越性能。经15种200余台机床的装机试用,结果表明,该导轨板用于数控、精密机床和测量机上,可以提高机床定位精度、调整灵敏度、运动平稳性以及有减少机械摩擦损耗的效果。应用FQ-1导轨板还可简化机床结构、缩短装配周期、降低机床的制造与维护费用。并可部份代替静压导轨与滚动导轨。推荐首先在中、小型机床的各向导轨和大型机床的横梁刀架导轨上使用。

近代机床的基本发展方向是提高加工精度、生产效率和自动化程度,故对机床导轨也就提出了更高的要求。如数控机床对导轨的要求是:

1. 导轨的精度保持性好;
2. 在导轨的垂直方向上要具有高的刚性;
3. 进给方向的振动阻尼系数要高;
4. 导轨面的摩擦阻力小;
5. 维修、保养简便。

机床导轨具有上述性能才能实现机床的定位精度高、调整灵敏度高以及刚性好等优点。过去常采用的铸铁滑动导轨副存在如下缺点:

1. 铸铁导轨副的摩擦特性差导致了机床进给系统产生粘-滑运动。粘-滑运动是一种松弛振动,可使机床导轨产生爬行现象;
2. 摩擦系数大(约为0.18~0.22);
3. 在干摩擦或少油润滑条件下无法正常工作;
4. 跑合性能差,制造及维修工作繁重。

为克服铸铁导轨副存在的上述缺点,目前国内外除研制高性能的金属材料外还采取了下面几种措施:

1. 采用静压导轨(液或气);
2. 采用滚动导轨;
3. 导轨面表层硬化;
4. 导轨面镶嵌或涂敷减摩塑料复合层。

近年来国内外在研究机床导轨的新结构和新材料方面取得了很大进展,已有多种塑料基的复合材料用于机床导轨。一九七七年,我们研制的FQ-1金属氟塑料复合机床导轨板已通过国家鉴定,并开始定点生产*。经过几年来在精密机床及数控机床上的应用说明,FQ-1机床导轨板保持了滑动导轨的工艺简单、刚性好等优点,而且解决了机床导轨的爬行问题,提高了机床的定位精度、调整灵敏度,降低了机床摩擦损耗,从而扩大了使用范围。

一、聚四氟乙烯(PTFE)复合材料及其在机床导轨上的应用概况

聚四氟乙烯摩擦系数低,但纯PTFE的耐磨性差,为提高耐磨性需加入适当填料。目前国外常用的此类机床导轨材料有“Turcite-B”(美)、“DU”(英),而FQ-1与“DU”系属同一类型。

“Turcite-B”是在PTFE中添加了50%的青铜粉、 MoS_2 、玻璃纤维等制成带材,为改善该材料的可粘接性,在与机床床身导轨连接的表面上采取特殊的处理。FQ-1与“DU”

是采用多孔青铜钢背结构注入PTFE及填料的工艺制成(图1)。

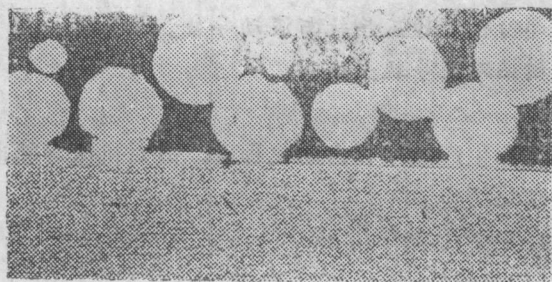


图1 FQ-1材料的断面

该结构与“Turcite-B”比较,既改善了导轨的尺寸稳定性和刚性,又解决了PTFE与床身导轨的连接问题。上述两种导轨材料都是减摩、防爬、自润滑性能良好的材料。国外已广泛地应用在加工中心、数控机床以及高精度机床的导轨面上。“Turcite-B”的制造工艺简单,粘在床身导轨面上允许再进行

