

表面光潔度 與超精加工法

魏 振 蓀 編 譯

大東書局出版

本書共分九章，內容分爲：①工件表面光潔度的測定方法及加工後表面疵病的性質，如澇痕種類等；②討論表面光潔情況與工件損耗兩者間的關係及表面各種不同損耗的種類；③由表面光潔討論引入最有效的加工方法——超精加工法，再着重地介紹幾種超精加工的方法——如平面、圓孔、軸件等超精加工的方法；④約略地介紹一些超精加工的切削用量及加工時間等數據，作爲讀者應用時的參考；⑤敘述工件超精加工後的優點——如負荷力增加等，用試驗的結果來加以說明。本書讀者爲機械製造工作者——工人、技師、工程師等及大專機械系學生、技術學校學生等。特別適宜於工具機製造、引擎製造、柴油機製造、汽輪機製造及其他精密機械製造的工廠企業內的技工及技術人員參考。

魏振藻編譯 董太解校閱

1954年5月發排 • 1954年7月上海第一版

1954年8月上海第一次印刷(0001—2000冊)

書號：5156·30''×42''·1/25·80千字·416/25印張：定價9,200元

大東書局(上海福州路310號)出版發行

上海市書刊出版業營業許可證出043號 • 上海市書刊出版業營業許可證發061號

大東印刷廠(上海安慶路268弄17號)印刷

目 錄

一	工件加工後的表面光潔度	1
二	表面光潔度的測量	3
三	加工後表面疵病的性質	9
四	表面損傷的種類	13
	腐蝕的影響	14
	疲勞折裂與表面凹痕	17
	磨擦的損耗	18
五	表面光潔度與金屬損耗的關係	20
	作用壓力與工件外形	21
	黏合作用	21
	金屬延展性對黏合作用的影響	23
	切削工具的損耗	24
	表面光潔度的重要性	25
六	有效油膜層	29
	油膜層的發熱量	30
	空隙的影響	31
	表面光潔度、空隙及負荷容量	32
七	表面光潔度的選擇	34
	黏合發生時的臨界光潔度	34
	有效的“剗花”痕跡類型	38
	光滑的表面	41

八 最有效的表面超精加工法	44
潤滑劑及磨條規範	48
超精加工的循環	49
圓柱形的超精加工	52
磨石的整形通常有二法	53
工件形狀的校正	55
平面與球面的超精加工法	56
內圓的超精加工	59
以超精加工法進行檢驗	61
超精加工法與其他加工法的比較	62
超精加工的餘量及時間	67
九 表面不同光潔度的負荷試驗	70
1750 轉/分運轉速度時的試驗結果	75
軟性軸件在 200 轉/分時的試驗結果	77
試驗的其他結果	81
十 超精加工法在其他方面的應用	87
附錄一 光潔度的種類與等別表	
附錄二 光潔度的級別	
附錄三 (甲)各種不同加工方法的表面光潔度	
(乙)各種不同加工方法的表面質量	
附錄四 各種不同加工方法及使用不同工具對表面光潔度的影響	
附錄五 超精加工前及超精加工後工件表面光潔度的比較	
附錄六 選擇超精加工法的幾個經驗數據	

一 工件加工後的表面光潔度

工件機械加工後的表面光潔度，根據 ГОСТ—2789—45 的規定，以表面起伏(凹凸)度的乘方平均根值 H_{CK} 表示之。就是將工件表面上，一定長度內的各凹入及凸出的高度取其乘方和以長度除之，再開方，即得表面光潔度的乘方平均根值，見圖 1。

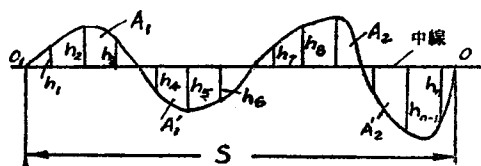


圖 1

先在工件表面上找得一大致使凹凸面積相等的中線，然後再從中線求得其各點的表面起伏(凹凸)度，即在下式中使：

$$A_1 + A_2 + \dots + A_n = A'_1 + A'_2 + \dots + A'_n \quad (1)$$

根據定義：

$$H_{CK} = \sqrt{\frac{1}{S} \int_0^S h^2 ds} \quad (2)$$

式(2)的近似值為：

$$H_{CK} = \sqrt{\frac{1}{n} (h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2)} \quad (3)$$

