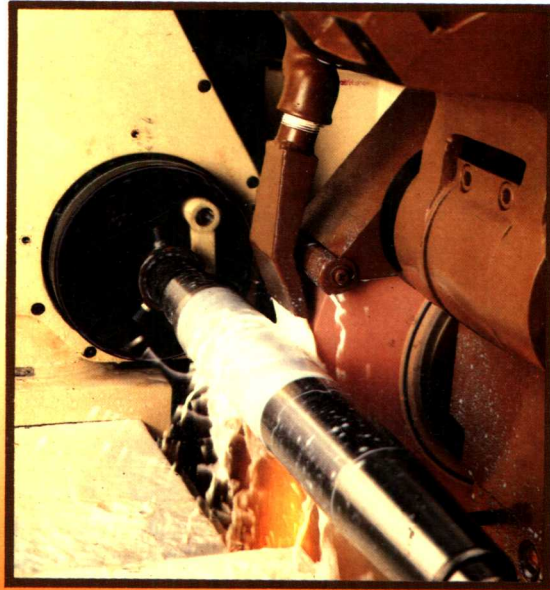


尖端磨削技術

黃舉錐 編譯

榮光機械



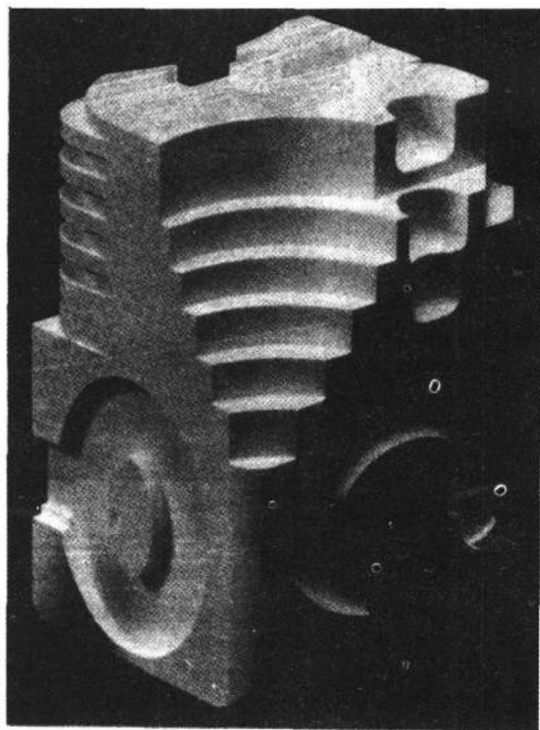
機械技術出版社 印行



全華科技圖書股份有限公司 經銷

尖端磨削技術

—黃舉錐 編譯—



蘇工業學院圖書館
藏書章

機械技術出版社 印行

全華科技圖書股份有限公司 經銷



機械技術出版社

尖端磨削技術

黃舉錐 編譯

出版者 機械技術出版社

地址 / 台北市麗江路76巷20-8號5樓

電話 / 5 0 6 4 0 1 8

郵政帳號：1029850-5號

發行人 林 永 憲

印刷者 豪邦彩色印刷有限公司

經銷 全華科技圖書股份有限公司

地址 / 台北市麗江路76巷20-2號2樓

電話 / 5 0 7 1 3 0 0 (總機)

行政院新聞局核准登記證

局版台業字第三五三三號

初版77年 7 月

定價 / 新台幣 280 元

版權所有 翻印必究

圖書編號 M 021029

譯序

磨削加工是一種古老的加工技藝，長久以來幫助人類解決生活所需的各種工具。由於磨削技術、磨削工具不斷的進步，及研究人員的努力，使磨削成為專業化的加工技術，更深入尖端科技的領域中，儼然成為精密加工的代名詞。

「尖端磨削技術」一書是由日本「工作機械技術研究會」集合各方面的磨削專家撰文編纂而成。包含精密陶瓷磨削、超音波複合磨削、磁氣磨削、適應控制磨削等先進的磨削技術及有關磨削的理論，對磨削技術做廣泛的討論，這些尖端技術雖尚未普及，但對今後磨削加工更進一步的發展，提供明確的趨向。

目前國內工業正值邁向技術密集產業的轉型期，無疑的，磨削技術的提升，在精密機械加工技術中是很重要的一環，本書的出版，希望能給從事磨削技術的工作者，提供觀念上的助益。

本書的譯作，力求與原意相吻合，所用譯名以部定機械工程名詞辭典為準，尚未訂定之名詞則儘量以合乎實際意義及順口典雅為度。例如，近年頗盛行的“creep feed grinding”一詞以“微速進給磨削”譯之，尚能詞暢意達。唯譯者才疏學淺，謬誤之處尚祈學者及先進們不吝指正。

1988年6月 譯者 謹識

序 言

「尖端磨削技術」是由日本東京大學等數十所著名大學，共推舉卅二位在磨削方面學有專才之博士，精心策劃完成之鉅著，甫於市面推出，即引起甚多磨削工作者之重視，本社科技編輯群幾經推敲，咸認為此書是國內機械工業輕型之良方，乃開始計劃投入出版之工作，並聘定黃舉錐先生譯稿，再由編輯群慎重討論後，於是中文版正式與國內讀者見面。

