

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

金屬損傷模型之建立及其在工業成形與工程評估之應用

(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-082-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：鄭榮和

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國93年5月31日

## 研究計畫中英文摘要：

### (一) 計畫中文摘要

本研究提出一個非破壞檢測的方法，可針對金屬材料的損傷參數進行定量的評估。此方法使用一個損傷力學模型，配合超音波回波法的損傷檢測，敘述金屬材料的勁度衰減與材料損傷的增長。為了在材料初始的巨觀裂紋發生前描述材料內部的劣化成長，我們發展出一個新的損傷力學模型。之後，採用數值分析軟體 ABAQUS/Standard 進行有限元素模型的驗證，並建立損傷狀態、彈性勁度與塑性應變的相互關係。根據 Mori-Tanaka 理論，可計算出損傷發展的變化參數，然後可利用 Christoffel's 等式預測超音波速度。結合理論預測與實驗量測的超音波速度，可解出未知的損傷變數，由此，可利用損傷模型的預測決定其它剩下的性質。本研究採用 304 不銹鋼試片完成實驗的量測。將數值模擬的結果與實驗結果進行比較，以驗證有限元素模型的有效性，發現結果相符。結果顯示，金屬損傷的參數可經由適當的損傷模型準確的估計出來。

關鍵詞：損傷力學模型，非破壞檢測，有限元素模型。

### (二) 計畫英文摘要

This research describes a non-destructive method for the quantitative estimation of property variations due to damage in metal materials. The method employs a damage mechanics model, which accounts for stiffness degradation and damage evolution of a metal medium with a measurement of ultrasonic velocity. In order to describe the progressive deterioration of materials prior to the initiation of macrocracks, we have developed a new damage mechanics model. Thereafter, a finite element model valid for numerically describing such damage process has been developed by ABAQUS/Standard code, and correlations between damage state, elastic stiffness and plastic strain could be found by the results of the finite element simulation. The property variations due to damage evolution are calculated based on the Mori-Tanaka theory, and then the ultrasonic velocity can be predicted by Christoffel's equation. When the measured velocity is coupled with the theoretically predicted velocity, the unknown damage variable is solved, from which other residual properties are determined by the predictions of damage model. The proposed technique is performed on type 304 stainless steel bars. The numerical results obtained by the simulation were compared with experimental ones in order to verify the validity of the proposed finite element model and good agreement was found. It is shown that the damaged properties of metals can be estimated accurately by the proposed method.

Keywords: Damage mechanics model, Nondestructive testing (NDT), Finite element model.

## 研究計畫內容：

### (一) 前言

損傷是指材料組織在外界因素作用下發生的力學性能劣化，並導致體積單元破壞的現象。結構材料中的損傷，有在製造或加工過程中引起的初始損傷，如金屬材料在冷熱加工時產生的夾雜、偏析等；有在外力作用或環境因素影響下發生和演變的塑性開裂、介面脫層等。這些以微孔洞或微裂紋形式表現的材料損傷，將在加載過程中逐漸增長、擴展與匯聚，形成一定尺寸的巨觀裂紋，導致結構的強度、剛度下降，以致破壞。這種屬於工程材料抗力性能的損傷劣化現象，在塑性變形、疲勞和潛變等力學行為中都能觀察到，它決定著結構的使用壽命和安全可靠性，從而成為材料科學、力學和工程技術界所共同關心的課題。

損傷和斷裂是緊密相關的力學現象。近三十年來得到充分發展的破壞力學也是研究結構損傷的學科，它研究工程結構中具有明確幾何邊界的巨觀裂紋問題。破壞力學從整體出發，通過對裂紋前沿的應力、應變、位移和能量場的分析，確定支配裂紋行為的破壞力學參數，對裂紋的擴展和結構安全性進行預測。這門學科對工程結構設計和可靠性分析具有重要影響。但如果把結構的使用壽命劃分為兩個階段，即把分布於材料內部的損傷演變發展成為確定幾何尺寸的巨觀裂紋視為第一階段，把巨觀裂紋的擴展並導致結構的最終破壞視為第二階段，則由實驗結果可以發現第一階段所經歷的時間往往佔構件使用壽命的 80% 左右，況且還有許多損傷現象並不導致破壞力學所描述的臨界開裂，而是產生失穩等現象，由此可見研究第一階段損傷現象及其力學機制的重要性，這就是需要建立和發展損傷理論的工程科學背景。