导轨面的精加工,便于调整机床工艺尺寸链,但其尺寸稳定性、刚性及耐磨性均较“DU”和FQ-1差,后者因塑料复盖层薄(0.05~0.01毫米),装于床身导轨上后一般不再加工,故要求以基础导轨的精度来保证床身导轨的合研精度。上述材料跑合性能良好,均能实现较高的接触效果。

二、FQ-1 机床导轨板的性能

1. 摩擦特性

图2、3是常用机床导轨材料的摩擦系数 μ 与滑动速度 V 的试验曲线,结果说明:

(1) FQ-1导轨副的摩擦系数较低(起始摩擦系数约为铸铁的1/5)。由于导轨副 μ 的降低,既减轻了机床给进时的阻力,又可增加传动系统的装配精度(如加大滚珠丝杠副或导轨银条的予紧力)及接触刚性。同时由于 μ 值在不同的滑动速度下变化较小,从而提高了机床的定位精度、运动平稳性和调整灵敏度以及降低了机床的拖动功率。

*北京市酒仙桥北京粉末冶金厂可提供商品。

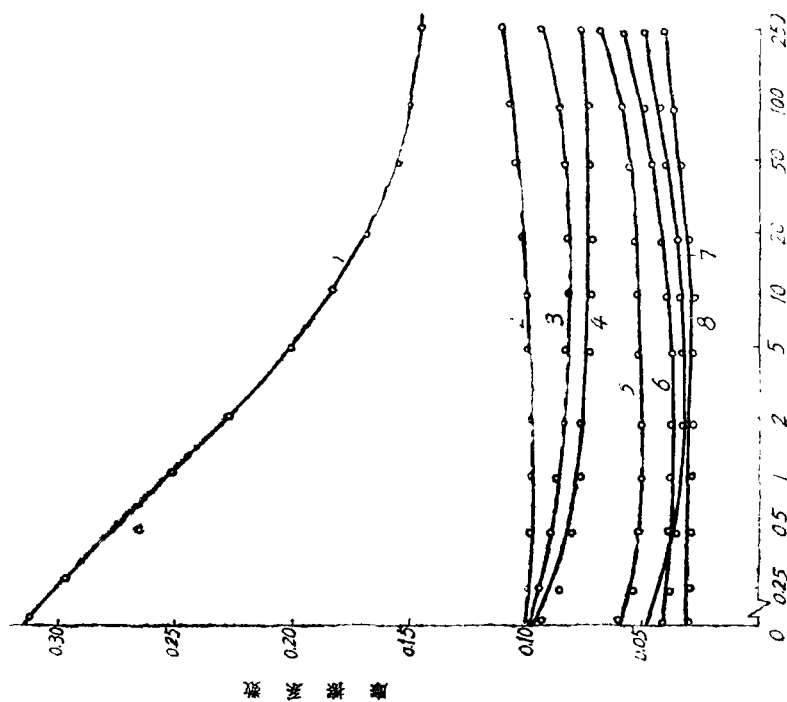


图2 导轨摩擦系数-滑动速度关系曲线(干摩擦)

往复式摩擦实验台, 比压 $P = 1$ 公斤/厘米², 对摩擦面为精刨铸铁
1—酚醛夹布胶木, 2—改性聚甲醛, 3—FQ-1, 10%Pb,
4—FQ-1, 20%Pb, 5—TURCITE, 5%Pb, 磨去铜层
100微米, 6—GLACIER "DU", 7—TURCITE "B",
8—FQ-1, 5%Pb