付印之前，數十家熱衷國內磨削教育之廠商，皆有感於本書之實用及獨特，乃慨然斥資贊助，使得內容更符合國內之須求，僅此向贊助廠商致萬份謝意及敬意！

科技編輯群 主編 林永憲

TYROLIT

研磨工具系列

嚴密篩選精品，科技結晶，行銷遍及世界各國

有了它，您的「**研磨工藝**」將如虎添翼，磨得淋漓盡致，無瑕可擊
它伴您，**磨**出信心，**磨**出樂趣來。



群錄

尖端科技的結晶・磨床業界的一大突破

CNC外圓磨床

高精度、高效率操作簡單易學，電腦自動砥石定位，並具砂輪自動補正可節省上下料的次數並滿足同心度之要求可作成型研磨。



本機為您

開發下列十種專用機能：

1. 端面研磨
2. 雙邊進給之橫面研磨
3. 單邊進給之橫面研磨
4. 橫面或錐面火花消失研磨
5. 擺動研磨
6. 錐面研磨
7. 強壓式橫面研磨
8. 砥石點復歸
9. 砂輪自動砥石
10. 砂輪及鑽石自助補正

*另有Angular Type CNC 外圓磨床，歡迎洽詢。

群錄KCI精密分度盤

滿足你任意角度之分割、高精度、低累積誤差（連續運轉2000轉其精度誤差約1°）



CNC伺服馬達控制器及驅動器

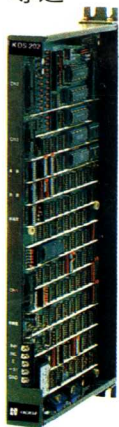
適用於分度盤、十字台、以及其他如：印刷機械、木工機械……等之精密定位。

Positionpack

Digital Command Input for Positioning

Incremental Absolute Command System 100 Kpps

KDS-202

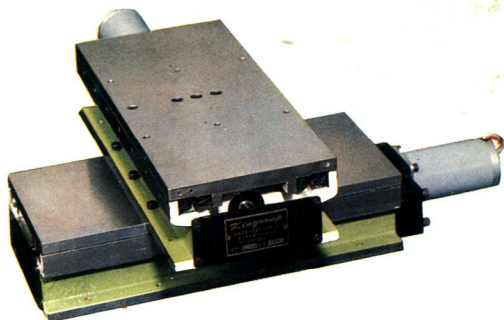


空氣、油壓缸用浮動接頭



群錄KCC精密十字台

適用電子裝配、平面鑽孔……、及機械加工。



群錄自動化工業股份有限公司

KINGROUP AUTOMATION INDUSTRY CORP.

台中市明德街明德巷26號
No.9, Lane 194, Chung Hsiao, RD.
Taichung, Taiwan, R.O.C.
TEL: (04) 2816565
TELEX: 57541 LICTON ATTN KINGROUP
BOX: 17,243 (台中) FAX: (04) 2877876

1

精密陶瓷的磨削加工

急需累積各不同材料的加工資料

從陶瓷工件的觀點來考慮磨削加工技術時，不論其加工方法、材料皆具有極悠久之歷史。但目前這種加工，還有許多新的重要的技術問題。然而精密陶瓷，包括構造用陶瓷作為工業材料，具有許多優越之特性。為了有效的利用其特性，必須建立產品化之加工技術。此情形在許多新材料的應用也會出現完全相同之問題。

構造用陶瓷磨削加工的困難點為，陶瓷具有高硬度、脆性及優越的高溫強度等，此為其他材料所未見之特性。因而，這些材料的特殊性質對研磨特性，呈現何種形態要做說明。這裏試著以磨削加工的高效率化、高精度化為基礎做評估。

一般的陶瓷材料內存有缺陷，是造成脆性破壞的起因，在加工中極易產生加工傷痕，這些傷痕常被認為是破壞的原因。如此有損工件強度的可靠性，所以考慮強度時不要忘了觀察加工面之表面狀況。

1 精密陶瓷的特性

一般所謂的陶瓷，種類繁多，而機械構造用之精密陶瓷，僅其極小的一部分而已。從加工特性的觀點看來，與一般的陶瓷有很大的差別。

這些材料主要是氮化矽、碳化矽、sialon、氧化鋯及氧化鋁等，具有高溫強度、耐熱性、耐蝕性及耐磨耗等特性。由於具有這些特性，對衆多的新材料而言，

2 尖端磨削技術

期望有更多新的技術來開發它。

這些構造用陶瓷，由於各個的特性不相同，所以其加工特性有很大的差別，而各材料依其燒結方法與燒結條件的不同也有差別。熱壓燒結或熱均壓（HIP）燒結處理的材料，其燒結成本較高，但質地緻密强度高，機械加工時工具易磨耗，加工性差。

常壓燒結或反應燒結，因為可燒結出形狀複雜之製品，將來之使用可能較多。前者在燒結完成時因收縮而會影響尺寸精度。而後者則氣孔率較高，燒結強度較低，所以，各有其問題。尤其是與加工有關者，提高前者在燒結後的尺寸精度，使燒結體的加工減少是今後之重要課題。

所以考慮陶瓷的加工時，不論陶瓷的種類，必須要把握其燒結法及材料特性。

2 磨削加工之問題點

構造用陶瓷，通常被用於砂輪材料的氧化鋁和碳化矽，其次為具有相等程度硬度的氮化矽等，以緻密的微粉體燒結而成，其最大的特徵是高硬度的脆性材料。因此，考慮加工方法時，不適用加工物塑性變形的加工法，屬於切削加工的大量除去加工法也行不通。

所以，現在使用最多的加工法是，利用微細破碎後除去的加工法，其中用鑽石磨輪的磨削加工，占有很大的比例（表1）⁽¹⁾⁽²⁾。

用鑽石磨輪對一般的陶瓷做磨削加工，不論加工效率、磨輪摩耗等皆可得到較好的結果，但對新的構造用陶瓷，磨輪摩耗非常大，且加工效率甚差。

究其原因，正如先前所考慮的，這些材料具有極高的硬度和強度，而成為脆性材料，到破壞為止所吸收的能量值比金屬材料低。因此，用磨粒把陶瓷工件逐漸打碎的方式，來選擇加工條件的話，應可實現有效率的磨削加工。

