

磨削译文集

第一机械工业部郑州磨料磨具磨削研究所

一九八〇年四月

立方氮化硼砂轮磨削性能的研究

S.K. BHATTACHARYYA, K.K. HON

(英国伯明翰大学)

提 要

用立方氮化硼砂轮对经热处理的轴承钢所作的一系列切入平面磨削试验表明:它与刚玉砂轮相比,磨削比G值可以提高20—200倍。本文讨论了在砂轮速度从20米/秒到60米/秒的范围内,按磨削力、比磨削能、表面光洁度来评定磨削性能的问题。本文还介绍了用对切削过程所产生的动态力进行光谱分析的方法来研究粒度和磨削条件的影响。对一个给定的工件——机床系统而言,在所进行的全部试验中,立方氮化硼砂轮都显示出独特的性质,即磨削性能随磨削时间的增加而得以改善。

符 号

a = 切深, mm

E_{sp} = 比磨削能, Jmm^{-3}

F'_x = 平均切向力, Nmm^{-1}

F'_x = 动态切向力, Nmm^{-1}

F'_z = 平均法向力, Nmm^{-1}

F'_z = 动态法向力, Nmm^{-1}

Kd_x = 切向力校正系数, NV^{-1}

Kd_z = 法向力校正系数, NV^{-1}

K_m = 信号放大倍数, 无因次

K_{vs} = 砂轮速度修正系数, 无因次

K_{vw} = 工件速度修正系数, 无因次

N = 主轴转速, rpm

V_s = 砂轮速度, ms^{-1}

V_w = 工件速度, $m\ min^{-1}$

Λ_w = 金属切除量参数, $mm^3s^{-1}N^{-1}$

ρ = 磨削系数, 无因次

引 言

立方氮化硼(CBN)是一种人造的超硬晶体。1957年由通用电气公司的Wentorf所发

现〔1〕〔2〕。由于其优异的材料特性（硬度仅次于金刚石，并具有良好的化学稳定性和热稳定性）作为一种磨料它的潜力是显而易见的，1969年已作为一种超级磨料投产。由于它的使用寿命非常长，因此立方氮化硼砂轮也称为半永久性砂轮。按磨削比G值衡量，立方氮化硼砂轮比刚玉砂轮高20到1000倍。

目前，美国、南非和苏联生产立方氮化硼，它们的商标是：通用电气公司的布拉松（Borazon）、De Beers 公司的琥珀氮化硼（Amber Boron Nitride）〔3〕和苏联的爱利泊尔（Elbor）〔4〕〔5〕。立方氮化硼可以镀镍或保持其原始形态，这要根据砂轮的结合剂来决定。

立方氮化硼磨削的存在和发展并不意味着它会取代那些已被广泛使用的磨料，而是补足它们性能的不足，因为CBN能使磨削性能提高从而把它作为增加生产率的一种方法。一般说来，对于硬的和难磨的合金钢，用立方氮化硼磨削比使用传统的磨料加工易于完成。可是最近作者所做的工业调查表明立方氮化硼技术在英国还远远没有得到充分利用〔6〕。

当高压高温烧结技术成功地用于生产立方氮化硼聚晶体时，立方氮化硼晶体在工业上的运用才真正得到了推广。立方氮化硼聚晶体可用作刀具和模具材料〔7〕。图1概括了立方氮化硼制品在制造业中当前的应用情况。

本文介绍了有关为了评价立方氮化硼磨削和鉴别是否充分发挥其潜力所需的技术而作出的一些研究成果。

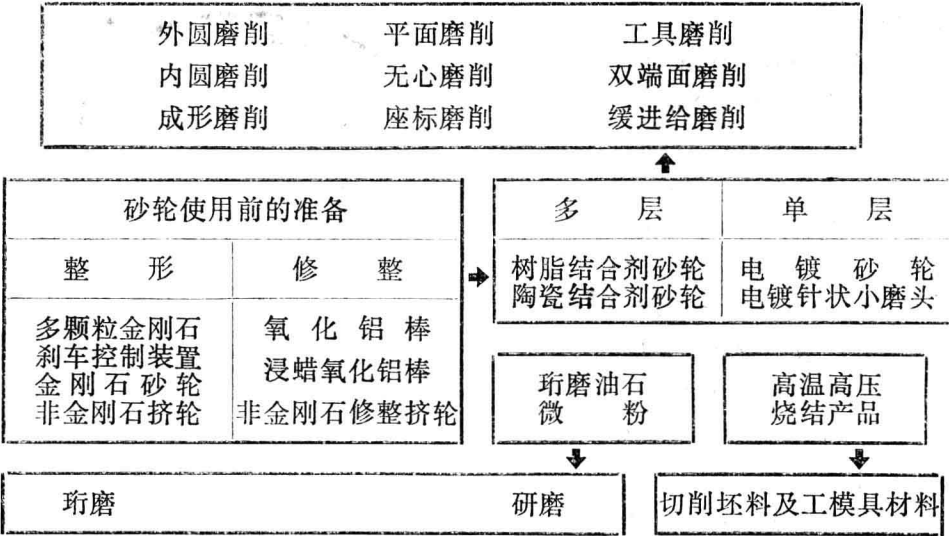


图1 立方氮化硼制品及其在磨削，超精加工，金属切削和工模具加工中的应用

试 验 程 序

机床

立方氮化硼磨削试验是在一台诺顿公司的S4型平面磨床上进行的，为了改善机床性能

对磨床做了一些改装。

1) 静压轴承

用一个主轴颈的液体静压轴承和一个液体静压径向——推力联合轴承替换原来主轴的各滚珠轴承以增加主轴的刚性。

2) 可变的主轴转速

用一个固定频率的变换器来控制电机无级变速，从0到4700 rpm。

3) 精密向下切进机构

装有一套配以单向侧隙自由支承的气动的向下切进机构以获得均匀一致的和微量的向下进给。

4) 电子设备

机床还设置了如工作台速度光学测量系统和主轴回转量讯号发生装置等电子设备。

试 件

试件材料是含碳1%的轴承钢。尺寸为宽20mm，长100mm和高30mm。所有的试件都经过淬火和回火处理，其硬度不低于维氏硬度(VPN) 849。

砂 轮

湿磨法试验使用三个粒度不同而结合剂都为耐用树脂的1A1砂轮，且其立方氮化硼浓度相同，都是100（即CBN所占体积为25%）。砂轮的尺寸是外径为304.8mm、宽25.4mm、孔径76.2mm。立方氮化硼层厚度为 $\frac{1}{8}$ "。基本规格是：