ГОСТ—2789—45 所列的表面光潔度標準，係自 $H_{CK}=100$ 的粗表面開始，以至 $H_{CK}=0$ 的最光表面。表面光潔度共分四大類：粗糙、半光、光及超光，每一類再分成不同的等別，共計可分 14 等，詳細數據見附錄

一。每一等別(自 3 至 13)再根據不同光潔度分成 a、b、B 三級,見附錄二。

各種不同的表面起伏(凹凸)度即決定工件加工的質量。因此根據各種機械加工的方法,不同的工藝過程和切削工具,便可得出一定的表面光潔度。附錄三及四所提供的資料,說明加工方法及所用的工具與工件表面光潔度的關係,可作選擇加工方法時參考之用。

二 表面光潔度的測量

測定表面光潔度的方法有多種：

1. 表面輪廓測形法 這是用針尖測出表面的凹凸形狀，求得其表面輪廓距中線的乘方平均根值，即 H_{CK} 。我們所常用的儀器有下列兩種：

(一) 表面測形儀 這種儀器專門用來測量工件表面的光潔度，如圖 2 a 及 2 b，由兩

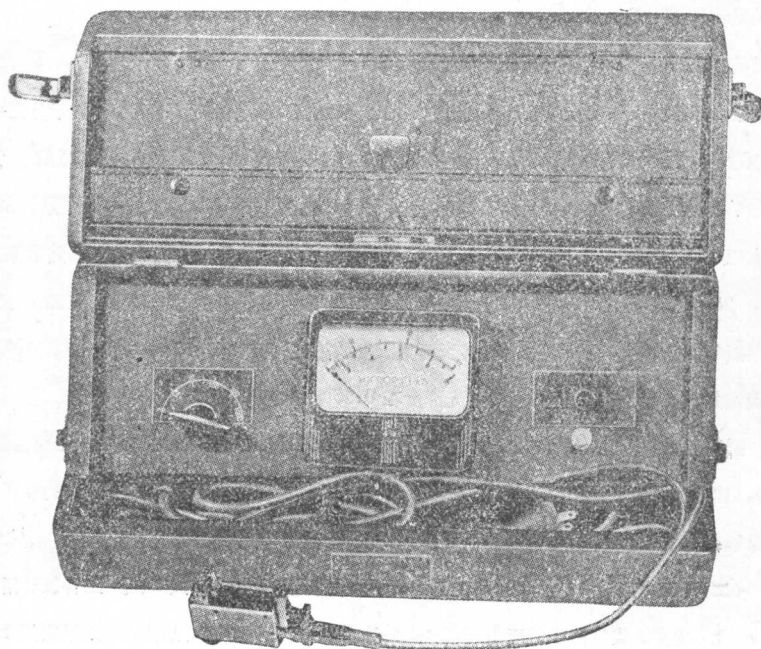


圖 2 a 表面測形儀

部份組成：描繪頭及擴大測定器。描繪頭依工件表面滑行，在兩圓鈕間置一小型鉛棒 C ，以精密彈簧薄片 D 加以支撐。在鉛棒露出的一端，置一 60° 錐尖的金鋼鑽，頂部圓頭半徑約 12μ 左右。金鋼鑽與工件表面相接觸，隨表面高低而起伏。在鉛棒另一端為一小型線圈 B ，隨金鋼鑽頂尖在永久磁極 A 間移動。因線圈在磁場的移動，產生微弱的電流，其強度與金鋼鑽尖端在工件表面上下移動的距離成正比例。由此產生的電流通過一柔軟電線 E 傳至擴大器，藉真空管的幫助加以強化，使一般精度的電表能加以測量。因所產生的電流與表面粗糙度成正比，故電表上的讀數可直接以公微（千分之一公厘）來表示。此項電表所表示的表面起伏度為乘方平均根值，與交流瓦特計所示者同。但此乘方平均根值並不代表表面的真正起伏度，由表中數值乘以 4 至 7 的係數，才能獲得正確的凹痕深度，以公微（ μ ）—1/1000 公厘表之。例如，表中讀數為 5μ ，事實上的表面凹痕深度為 20μ — 35μ 。測量不同直徑的工件時，僅須將描繪頭上的壓花螺帽加以旋轉，以調節金鋼鑽尖與圓鈕間的距離。一般車光面，其表面光潔度的讀數約在 100μ — 10μ 之間，磨削後的表面光潔度為 10μ — 2μ ；超精加工後，其光潔度在 0.25μ — 0.016μ 之間，詳細數據見附錄三。

