

報 文

金属材料に対する爆轟効果

第Ⅳ報 爆轟衝撃及びジェット衝撃をうけた鋼材の硬度分布

(昭和34年5月25日 受理)

野村 羊観・遠藤 信・今井彦太郎・行方 二郎

(防衛大学校)

I 緒 言

筆者等は本研究の第Ⅲ報¹⁾として、種々の形状の変形或は穿孔を爆薬の爆轟により軟鋼板にあたへ、その形状に対する硬度分布の特徴及びそれとフライ試薬による歪模様との対応について述べた。前報と同じく硬度分布図の集積を目的として、前報以後に行はれた硬度測定の実験結果について述べる。

硬度測定に関する事項は前報と同一であるので省略する。硬度の表現は Vickers 硬度 (Hv) を採用した。薬は実験3の場合以外は総て20瓦を外径21mmに圧搾成型したもので、TNTの比重は1.44, RDXのそれは1.58である。

II 実験-1. 中空円筒の軟鋼の場合

Pearson と Rinehart²⁾ は、低炭素鋼の有底中空円筒内におかれた爆薬を爆轟させて、円筒の半径方向の硬度分布を測定するため、外径9インチ、内径1インチの肉厚の円筒を使用して、それが爆轟によつて破壊される事を防止した。彼等は此の実験において、円形切断面の半径方向の硬度分布図は階段的に減少する4ヶの硬度一定領域を示す事、並びに硬度一定領域にある1ヶのフェライト結晶粒内のノイマンバンドが示す方向の数が4方向より1方向づつ減じて最底の硬度増加領域では1方向になっている事、を示した。円筒の肉厚を彼等の約4分の1程度即ち25mm位にして爆轟を行った場合、硬度一定領域の段数に変化するかどうかを検べる事を目的として本実験を行った。但し有底中空円筒を用いると軟鋼の場合破壊はまぬかれないので、底なしの円筒を用い、Fig. 1 に示す如く配置し

て実験を行った。円筒は、外径73.2mm、内径21.7mm、高さ35mm、炭素含量0.17%の軟鋼で950°Cに2時間加熱後空冷したものである。

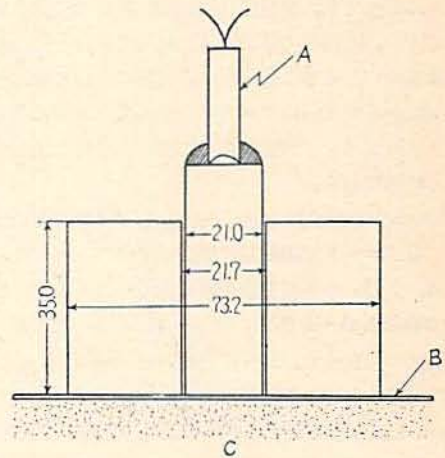


Fig. 1. Firing arrangement for a cylinder internally loaded with explosive (in mm unit).

A : detonator, B : mild steel plate (1mm in thickness), C : sand.

硬度分布の測定には上面より10mmの位置で切断した面を用い、0.1~0.2mm間隔で詳細に行つた。測定面は数個の放射状の亀裂を伴っているが、硬度の測定は亀裂のない部分を撰んで数ヶ所行つた。此の種の亀裂については既に Pearson と Rinehart²⁾ の詳細な観察がある。測定結果は大同小異であるが、比較的差異のある場合の結果を Fig. 2 に示す。この図において A, a より G, g までの対応は極めてよいが、それ

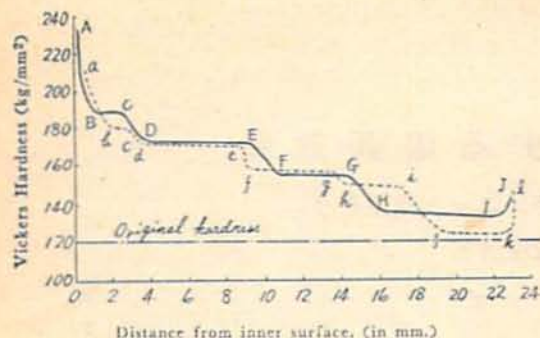


Fig. 2. Hardness-distribution along different radii of the hollow cylinder of mild steel loaded with a charge of TNT.