1) CBN 60/80 WBA 1/8

2) CBN 100/120 WBA 1/8

3) CBN 220/230 WBA 1/8

磨削液

所有的试验都使用特殊的含有极压增添剂的重负荷磨削液Cimperial 20，要经常检查并保持其浓度为5%，流量为15 l/min。

砂轮使用前的准备

在磨削试验开始以前，首先要给砂轮创造工作条件。它与刚玉砂轮不同，必须经过三个不同的准备阶段：

1) 整 形

整形工序使用粒度为80/100的多颗粒金刚石工具。工作条件是： $V_s=25\text{m/s}$ ， $V_w=0.3\text{m/min}$ ， $A=5\ \mu\text{m}$ 。每整形20次后应将金刚石工具转动一下并测量砂轮的不圆度。这个过程不断重复，直到砂轮的不圆度再不能够改善为止。

2) 修 整

用氧化铝棒除去砂轮表面的结合剂以提供容屑空间。用手工来完成修整，一直进行到氧化

铝棒上不再出现结合剂增多的现象和氧化铝棒消耗速度加快时为止。整形和修整对砂轮表面“地形图”的影响示于图2。用于各种砂轮的氧化铝棒的规格是：

修整棒	砂轮粒度
WA 150 BV	60/80
WA 320 BV	100/120
WA 500 GV	220/230

3) 予磨

为了使起始阶段的磨削稳定，应先在软钢块上进行200次予磨。予磨

条件是： $V_s=25\text{m/s}$ ， $V_w=15\text{m/min}$ ， $a=5\ \mu\text{m}$ 。要测量砂轮廓形磨损作为以后计算G值的修正资料。对砂轮的不圆度也要测量，如果不圆度太大，那么给砂轮创造工作条件的整个过程将要重复进行。

仪器及数据的采集

磨削力 F_x 和 F_y 用刚性好、灵敏度和谐振频率高的压电式测力仪测量。磨削力数据测试系统的装置示意图如图三所示。对平均的和动态的磨削力的分析是经过一部微型计算机把储存在磁带记录器中的模拟信号转换成数字信号。

整个试验采用切入式湿磨法。切去金属的总体积定为 $2000\text{mm}^3/\text{mm}$ 。表面光洁度，表面波纹度，砂轮磨损以及砂轮圆度的测量均在每次试验当中和结束时进行。

此外，还要进行一些其他方面的测量，这将在另一篇论文中讨论。

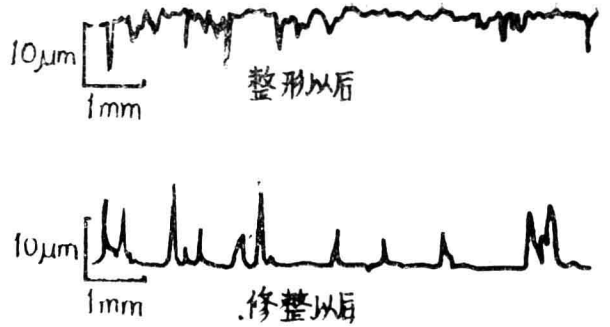


图2 整形和修整对砂轮表面轮廓的影响(用触针法测量的结果)

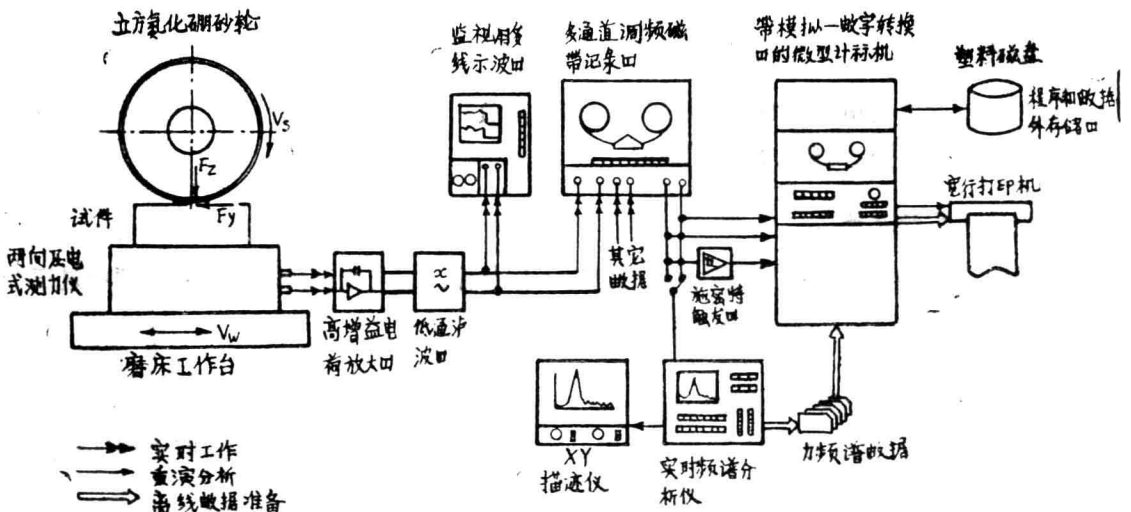


图3 平均的和动态的磨削力数据采集及分析系统

试验结果及讨论

概述

对一个给定的工件——机床系统，砂轮的磨削性能取决于磨料及结合剂材料的物理、化学和机械特性，工作条件和环境。磨削性能的评价可以用与磨削力有关的原始单位如 F_x 、 F_z 和导出单位 Δw 来说明；或者用工件性质如表面光洁度，表面完整性等来说明；或者也可用以磨削比 G 值衡量的砂轮磨损来说明。CBN砂轮磨削性能的讨论将建立在上述这些标准的基础之上。

CBN磨削力的一般模式（即变化规律）是相当独特的，其两个磨削分力 F_x 和 F_z 在整个磨削周期里连续不断地减小。这也可从其他人如Graham和Nee〔8〕的研究结果来证明。

在这里，根据磨削力的下降率可以认为它是分成两段的。如图4所示第1阶段下降率比较快，而第2阶段的特点是下降率非常慢几乎趋近于零。第1阶段和第2阶段并没有明确的分界线。根据这种认识，两个不同的阶段就意味着砂轮磨损有两种不同的形式。第一阶段可看作是砂轮上的切削磨粒从原始轮廓调整到磨削过程中产生的轮廓这一瞬态所产生的结果。当瞬态结束或快要结束时，所有的切削磨粒轮廓的统计特征变得比较整齐就意味着进入磨削第2阶段。切削磨粒轮廓的分析也为此提供了证据。