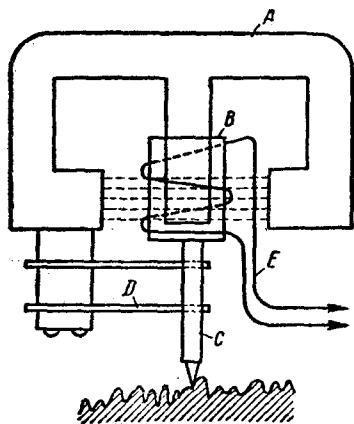
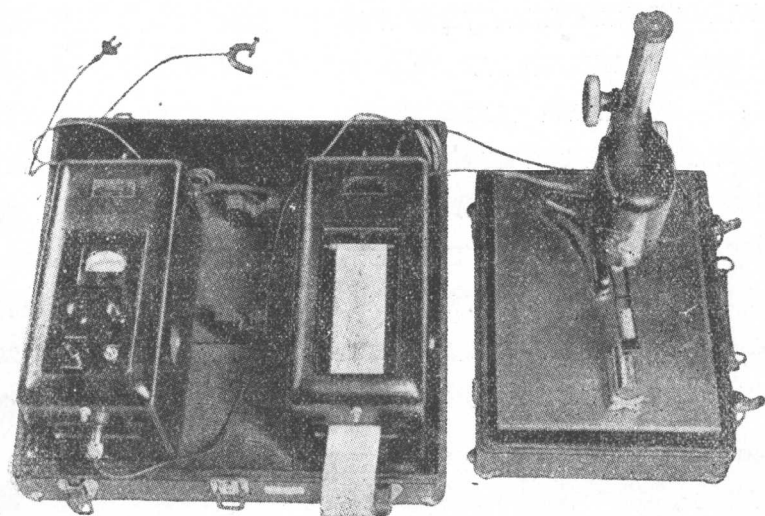


圖 26 表面測形儀

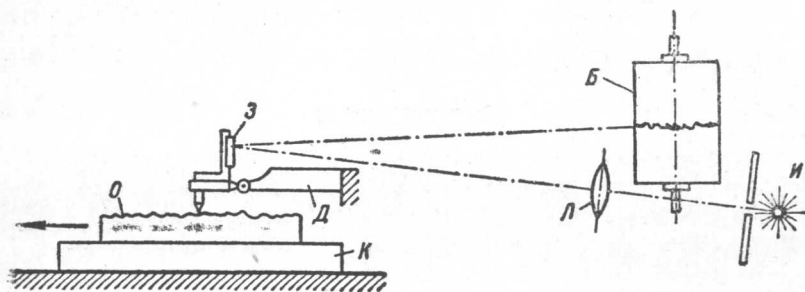
這種儀器的優點是測定表面光度時較為迅速，並且簡便；不但可以測量平面及圓柱面，並且可以測量直徑 13 公厘以上的孔面和齒輪牙面及花軸鍵等的表面。但帶有磁性的零件不能用這種儀器測量。測量時筆尖移動的速度，一般不宜超過 25 公厘/秒。

這種儀器的優點是測定表面光度時較為迅速，並且簡便；不但可以測量平面及圓柱面，並且可以測量直徑 13 公厘以上的孔面和齒輪牙面及花軸鍵等的表面。但帶有磁性的零件不能用這種儀器測量。測量時筆尖移動的速度，一般不宜超過 25 公厘/秒。

(二) 記錄測形儀 這種儀器又稱白氏表面分析儀，見圖 3a 及 3b。工件放在活動小櫃 K 上，描繪筆尖以極小的壓力（0.2~4 公分左右）沿工件表面滑動。描繪點筆尖用金鋼石或藍玉製成，尖端半徑約 10 — 15μ 。筆尖的上下移動使鏡面 3 發生角位移。光線自 H 經聚光鏡 A ，射在鏡面上，反射到感光紙轉筒 B 上。筆尖在工件表面的上下移動，使鏡面繞支點



(a)