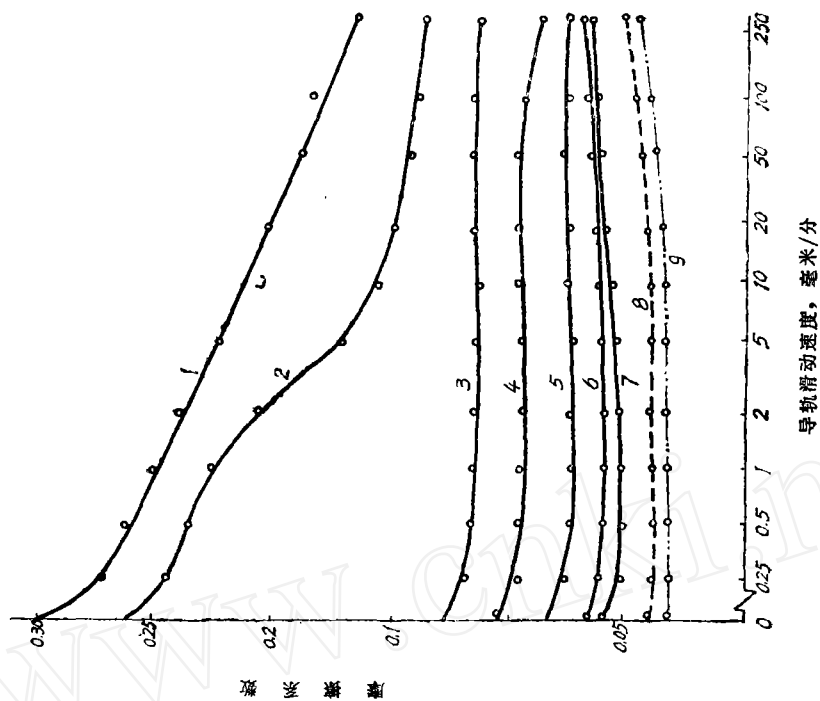


图3 导轨摩擦系数与滑动速度的关系曲线(油润滑)

试验条件: 往复式摩擦实验台, 比压 $P = 1$ 公斤/厘米²
对摩擦面为精刨铸铁, 室温20℃
1—酚醛夹布胶木, 2—改性聚甲醛, 3—FQ-1, 10%Pb,
5—FQ-1, 20%Pb, 6—TURCITE "B", 7—GLACIER "DU",
8—FQ-1, 5%Pb, 磨去铜层100微米, 9—FQ-1

(2) FQ-1 导轨副的摩擦系数几乎不随滑动速度而改变, 因而避免了摩擦副的粘-滑运动, 克服了机床导轨的爬行现象。机床工作台的运动方程为:

$$(M + m') \ddot{X} + (n + n') \dot{X} + KX = 0$$

式中: X ——工作台位移;
 M ——工作台质量;
 k ——传动系统刚度;
 n ——传动系统阻尼系数;

m' 、 n' ——由于摩擦力的作用而引入的附加质量及等效阻尼系数。

当摩擦力与速度变化向量一致时(即 μ 与 V 同时增加或减少), 则摩擦力要消耗系统的振动能量, 使振荡衰减, 此时 $n' \geq 0$ 即防止爬行。而铸铁导轨副(或夹布胶木-铸铁导轨副)在低速时 $n' < 0$, 导致机床导轨的爬行现象。

2. 磨损特性

(1) Amsler 磨损试验

在 Amsler 试验机上的试验条件如表 1 所列, 表 2 所列为其试验结果。从表 2 的结果可以看出, FQ-1 机床导轨材料在干摩擦条件下使用时, 有良好的摩擦、磨损性能。在有润滑油的条件下虽然 FQ-1 的抗磨粒磨损性能稍差, 但可防止对磨金属导轨面发生咬粘及犁沟磨损。试验证明 FQ-1 与“DU”均比“Turcite-B”耐磨。

(2) 装机磨损试验

先后在 M2110 内圆磨床和 SI-235 超高精度车床导轨上进行了装机跑合磨损试验。在 M2110 磨床上的试验条件为: 比压 $P = 1$ 公斤/厘米², 速度 $V = 6$ 米/分, 工作台行程 $L = 300$ 毫米。连续运转 2200 小时后导轨磨损量为 0.018 毫米(包括初期磨损)。在 SI-235 车床上的试验条件为: 比压 $P = 1$ 公斤/厘米², 速度 $V = 150$ 厘米/分, 拖板纵向行程 $L = 200$ 毫米。连续往复运动 11 万次(相当于机床两班使用十年)后导轨磨损量为 0.0007 毫米。