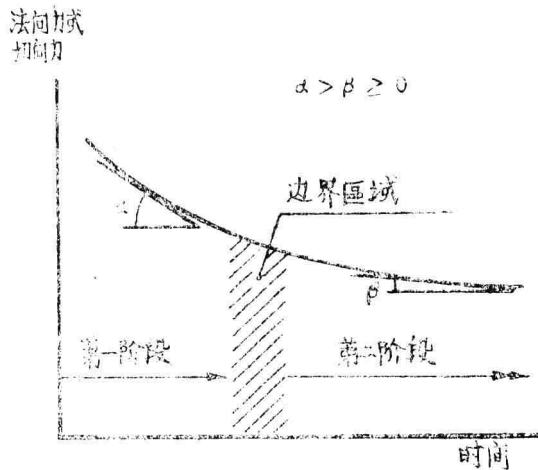


图4 立方氮化硼磨削时力的模式

第1阶段和第2阶段之间的差异也可用砂轮磨损来证明。第1阶段的 G 值比第2阶段的 G 值高得多，甚至可能超过400%。在第2阶段磨削时 G 值近于常数，其变化不超过9%，这说明砂轮的损耗主要是由在磨削初期磨擦所造成，以后出现愈来愈多的微小破碎，最后在第2阶段里达到近于稳定状态。

立方氮化硼磨削的磨削系数 ρ 总是低于0.3，而对刚玉磨削而言， ρ 值一般是介于0.3和0.4之间。较低的磨削系数可用以说明立方氮化硼晶体较锋利，因此切去金属所需的力也就较小。

砂轮速度 V_s 的影响

对一般砂轮而言，较高的砂轮速度是有利的。这同样也适用于立方氮化硼磨削。当金属切除量为 $125\text{mm}^3/\text{mm}$ 时， V_s 从 20m/s 增加到 40m/s 和 60m/s ，磨削力 F'_x 就分别减少了58%和66%。

图5表示 V_s 对 F'_x 、 F'_z 、 ρ 和 E_{sp} 的影响。未涂黑的符号代表逆磨的情况，涂黑了的符

号代表顺磨的情况。当 V_s 增加时 F'_x 及 F'_z 都减小。值得注意的是虽然开始时增加 V_s 没有使得 F'_x 和 F'_z 按正比例变化,而随着磨除体积的增加,其按正比例变化的关系才变得更清楚。当 $V_s=20\text{m/s}$ 时,在逆磨和顺磨之间 F'_x 与 F'_z 的变动较大是由于受到机床功率限制的缘故。

平常对比磨削能 E_{sp} 、曲线的解释是较低的 V_s 消耗的能量就比较少。目前出现这种现象的原因是有关 E_{sp} 的计算并没有根据固定的条件来考虑,而是根据实际测量的情况按(1)式计算出来的。

$$E_{sp} = \frac{K_{vs} V_s F'_x}{K_{vw} V_w a} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$\text{J/m} \cdot \text{m}^{-3}$

在这里: $K_{vs} = V_s$ 的修正系数

$K_{vw} = V_w$ 的修正系数

当 $V_s=20\text{m/s}$ 时, K_{vs} 低至0.58,

这就是使其结果看起来好像矛盾的原因。

V_s 对 G 值的影响如图6所示。大体上是当 V_s 为20m/s和40m/s时,金属切除量从开始到1000 mm^3/mm 的 G 值比第二段1000 mm^3/mm 到2000 mm^3/mm 时的 G 值高一些。对于 $V_s=60\text{m/s}$ 的情况则不同。这也可以由磨削力的曲线来解释,该曲线的斜度较平就说明 V_s 较低时不存在第一阶段所出现的情况。进一步磨削时 G 值的时间模式便显示出来了,即 V_s 较高, G 值也较高。且表面光洁度还得以改善,其结果列举如下。

V_s m/s	20	40	60
Ra μm	0.55—0.60	0.49—0.50	0.38—0.41

与刚玉砂轮相比,立方氮化硼砂轮所获得的 G 值是高得非常惊人的,对同样的工件材料而言,刚玉砂轮的 G 值即使在有利的加工条件下也只有10—15。而且, G 值高意味着修整砂轮和更换砂轮时间损失较少。这样的磨粒是有经济价值的并且在选择氮化硼砂轮时完全应予考虑。

