MOIRE INTERFEROMETRY在結構構件熱變形量測與分析之應用

MOIRE INTERFEROMETRY ON THE THERMAL DEFORMATION OF STRUCTURAL COMPONENT

吳肇哲，林世勇，Robert Czarnek
J. J. Wu, S. Y. Lin and Robert Czarnek

原著載於中華民國第二屆結構工程研討會暨國科會工程處
結構工程專題研究成果研討會論文集(一)
1994年11月，291~300頁
Reprinted from Proceedings of The Second National Conference on Structural Engineering
Nantou, Taiwan, R.O.C.
November 4-6 1994, pp.291~300

Moire Interferometry 在結構構件熱變形量測與分析之應用

吳肇哲[1] 林世勇[2] Czarnek, Robert[3]

關鍵詞：Moire Interferometry，結構構件，熱變形場，高解析

摘要

本文主旨在提出Moire Interferometry於加溫環境下之應用。首先就可耐高溫之光學量測系統介紹其設計觀念及所克服之困難。隨後以切削刀頭作為試片，模擬一般由不同材質組合之結構構件，在加溫過程中表面熱變形之量測。實驗結果顯示，不同材質間存在顯著的變形不連續及應變集中。同時，清晰穩定的干涉條紋證明此實驗系統的穩定性。最後，採用高解析資料分析方法取得應變分布。本文結合高溫Moire及高解析資料分析方法之優點，將可為加溫環境中，結構構件之研究提供有力的量測分析利器。

1. 前言

隨著結構構件在溫度環境下之廣汎應用及新材料之開發，如複合材料以其輕質且具高操作性能或高溫抵抗性而廣受重視、或如結構補強時採用不同材料之搭接構件(Lap Joint) 研發等等。充分了解其力學行為，是提升至應用層次必經之路。因此，一種能提供精密量測與分析的研究方法，對於結構構件之開發與設計具有關鍵地位。

Moire Interferometry 是一種於室溫環境下，被廣泛應用於固體力學領域的光學量測技術[1,2,3]。具有高敏感度（High Sensitivity），高解析度（High Resolution）及全域（Full-field）之平面變形（In-Plane Deformation）量測能力。同時，其容易解讀(Easy-to-interpret)且具高對比（High Contrast）的干涉條紋（Interferogram）均為其他機械或光學量測方法所無法兼具。

在考量其引人的特點，一些研究人員[4,5,6,7,8]試著將其應用至溫度環境(Elevated temperature)，但由於實驗系統的不穩定及試片光柵的抗溫能力不足，使得突破極為有限。直到最近，在文獻[9,10] 成功地將 Moire Interferometry 發展至980℃高溫，證明其在高溫環境下之適用性。本文將就此新的高溫 Moire系統，簡介其設計概念及所克服之困難，並應用至結構構件熱變形之量測與觀察。進一步，本文引進高解析資料分析方法 (High Resolution Data-Reduction)，解析變形場，取得全域應變場。結合此量測新技術及分析新方法以作為結構構件研究新利器。

2. Moire Interferometry 基本原理

---

1 亞新工程顧問公司結構工程師

2 Engineer, CTC, Johnstown, PA

3 Senior Engineer, CTC, Johnstown, PA

Moire Interferometry 是以光波間干涉現象產生條紋為基礎，發展出之光學量測技術。圖一簡示基本Moire系統之操作原理。當二束平面光波（Collimated Beam）A及B同時投射至含有光柵（Grating）之試片表面（平面）。此試片光柵將隨著試片平面承受外力產生之變形而改變光柵頻率，同時改變繞射光波之波前（Wavefront），分別為A'及B'。其中A'為光波A產生之正一繞射波，B'為光波B產生之負一繞射波。A'及B'於試片平面法線方向互相干涉，產生干涉條紋（Fringe Pattern）。此干涉條紋代表著試片變形等高圖（Deformation Contour Map）。變形方向垂直於試片光柵格線方向。

分析計算時，每一條紋被指定一個編號（Fringe Order），二條紋間距表示試片上對應之二點有一個敏感度單位之變位差異。在Moire系統中確立入射光波之波長及入射角度，即可定出系統之敏感度。在VPI & SU之Photomechanics Lab， 1200 lines/mm之試片光柵及敏感度417nm是普遍採用。