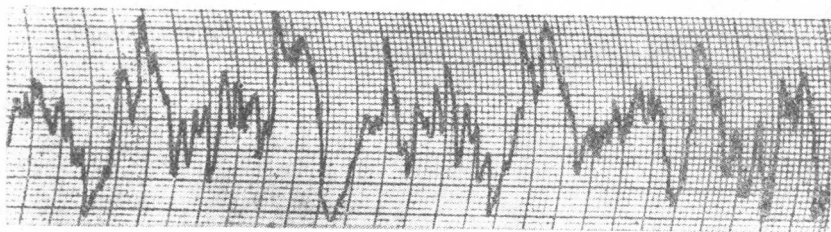
(b)

圖 3 記錄測形儀(白氏表面分析儀)

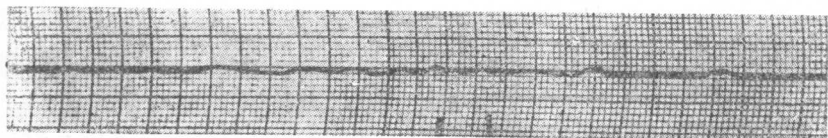
B 擺動，因此藉光線的反射，在感光紙上記錄出表面輪廓曲線。表面輪廓的放大比例可達 $2500=1$ 或 $8000=1$ 。其靈敏度達 0.025μ (表面起伏度)。這種分析儀有時不用感光原理，而將描繪點裝於單枚圓鈕上。因描繪點的移動使披亞氏晶體(Piezo Crystal)產生微弱的電流，經過真空管的擴大，電流傳至第二披亞氏晶體，這第二次的作用使記錄筆尖在紙條上移動

而繪出所需的曲線來，這曲線即表示所測工件的表面光潔情況，如圖 4 所示。這樣，使表面起伏度加以放大，並且具體記錄，作為研究之用。紙條上所印的每一方格即表示工件表面的單位起伏量。描繪點的動作由一偏心輪加以激動 (Actuate)，其總移動量一次可達 0.1 公厘。

上述兩種測定儀各有其不同的用途。表面測形儀僅簡單地讀出一數字作為表面光潔度的指標，而白氏表面分析儀則記錄出表面起伏的情況。在白氏儀上可加置一附件，以測得表面光潔度的乘方平均根值。由這兩種測定儀所得的表面光潔度，其絕對正確度頗難以肯定；但對兩工作表面的相對光潔度可有效地加以比較。兩種測定儀皆有一嚴重的缺點，即表面疵病如較數公絲為寬者，便無法在儀器上表示出來。以上二種儀器的描繪頭或筆尖在經一定次數的使用後，就要加以修正，否則即影響到測定的數值，同時在表面上亦留下一條細痕。