### (二) 研究目的

由於損傷理論本身具備的複雜性，以及損傷表現於材料內部、不易被發現與監測，因此損傷力學並不像破壞力學般被廣泛應用於工程評估上。為了有效率地評估結構件的殘餘性質與適用性，本研究計畫的目的為建立一套具備力學基礎的損傷評估系統，使用非破壞檢測技術偵測受損材料的損傷情形，並以適當的量化準則處理非破壞檢測的結果，定量描述現行損傷狀態，配合損傷力學理論的分析結果，由現行損傷狀態推測受損材料的殘餘力學性質，據以判斷此結構件繼續使用之可靠性以及更換或修補之必要性。

### (三) 文獻探討

巨觀損傷力學源自 Kachanov[36]在 1958 年研究金屬潛變 (creep) 破壞時，首次引入了“連續性因子”和“有效應力”(effective stress) 的概念來描述低應力脆性潛變損傷；Rabotnov[37]在 1963 年進一步引入了“損傷因子”的概念。在這些概念的基礎上，他們採用連續體力學 (continuum mechanics) 的唯象 (phenomenological) 方法來研究材料潛變損傷破壞過程。除 Kachanov、Rabotnov 外，Lemaitre、Chaboche、Kremple、Krajcinovic、Murakami、Hult、Hayhurst 和 Leckie 等人採用連續體力學的方法，把損傷因子進一步推廣為一種場變量

( field variables ), 逐漸形成了“連體損傷力學”( Continuum Damage Mechanics, CDM ) 這一個新的力學分支。在 1980 年代, 學者們以熱力學架構和微觀力學方法嚴謹的推導損傷理論, 並且應用至工程上, Leckie[58]與 Hult[59] 分別利用損傷理論解潛變問題; Truesdell 與 Noll[60]、Jaunzemis[61]、Malvern[62]及 Maugin[63]等人在不可逆熱力學架構下, 建構了系統化的非彈性本構方程式( inelastic constitutive equations ); Krajcinovic 與 Lemaitre[64]、Lemaitre 與 Chaboche[65]及 Lemaitre[66]則成功的將損傷理論應用至各種損傷分析上。

另一個研究損傷力學的方式是微觀損傷力學( Micro Damage Mechanics, MDM ), 這裡所言微觀尺度是指微空孔、微裂紋或是晶體的大小, 並非指原子大小層級; 這個概念可以追溯到 1957 年英國科學家 Eshelby[38], 研究『無窮大彈性基材含局部橢圓形相變, 而引起材料整體彈性常數改變的問題』, 並且利用彈性力學方法得到其閉合解( close form solution )。這個概念開啟了往後在彈性基材含均勻分散圓孔、彈性基材含均勻裂紋、彈性基材含週期排列圓孔、彈性基材含週期排列裂紋、二相材料等效彈性性質、複合材料含橫向裂紋等等的研究領域, 使得學者對於微觀機制對整體( global ) 行為的影響更加瞭解。

上述這些損傷理論, 在損傷變量的選取上, 有單純量、雙純量、向量、二階張量和四階張量等, 使得損傷變量數目多, 不易充分了解其物理意義且不易掌控, 並且在損傷變量與力學性質交互影響的處理上, 採用有效應力的概念, 從實驗結果可以發現這個概念的不合理性, 鑒於這些缺點, 我們將從微觀力學的觀點出發, 定義具備代表性物理意義的損傷變量, 並使用均質化方法估算損傷變量與力學性質的關係, 然後在不可逆連體熱力學的架構建立塑性變形的應力應變關係與損傷演化律, 是一個具備微觀物理意義且容易與實驗驗證的金屬損傷模型。