針對上述系統，公式（1）定義出條紋編號，變形量及試片光柵頻率之關係

$$U = \frac{N}{2fs} \qquad \text{公式（1）}$$

其中，U為變形量, N為條紋編號， fs 為試片光柵頻率。

延伸上述一維變形量測觀念，可組合出無限多種二維量測（In-Plane Measurement）系統。通常，如此之系統是以雷射為光源，產生平面光波，經光波路徑安排成四個（二組）平面波，於適當的照射角度下，照射在含垂直光柵(Cross Grating)之試片，分別取得水平方向及垂直方向之變形量。由於Moire系統具有高敏感度，相對地，振動源的影響亦極為敏感。所以，整個系統多半設置在大而重的實驗桌面（Holographic Table）以達到絕緣地面傳送的振動。如此系統，即使由任何一個光學元件產生之微小振動都會影響到實驗結果。尤其在試片承受溫度負荷時，熱對流（Convection Thermal Current）會影響光波路徑（Beam Path），造成系統之不穩定，甚至影響鏡片之收縮，而產生無法預知之誤差。

因此，應用Moire Interferometry至溫度環境時，主要的困難，包括系統的穩定性，試片光柵的耐溫能力及隨著高溫所產生之條紋對比損失（Contrast Loss）等問題之克服。

3.高溫Moire 系統

為了達到系統之穩定性，設計之觀念從 Moire 系統(Interferometer)之選擇及實驗環境（Testing Environment）設計二方面著手。由於Achromatic 系統 [11]相較於傳統系統有較強之振動源抵抗性，因此被採用為高溫Moire 系統以消除振動之影響。設計時儘量加大鏡片與試片間距離，以減輕熱影響，同時保持整個系統之精簡(Compactness)。

另一個重要觀念，是採用眞空實驗環境以克服熱對流之影響。 亦即，設計一個眞空室（Vacuum Chamber），將整組系統置於室中，於室外並以機械幫浦抽取室內空氣，以達降壓效果。因此，於加溫環境中，熱對流對設備及鏡片之影響可被隔除，同時可防止干涉條紋隨著熱對流而舞動。

圖二簡示系統之配置及光波路徑之設計。由於系統本身對於入射光源之輕微移動並不敏感，因此，設計上可將雷射及部分光學構件置於眞空室外，以進一步精簡系統空間，同時便於實驗之操作。

配合新開發的耐高溫試片光柵製造技術，及運用適當的濾鏡(Filter)消除高溫所產生之對比損失。此一高溫Moire系統，成功地推展到980℃的高溫領域[10,11]。

4. 應用 - 結構構件熱變形量測

切削刀頭(Cutting tool bit)，幾何如圖三所示，是由至少三種以不同材質組合而成，亦即，碳化鎢(Tungsten Carbide),鋼鐵及銅合金。切削工作中，隨著逐漸升高的溫度，於不同材質界面附近產生熱變形差異及形成應變集中是可預期。界面附近是重要研究區域。

應用在一般熱變形量測，應變計是最常使用。但其僅具有量測點附近之平均值（Single Value），對於如複合材料或構件搭接等問題往往需較多的資料時，在量測功能上是不能與具有全域、高對比、高敏感度之Moire 相比。而材料的缺陷(Defect)或脆弱區往往不可得知，此時全域的量測功能，更加重要。本文 選取切削刀頭作為試片，模擬一般由不同材質組合之結構構件，承受熱負荷時，表面熱變形之量測。

4.1 試片準備

試片是從商用切削刀具，切出端部，將之磨平後，選用頻率1200條/mm之光柵複製（Replicate）至試片表面。試片尺寸長為 2.54公分，寬為 0.625公分。

圖四簡示複製程序。首先以光柵為母模，將其以眞空電鍍(Vacuum deposited)上一層金屬薄膜，厚度大約在100A（Angstrom）之位階。對於300℃以下之測試，鋁是最佳薄膜選用材料，以其具有低成本及高光反射係數（Reflectance）等特點。

由於實驗溫度在200℃至300℃，母模及試片間接著劑的選擇是以二成份環氧樹脂類接著劑（Epoxy Adhesive）接合母模及試片，並施加重物以控制樹脂之厚度。為了保持試片光柵邊緣的完整性，於樹脂凝結過程，充分清除溢出之樹脂是必需的。待樹脂凝結，即可剝離母模，將光柵複製至試片表面。