より自由面にいたる間に若干の差異が認められる。本実験に使用した軟鋼の爆轟前の硬度は $Hv=120$ であるが、 $j-k$ 間の硬度はそれより若干高く、又 $H-I$ 間のそれは $Hv=20$ 程大きい。即ち本実験の場合には硬度一定領域の数は4或いは5である。爆轟の仕方は異なっているが肉厚が Pearson 等の実験の場合の4分の1になつても、硬度変化の様相は彼等の結果と類似しており、円筒の肉厚の減少に伴つて硬度一定領域の段数が少くなる事は起らない。此等の各段の硬度一定領域にある大部分のフェライト結晶粒1ヶ中に見られるノイマンバンドの方向数は Pearson 等の検査像と全く同様である。

Singh⁹⁾等が軟鋼 ($C=0.13\%$) をノイマンV筒より生ずるジェットで衝撃した場合、ノイマンバンドに6方向、7方向のものもある事を提示しているが、本実験の場合には $A-B$ 間或いは $a-b$ 間においても最大方向数は4であつた。 $A-B$ 間或いは $a-b$ 間の組織を特徴づけるものは彎曲したノイマンバンドを伴つた grain flow とノイマンバンドの数(方向数でなく)の多い事である。 $A-B$ 間或いは $a-b$ 間の異常な硬度の増加はノイマンバンドのみが認められる他の領域とは異なつて、はげしい送り帯の発生に基づくものである。この事は送り帯の存在が直接観察し得なくても grain flow の存在から臨実に云へる事である。此の範囲以外の部分における硬度増加の原因に送り帯の発生も加はつているか否かは不明であるが、各硬度一定領域とノイマンバンドの方向数が規則性をもつて対応している事から考へて、grain flow の認められない領域の硬度増加の原因は殆んどノイマンバンドの発生によると考へられる。

ノイマンバンドが彎曲している事は粒界の変形がノイマンバンドの発生より時間的に後ではれた事を示す

ものである¹⁰⁾。一般的に云つて、1ヶの結晶粒内においてノイマンバンドの発生は、極めて急速な応力に対しても生じ得るが、grain flow は1ヶの粒内に送り帯が生ずるのみならず結晶群が移動しなければならない故時間を必要とする現象である。爆轟ガスは内壁に最初衝撃力を及ぼし次いで推力的作用に変化して内径を拡大せしめる。ノイマンバンドの発生は衝撃力によつて鋼材内部に誘起された瞬間的応力波の通過によるものであり、内壁近傍の grain flow は推力による圧縮加工によるものである。即ち爆轟ガスの衝動効果と静的効果とはそれ等の作用発現に時間的順序があるのみならず、夫々の有効作用距離にも差がある。爆轟ガスの有する二作用が金属組織学的にも区別される事は興味がある。

自由表面近くまで一旦硬度を測定した後、更めて自由表面近傍を切り出し自由表面が彎曲しない様注意して磨き丹念に硬度を測定する事によつて、自由表面近傍における硬度の増加を見出し得た (Fig. 1 の $I-J$ 及び $k-l$)。此の部分の組織は Photo. 1 に示される如く結晶1ヶ内のノイマンバンドの方向数が2及び3になつておるものもあり、硬度増加に対応した状態を示している。此の現象は内壁面からの入射応力波と外壁面での反射応力波とが干渉する事によつて生じたものと考へられるが、此の干渉効果は、本実験の場合自由表面の極く近傍にとどまつており内部に及んでいない事が云はれる。



Photo. 1. Microstructure showing two or three directions of Neumann bands in ferrite grains very near the outer free surface. ($\times 280$).