工件速度 V_w 的影响

工件速度增加会增大金属切除率 Z'_w 。参见图7,它表明了 V_w 对 F'_x 、 F'_z 和其他参数

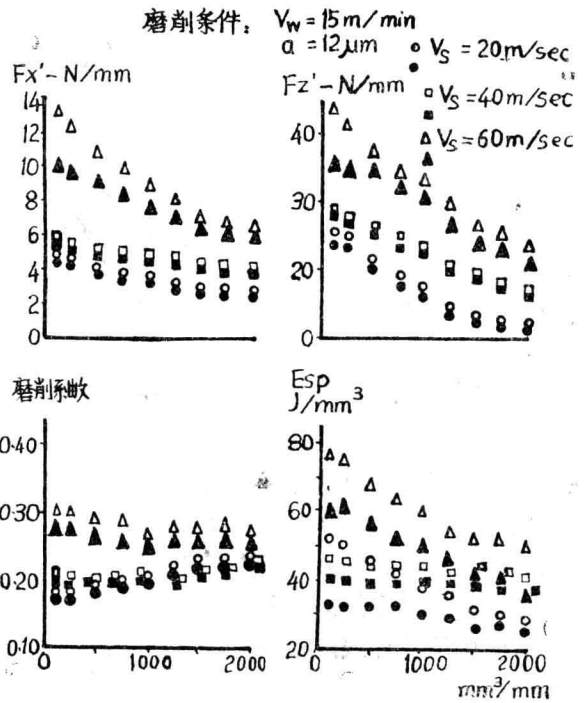


图5 砂轮速度对磨削力和比磨削能的影响

* 图5中符号可能系 \bigcirc $V_s=60\text{m/sec}$

\triangle $V_s=20\text{m/sec}$ ——译者注

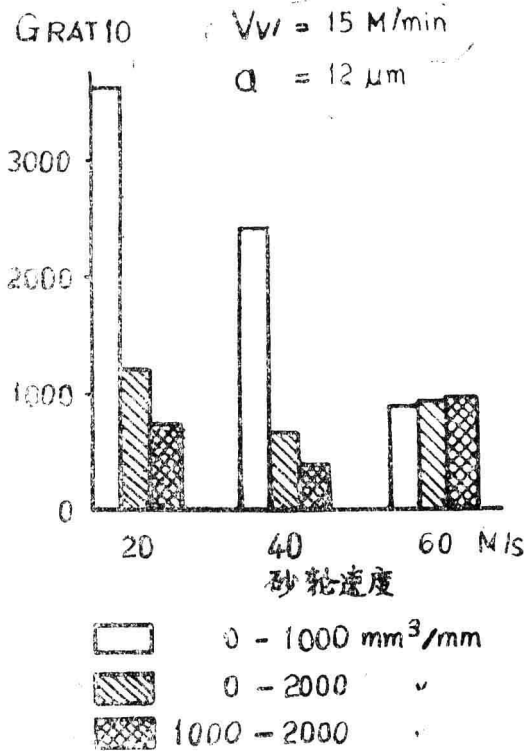


图6 砂轮速度对G值的影响

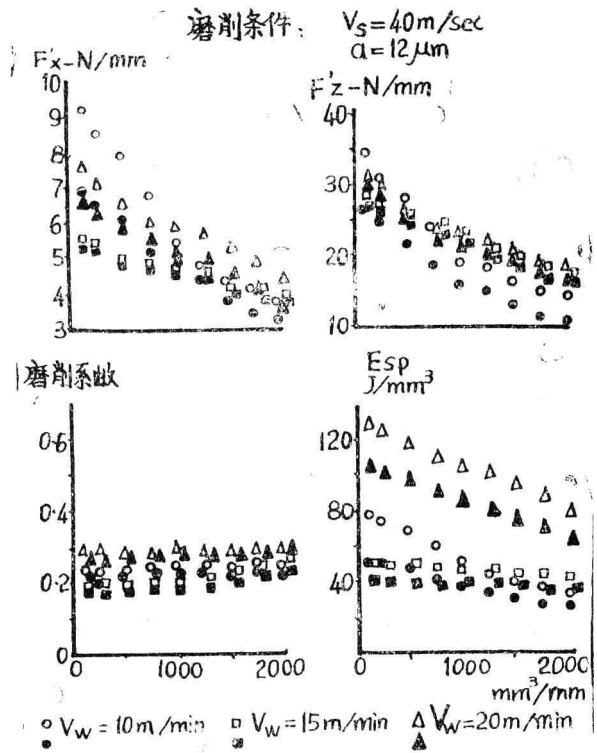


图7 工件速度对磨削力及比磨削能的影响

的影响，并表示金属切除量在 $0 - 1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 时在一定程度上发生重迭的现象。

对于较高的 V_w 计入修正系数 K_{vs} 后， E_{sp} 值是较低的。这或许可归结于这样一种事实，即 $V_w = 10 \text{ m/min}$ 太低，因此输入的能量大部份转化为热，并使温度上升。它还使结合剂受热软化，这也就是为什么G值相对比较低的缘故。

图8举例说明了 V_w 对G值的影响，且表明其最大的G值发生在 $V_w = 20 \text{ m/min}$ 处。如果 Z'_w 仅为 $4 \text{ mm}^3/\text{sec}/\text{mm}$ ，这样的金属切除率不算高，因此像一般所说的那样 V_w 较高就能给出较高的G值的说法是错误的。

向下切进量a的影响

图9表示向下切进量对磨削力及其它导出单位的影响。对于向下切进量为 $4 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 这两种情况而言，在金属被切去 $1000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 以后 F'_x 变得相对稳定了；但是向下切进量为 $20 \mu\text{m}$ 时， F'_x 却连续地减小。这意味着当前者已处于磨削第二阶段时而后两者则仍停留在磨削第一阶段。

对于不同的向下切进量，由于 K_{vs} 和 F'_x 不同， E_{sp} 的差异是非常显著的。例如当向下切进量为 $4 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$ 时， K_{vs} 值分别为 0.92 和 0.75 。然而向下切进量对 E_{sp} 的影响和刚玉砂轮的情形是一致的。也就是说向下切进量较小时， E_{sp} 会增加。

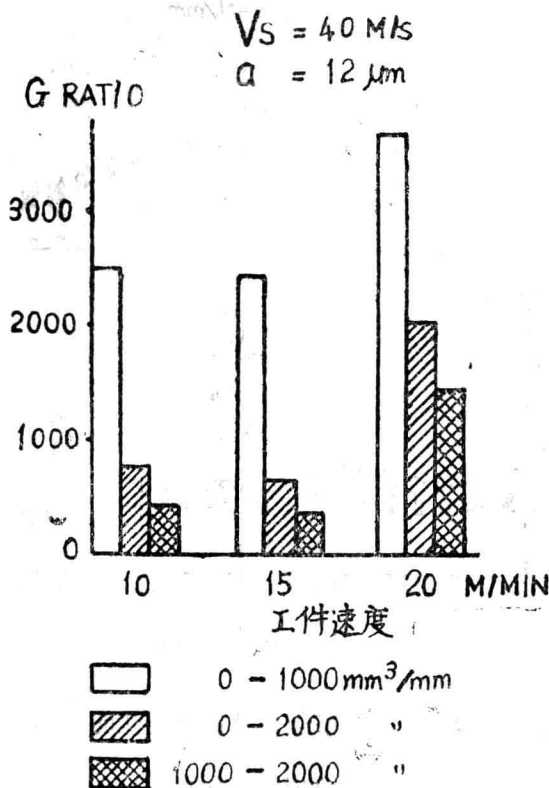


图 8 工件速度对G值的影响

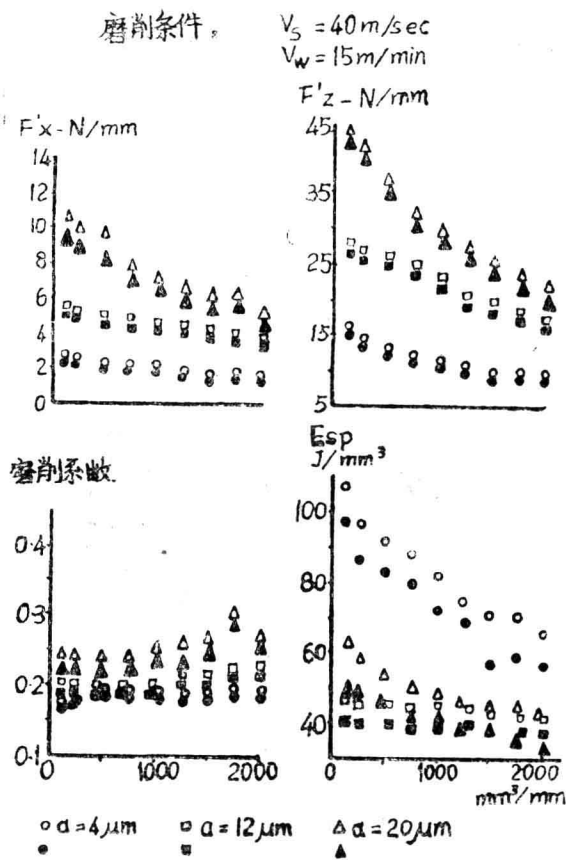


图 9 向下切进量对磨削力和比磨削能的影响

G值的大小示于图10,一般说来,向下切进量较小则G值较高。可是向下切进量对表面光洁度的影响则不算太大,向下切进量为 $4\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$ 时Ra在同一范围 $Ra = 0.45 - 0.50\mu\text{m}$,向下切进量为 $20\mu\text{m}$ 时Ra则为 $0.31 - 0.32\mu\text{m}$ 。