但目前對這些材料的磨削機構不十分瞭解，對此高硬度材料的磨削，加工機械和磨輪的剛性、精度也不十分清楚，故高效率的加工尚無法實現。且在高效率加工時，加工面難免有崩落（chipping）或裂痕（crack）等加工傷害發生，工件之可靠度降低，成為嚴重之問題。

另一方面，陶瓷在次微米的微小進給條件下，磨粒壓在加工面上滑動，會在加工面產生塑性流動⁽³⁾⁽⁴⁾，若積極引用這種加工條件，將減少加工傷痕，可得到高精度之加工面。因此，在陶瓷加工時，其效率、精度及可靠度為相互相反之要求，此為其困難點。

3 在加工例中的問題點與特徵

(1) 磨削切斷加工

磨削加工中，磨削切斷是微速進給（creep feed）的磨削，相當於切溝槽的磨削加工。用較薄的磨輪，切入深度大、加工物進給慢為其特徵。磨削中各個磨粒與工件的干涉狀態為，兩者之接觸長度 l ，磨粒切入深度 g ，磨粒間隔 a ，磨輪周速與加工物的速度分別為 V 及 v ，磨輪切削深度為 Δ ，磨輪直徑若為 D ，則可表示如下：

$$l = \sqrt{\Delta D} \dots\dots\dots(1)$$

表1 不同材料的加工方法(加工件數/問題點件數)

加工方法	材 料	成 品 或 半 成 品							計	
		電子零件用陶瓷	半導體	水晶石英玻璃	氧化鐵	瓷(含超硬合金)	機械構造用瓷*	切削磨工工具	計	%
切斷加工(用金屬鋸, SiC切斷磨輪等的切斷加工)		6/11	3/	3/	2/9	1/	12/20	6/13	33/53	7.0/5.3
鑽石切斷加工(用鑽石鋸, 鑽石切斷磨輪的切斷加工)		16/26	6/	7/8	7/28	4/10	29/83	10/19	79/174	16.8/17.3
磨削加工(用一般磨削磨輪)		6/9	2/	4/8	2/1	3/4	15/31	11/24	43/77	9.1/7.6
鑽石磨削(用鑽石磨輪)		15/35	3/2	4/5	5/19	10/28	30/138	16/50	83/277	17.6/27.5
研磨與搪磨		16/28	5/7	6/18	5/25	3/2	21/60	3/6	59/146	12.5/14.5
超音波加工		7/12	1/	2/14	1/5	1/1	14/30	2/3	28/65	5.9/6.5
放電加工		2/			1/	4/21	3/9	3/1	13/31	2.8/3.1
雷射加工		11/13	2/7		1/	/1	6/9	1/	21/30	4.5/3.0
其他(14種)**)		25/22	13/30	7/14	9/31	4/7	38/42	16/8	112/154	23.8/15.3
計		104/156	35/46	33/67	33/118	30/74	168/422	68/124	471/1007	

*) 引擎零件、熱交換器、機械軸封、模具、泵浦及閥零件。
 **) 加工件數小於20件以下者(搪磨、超精密加工、研磨布或紙加工、擦光、銑、拋光、液體噴射、線切割、電漿加工、電子束、放電、離子束、化學、電解等加工)。

$$g = 2a \cdot \frac{v}{V} \sqrt{\frac{\Delta}{D}} \dots\dots\dots(2)$$

在此磨削條件下，接觸長度為一般磨削的 10 倍左右，磨粒切入深度約為一般之 1/10，無法深切入，而增加滑動之情況，致使工件難以用有效的，破碎後去除切屑的加工方式。

因此，加工效率被認為比一般的研磨作業差。若不管磨輪切入量的大小，在磨削切斷加工的範圍內，選擇 Δ 與 v 可預測對磨削特性的影響。

圖 1 為熱壓製氮化矽的切斷加工，設定每單位時間的切斷面積為一定（ $\Delta \cdot v = \text{常數}$ ），顯示磨輪切入深度 Δ 與加工物速度 v 對磨削抵抗的影響。根據結果， Δ