本研究的最大貢獻乃是在於發展一套新的金屬彈塑性損傷模型, 並且與非破壞檢測技術作結合, 建立非破壞式損傷評估系統, 因此深入了解現行非破壞檢測技術是必要的。無損超音波波速法( nondestructive ultrasonic velocity methods ) 廣泛地被使用於材料性質的測試, Nagarajan [53]與 Panakkal [54]分別研究礬土與二氧化鈾的超音波速與密度的關係; Roth [55]使用半經驗模型( semi empirical model ) 分析多晶材料中超音波速與孔隙率的關係; 然而這些研究都是直接由實驗結果擷取經驗方程式, 缺乏理論背景, 如果要進一步定量描述材料的微結構對超音波無傳遞特性的影響, 更深入的理論探討是必須的。Gruber [56]是第一個結合微觀力學與超音波檢測的學者, 他使用微觀力學方法估算微結構對彈性勁度的影響, 進而預測波速改變; 另一方面, Adler [57]研究微結構對超音波衰減度的影響, 歸納出鑄鋁材的孔隙率及平均孔隙尺寸與超音波衰減度的關係。

## (四) 研究方法

### (1) 選擇適當的非破壞損傷檢測系統

非破壞檢測方法主要有顯微鏡檢視、超音波探傷、聲洩法( acoustic emission ) 與 x 射線法等四種。其中超音波探傷法使用高頻機械振波來檢測損傷機制, 經由分析超音波訊號的強

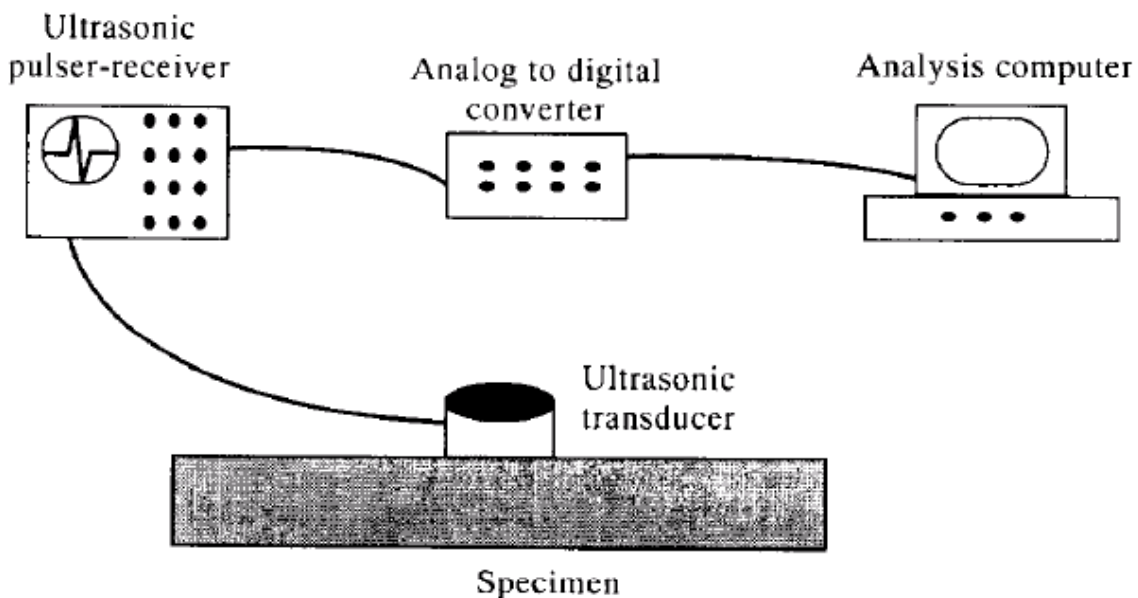
度衰減程度與回波時間，即可判斷材料內部缺陷的尺寸與位置，較適用於本研究的要求，故採用此系統進行之後實驗的非破壞損傷檢測。

### (2) 研究超音波傳遞特性，建立非破壞檢測參數 ( NDT parameters ) 資料庫

由於超音波回波法 ( ultrasonic pulse-echo method ) 具備非破壞特性，且便於定量描述檢測結果，因此本研究將採用此方法進行損傷檢測。當超音波在介質中傳遞時，其波速受到材料之密度與彈性勁度影響，超音波縱波波速與彈性勁度的關聯可由本構方程式 ( constitutive equation ) 推導而得；另一方面，當材料受到外力作用而引發損傷成長時，將導致勁度衰減 ( stiffness degradation )，進而改變超音波速。本階段將先推導超音波縱波波速與彈性勁度的關聯，並配合第一年計畫所建立之金屬彈塑性損傷模型，以彈性勁度為媒介，建立超音波速與損傷變量之資料庫，作為損傷評估之參考依據。