表 1 Amsler 磨损试验的试验条件

条 件	上 试 样	下 试 样
材 料	对比材料(8种)	45号钢
表面处理	未热处理(工作状态)	调质H _B 350
表面光洁度	▽7(平磨)	▽9(滚压)
尺寸精度	总厚度 $6^{+0.05}$	φ40
运动方式	固定不动	转速 $n = 200$ 转/分
接触载荷	$P = 60$ 公斤	
相对滑动速度	$V_c = 25.12$ 米/分	
摩擦行程	下试环总转数 15000 转(约 1.9 公里)	
润滑条件	两种情况: ①干摩擦、②30号机油浸下环 1/3	
每种试验重复数	5	
环境温度	16℃	

表 2

Amsler 磨 损 试 验 结 果

试验结果 对比材料		干 摩 擦				30° 机油润滑（ 浸下试环1/3 ）			
		摩擦力矩 （公斤·厘米）	摩擦系数	积累摩擦功 （公斤·米）	磨痕宽度 （毫米）	摩擦力矩 （公斤·厘米）	摩擦系数	积累摩擦功 （公斤·米）	磨痕宽度 （毫米）
自 产 FQ-1	5 % 铅	18.87	0.153	17800	4.92	3.0	0.024	2830	3.33
	10% 铅	17	0.143	16000	4.03	3.5	0.027	3300	2.92
	20% 铅	12.5	0.101	11800	3.62	3.0	0.025	2830	3.26
DU		17	0.142	16000	2.53	6.5	0.046	6120	2.81
Turcite “B”		23.17	0.186	21800	6.7	4.4	0.036	4150	4.63
酚醛夹布胶木		不具备干摩擦性能——因温升过高（下试环温度>90℃）试验无法进行				10.5	0.087	9900	2.08
改性聚甲醛						4	0.034	3780	1.49
I级铸铁						13	0.108	12300	1.03

根据以上试验证明 FQ-1 导轨板安装在数控或精密机床上, 只要具备普通的维护措施, 是能满足机床的使用寿命要求的。

3. FQ-1 其它性能指标

起始摩擦系数: 油润滑时为 0.04, 干摩擦时为 0.15

导热系数: 0.1 卡/秒·厘米·℃

线膨胀系数: $1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$

抗压强度: 300 公斤/厘米²

硬度: HB11~13

三、FQ-1 机床导轨板的装机效果

FQ-1 导轨板在 15 种类型, 共 200 余台机床及测量机上装机使用, 已取得了显著效果。同时在改装、维修机床的工作中, 也取得一些成绩, 现将装机使用效果简介如下:

1. FQ-1 导轨板在数控机床上的应用

在北京第一机床厂的 XK5040 三座标数控铣床, XK736 无升降台数控铣床, XK736 数控仿形铣床和北京实验机床厂的 JCS-016A 数控精密电火花加工机床上共装有 45 台份的 FQ-1 导轨板, 结果如下:

(1) 提高了数控机床的定位和重复定位精度 (见表 3)。

表 3 用 FQ-1 导轨副提高数控机床定位、重复定位结果

机床型号	导轨进给方向	脉冲当量	定位精度	重复定位精度	备 注
XK5040C	Z向	0.03毫米	± 0.025	—	铸铁导轨副
		0.004毫米	± 0.018	—	FQ-1 导轨副
JCS-016A	X向	0.01毫米	± 0.006 毫米	± 0.002 毫米	FQ-1 导轨副
	B向回转坐标	30"	$\pm 17''$	$\pm 10''$	FQ-1 导轨副

(2) 提高了数控机床的轮廓切削精度 (表 4)。

表 4 XK5040C切削 $\phi 100$ 外圆表面结果

切削精度名称	设计指标	安装FQ-1后切削精度测定值						铸铁导轨副切削精度值
		1	2	3	4	5	平均值	
不圆度毫米/ $\phi 100$	± 0.02	0.02	0.015	0.02	0.035	0.025	0.027	约0.04