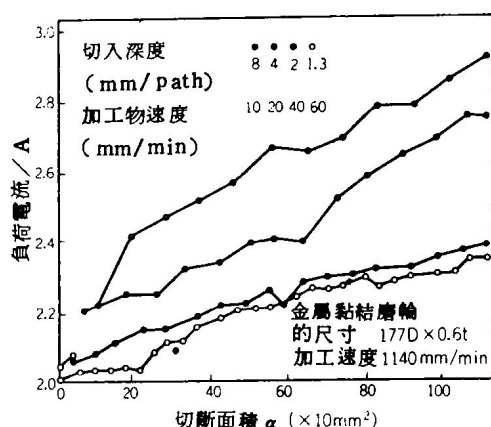


圖 1 用金屬黏結磨輪其切入量與加工物速度對切斷抵抗之影響

較小 v 較快時，切斷抵抗大幅減少，與先前的預測相當一致。

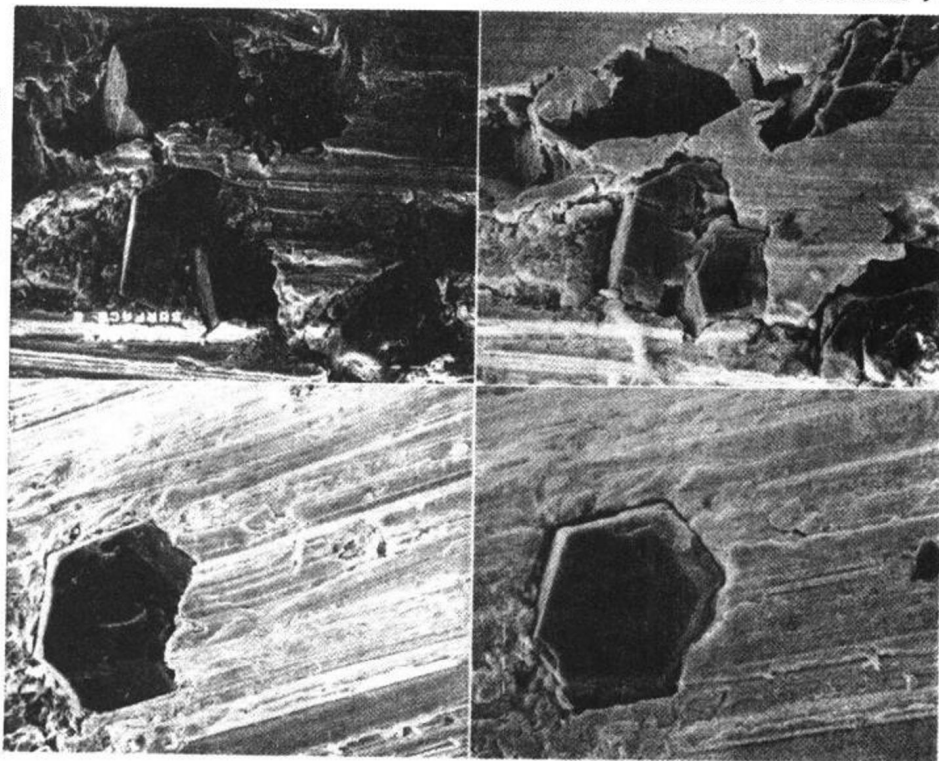
構造用陶瓷的磨削，由於其硬度與強

修整後

熱壓製氮化矽切斷加工後（切 496mm²）

磨輪外周面上的磨粒

磨輪側面上的磨粒



照片 1 金屬黏結鑽石磨輪表面的磨粒磨耗

度，鑽石磨輪的磨耗較早，在滑動為主的切斷加工時，磨耗更為迅速（照片 1）。因此，由於不可避免的磨削熱或磨削抵抗增加，而造成工件的微小崩落或裂痕發生，磨輪的修整作業很重要。

通常鑽石磨輪大多使用金屬黏結或樹脂黏結，使用前者磨粒的破碎性較差，黏結強固，可耐較大的磨削力。因切刃自生作用低，切刃易磨鈍，所以修整間之壽命很短。而且，不論整形（truing）或修整（dressing）皆甚費時。

針對此點，用樹脂黏結之磨輪，磨粒的破碎性較佳，修整間之壽命較長，磨輪之磨耗量則較大，磨輪側邊的磨粒也會產生磨耗，如此對加工性有很大的影響（照片 1）。圖 2 所示為在磨輪之側邊加間隙角，可避免磨輪側邊磨粒的磨耗，修整間之壽命大幅提高。

