

超微小硬さ試験を利用した材料特性評価法 (三角錐圧子による除荷曲線部の形状指数と除荷終了点)

Study on Evaluational Method of Determining Material Characteristics using Ultramicro Hardness Tester (Estimation about Exponential Index of Unloading Curve and Finish Point of Unloading using Triangular Pyramidal Indenter)

正 石橋 達弥 (新潟大)
正 大木 基史 (新潟大)
学 天野 裕久 (新潟大院)

○学 中鉢 幸男 (新潟大院)
学 藤塚 将行 (新潟大院)
高田 昌志 (日本電信電話(株))

Tatsuya ISHIBASHI, Yukio CHUBACHI, Motofumi OHKI, Masayuki FUJITSUKA, Hirohisa AMANO:
Faculty of Engineering, Niigata University 8050 2-no-cho Ikarashi, Niigata 950-2181, JAPAN
Masashi TAKADA: Nippon Telegraph and Telephone CORPORATION

In this paper, it is described about the method for an evaluation of material characteristics in submicron scale, by using ultramicro hardness tester with triangular pyramidal indenter, which can investigate for extremely small and shallow area of material properties. The indentation tests for three materials (aluminum alloy, phosphor bronze, stainless steel) are carried out, obtained loading and unloading curve, respectively. From unloading curve, exponential index and finish point of each curve are derived. As a result, it turns out that the exponential index of unloading curve was 1.5, although with different materials. Consequently, calculated Young's moduli using exponential index are approximately consistent with measured Young's modulus.

Key Words : Triangular pyramidal indenter, Exponential index of unloading curve, Young's modulus

1. 緒言

材料の機械的性質を測定する材料試験機の中でも硬さ試験は簡便・迅速という点で幅広く利用されている。また、最近の工業製品は、技術の高度化・薄膜化の傾向があり、それら材料の特性評価に対する需要はますます高まっている。押し込み硬さ試験法のうち、三角錐圧子を用いて極狭小域部の材料特性を測定する超微小硬さ試験においては、圧子押し込み量や除荷量などの極微量の測定に信頼性がかけるため、不確実な硬さ測定値を生ずる原因を定量的に解明する必要がある。本研究は、三角錐圧子によるサブミクロンオーダーに至る押し込み硬さ試験により、材料の機械的性質の測定を目的としている。本報では超微小硬度計を用いて、三角錐圧子による金属の押し込み-除荷試験を行い、試験結果・データ処理(除荷曲線形状の指数と除荷終了点に関する検討)、それから求めた縦弾性係数(ヤング率)の検討を行った。

2. 実験

2.1. 試験機

実験では、試験機として島津製作所製島津ダイナミック超微小硬度計(DUH-201)を、また圧子には稜間角 115° の修正ベルコピッチタイプダイヤモンド三角錐圧子を使用した。

2.2. 試験片

試験片としては、アルミ合金(A2017)、ステンレス鋼(SUS 304)、りん青銅(C5210R-1/2H)を用いた。また、測定回数は各試験片に対し5回ずつである。

3. 実験結果と考察

Fig.1に、アルミニウム合金(JIS A2017)試験片に対して行った実験により得られた荷重-変位線図(押し込み曲線)の

例($L_M = 10\text{gf} = 9.8 \times 10^{-2}\text{N}$)を示す。

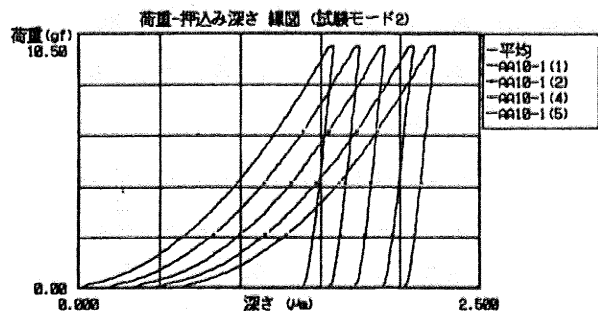


Fig.1 Relationship between load and indentation depth

4. 除荷曲線形状指数等の決定法

本試験機の制御プログラム上の問題、および圧子が試験片と離れる直前は押し込み開始点に比べて不安定である(Fig.2 (a), (b))ことから、除荷終了点である δ_s (くぼみ深さ)を除荷過程の荷重域3点から決定する方法を考え、かつその曲線形状指数 n の決定も行った。

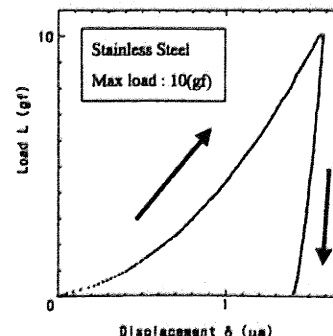


Fig.2(a) Relationship between Load L and Displacement δ

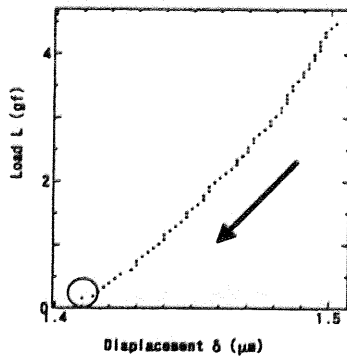


Fig.2(b) Enlargement of unloading curve

各押込みデータのうち、最大荷重後の除荷過程のデータを拡大プロットし、それに合う近似曲線を引いた。その曲線をその形状に基づき、次式のように仮定した。

$$Lr = K(\delta r - \delta s)^n \quad \dots (1)$$

ここで、 K は比例定数である。

これより得られる最大荷重(L_{\max})の3%、35%の荷重 L_{r1} 、 L_{r2} とその時の押込み量 δ_{r1} 、 δ_{r2} 、および最大押込み量 δ_{r3} のときの荷重 L_{r3} の計6点を求めた(Fig.3)。