### (3) 架設超音波探傷設備，撰寫電腦程式，分析超音波訊號

使用脈波反射法 ( pulse-echo method ) 進行非破壞損傷檢測，超音波探傷儀架設情形如圖四所示，以探頭直接接觸試片，產生超音波並入射至試片，然後以脈波接收器蒐集超音波的回波訊號，透過類比數位轉換器處理回波訊號，將類比訊號轉換成數位訊號，並傳至電腦儲存，為了識別訊號代表意義，撰寫電腦程式，進一步分析回波訊號，建立回波訊號與 NDT 參數之關聯性，以便結合第三步驟所建之 NDT 參數資料庫，建立定量化超音波探傷技術。此部份之研究必須使用超音波探傷儀，而其困難處在於超音波訊號的龐大性，需依靠高效率的電腦以便儲存及處理回波訊號，並且回波訊號與 NDT 參數的連結亦具備困難性。



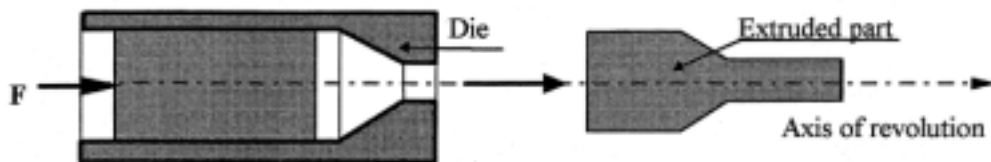
圖四 超音波訊號儲存及分析裝置

### (4) 驗證非破壞式損傷評估系統

對加載過的金屬試棒進行破壞式損傷檢測，將檢測結果與上述非破壞式損傷評估結果作比較，以驗證非破壞損傷評估系統之準確性。

### (5) 應用實例 - 擠製成形 (extrusion)

擠製成形是工業界常用的成形方法，透過將材料擠入模具中改變其截面形狀和面積，得到需要的工件，如圖五所示。模具設計的優劣將直接影響成品的品質，因此，一套評估模具設計優劣性的判準是必須的，本研究將採用金屬彈塑性損傷模型對不同設計的模具進行分析，藉由有限元素法模擬擠製成形過程中損傷演化情形，比較模具參數（例如模具角）對成品品質的影響，建立模具設計之參考標準。這部分的工作內容包含模具設計與製作、擠製成形實作、建構有限元素模型與設計參數分析，是極具難度且費時的工作。



圖五 擠製成形示意圖

### (五) 結果與討論

將超音波回波法的實驗量測結果，整理出彈塑性損傷模型並加以修正，我們成功的建立了一套非破壞損傷評估技術。根據實驗結果，我們得到以下的結論：

1. 我們提出一個以微觀力學為基礎的損傷模型的新概念。此方法只需有一個量化的損傷變數，即可參照 Mori-Tanaka 的方法評估損傷材料的力學行為。
2. 透過有限元素法改善損傷模型，使其能精確的預測變形與損傷成長的過程，並進而預測彈性常數及縱波波速的衰減。
3. 由於損傷參數、塑性應變、殘留力學性質及 NDT 參數的相互關係可經由有限元素模型建立出來，我們僅使用超音波回波法評估損傷材料中的縱波波速，並借助之前發展出之資料庫的平均值，獲得材料該階段的損傷狀態。