磨輪周速對切斷效率的影響亦可知，磨輪周速增加則負荷電流增加⁽⁶⁾，這與修整間加工量的降低也有關連。正如前述在深磨削時增加干涉狀態，因此認為磨削液

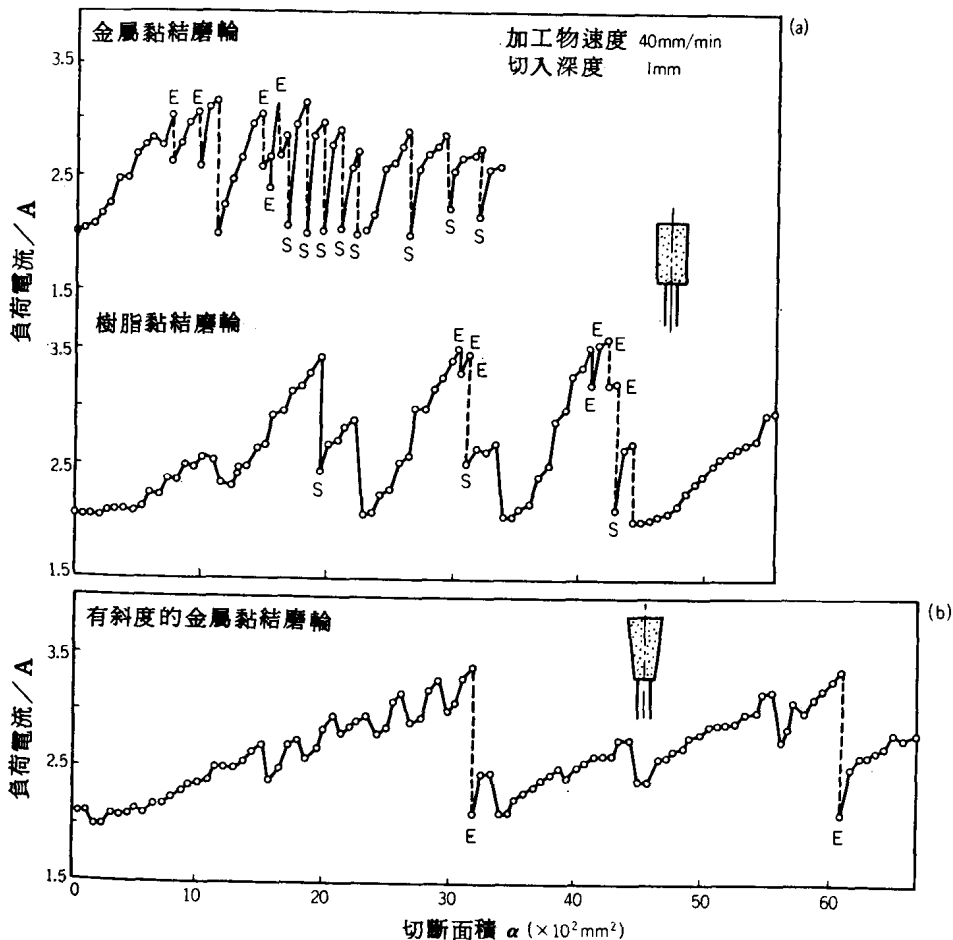


圖 2 磨輪的種類、形狀、修整方法與切斷抵抗

的效果也有密切關係。使用適切潤滑性與冷却性的磨削液，及將磨削液有效的噴至磨削點，可以有效的提高加工效率。

考慮工件的品質時，磨粒的磨耗會造成磨削熱或磨削抵抗增加，對品質有影響。以加工成本觀點，減少鑽石磨輪的磨耗為重要問題。

比起一般的陶瓷材料，構造用陶瓷的磨削加工，磨輪磨耗差了1至2位數之多，尤其是加工條件不佳的切斷加工，用樹脂黏結磨輪其磨削比值約數十～數百，其中用熱壓製成緻密的氮化矽，其值特低。但加工條件的影響很大，選擇最適當的加工條件，可望大幅提高加工效率。

2. 平面磨削加工

構造用陶瓷的加工法中，用鑽石磨輪

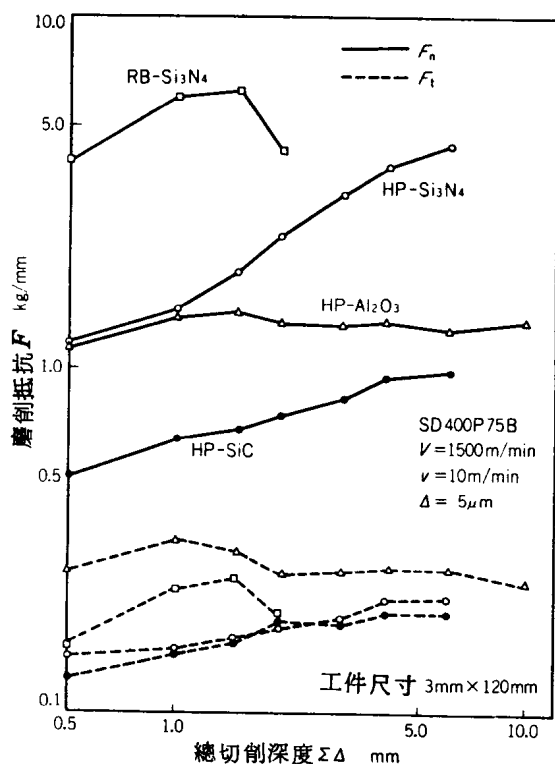


圖3 各種陶瓷磨削抵抗的二分力

磨削工件者使用最多，這種加工法在加工上還有許多問題存在。在磨削加工中，基本的問題點與前述的磨削切斷加工相同，磨削加工時做精修加工較多，必須考慮加工條件對加工效率、加工成本、加工精度及加工面特性的關係。

構造用陶瓷，已知其加工性差，磨削抵抗大。圖3、圖4所示為數種高強度陶瓷，其磨削抵抗的法線分力 F_n 與切線分力 F_t 及二分力之比 F_n/F_t ，氮化矽 (Si_3N_4) 的 F_n 值特別高，二分力之比值也最高。

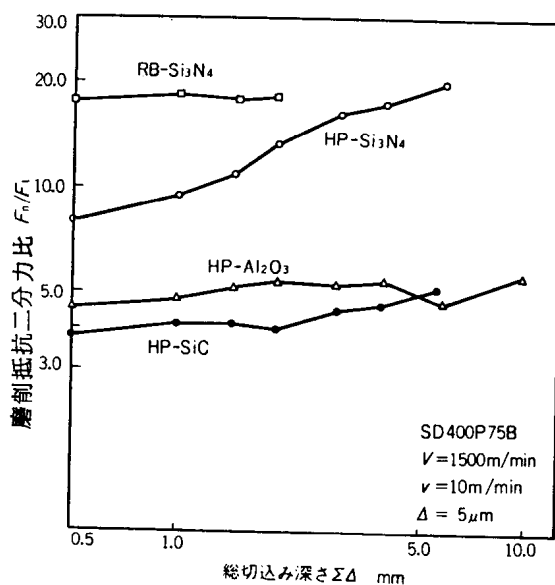


圖4 各種陶瓷磨削抵抗的二分力之比值

相對的，碳化矽 (SiC) 之值較低，二分力之比值約4~5，比起金属材料尚高很多。

材料硬度，碳化矽比氮化矽高，破壞韌性則氮化矽較高，磨削性除了硬度外，韌性也是影響很大的因素。

如此高的法線分力，從磨輪軸至磨輪及工件的支撐系統都會產生彈性變形，使

得磨削誤差增大，尺寸精度降低及發生振動現象。而且，磨粒無法對加工物做大量進給，也就無法用破碎去除的加工方式，加工效率降低。因此，要解決此項問題點，必須將整個磨削系統之剛性提高。