(3)可实现微小伺服进给脉冲当量。表5列出了JCS-016A机床主轴头单脉冲向下进给时的位移量,实现了0.3微米伺服进给脉冲当量。这对提高数控机床的切削精度起着保证作用。

表 5 JCS-016A机床主轴头向下进给与位移量

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	测量平均值
主轴位移量	0.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.2	0.5	0.2	0.3	0.3微米
测量序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	测量平均值
主轴位移量	1.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3微米

(4)提高了数控机床的调整灵敏度。数控机床的调整灵敏度与进给驱动系统的刚性,反向间隙和滑动面的摩擦阻尼特性等因素有关。XK5040机床是用“动态反向死区”的测量值来体现机床调整灵敏度的优劣程度。表6列出了该值的结果。

表 6

导轨进给方向	设计指标毫米/300毫米	装FQ-1导轨板后反向死区各次实测值						铸铁导轨副平均值
		1	2	3	4	5	平均值	
X	0.04	0.015	0.025	0.02	0.02	0.018	0.012	0.05
y	0.04	0.015	0.025	0.015	0.015	0.022	0.02	0.05
Z	0.08	0.03	0.035	0.05	0.05	0.015	0.02	0.10

(5)便于机床总装时精度的调整,缩短了装调和精度检验周期。机床导轨的导向精度在检验过程中,往往是靠调整间隙补偿元件镶条的位置来实现的。为提高导向精度,常将导轨面间隙调小,这样必然带来滑动面间运动不灵活及驱动率加大的问题。在装配和检验精度过程中,需反复调整镶条位置。而采用FQ-1导轨板,因其摩擦系数低,则能保证在微小间隙的状态下滑动面间运动灵活。如JCS-016A机床主轴头进给导轨副及镶条装上FQ-1板,将镶条予紧而产生0.01毫米的过盈量(见图4)。这样一方面获得了较高的导向精度(主轴头在导轨全长范围内的位移不直度小于0.004毫米/200毫米,对工作台不垂直度小于0.006毫米,扭转精度小于0.003毫米,另一方面导轨面摩擦力降至2.5公斤,主电机扭矩为612克·厘米。又如在XK5040机床的Z向燕尾导轨副的镶条上装FQ-1板后的反向死区由铸铁镶条的0.08毫米降到0.025毫米(前值超差),其原因也在于此(图5)。

(6)降低了机床的拖动功率。这对数控机床的设计与使用意义较大,因拖动功率的明显降低,既节约了能源消耗,又降低了成本,而且为大功率步进电机直接拖动方式创造了有利

条件。表 7 列出了 XK5040A 机床 Y 向导轨装 FQ-1 板前、后的空载拖动力矩测试结果（该力矩是由测量液压力矩放大器的入口油压值换算而得）。

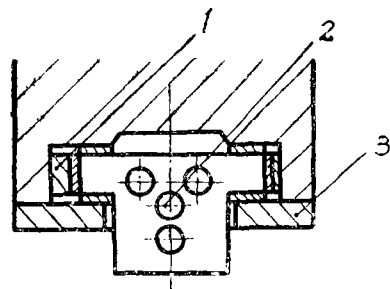


图 4 镶条安装示意图
1—镶条，2—主轴头，3—压板

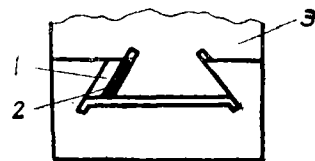


图 5 FQ-1 安装板示意图
1—镶条，2—FQ-1 板，3—立柱

表 7 XK5040A 机床 Y 向导轨空载拖动力矩测量值

进给速度,毫米/分		24		30		50		100		200	
测 量 次 序		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
空载拖动力矩 公斤·米	铸铁导轨	0.36	0.36	0.37	0.37	0.28	0.42	0.30	0.33	0.33	0.35
	FQ-1 导轨	0.2	0.125	0.26	0.15	0.17	0.14	0.25	0.15	0.175	0.15
测试结论		FQ-1 导轨副比铸铁导轨副的空载拖动力矩低50%									