粒度dk的影响

用作砂轮的立方氮化硼的粒度可以从40/60到325/400。 $6/12\mu\text{m}$ 到 $36/54\mu\text{m}$ 的微粉也可用于珩磨和研磨。在本系列试验中采用了三种不同的粒度: 60/80, 100/120, 220/230 作为立方氮化硼磨削中粗的, 中等的和细的三种情况。

图11表明较大的磨粒尺寸将导致 $F'x$ 和 $F'z$ 较高。当金属去除量为 $125 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 时, 粒度为60/80和100/120时的 $F'x$, $F'z$ 分别比粒度为220/230时高3.7倍和1.6倍。虽然对粒度为60/80的砂轮而言 $F'x$ 还不算很高, 但 V_s 却下降了约30%, 且无论逆磨和顺磨 V_w 都有30%的改变。这说明粒度为60/80的砂轮 E_{sp} 变化大的原因。对其他粒度的砂轮 E_{sp} 的变化比较小, 其 V_s 和 V_w 的变化约为15%。

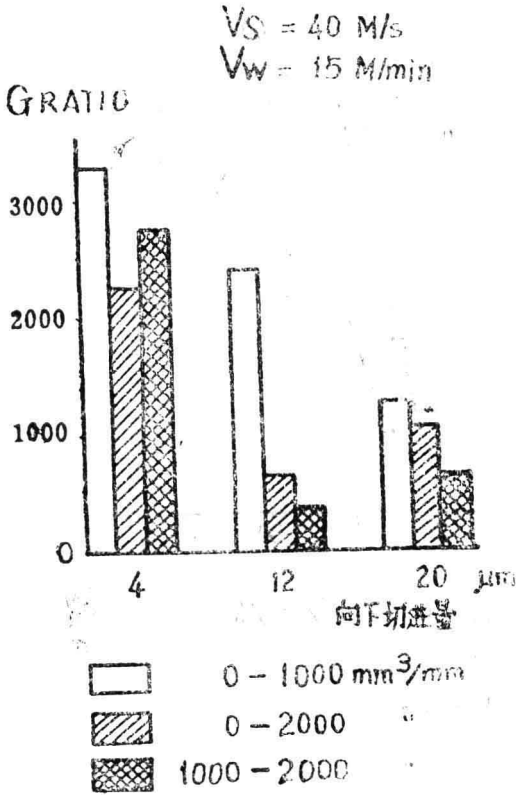


图10 向下切进量对G值的影响

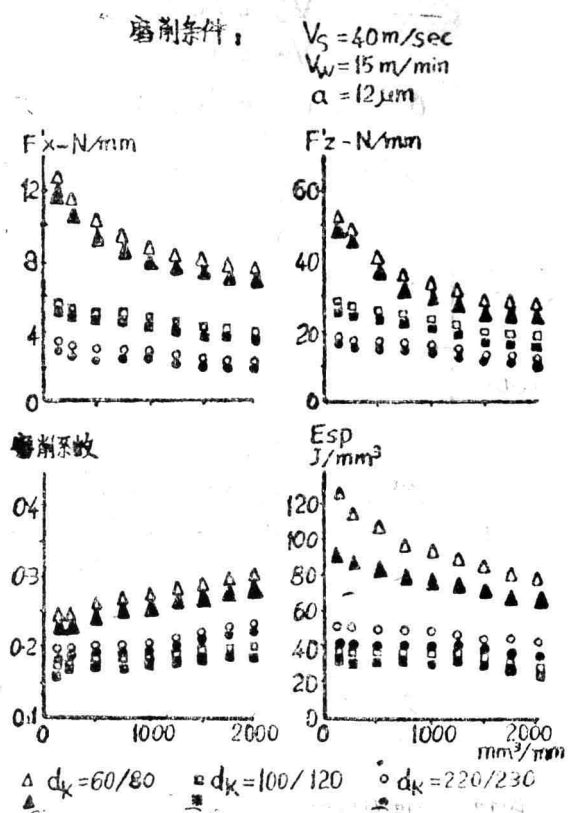


图11 粒度对磨削力及比磨削能的影响

对粒度为60/80的砂轮所作的显微镜检查表明磨削时发生堵塞而其他两种砂轮则未看到这种情况。采集一片堵塞在砂轮上的切屑并放在立体扫描电子显微镜下进行研究。图12所示(见封二)的显微照片表明切屑有严重塑性变形、弯折、撕裂和沟痕。

图13表明了粒度对G值的影响, 对应于粒度60/80和100/120的砂轮, 金属切除量为0—1000 mm^3/mm 第1阶段和1000—2000 mm^3/mm 第2阶段之间的G值改变较大。将试验条件特定在 $Z'w = 3 \text{ mm}^3/\text{sec}/\text{mm}$ 时, 磨粒尺寸减小, G值就增加。表面光洁度随粒度改变的情况列举如下:

dk	60/80	100/120	220/230
Ra μm	0.96—1.10	0.49—0.50	0.32—0.44

金属切除参数 Λw

Hahn对金属切除参数 Λw 的定义为〔9〕,

$$\Lambda w = \frac{Z'w}{F'z} \quad (2)$$

它是粒度或者说是磨削效率的一种评定指标。对于一个给定的工件——机床系统它也可以解释为砂轮磨削性能的一种评定指标。即 Λw 值大说明砂轮的磨削性能好, 反之亦然。对