在構造用陶瓷的磨削加工，雖然，很明顯的要降低磨削抵抗，尤其是法線分力，但是，由於切削條件的不同，會使磨削抵抗有相當的變化。

圖5所示為氮化矽工件在平面研磨加工時，磨輪周速對磨削抵抗法線分力 F_n 、磨削比 G 及加工面粗度 R_{max} 的影響。在 $V = 800 \sim 2100 \text{ m/min}$ 的範圍，顯示隨 V 值的增加， F_n 大幅降低，磨削比則增加。這種趨勢在碳化矽中亦相同，因此磨削高強度陶瓷時，必須掌握磨輪的最佳周速，同時磨輪高速化後，磨削液的供給方法，及磨輪驅動力的增加等新的問題也必須解決。

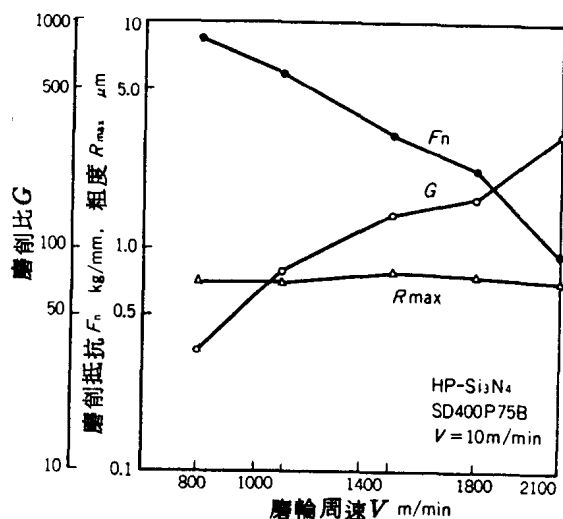


圖5 氮化矽的磨輪周速與磨削特性

另外，檢討這些磨削特性，對材料的磨削性做統一的評估。與磨削性有關之材料特性有硬度及破壞韌性 K_{Ic} ，其次考慮

抗拉強度與彈性係數，成為彈性能係數 $MOR = \sigma_t^2 / 2E$ ，試著用這些變數評估⁽⁷⁾。

根據數據在圖6可知， K_{Ic} 及 MOR 值與研磨性的關係，比硬度更為明顯⁽⁸⁾，高強度陶瓷的磨削性，尚無法用統一的模式說明。希望在這個領域的研究有更大的進展。

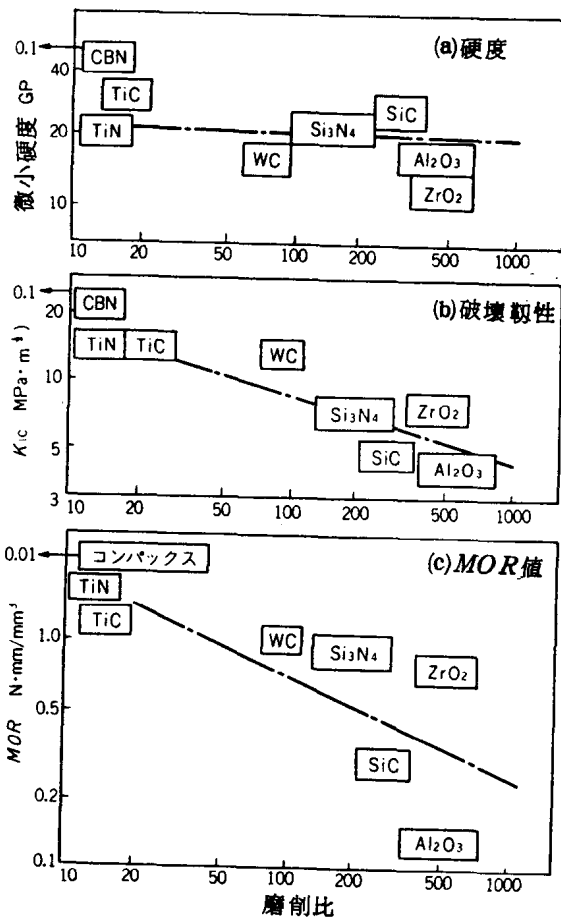


圖6 各種陶瓷的硬度、破壞韌性、 MOR 值與磨削比⁽⁸⁾

3. 鏡面研磨加工

用鑽石磨輪磨削陶瓷，以磨粒壓入工件使工件破碎及產生局部的塑性流動，利用此兩種機構除去切屑，形成加工面，兩

8 尖端磨削技術

種機構在切除的比例則隨加工條件變化。如構造用陶瓷緻密且高硬度的材料，用具有同級硬度的磨粒進行磨削加工時，大體上，加工面由微細的破碎及隨滑動產生的塑性流動所形成，一般認為可得到較佳之加工面。

圖7為熱壓製氮化矽材料，用氧化鋁系陶瓷黏結（Vitrified）磨輪進行磨削加工的例子，圖上顯示磨削次數對加工面粗度的變化。用氧化鋁系陶瓷黏結磨輪磨削這類材料時，磨粒的刃鋒無法做正常的磨削，刃鋒在前進方向會磨損，而無法對工件做正常之切削。隨著進給次數的增加，加工面壓力逐漸上升。