本研究中所提出的非破壞損傷評估技術，可被延伸應用於金屬成型過程中檢測繪製局部損傷的分布情形。

## 參考文獻

- [1] 鄭榮和，熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞與破壞之分析與評估：子計畫四—複合材料組件疲勞及破壞之有限元素分析，國科會專題研究計畫成果報告，NSC85-2212-E002-038。
- [2] 鄭榮和，張朝萬，“纖維複合材料之位移觀點破壞判準”，中華民國第二十一屆全國力學會議論文集，頁 133-140，1997。
- [3] 鄭榮和，熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞與破壞之分析及評估(II)：子計畫四—複合材料組件疲勞及破壞之有限元素分析，國科會專題研究計畫成果報告，NSC86-2212-E002-059。
- [4] 鄭榮和、蔡妙慈，“纖維強化複合材料損傷分析”，中國航空太空學會第三十九屆學術研討會論文集，頁 195-202，1997。
- [5] 鄭榮和、蔡妙慈，“纖維強化複合材料損傷分析”，中華民國力學學會期刊(系列 B)，Vol. 15，頁 59-70，1999。
- [6] 鄭榮和，經使用劣化後 Gr/Peek 複材之修補：子計畫 IV—纖維強化複合材料損傷及修補之模擬(I) 國科會專題研究計畫成果報告，NSC88-2212-E002-040。
- [7] 馬仁宏、鄭榮和，“積層板複合材料主軸損傷分析”，中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集，新竹市，中華民國，頁 64-71，1999。
- [8] Maa, R.H. and Cheng, J.H., “A CDM-based failure model for predicting strength of notched composite laminates,” Seven Annual International Conference on Composite Engineering (ed. D. Hui), Denver, Colorado, pp. 573-574, 2000.
- [9] 馬仁宏、鄭榮和，“複合材料基材裂紋彈性損傷破壞模型”，中華民國力學學會第二十五屆全國力學會議論文集，台中市，中華民國，頁 351，2001。
- [10] 鄭榮和，經使用劣化後 Gr/Peek 複材之修補：子計畫 IV—纖維強化複合材料損傷及修補之模擬(II) 國科會專題研究計畫成果報告，NSC89-2212-E002-126。
- [11] 鄭榮合、林松濤，“複合材料修補脫膠現象之研究”，中華民國力學學會第二十五屆全國力學會議論文集，台中市，中華民國，頁 151，2001。
- [12] Chung, L.C. and Cheng, J.H., “The Analysis of Instability and Strain Concentration during Superplastic Deformation,” Materials Science and Engineering A, Vol.308, pp.153-160, 2001.
- [13] Chung, L.C. and Cheng, J.H., “Fracture Criterion and Forming Pressure Design for Superplastic Bulging,” accepted in Materials Science and Engineering A. 2001.
- [14] Cheng, J.H. and Chung, L.C., “Characterization of Instability and Strain Localization for Superplastic Deformation,” Plastic and Viscoplastic Response of Materials and Metal Forming, Proceedings of the Eighth International Symposium on Plasticity and Its Current Applications (ed. by A.S. Khan, H. Zhang, and Y. Yuan), Whistler, Canada, pp.472-474, 2000.
- [15] Cheng, J.H. and Chung, L.C., “The Analysis of Instability and Strain Concentration During Superplastic Deformation,” International Conference on Superplasticity in Advanced Materials, Orlando, FL, USA, 2000.
- [16] 鄭榮和、鍾禮全，“超塑性變形失穩及應變集中現象之分析”，中華民國第二十三屆全國力學會議論文集，卷二，頁 56-63，1999。
- [17] 鄭榮和、鍾禮全，“超塑性 Ti-6Al-4V 板材的失穩分析及破壞判準”，中華民國第二十五屆全國力學會議論文集摘要集，頁 150，2001。
- [18] 黃承照、鄭榮和、黃坤祥，“粉末燒結孔隙材料之鍛粗分析”，中華民國力學學會第二十三屆全國力學會議論文集，卷三，頁 125-132，1999。
- [19] 黃承照、鄭榮和，“粉末燒結材料應用於傳動構件之鍛造模擬”，中國機械工程學會第十七屆全國學術研討會論文集，2000。
- [20] 鄭榮和，粉末燒結材料鍛造成形之模擬與實作，國科會專題研究計畫成果報告，NSC 89-2212-E-002-111。
- [21] Huang, C.C. and Cheng, J.H., “Forging Simulation of Sintered Powder Compacts under Various Frictional Conditions,” accepted by the Int. J. Mech. Sci. (Reference No.: SR/2000/5345), 12 December (2001).
- [22] Huang, C.C. and Cheng, J.H., “Forging analysis of sintered powder compact,” In: Simulation of

Material Processing: Theory, Methods and Application, edited by K.I. Mori, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, pp. 1039-1045, 2001.