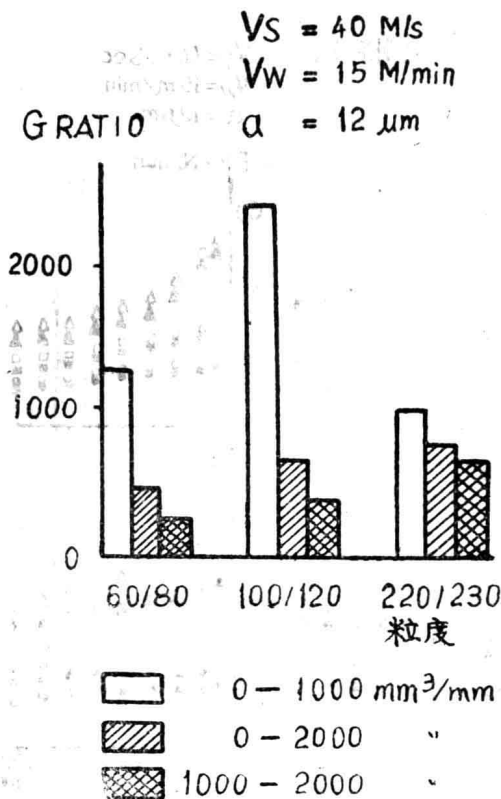


图13 粒度对G值的影响

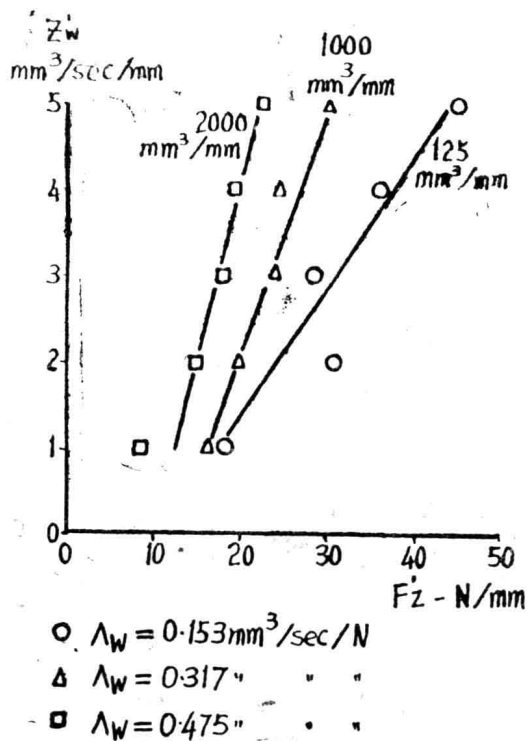


图14 金属切除参数的改善 (以累积的工件磨削体积来证明)

于刚玉砂轮而言 Λ_w 随磨削时间变化的关系已有记载,且 Λ_w 总是随时间的增加而减小的.有关立方氮化硼内圆磨削的 Λ_w 的研究结果已由Lindsay和Navarro提出〔10〕.

如图14所示,立方氮化磨削时 Λ_w 的图形揭示出一个异常的特性,即 Λ_w 随时间的增加而得以改善.但因为CBN砂轮与刚玉砂轮相比其耐用度很高,其磨削性能随时间增加而得以改善并且长期不会恶化是合乎逻辑的.的确,要得出CBN砂轮的使用寿命的数据是非常化时间的,曾经作过金属切除量为 $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 的长时间运转试验,都没有看出CBN砂轮有恶化的迹象.

磨削力的频谱分析

磨削力的频谱分析的目的是为了获得磨削过程动态性能的资料.如图3所示:时域内力的信号送至应用离散付里叶变换技术的实时频谱分析仪中以获得频率域里力的频谱.因为自频谱分析仪得到的单位是分贝,所以用下式转换为力的单位:

$$\begin{bmatrix} \tilde{F}'_x \\ \tilde{F}'_z \end{bmatrix} = \frac{1.414 \times 10^{-4}}{b \times K_m \times 10^{\frac{n}{20}}} \times \begin{bmatrix} Kdx \\ Kdz \end{bmatrix} \text{ Nmm}^{-1} \quad (3)$$

在这里 n =力频谱的坐标值,单位是分贝。

在整个试验过程中, F_z 力频谱随时间的变化如图15所示。峰值出现在频率为1N和2N处,因为它们是主轴旋转频率N的倍数,因此属于强迫振动,而且主要是由于砂轮的不圆度,砂轮剩余不平衡以及主轴轴承不同心所引起的。尤其是在使用CBN砂轮作平面磨削时,1N的振动是非常普遍的。除上述各种因素以外,也还有可能是由于该砂轮的结合强度高及磨料浓度大而引起振动的。为阐明这一点准备今后进一步试验。

虽然在每次试验中 F'_z 都是逐渐减小的,但是 F'_z 却显出了相反的趋势而略有增加。在所有的试验中都没有出现再生颤震。

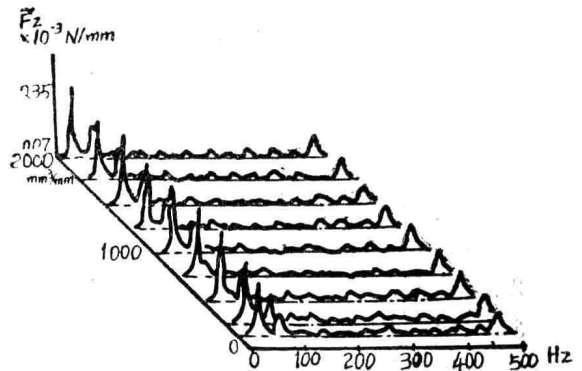


图15 粒度为100/120的砂轮的力频谱,磨削条件是:

$$V_s = 40 \text{ m/s}, \quad V_w = 15 \text{ m/min}$$

$$a = 12 \mu\text{m}$$

结 论

1、为了确保立方氮化硼磨削能获得最大的受益,必须按下表中所总结的做好各种准备。

必要的准备		受益的方面	注意事项
机 床	工 件	砂轮寿命	最初砂轮投资费用较高,
电机功率较高	合金钢硬度超过Rc50	修整次数	砂轮使用前准备程序严格,
结构设计好	无碳化物偏析	磨削比G	对同等的表面光洁度
主轴刚度高	无陶瓷夹杂物	尺寸公差	要使用较细的磨粒,
主轴转速高		生产率及经济性	砂轮的储存及装卸

2、立方氮化硼磨削时力的模式不同于刚玉磨削,其 F'_x 和 F'_z 在磨削第一阶段连续下降很快,但在磨削第二阶段却下降得很慢了。当金属切除量达到 $6000 \text{ mm}^3/\text{mm}$ 时 F'_x 和 F'_z 便已经看不出有什么增减了。

3、立方氮化硼砂轮的磨削性能如金属切除参数 Δw 所指示的那样随着磨削时间的增加而得以改善。对立方氮化硼砂轮而言,这是一种独特的性质。

4、磨削第一阶段G值非常高,然后在磨削第二阶段下降到较低的值。这表明在磨削第一阶段砂轮磨损主要是由于磨擦作用,而在磨削第二阶段系磨擦、微细破碎及其它磨损机理的综合作用。

• • 此处 F_z' 可能系 F_z' 之误——译注

5、砂轮速度 V_s 、工件速度 V_w 和向下切进量 a 对磨削力和比磨削能的影响跟用刚玉砂轮磨削时的规律是一致的。对立方氮化硼磨削而言，较高的砂轮速度更为有利。

参考文献

- 1、R. H. WENTORF, JR. (1957) Cubic Form of Boron Nitride, Journal of Chemical Physics, Vol. 26.
- 2、R. H. WENTORF, JR., U. S. Patent 2, 947, 617.
- 3、DE BEERS (1974) Amber Boron Nitride a new metal Working abrasive, De Beers Publication.
- 4、G. M. IPPOLITOV (1967) Grinding wheels and abrasives, Machines and Tooling, Vol 38 Number 5.
- 5、STANKOIMPORT (1976) Elbor Tools, Stankoimport publication.
- 6、K. K. HON and S. K. BHATTACHARYYA (1976) Special Report—Cubic Boron Nitride, Metalworking Production, January.
- 7、R. E. HANNEMEN and L. E. HIBBS, JR. (1973) Borazon and diamond compact cutting tools, General Electric Company Report 73CRD182.
- 8、W. GRAHAM and A. Y. C. NEE (1974) The grinding of tool steels—a comparison between diamond and cubic boron nitride, Production Engineer, June.
- 9、R. HAHN and R. P. LINDSAY (1970) On the basic relationships between grinding parameters, CIRP Annal.
- 10、R. P. LINDSAY and N. P. NAVRRO (1974) Principles of grinding with Borazon CBN wheels, Machinery and Production Engineering, January, March, June.