隨後將含光柵之試片置入試驗室（High-Temp Moire Interferometer），以機械幫浦抽至0.1 torr之低壓後，逐漸加溫，並記錄試片在不同溫度下之變形。

4.2 熱變形量測與分析

圖五A及圖五B為二代表性熱變形條紋等高圖，分別表示在219℃下水平方向變形場(Horizontal Deformation, or U-Field）及垂直方向變形場（Vertical Deformation, or V-Field）。

此項實驗，量測系統敏感度設定為417nm，亦即，只要試片有微小變形，即使如417nm亦即清楚地被觀察、定義。從水平變形場及垂直變形場可清楚發現，於碳化鎢/鋼鐵，鋼鐵/銅合金及銅合金/碳化鎢界面間存在顯著的變形不連續及應變集中。定量上，可分別從水平變形場及垂直變形場讀取條紋編號換算相對應位置之相對位移量。

$$U(x,y)=\frac{N_x(x,y)}{2fs} \qquad \text{公式（2.A）}$$

$$V(x,y)=\frac{N_y(x,y)}{2fs} \qquad \text{公式（2.B）}$$

其中，$U(x,y)$及$V(x,y)$分別為水平及垂直方向變形量，

$N_x(x,y)$及$N_y(x,y)$分別為水平及垂直方向條紋編號。

平面應變分量(Components)包含了三項，亦即，正向應變（Normal Strain）ε_x，ε_y及工程剪應變（Engineering Shear Strain）γ_{xy}，分別可從應變-變位關係式取得

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} \qquad \text{公式（3.A）}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} \qquad \text{公式（3.B）}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \qquad \text{公式（3.C）}$$

如圖五A所示，相同水平距離ΔX的兩點，於界面附近，相較於其他區域，有較多的 ΔNy條紋差異數，i.e., ΔNy / ΔX 較大。 同樣的，於圖五B中，相同垂直距離ΔY的兩點，於界面附近，有較多的 ΔNx條紋差異數，i.e., ΔNx / ΔY 較大。亦即剪應變γ_{xy}分量（Shear Strain Component）在加溫過程顯著增加。

穩定、高對比的條紋再次確認高溫量測系統的穩定性，亦即，振動源已有效隔離，同時，加溫過程產生之熱對流所造成的條紋模糊，已被排除。於此變形等高圖中，清楚記錄平面上各點之變位，方便資料的準確讀取分析。此實驗結果展示高溫Moire系統的功能，及其平面量測的應用性。

除了高溫應用性之研究，本文另一主要目的是結合此量測新技術與由Czarnek[12,13,14,15] 所領導之研究群近幾年所發展出的高解析資料分析方法，解析取得全域應變場。於此，作一整合介紹。

5. 高解析資料分析方法（High-Resolution Data Reduction Techniques）

基本上，Moire Interferometry 能提供至 417nm的敏感度及 100nm的解析度。 事實上，這些都是在考量光源效率，及系統精簡的一種最佳組合。對於低密度的條紋型式（Low-Density Patterns），譬如殘留應變(Residual Strain Analysis)分析，及較小的分析區域，為了減少分析誤差，較高解析的資料分析方法是需要的。

一種所謂高解析資料分析方法最早是由 Czarnek 及 Lee[12,13]所發展。 最近由Czarnek 及Lin[14,15]加強，主要是藉由加入資料平整（Data-Smoothing）的觀念，以去除在數位讀取（Digitizing）過程，人為誤差所引入之不均勻性，藉著數位讀取輕微過度曝光的條紋，如此解析度可提昇至20nm。 此法成功的解析出Cruciform 試件之不均勻性[15]。

本文以此切削刀頭端部(Carbide)熱變形為例，解析取得全域應變場。簡言之，為了使用此法，實驗過程中，將黑白底片輕微過度曝光使干涉條紋寬度變細，而使得數位讀取條紋中點位置，具有最高解析值及精確度。 此外，同時加入適當的旋轉頻率條紋（Rotional Carrier Fringe），如圖六A及六B 所示，增加資料點的讀取。

數位讀取資料（Digitized Data）中包含每點之座標及條紋編號，而於接近介面附近，增加取點密度。分析過程是建立在有限元素觀念，首先以網格自動產生程式（Auto-Mesh Generation Program）產生三角元素，如圖七 所示。