- [23] 鄭榮和、胡斯遠, “氣渦輪機組件焊補變形之研究”, 中華民國第二十四屆全國力學會議論文集, 頁 ATM 24/F221-228, 2000。
- [24] 鄭榮和、胡斯遠、黃偉誠, “發電機組關鍵組件壽命評估&修護技術研究,” 台電修護處委託研究計劃期末報告, 2001。
- [25] 曹榮明、鄭榮和、林俊彬, “牙周膜之黏彈性行為,” 中華民國第二十四屆全國力學會議論文集, K008, 2000。
- [26] Tsao, J.M., Lin, C.P. and Cheng, J.H., “A Nonlinear Model to Simulate the Viscoelastic Behavior of Periodontal Ligament,” International Society of Biomechanics, XVIIIth Congress, O348, 2001.
- [27] Tsao, J.M., Cheng, J.H., and Lin, C.P., “The Creep Source and the Volumetric and Deviatoric Viscoelastic models of Periodontal Ligament,” International Conference on Biomechanics combined with the Annual Scientific Meeting of Taiwanese Society of Biomechanics, O35, 2001.
- [28] 鄭榮和、黎龍芳, “齒輪幫浦容積效率與公差配合之改善”, 中華民國第二十四屆全國力學會議論文集, 頁 F-30, 2000。
- [29] 鄭榮和、許嘉元, “金屬密封塑性變形研究”, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 2000。
- [30] 鄭榮和、許嘉元、洪正凡、鍾允昇, “密封機制與洩漏特型分析,” 中華民國第二十五屆全國力學會議論文集, 頁 140, 2001。
- [31] 鄭榮和、洪正凡、葉宏揚, “隔膜閥設計與壽命測試”, 工業技術研究院分包學術機構研究計劃, 2001。
- [32] 鄭榮和, 熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞與破壞之分析與評估: 子計畫四—複合材料組件疲勞及破壞之有限元素分析, 國科會專題研究計畫成果報告, NSC85-2212-E002-038。
- [33] 鄭榮和, 熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞與破壞之分析及評估(II): 子計畫四—複合材料組件疲勞及破壞之有限元素分析, 國科會專題研究計畫成果報告, NSC86-2212-E002-059。
- [34] 鄭榮和, 經使用劣化後 Gr/Peek 複材之修補: 子計畫 IV—纖維強化複合材料損傷及修補之模擬 (I) 國科會專題研究計畫成果報告, NSC88-2212-E002-040。
- [35] 鄭榮和, 經使用劣化後 Gr/Peek 複材之修補: 子計畫 IV—纖維強化複合材料損傷及修補之模擬 (II) 國科會專題研究計畫成果報告, NSC89-2212-E002-126。
- [36] L. M. Kachanov, “On the time to failure under creep condition,” *Izv. Akad. Nauk. USSR. Otd. Nauk.* Vol. 8, pp.26-31, 1958。
- [37] Y. N. Rabotnov, “On the equations of state for creep,” *Prog. in Appl. Mech.*, pp.307-315, 1963.
- [38] J. D. Eshelby, “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems,” *Proceedings of the Royal Society, London, Series A*, Vol. 240, pp. 367-396, 1957.
- [39] P. Ladevéze, *Sur Une Théorie de l’Endommagement Anisotrope*, Rapport Interne no. 34, Laboratoire de Mécanique et Technologie, Cachan, France.
- [40] B. T. Smith, J. S. Heyman, A. M. Buoncristiani, E. D. Blodgett, J. G. Miller, S. M. Freeman, “Correlation of the deply technique with ultrasonic imaging of impact damage in graphite-epoxy composites,” *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp.1408-1416, 1989.
- [41] S. C. Wooh, I. M. Daniel, “Three-dimensional ultrasonic imaging of defects and damage in composite materials,” *Materials Evaluation*, Vol. 52, pp.1199-1206, 1994.
- [42] M. V. Hosur, C. R. L. Murthy, T. S. Ramamurphy, A. Shet, “Estimation of impact-induced damage in CFRP laminates through ultrasonic imaging,” *NDT & E International*, Vol. 31, pp. 359-374, 1998.
- [43] T. J. Moran, R. L. Crane, R. J. Andrews, “High-resolution imaging of micro-cracks in composites,” *Materials Evaluation*, Vol. 43, pp. 536-540, 1985.
- [44] S. C. Wooh, I. M. Daniel, “Enhancement techniques for ultrasonic nondestructive evaluation of composite materials,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 112, pp.175-182, 1990.
- [45] M. R. Gorman, “Ultrasonic polar backscatter imaging of transverse matrix cracks,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, pp.1499-1514, 1991.
- [46] K. V. Steiner, R. F. Eduljee, X. Huang, Jr. J. W. Gillespie, “Ultrasonic NDE techniques for the evaluation of matrix cracking in composite laminates,” *Composite Science and Technology*, Vol. 53, pp. 193-198, 1995.
- [47] D. Datta, N. N. Kishore, “Features of ultrasonic wave propagation to identify defects in composite materials modeled by finite element method,” *NDT&E International*, Vol. 29, No. 4, pp. 213-223, 1996.