磨削後的工件表面



超精加工後的工件表面

圖 4 記錄測形儀

2. 光學測形法 就是用雙管顯微鏡或干涉儀，以光學方法得到工作表面的凹凸曲線。

圖 5 a 為光學測形法的原理示意圖。光線自光源 S 經狹縫射至工件表面，入射角為 45° ，由圖 5 b 便可明瞭，如在反射處以顯微鏡觀察，

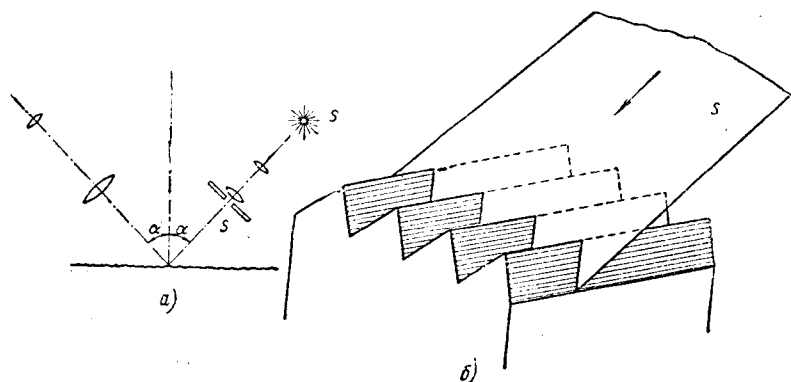


圖 5 光學測形原理

可獲得工件表面的起伏情況。在這種儀器中裝以鏡頭，便可照出表面凹凸情況的相片來，再藉顯微鏡中刻線與螺桿的幫助可以量得凹凸的高度。這一儀器的使用範圍以表面起伏度在 2μ 以上的粗表面為適宜；較細的表面，用這儀器測形時，準確性便要差些。干涉儀可用於測定精度較高的表面，圖 6 為干涉儀鏡頭的結構簡圖。中央兩片玻璃 M ，接觸的一面加以鍍銀，光線自 S 射入，一部份被反射，另一部份則透過玻璃片 M 而射至透鏡 O_1 ，再被精密鏡面 M_1 反射回來，經過玻璃片 M 時，又分成兩部份，其中有一部份反射至目鏡 Ok 。第一次自光源 S 來的光線一部份向下反射，經過透鏡 O_1 後

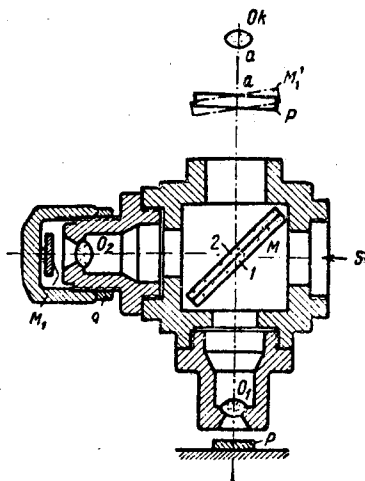


圖 6

至工件表面 P ，再向上反射，有一部份通過玻璃片 M_1 進入目鏡 OK 。因此經過適當地調節後，在目鏡處能看見兩種表面形像：一種來自精密鏡面 M_1 而另一形像則來自工件表面 P 。其放大倍數約 $40\sim 1000$ 倍。這樣光線分成兩部份，經過不同路程後再匯合，便發生干涉作用。所以我們在目鏡 OK 處觀察時，便呈現干涉帶的現象。如果干涉帶成為直線，這就說明工件表面為平滑面，干涉帶歪曲愈大，則工件表面的凹凸度亦愈大。這儀器的測量範圍極小，僅 $0.2\sim 0.5$ 平方公厘面積，並且需連續量 $5\sim 10$ 次，以取得適當的數值。測量的精度可達 $0.01\sim 0.02\mu$ ，故可用於規塊、量塊及卡規等表面光潔度的測定。

此外，在工場中尚可使用比較法以測定工件表面光潔度，即把工件表面與一定表面光度的樣件相比較，用放大鏡（一般放大五倍以上）、反射儀或氣測儀等來觀察。這種方法使用時較為簡單迅速，但常受檢驗者主觀判斷的影響，而使同一表面產生不同的檢驗結果，故僅能作為檢驗表面光潔度的參考方法。此外，我們尚須注意，樣件的材料需與工件的材料相同，否則便影響檢驗的正確性。

在實驗室中檢驗工件表面光潔度時，尚有將工件表面製成截面樣片來進行放大研究者，這種方法在實際使用時太麻煩，所以本書中不擬加以討論。

三 加工後表面疵病的性質

磨削為精加工方法之一，除卡規等工具外，都可用磨削來獲得所需的精確尺寸。無磨削便無法考慮大量生產及機件互換等問題；但磨削後的工件，表面上常留下許多為實際上應用時所不容許有的痕跡。最常見者如圖 7 所示，軸形工件上的螺旋形磨痕，由許多脊痕(Ridges)組成。磨床工作者對這類脊痕很熟悉，其深度可用指尖測知。除了上述斷續的螺旋痕以外，磨削面上尚有一種較長節距的波狀痕跡。這種磨痕無法用普通的表面測定儀(如前節所述的表面測形儀或白氏表面分析儀)來測量。它的產生主要由於磨床機件的鬆動，準確度不足，金屬磨削時所發生的熱量等因素造成。例如，磨軸鬆動可能造成間隔不均的“平痕”，頭架傳動不正常可能產生表面平行磨痕；冷卻液不足可促使產生進刀螺旋痕。幾乎所有磨床，或多或少地可能產生上述幾種磨痕的一種或多種。