資料平順化的觀念，是視每一節點都有彈簧束縛，因此，當產生平面變形時，理論上，變形曲線應呈某種程度的平順。基於此觀念，可設定一準則，去刪除特異點，如讀取資料人為引入之誤差，減少資料散布，而達平順資料，如此，材質中之不均勻性更易辨識（Resolution of Nonhomogenity）。

平順化之應變等高圖ε_x，ε_y 及γ_{xy} 如圖八A, 八B 及八C 所示。值得注意的是，在應變圖中，由於人為所造成之誤差已被大量減少。量測之正向應變ε_x為140 μm/m 至 2580 μm/m，ε_y為180 μm/m 至 1980 μm/m及剪應變γ_{xy}為 -2090 μm/m to 1980μm/m。

此例展示此全域分析方法(Full-field Hybrid Method)對於應變分析之優點，譬如分析過程無需知道材料性質，同時解析能力可提高至20nm。如果知道材料性質，可由應力-應變關係式輕易取得應力場。

6. 結論

本文主要在介紹Moire Interferometry發展之新技術，同時將其應用至結構構件熱變形之量測與分析。實驗結果顯示，清晰穩定的條紋確認系統之設計概念，如Achromatic Interferometer 及真空實驗環境之採用。而全域、高敏感度、高解析的變形等高圖，清楚記載材質界面間熱變形差異。藉由高解析資料分析方法，解析出全域應變場。分析資料顯示，對於此類結構構件的設計使用，需特別留意界面間熱應變集中。

本文結合高溫Moire及高解析資料分析方法之優點，隨著結構構件在溫度環境下之廣汎應用及新材料之開發，將可為其加溫環境中，承受熱負荷、疲勞負荷或機械負荷之研究提供有力的量測分析利器。歸納而言，此方法學具有比980℃更高溫的穩定量測系統、417nm的敏感度及20nm高解析能力。

未來研究方向著重在更廣之溫度範圍下，對於加熱系統及機械負荷施加夾具之設計，以進行耐溫結構構件力學行為之了解。此外，影像處理技術（Image Processing)可使試驗之觀察與分析達到真實（Real-Time）亦為另一研究興趣。

於應用例中，實驗溫度在220℃左右，對於更高溫的測試，於此提供試片光柵準備方式建議表，附於表一。

7. 參考文獻

1. Sciammarella, C.A., "The Moire Method-A Review," Experimental Mechanics, Vol.22, No. 11, pp.418-433, 1982.
2. Czarnek, R., "Structural Testing, A Monograph for the Society for Experimental Mechanics-Moire Interferometry", Editors: R.T. Reese and W.A. Kawahara (In press).
3. Patorski, K., "Moire Methods in Interferometry," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 8, pp.147-170, 1988.
4. Bowels, D.E., Post, D., Herakovich, C.T. and Tenney, D.R., "Moire Interferometry for Thermal Expansion of Composites,"Experimental Mechanics, Vol. 21, pp. 441-447, 1981.
5. Kang, B. S.-J., Wang, F.X. and Liu, Q.K., "High Temperature Moire Interferometry for Use to 550 C," roceedings of the 1990 SEM Fall Conference, 25th Anniversary Edition, Balitimore, Maryland, pp.457-464,1990.

6. Forno, C., "Welds at High Temperatures Studied by Moire Photography," Welding and Metal Fabrication, Vol. 46, No. 10, pp. 661-667.
7. Sciammarella, C.A. abd Rao, M.P.K., "Failure Analysis of Stainless Steel at Elevated Temperatures, "Temperatures," Experimental Mechanics, Vol. 19, No. 1, pp. 389-398, Nov. 1979.
8. Cloud, G.L. and Bayer, M., "Moire to 1370℃," Experimental Techniques, Vol. 12, No. 4, pp. 24-27, 1988.
9. Czarnek, R., Wu, J.-J., Lin, S.-Y. and Lee, J., "High Temperature, High-Sensitivity Moire Interferometry," Experimental Techniques, May/June, 1993.
10. Wu, J.-J., "Moire Interferometry at High Temperatures," Ph. D Dissertation, Engineering Science & Mechanics Department, Virginia Polytechnic Institute & State University, December 1992.
11. Czarnek, R., "High-sensitivity Moire Interferometry with a Compact Achromatic Interferometer," Optics and Lasers in Engineering , Vol. 13, No. 2, pp. 99-115, 1990.
12. Czarnek, R., Lee, J. and Rantis, T., "Moire Interferometry with Enhanced Resolution," Experimental Techniques, Vol. 14, No. 4, pp. 24-28, 1990.
13. Lee, J., "High Resolution Interferometric Measurements of Residual Strains in Composites," Ph. D Dissertation, Engineering Science & Mechanics Department, Virginia Polytechnic Institute & State University, December 1990.
14. Lin, S.-Y., Czarnek, R. and Lee, J., "INtefration and Processing of High-resolution Moire Interferometry Data," Proceedings of the 1991 SEM Spring Conference, Milwaukee, Wisconsin, pp. 513-518, 1991.
15. Lin, S.-Y., "Intefration and Processing of High-Resolution Moire Interferometry Data," Ph. D Dissertation, Engineering Science & Mechanics Department, Virginia Polytechnic Institute & State University, May 1992.