隨磨削次數的增加，工件表面粗度亦

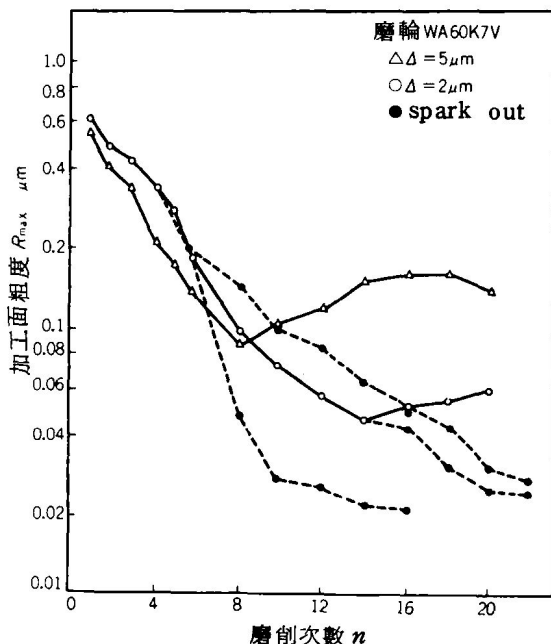
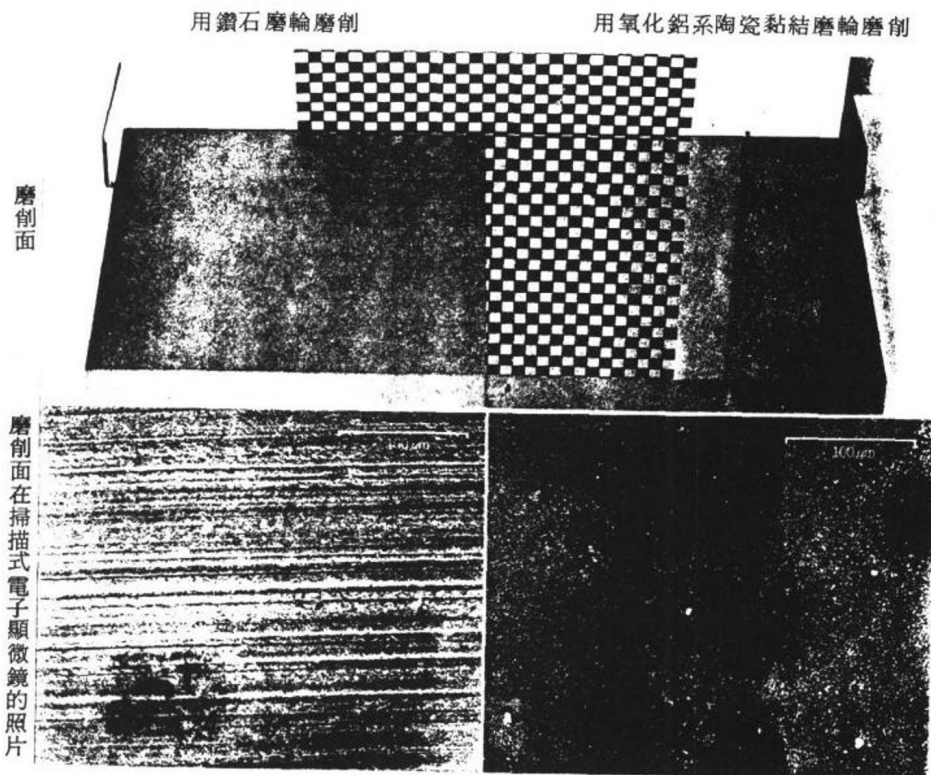


圖7 氧化鋁系陶瓷黏結磨輪對熱壓製氮化矽之磨削



照片2 用鑽石磨輪與氧化鋁系陶瓷黏結磨輪的磨削面比較

改進，但加工面壓力過高後，會發生崩落現象，使加工面惡化。所以欲得良好之加工面，加工面壓力要保持在定值以下。當表面精度提高後，造成 spark out 磨削使加工面壓力上升，加工表面有微細的塑性流動。如此可使加工面之表面粗度達到 $R_{\max} 0.02 \mu\text{m}$ 的程度。

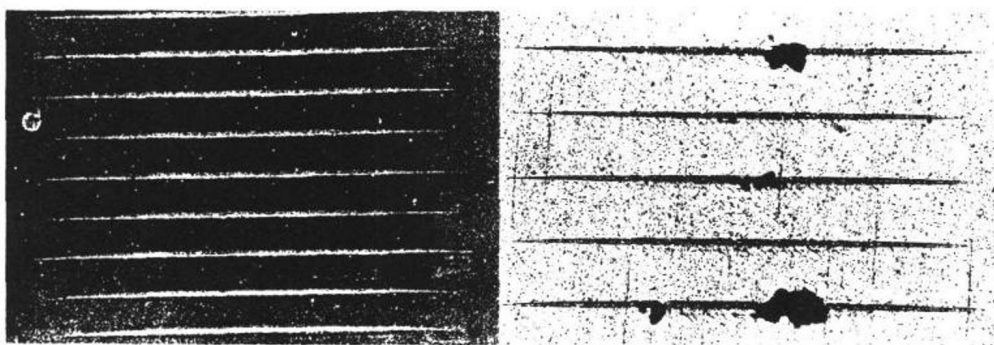
照片 2 為使用鑽石磨輪與氧化鋁系之陶瓷黏結磨輪，對熱壓製氮化矽磨削加工後其加工面之比較。用 SEM（掃描式電子顯微鏡）在加工面做微細之觀察後，認為兩者之磨削機構並不相同。依此方法加工其他材料，結果可能也相似，故咸認用氧化鋁磨輪磨削是較有效率之鏡面研磨。