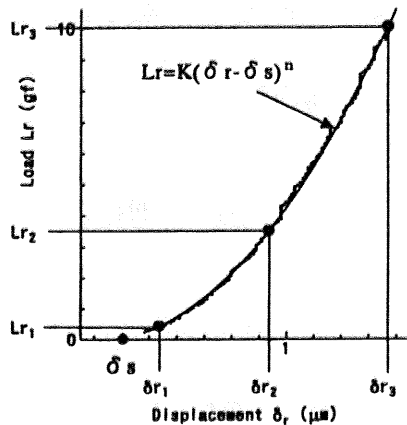


Fig.3 Determination of finish point of unloading

4.1. 除荷終了点(δ_s)の決定法

上で求めた6点を式(1)に代入することにより、 δ_s は次式を満足する値で与えられる。

$$\frac{\ln\left(\frac{\delta_{r3} - \delta_s}{\delta_{r1} - \delta_s}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_{r3} - \delta_s}{\delta_{r2} - \delta_s}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{L_{r3}}{L_{r1}}\right)}{\ln\left(\frac{L_{r3}}{L_{r2}}\right)} \quad \dots (2)$$

この式を用いて数値解析的に δ_s を求めるプログラムを作成し、 δ_s の決定を行った。

4.2. 曲線形状指数 n の決定法

n は、 δ_s を定めることにより次式で与えられる。

$$n = \frac{\ln\left(\frac{L_{r3}}{L_{r1}}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_{r3} - \delta_s}{\delta_{r1} - \delta_s}\right)} \quad \text{または、} \quad n = \frac{\ln\left(\frac{L_{r3}}{L_{r2}}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_{r3} - \delta_s}{\delta_{r2} - \delta_s}\right)} \quad \dots (3)$$

式(3)を用いて除荷曲線形状指数を算出した結果をFig.4に示す。その結果、形状指数は球圧子による除荷曲線の形状指数にほぼ一致($n=1.5$)することが、アルミ、りん青銅、ステンレス鋼に対しても確認された。

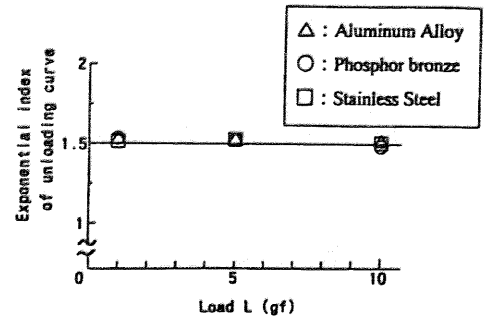


Fig.4 Relationship between exponential index of unloading curve and load

5. 三角錐圧子による金属のヤング率算出式

球圧子による金属のヤング率算出式の考え方を基に、石橋らにより提案されている三角錐圧子による金属のヤング率算出式を示すと、次のようになる。

$$Es = \frac{(1 - \mu_s^2)}{3.68 \times \frac{\delta_{r3} \times (\delta_{r3} - \delta_s)}{L_{r3}} - I(E)} \quad \dots (4)$$

ここで、

Es : 金属のヤング率, μ_s : 金属のポアソン比

$I(E)$: 圧子の弾性パラメータ $\{=(1 - \mu_1^2)/E_1\}$

E_1 : 圧子のヤング率, μ_1 : 圧子のポアソン比

6. アルミ合金、りん青銅、ステンレス鋼に対する算出値

アルミ合金(A2017)、りん青銅(C5210R-1/2H)、ステンレス鋼(SUS304)試験片に対する実験結果を用いて、式(4)によりヤング率を算出した結果をFig.5に示す。

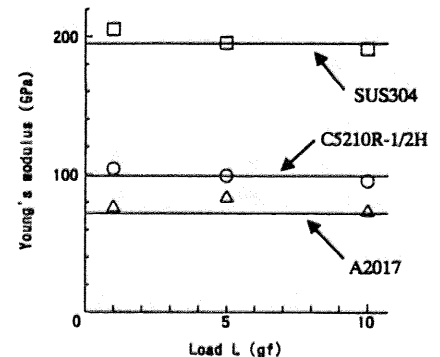


Fig.5 Results of experiments by ultramicro hardness tester (mean value)

7. 結言

- (1)縦型超微小硬さ試験機を用いて修正ベルコピッチ三角錐圧子による試験を、3種類の金属(アルミ合金、りん青銅、ステンレス鋼)に対して行った。
- (2)除荷終了点を除荷曲線上の3点を用いて決定する方法を示した。
- (3)今回用いた試験片において、除荷曲線形状指数の決定を行った結果、その形状指数は球圧子による除荷曲線形状指数にほぼ一致することがわかった。
- (4)提案されている三角錐圧子によるヤング率算出式を用いてヤング率を算出したところ、それらの平均値はひずみゲージによって求めた値とかなりよい一致を示した。

最後に、試験片等のご協力と研究に対する支援をいただいた(株)原田伸銅所、並びに協力いただいた4年生の濱岸憲一朗君、吉川裕輔君に感謝申し上げます。