Moire Interferometry On the Thermal Deformation of Structural Component

Wu, Jau-Je[1] Lin, Shih-Yung[2] and Czarnek, Robert[3]

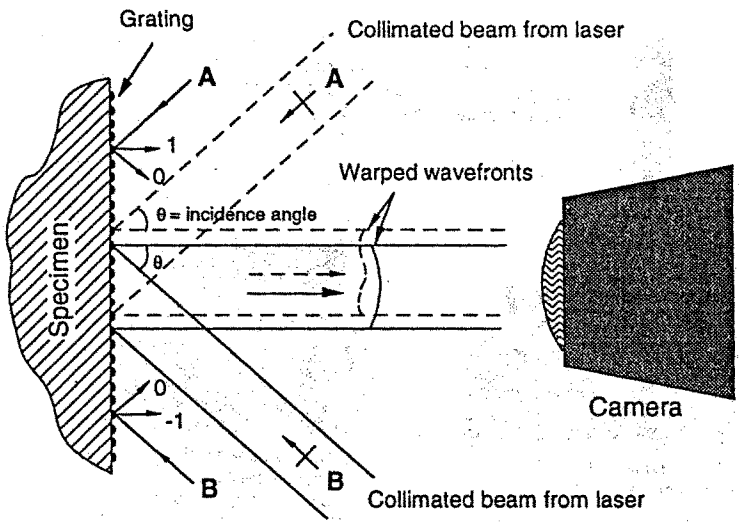
Abstract

The objective of this study was to provide an optical technique allowing full-field in-plane deformation measurements at high temperature by using high-sensitivity moire interferometry. One of its application was performed on a cutting too bit to simulating the behavior of structural components with different materials subject to thermal loading. High contrast interference patterns confirmed the approach of this newly developed method including the high-temperature moire system and the use of vacuum environment. Also, a significant thermal deformation mismatch was observed around the interfaces. A high-resolution data-reduction technique was used to measure the strain distribution of the cutting too bit. If combined with the high-resolution data-reduction techniques, this technique can provide extremely powerful full-field, high-resolution measurements of deformation and strain in the high-temp regime.

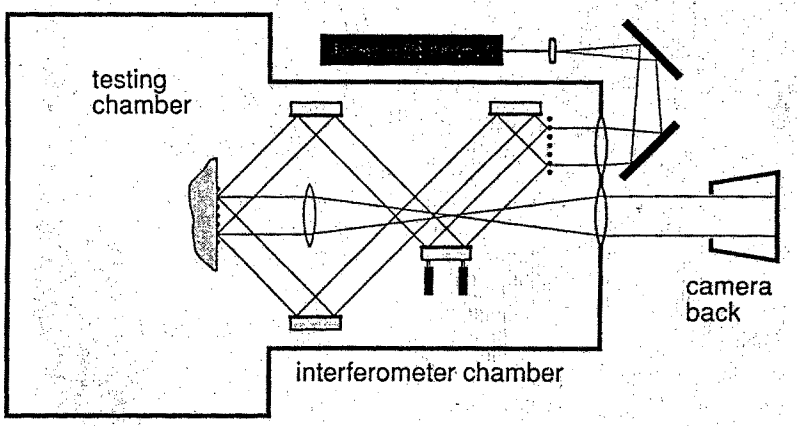
1 Engineer, MAA, Taipei
2 Engineer, CTC, Johnstown, PA
3 Senior Engineer, CTC, Johnstown, PA