4 加工面的強度評估

(1) 磨削機構

在此可以看出，加工條件對陶瓷的磨削特性有影響。為了提高陶瓷在磨削加工的效率、精度及可靠度，必須瞭解工件在這些加工條件下的磨削機構與加工後之表面特性。

由於陶瓷是脆性材料，加工時基本上以磨粒壓入及拉開，使工件產生微小破碎之切屑而除去，與金屬材料因塑性變形產生切屑而除去的方式，有極大的差別。此時工件表面會生成磨削條痕，同時依加工條件的不同在條痕下會發生裂紋⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。



照片 3 用單鋒鑽石對氮化矽（左）與碳化矽（右）的磨削條痕

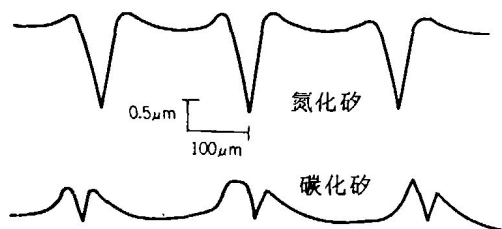


圖 8 用單鋒鑽石磨削氮化矽與碳化矽的條痕斷面

照片 3、圖 8 所示為用單鋒鑽石磨削氮化矽與碳化矽時，其磨削條痕及其斷面圖。

在碳化矽上，沿著條痕可見有崩落現

象及不少的裂紋，由此可知磨削特性因材料之不同而有差異。而且在任一條痕的旁邊，皆可看出有相當寬廣的凸起，認為是有塑性變形現象。在大部份的條痕內部有裂紋發生⁽¹¹⁾，因此為確保工件之可靠度，必須評估這些具有裂紋之加工面的強度

(2) 加工條件與強度

增加陶瓷材料之負荷時，材料內的任何缺陷，可能會生長成裂紋而產生脆性破壞，所以缺陷的存在對強度極為敏感。會成為破壞原因的缺陷相當多，有些在燒結

10 尖端磨削技術

過程形成，有些在燒結後的加工中產生傷痕。在發生破壞時，為判定是否因加工傷所造成，可觀察破壞的深度或方向等，依此而決定加工條件。

另外，討論加工與強度的關係，通常以加工面粗度與強度的關係來表示，因兩者關係密切，當表面粗度惡化時，顯示強度顯著降低⁽¹²⁾。但是，因加工而造成強度降低時，以表面粗度測定值作為表面傷痕深度的指標，並不足以解釋強度的降低狀況，因粗度計無法測出加工面下之情況，如照片3上顯現的裂紋也必須考慮。

而且，這些沿條痕的裂紋，會沿深度方向及橫向伸展，其中認為前者對強度的影響較大。所以，當裂紋成為破壞的原因時，磨削方向與外加的張力負荷方向有絕對的關係。

圖9為強度變化的例子，材料為熱壓製氮化矽，圖上顯示磨輪粒度與磨削方向

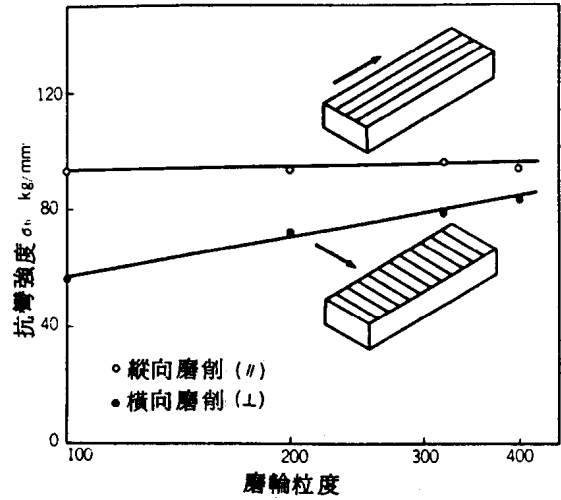


圖9 磨削氮化矽時磨輪粒度與磨削方向對強度的影響

對強度的影響。同一粒度所加工之表面粗度相同，粒度細者則可得到良好之加工面，故僅量測表面粗度，即可評估加工面的強度。但對加工傷害敏感之材料就有較大之誤差，由照片3可見對碳化矽的影響較大。

圖10中，使用碳化矽材料，與圖9

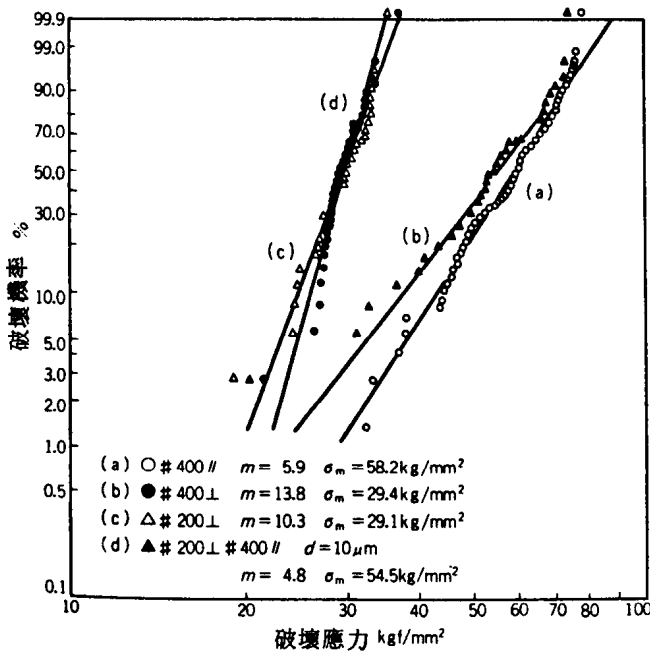


圖10 碳化矽的加工條件與強度