- [48] R. K. Luo, E. R. Green, C. J. Morrison, "An approach to evaluate the impact damage initiation and propagation in composite plates," *Composites, Part B: engineering*, Vol. 32, pp.513-520, 2001.
- [49] R. Talreja, *Damage mechanics of composite materials*, 1994.
- [50] F. Aymerich, S. Meili, "Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates," *Composites, part B: engineering*, Vol. 31, pp. 1-6, 2000.
- [51] Gurson, A. L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 99, No. 1, pp. 2-15 (1977).
- [52] Tvergaard, V., "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions," *International Journal of Fracture*, Vol. 17, No. 4, pp. 389-407(1981).
- [53] Nagarajan, A., "Ultrasonic study of elasticity-porosity relationship in polycrystalline alumina," *Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 10, pp. 3693-3696 (1971).
- [54] Panakkal, J. P., Ghosh, J. K. and Roy, P. R., "Use of ultrasonic velocity for measurement of density of sintered fuel pellets," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 17, pp. 1791-1795 (1984).
- [55] Roth, D. J., Stang, D. B., Swickard, S. M. DeGuire, M. R. and Dolbert, L. E., "Review, modeling and statistical analysis of ultrasonic velocity-pore fraction relation in polycrystalline materials," *Mater. Eval.*, Vol. 49, No. 7, pp. 883-888 (1991).
- [56] Gruber, J. J., Smith, J. M. and Brockelman, R. H., "Ultrasonic velocity C-scans for ceramic and composite material characterization," *Mater. Eval.*, Vol. 46, No. 1, pp. 90-96 (1988).
- [57] Adler, L. Rose, J. H. and Mobley, C., "Ultrasonic method to determine gas porosity in aluminum alloy castings: theory and experiment," *J. Appl. Phys.*, Vol. 59, No. 2, pp. 336-347 (1986).
- [58] Leckie, F. A. and Hayhurst, D., "Creep capture of structures," *Proc. Royal Society, London*, Vol. A340, pp. 323-347 (1974).
- [59] Hult, J., "Creep in continua and structures," in *Topics in Applied Continuum Mechanics*, pp. 137, Springer, New York, 1974.
- [60] Truesdell, C. and Noll, W., *The Nonlinear Field Theories of Mechanics*, in *Encyclopedia of Physics III/3*, S. Flugge, Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1965.
- [61] Jaunzemis, W., *Continuum Mechanics*, The Macmillan Co., New York, 1967.
- [62] Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1969.
- [63] Maugin, G. A., *The Thermomechanics of Plasticity and Fracture*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [64] Krajcinovic, D. and Lemaitre, J., *Continuum Damage Mechanics-Theory and Applications*, Springer-Verlag, Wien, 1986.
- [65] Lemaitre, J. and Chaboche, J. L., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, London, 1990.
- [66] Lemaitre, J., "A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83-89 (1985).