Test temperatures	Recommended specimen grating preparation
Room temperature to 210°C	Epoxy grating
Room temperature to 350°C	Silicone rubber grating
Room temperature to 1000°C	Plasma-etched gold grating
Room temperature to above 1000°C	Etched grating(directly on specimen)

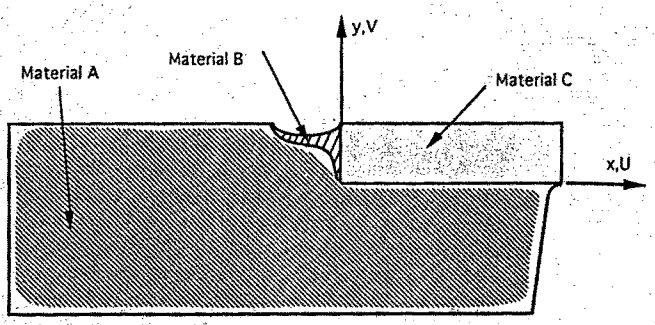
表一 測試溫度與試片光柵準備方式建議表



圖一 基本Moire系統

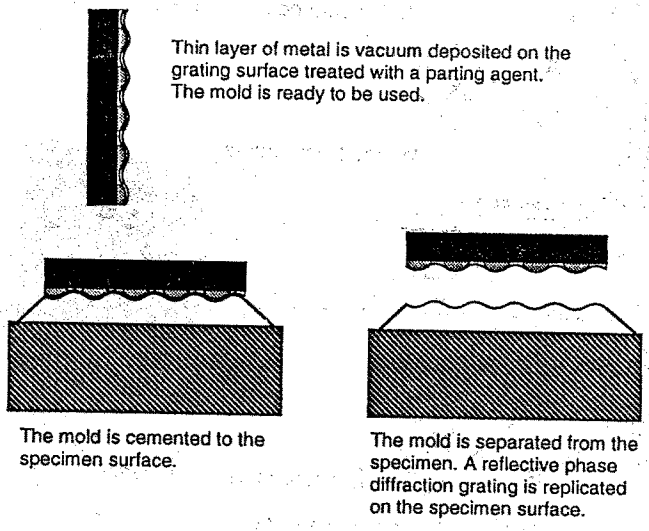


圖二 高溫Moire系統

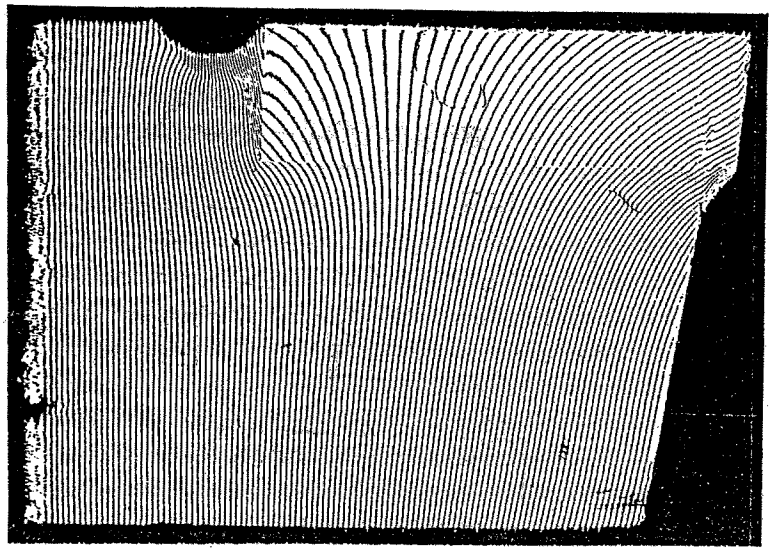


Material A: Steel
Material B: Alloy of copper
Material C: Tungsten carbide

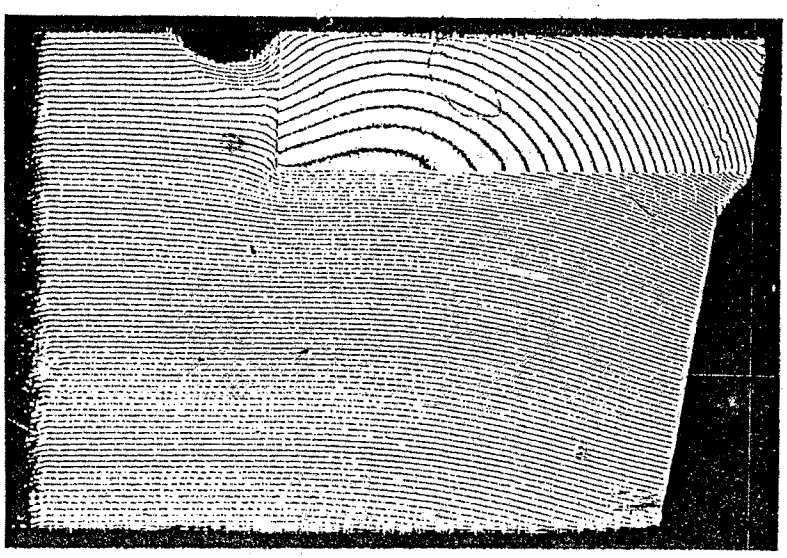
圖三 切削刀頭試片



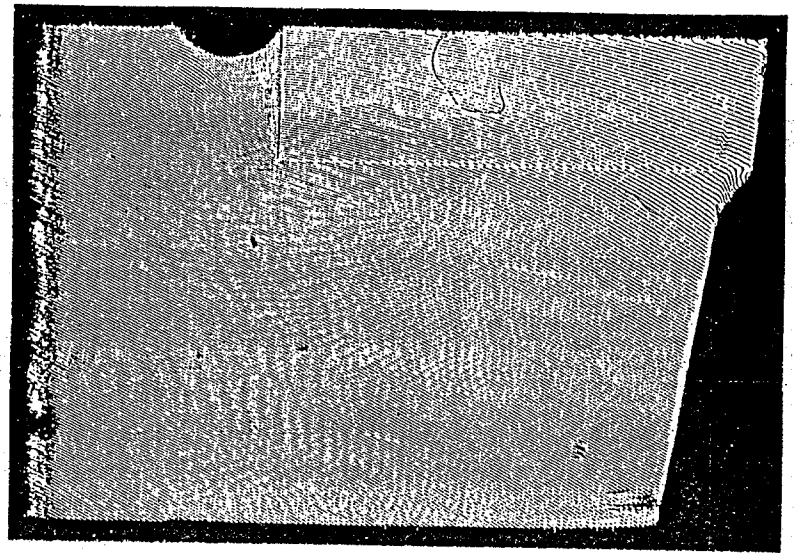
圖四 試片光柵複製程序



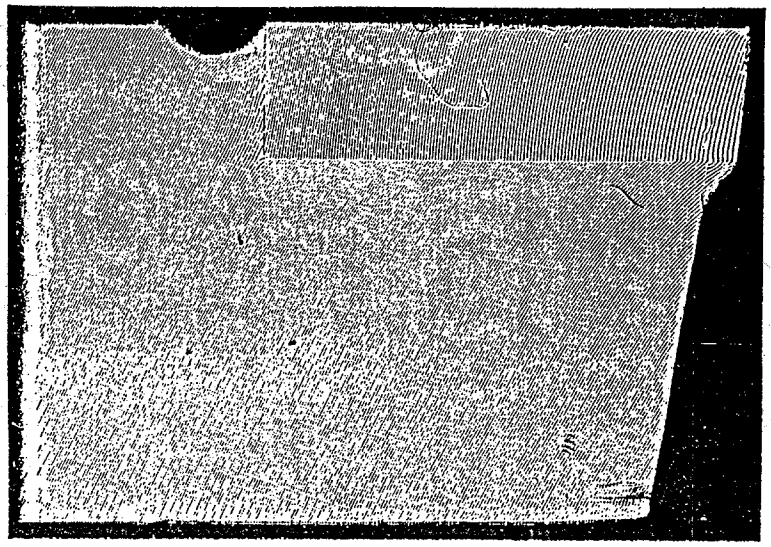
圖五A 水平方向條紋等高圖代表在219℃下切削刀頭熱變形



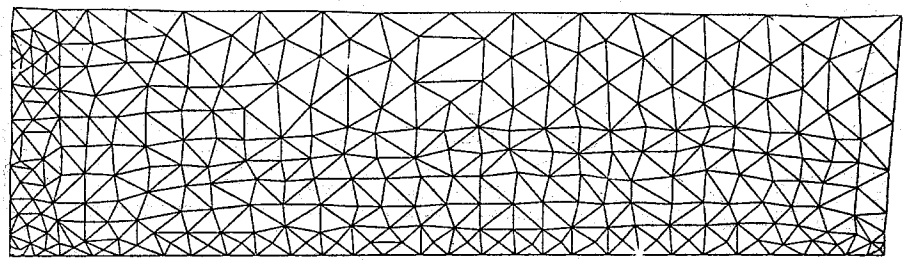