2. FQ-1 导轨板在精密机床上的使用

在北京第二机床厂的 MMB1320 精密外圆磨床、MG1432 高精度车床和成都机床厂的 M2110 内圆磨床等精密机床上，进行了 FQ-1 导轨板的装机试验，取得如下结果：

（1）提高了机床的防爬性能。如对 MMB1320 机床的砂轮架进行连续进给试验，原铸铁导轨副当进给速度约为 0.3 毫米/分出现爬行现象，改用 FQ-1 板后，出现爬行现象的进给速度降到 0.036 毫米/分，使得该机床的加工精度和工作范围有了明显的提高。

表 8 MG1432 外圆磨床砂轮架导轨副对比效果

导轨副型式		滚动导轨副		FQ-1 滑动导轨副	
油缸工作压力, 公斤/厘米 ²		8	10	8	10
快速定位精度, 微米/20次		1.2	1.5	0.6	0.7
手动定位不重合度, 微米/10次		1.5	1	0.9	0.5
进给刚度, 公斤/微米		8	10	10	11
砂轮对工作台振幅, 微米		0.25~0.3		0.1	
砂轮架绝对振幅, 微米		0.24		0.13~0.14	
磨削试件	光洁度	▽11	▽11	▽12	▽12
	波纹度, 微米	0.5	0.5	0.2	0.2
	不圆度, 微米	0.2	0.2	0.1	0.1
	磨削时间, 分	60	60	30	30

（2）改善了机床的运动平稳性，提高了精加工光洁度。表 8 列出两台 MG1432 外圆磨床砂轮架导轨副的对比结果。

表 8 还说明了 FQ-1 板在有些场合可代替滚动导轨副, 既提高了导轨接触刚性和抗振性, 又简化了机床结构及装配工艺。

(3) 增加了手动微进给准确性, 保证了加工尺寸精度和工作效率的提高。表 9 列出三种磨床砂轮架进给准确性的对比结果。

(4) 降低了操纵系统的手轮力(见表10)。

表 9 三种磨床砂轮架手动微进给准确性

机床型号	机床进给要求 微米/格	10次手进给积累误差, 微米	
		铸铁导轨副	FQ-1导轨副
MG 1432	1	—	0.6
MMB1320	0.5	1	0.5
M2110	前段	1	0.2
	中段	1	0.6
	后段	1	0.5

表10

机 床 型 号		手 轮 力, 公斤	
		铸铁导轨副	FQ-1导轨副
MMB1320砂轮架		8	4
M2110 砂轮架	粗 进 给	8	6.3
	细 进 给	12	3.2
SI-235 车 床	刀架手轮	规 定 值	FQ-1导轨实测值
	纵 向	6	3
	横 向	4	2
	小 刀 架	4	1

3. FQ-1 导轨板在精密测量机上的应用

精密测量机要求导轨具有高的运动平稳性、调整灵敏度及抗振、防爬性能。FQ-1 在三坐标精密测量机、激光丝杠检刻机和磁场测量机上装试结果证明, FQ-1 导轨副具有较小的摩擦阻力, 用100~150瓦伺服电机即可顺利拖动, 且易于保证滑动表面加工精度及抗振性能, 在测量机上代替滚动导轨后消除了约1.5~2 微米的周期性振动峰值。

1. FQ-1 导轨板在机床上应用的综合效果

(1) 提高了数控机床的伺服性能, 降低了位置控制精度的要求。对闭环数控和半闭环数控方式的机床而言, 易于保证伺服系统的稳定性。对开环数控方式的机床而言, 也能有效提高进给驱动系统的定位精度、轮廓切削精度和精加工的光洁度等伺服性能。