译自《19th International MTDR conference》预印本, P 645~653, 1978年.

马骏骑译 诸兴华校

磨削表面可见缺陷的测量

G. TRMAL, B. MANNING, H. KALISZER

(英国伯明翰大学)

提 要

本文对被磨削的工件表面上产生的可见花纹的表面性质进行了分析。表面花纹强度现已被用来作为新磨床验收试验中的一项标准。但目前评定的办法是纯主观的，因此需要一种较少依赖于主观臆断的技术。已经发现可用触针描迹方法，但不适于快速测量，因而提出了采用光学测量法，并对此进行了分析。在分析的基础上研究了一种用散射光测量的方法，并设计了实用的仪器。对这一仪器作了较详细的叙述并给出了初步的试验结果。目前在生产现场条件下所作的进一步试验正在总结中。

引 言

磨削表面的地形图通常是用磨削过程中所固有的表面组织结构不规则性的粗糙度的算术平均值 R_a 来评定的；也可用波纹度参数来评定（粗糙度正是迭加在这种波纹度上的）。然而逐渐觉察到： R_a 这个直到目前应用最普遍的参数，并不能完全决定一个表面是否可接受。尽管 R_a 在制造中是控制质量的一个极有价值的参数，但是它很少或根本不考虑到表面的不规则性形状。它是一项有用的数量指标，但是它不能充分确定表面的某些性质。

在很多情况下，能直观地觉察到在精密磨削过的表面上所出现的相当明显的花纹，而这些花纹可能是不符合检查要求，但用 R_a 值却很难断定出来。这些花纹如果发生在制造金属薄板的轧辊表面上，就会把这些花纹转移到被轧制的薄板上，因而使产品质量降低。目前表面花纹强度是机床验收试验中的一个部分，但其评定办法是带主观性的。

本文的目的在于分析一种对精密磨削表面上的一些可见花纹作出定量评定的办法，并且研制一种仪器，它将为定量地控制花纹提供基础，并且给出所要求的数量指标。

表面花纹分析

根据Jones & Shipman公司检验部门（负责机床验收）的意见，专门准备了四个磨削试件。这些试件的表面花纹从“最好的”（低的花纹强度）到“不能接受的”。对这些试样进

行初步检验表明：表面花纹的变化，不仅表现在强度上，而且也表现在密度和形状上。为了区别这些花纹，对每一个试件的不直度与不平度均进行了测量，而且在地形图方面也作了估计。

借助改进型NPL干涉仪和Rank Taylor Hobson Talysurf 10型粗糙度检查仪分别对平直度及粗糙度进行了分析。

对于粗糙度小的试件 ($R_a=0.07$ 微米) 显示有平行波纹，其波长接近1.25毫米，并迭加在波长为12.5毫米的波纹上。这些波状花纹的双倍振幅约为0.25微米。然而用干涉仪显示的波形结构并不与目测的相符。

对于粗糙度大的试件 ($R_a=0.2$ 微米)，干涉测量没有显示任何明显的花纹。为了确定为花纹所建立起来的特征，对表面粗糙度的地形图进行了详细分析。分析时，如图1所示，取一系列作横向移动的轨迹，使其间距为0.2毫米，每一轨迹的 R_a 值作为轨迹的位置函数也表示在图1中。仅在个别的试件中， R_a 值的变化才与目测的表面花纹比较一致。

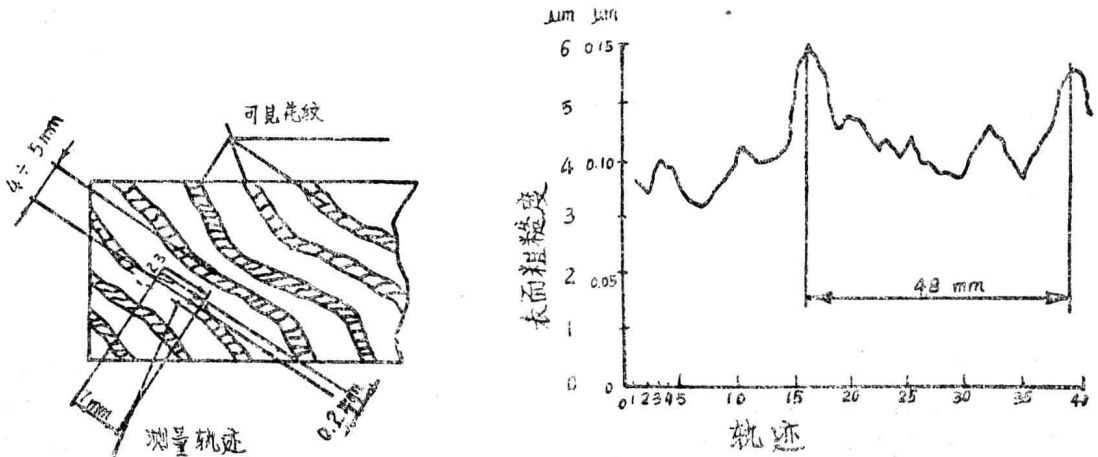


图1 表面粗糙度的测量

在其他的试件中，尽管一般花纹是相当显著，但是 R_a 值只出现少许变化。

对所产生的花纹进行更详细地分析后表明，在花纹带上和在两带之间尽管测出的 R_a 值是属于同一级的，但轨迹的形状是不同的。由图2可以看出，所记录的轨迹可用试件横截面上的“平均斜度”及斜度分布函数来表示其特征。因为来自一个光源的光的反射对随机表面上的斜度变化是敏感的，由此有理由假定：光线将在由“平均斜度”所决定的方向上被反射；反射光的散射取决于斜度分布。

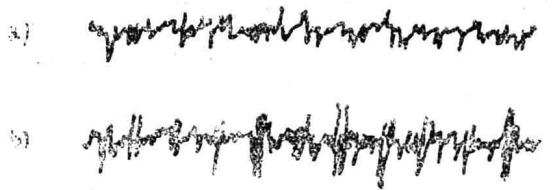


图2 在花纹带及它们之间的表面轮廓特性

磨削表面的反射性质

为了证实磨削时产生的表面花纹，可以用它们对光的反射性质来评定的假定是正确的，因此应用机床工业研究协会 (MTIRA) 研制的表面质量比较仪〔1〕，对磨削试件进行了分析。为了作出“反射性地图”，应用比较仪从两个方向对试件表面进行扫描。按反射能力读数作出的图形与目测的花纹是很类似的。