磨削工作雖為一種精加工方法，所磨去的工件餘量較少；但磨削進行時，動作相當劇烈，所需馬力亦相當可觀。因為磨粒切削時為負傾角作用，切削效率頗低，而結果使接觸線處發生大量熱量，一般約為 700°C 左右至金屬的熔點止。切削液的應用可使熱量儘速散去；但並不能阻止其產生。工件表面層常因磨削時高熱的發生失去其一部份熱處理後應有的效用。這種磨削“燒灼”現象所影響的深度約自數公絲至數十公絲不等，視磨削情況而定。

螺旋形磨痕的發生，係因磨輪的前導邊緣部份在磨削時較其後邊

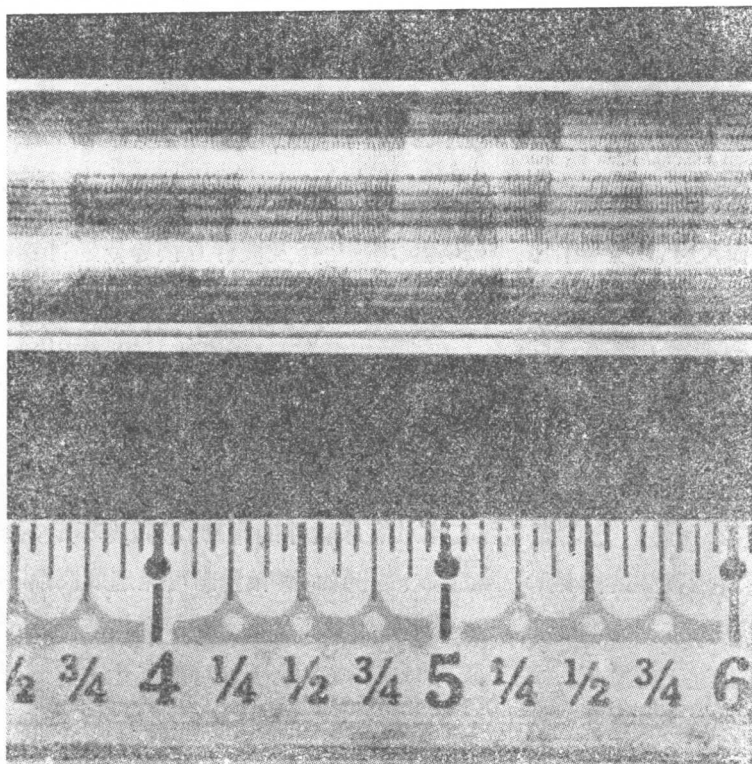


圖 7 磨削後的表面稍經超精加工即顯露出各種脊痕、震痕及進刀痕等

的平面部份，磨削更為劇烈；因此，這部份所產生的熱量更多，使工件接觸部份向直徑及軸綫二個方面膨脹和伸張，以致工件面上與磨輪角接觸的螺旋線部份被磨去較多。冷卻後，這部份又縮回到原來尺寸，產生凹陷現象，較一般表面略低。這就是進刀螺旋磨痕產生的原因。其補救的方法為，將冷卻液噴射處愈近磨輪與工件接觸處愈佳，藉以降低熱量；但終無法完全消除這種磨痕現象。

另一因磨削時高熱而產生的影響，為表面剩餘應力。當磨輪與工件

的接觸線產生高熱後開始向各方
向膨脹；但因工件內部較冷，阻止
其向內伸張，故唯一可能是向外
擴張。工件冷卻後，開始收縮，因
此，表面層受到拉張應力的作用。
疲勞折裂常自這種表面損裂處或
應力集中處開始。如表面應力為
拉力，則耐疲強度便等量減弱；反
之，如表面應力為壓力，則耐疲強
度反而等量增加。磨削結果所產
生的應力往往為表面張力，其嚴
重情況常超過工件材料的拉力強
度，因而直接促使裂紋的產生，如
圖 8 所示。這就是一般硬化鋼
件，磨削後所產生的表面裂紋。
此外，磨粒角度的不確當，亦可造
成工件金屬內部結晶體構造的變
化。工件表面常有因切削而產生
的一層結構較鬆的薄層，在磨削
時，這層金屬顆粒便產生磨擦作
用而增加空隙。如用細粒硬質砂
輪，常產生高熱而使工件表面層
膠塑化。這樣，甚至可使工件表面
突起部份擠入凹陷部份，而促成
金屬表面金相結構的變化。總之，