(2) 提高了精密机床和精密测量机的运动平稳性和定位精度, 防止了爬行现象, 从而使加工工件的精度和光洁度显著提高。

(3) 由于具有减摩、防爬性能, 从提高机床抗振性的角度出发, 可替代滚动导轨、导套, 在提高工件的精加工光洁度方面可取得明显效果。

(4) 显著地降低了机床的进给驱动系统拖动功率, 同时也降低了操纵系统手动进给的劳动强度。

(5) 简化了机床进给系统的结构(对静压和滚动导轨而言), 提高了机床制造与装配的工作效率, 便于导轨的维修与更换。

四、FQ-1 导轨板的应用范围和使用方法

1. 适用的机床类型和部位

FQ-1 板适用于中、小型机床的各向导轨, 大型机床的横梁及刀架导轨。尤其在垂向

导轨部位及镶条上使用FQ-1导轨板易于收效。还适用于一切往复式、回转式及振动式滑动导轨。为了获得较好的工艺性,以矩形平面导轨为宜。一般将FQ-1板装于导轨副的矩轨上。

根据文献[1]的推荐:导轨面最大滑动速度 $V_{\text{最大}}=10$ 米/分;导轨面正常工作比压 $P=1.7\sim 3.5$ 公斤/厘米²。当载荷或运动是间歇的情况时(如立式车床的滑动枕导轨)比压可达10.7公斤/厘米²,瞬时峰值 $P_{\text{最大}}=21.4$ 公斤/厘米²。

2.FQ-1导轨板的对磨导轨材料为铸铁(或钢),其表面可开油孔或油槽,但必须严格倒钝尖角、毛刺,以防FQ-1板面被划伤。对磨导轨表面可用精刨(或铣)及周边磨削加工,光洁度 ∇_7 为宜(过低或过高均不利)。

3.FQ-1板面的可加工余量较小,出厂后的成品已保证其标准长度范围内的厚度均匀性在 ± 0.005 毫米内,在机床导轨合研调整精度时(如观察与调整导轨面接触斑点密度及均匀性),若需调整加工,一般要求修刮FQ-1板背表面或其安装基面。为了减少这一加工量,故要求安装基面需达到机床总装尺寸链的精度指标。安装基面的光洁度为 ∇_8 即可。

4.FQ-1板的安装固定方式

固定方式有三种:

(1)铜埋头螺钉固定:用于较长导轨上(长于1米),螺钉孔需与基面配钻或采用一个螺钉与1~2个铜销钉固定一块FQ-1板。

(2)粘接方法:用于较短的导轨上或安装基面精度较高的测量机上,粘接后无需再进行FQ-1板面的调整加工。粘接剂可采用聚氨酯101胶或压敏胶,需保证胶层厚度均匀及固化过程中板面的粘着性。

(3)浮装于导轨副间,两端加限位块——用于轻型导轨副上。

5.维护措施

为防止对磨导轨面的锈蚀和提高使用寿命,可采用滴油润滑方式(供油量不大于0.4毫升/分)。导轨防尘装置可用毛毡,如为了减少防尘装置的摩擦阻力,建议用PTFE塑料刮板,则效果尤佳。

6.FQ-1导轨板的厚度及现有规格

目前提供的导轨板厚度 $\delta=2.5$ 毫米,为了适应非矩形导轨的厚度要求,用户可自行磨削钢背或要求生产厂做补充加工。

现有尺寸规格:

长度——300、400、500毫米;

宽度——25、30、40、50、60、80毫米。

五、结 束 语

FQ-1材料是一种减摩、防爬、具有一定自润滑性能的导轨材料。经过研究已初步探索出一条合理的生产工艺线,样品已通过了鉴定,目前即将完成中试任务,建成了一个具有一定生产规模的产品供应基地。已具备了为用户单位提供合格产品的条件。

FQ-1材料除作机床导轨外,还可卷成套作轴承使用,它在国防、轻工、航空、化工等部门有着广泛用途。可以预见,以PTFE为基材的复合材料在摩擦副及密封装置上将会得到广泛应用。因此,进一步研究和改善该类材料的性能是极为重要的。