在附加的试验中，也用比较仪从大致与花纹位置正交的方向对表面进行扫描。结果表明：所记录到的反射能力的变化与由工厂检验员所作的定量评定是非常一致的。

如图3所示，假定一个磨削表面的横向截面是由具有各种斜度的直线边所组成，这些斜度的分布曲线（聚集中心为零）也表示在图3中。

如果在与斜度的平均线正交的方向上，用光照射表面轮廓，则它的反射光会在各种不同的随机方向上。反射光的强度作为反射角的函数可以用一条曲线来表示，这条曲线在理论上应与斜度的分布曲线相同。

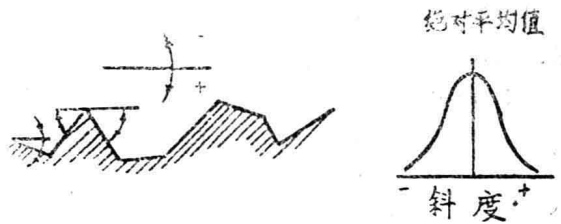


图3 斜度分布

为了避免混乱，区分表面反射率与漫射率的差别是很必要的。在本文中反射率规定为反射光与入射光总量之比。对于稳定的照明，反射率可以用如图4 a所示的曲线下的面积来表示。

漫射率或散射性可作为反射光的散开程度的度量，可用图4 b所示的曲线形状来表示。

这些曲线表示了反射光的强度随反射角而变化。

根据以上的定义：暗色的光滑表面具有低的反射和漫射率；而白色的不光滑表面则具有高的反射和漫射率；镜面则具有高的反射率和低的漫射率。

同样也可以证明：反射率决定于材料的光学性质（包括颜色在内），而漫射率主要决定于几何性质或表面粗糙度。

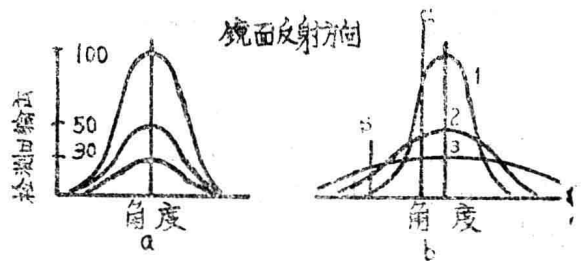


图4 表面光学性质与几何性质不同的影响
a、不同的反射率 b、同样的反射率
同样的漫射率 不同的漫射率
表面的光学特性 表面的几何特性

反射光的检测

磨削表面可用一些具有特定斜度的微小平面来理想化的表示。当用与斜度平均线正交的光照射它时，则反射光的强度（反射角的函数）曲线与斜度的分布曲线相似。然而如果用平

行的光束斜向地照射这样的表面时，所有向光源倾斜的平面，将形成较大的面积，并且将因此反射出更多的光。这样就导致因倾斜角不同使各个平面具有不均匀的权重，并且产生了如图5所示的反射光平均值的漂移。对于具有相当窄的斜度分布范围的磨削表面，这种现象将不大显著。

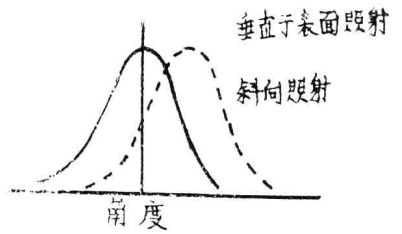


图5 由于表面粗糙度引起的反射光的最大值方向的漂移

花纹的可见度（强度）是随观察角度而变化的。关于这点，注意到下述情况是非常有意义的：花纹的图象可由“正”变到“负”，即当观察角度变化时，亮底暗的花纹可变成暗底亮的花纹。由图4 b所示，由于观察角度与镜面反射方向相差 α 角，与曲线1相应的反射光所呈应出的花纹则比按曲线3反射的底色要亮。然而，如果观察角度改变到 β ，则在这个方向上来自底色（曲线3）的反射光强度比从花纹上反射的强度要高，并且花纹看来就较暗。在这两个位置之间，即在曲线1与曲线3相交的那个角度上，花纹就会看不见。由于实际的原因，反射光的强度不能在一个单一的方向测出。如图6所示，用一个夹角为 ϵ 的光束照射试件。假定是镜面反射时，则反射光束的夹角与照明光束的夹角相等。如果检测系统接受一束夹角与入射光束相同的光线，则反射光线将全部被检测。当反射面的角度位置稍为有点偏差时，就会导致一部分束线不能进入检测器中，因而也就减小了检测信号。图7表示了检测信号强度随角度变化的关系，并以此作为仪器的特性曲线。

仪器分辨率（尖点锐度）应尽可能高，但是这一要求必须注意与照明点的大小、照明强度及检测信号的强度的要求相平衡。

如果检测器的孔径角大于 ϵ ，则在反射表面的某一倾斜范围内，检测信号的强度仍会保持不变，这就使分辨率降低。

在另一方面，如果孔径角小于 ϵ ，虽然检测信号强度不能达到上述水平，但在反射面的一定倾斜角范围内也仍然保持不变。

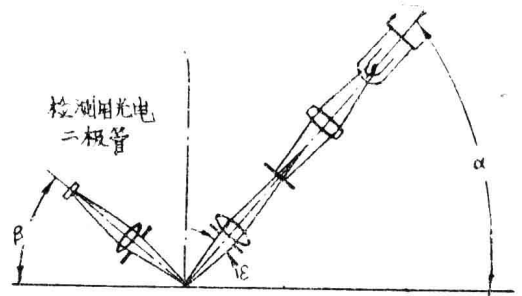


图6 光学系统图

磨削表面在两个不同方向上的特征

磨削表面基本上由大量独立的划痕所组成，这些划痕由砂轮表面上的各个单独刀刃的切削作用所产生。在与主切

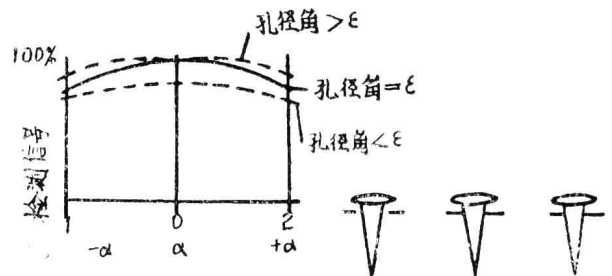


图7 孔径角大于或小于 ϵ 时，检测器的特性曲线