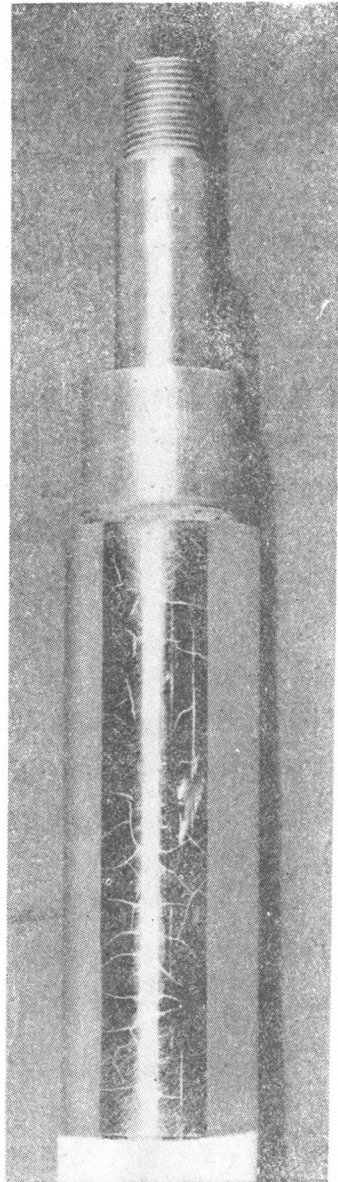


圖 8 磨削時受熱而產生的表面裂紋，經超精加工即行顯露

無論任何工件，經過磨削後，可能產生下列各種表面疵症中的一種或多種：

1. 短節矩幾何形疵病，如磨削脊痕等。

2. 長節距疵病，如震痕、螺旋進刀痕、平面磨痕及其他因機床準確性不足而產生的表面痕跡。

3. 因磨削產生高熱而促使金屬表面層金相結構上的變化，如一般所熟知的“表面燒灼”現象等，甚至所產生的熱量可使金屬表面層達到膠塑性滑擠的程度。

4. 因磨粒切削角度的不當，表面可能產生扯裂現象，即一般所稱的片化或碎裂現象。

磨削為精確加工方法之一，並且對於硬化工件，這方法為惟一最有效的加工方法；但是由上述情況觀之，磨削後的工件表面實有繼續加以改進的必要。

四 表面損傷的種類

最先對於摩擦理論加以研究的，為公元1700年左右的亞門頓氏。他的結論為：“摩擦力與接觸面積無關而與接觸面上所受的壓力（或動體的重量）成正比例。摩擦阻力的產生係因接觸表面的起伏不平所致，因此，摩擦力的大小與表面光潔度直接有關”。近數十年來對於亞門頓氏的學說已逐漸重視，因此，對於工件表面光潔度的要求亦不斷提高。工件表面光潔度提高後，立即產生了另一種奇特的現象，即湯林生氏在1920年所發現的“摩擦力的產生係分子相互接近時所發生的一種吸引力所促成”，如圖9中規塊因分子間引力而被吸住。最後1935—1939年間保登氏用各種試驗證明金屬摩擦為經常變動的情況，細小的金屬表面顆粒有一時期黏附在一起；但繼續使用外力後便開始滑動與分離，直至另一黏附現象產生。他稱這種現象為金屬表面的不斷黏離作用，並且在滑動時期可能忽然產

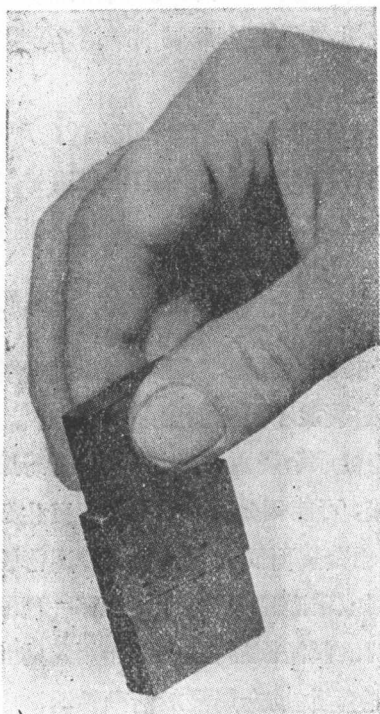


圖9 規塊因分子間的引力而被吸住