圖五B 垂直方向條紋等高圖代表在219℃下切削刀頭熱變形



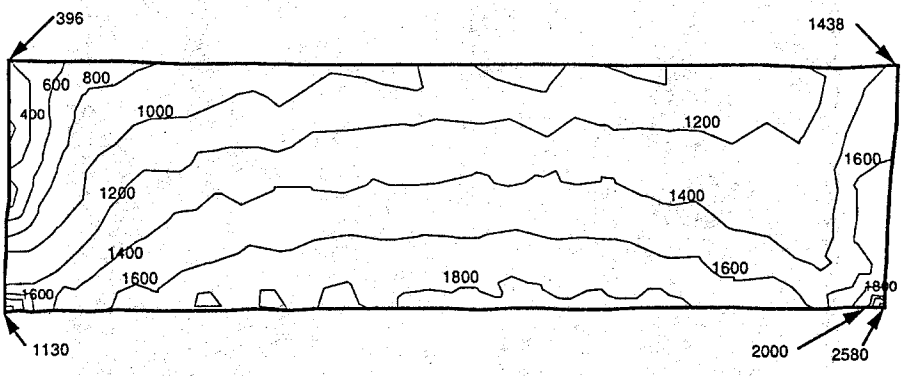
圖六A 水平方向含旋轉頻率條紋等高圖



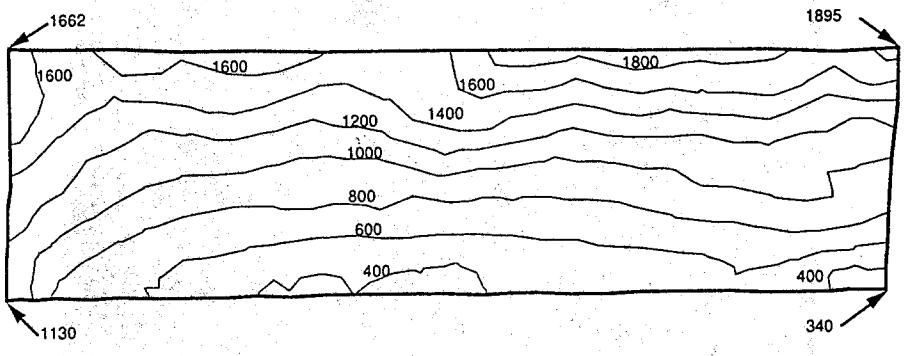
圖六B 垂直方向含旋轉頻率條紋等高圖



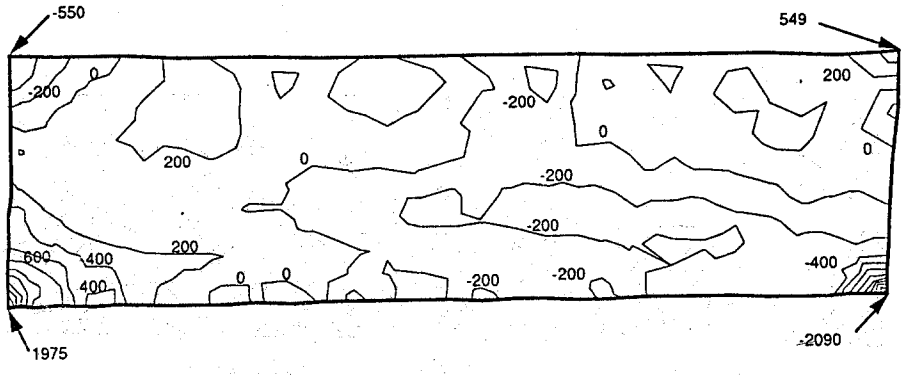
圖七 切削刀頭端部(Carbide)三角元素網格圖



圖八A 切削刀頭端部正向應變ε_x等高圖，等高圖圖中，間距為200 μ m/m



圖八B 切削刀頭端部正向應變ε_y等高圖，等高圖圖中，間距為200 μ m/m



圖八C 切削刀頭端部工程剪應變γ_{xy}等高圖，等高圖圖中，間距為200 μ m/m