III 実験-2. 中空円筒の Ni-Cr 鋼の場合

実験1の場合と全く同一寸法の Ni-Cr 鋼 (第2種) を使用し、且つ同一条件で爆轟を行った場合、硬度分布が如何に現はれるかを知るために、又此の場合は軟

鋼と異なつて爆轟を2回繰返しても破壊しないので、1回爆轟衝撃したものと2回行つたものとの硬度分布を比較するために、本実験を行った。Ni-Cr鋼円筒は860°Cに40分加熱後油焼入を行い、次いで600°Cで1時間焼戻し再び油冷した。爆薬はTNT及びRDXの両者を用いた。

硬度分布の測定は上面より10mmの距離の断面について行つた。その結果をFig. 3及びFig. 4に示す。

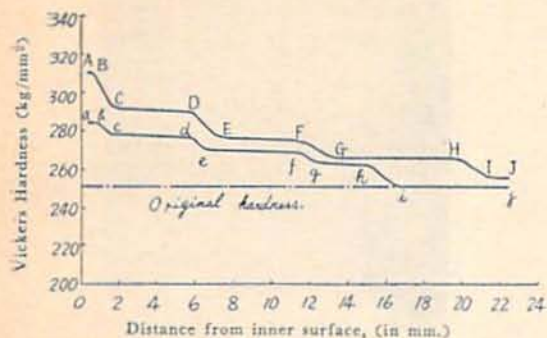


Fig. 3. Hardness-distance curves along a radius of the hollow cylinder of Ni-Cr steel loaded with a charge of TNT. Lower and upper curves were plotted from data obtained by loading once and twice, respectively.

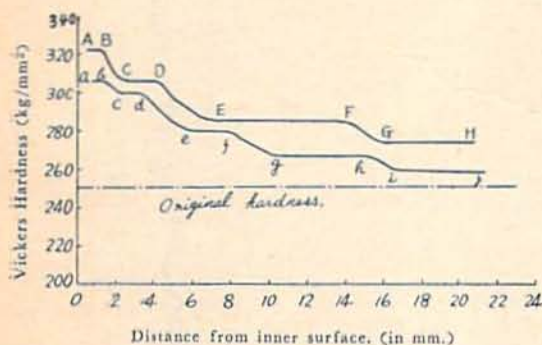


Fig. 4. Hardness-distance curves along a radius of the hollow cylinder of Ni-Cr steel loaded with a charge of RDX. Lower curve, once loading. Upper curve, twice loading.

TNTの場合の*i-j*(1回爆轟)は衝撃前のNi-Cr鋼が有していた硬度であり、これを除いて硬度変化のある領域について数へれば1回爆轟の時は4段、2回の時は最終段(*i-j*)において多少の増加を示しているので5段となる。RDXの場合は1回爆轟の時既に最終段も若干の硬度変化を示し5段となり、2回の時は4段である。

TNT及びRDXを使用した合計4個について上面より10mmの切断面においては亀裂は見当らなかつたが偶々RDXを用いて1回爆轟を行つた試料の上面より20mmの切断面にPhoto. 2に示される環状の亀裂が見出された。円筒の軸方向に切断して見ると亀裂は軸方向には延びておらず極めて限局されて発生している事が知られる。中空円筒内で爆轟を行つた時応力波が鋼材中を進行する模型をRinehart¹⁾等が提出しているが、半径方向の応力波の干渉によるものではなく、鋼材の境界条件が敏感に利くため限局された部位にのみ

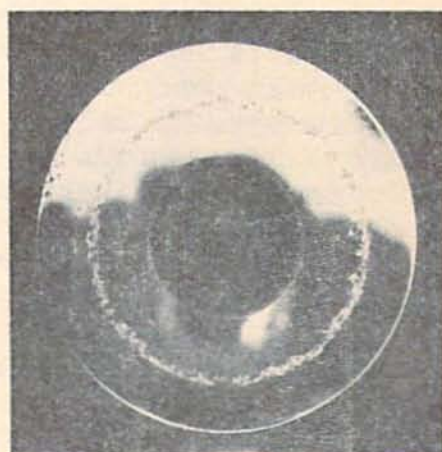


Photo. 2. Ring crack in the circular plane sectioned at a distance of 20mm from the top of the cylinder loaded once with a charge of RDX.

亀裂が発生すると考へられる。亀裂近傍の硬度分布を測定した結果をFig. 5に示す。亀裂ををさんで不連続な硬度変化(*N-O-S*)が見られる。

SinghとGandhi²⁾は炭素鋼($C=0.4\%$)を成型薬の鋼ジェットで衝撃したものについて半径方向の硬度

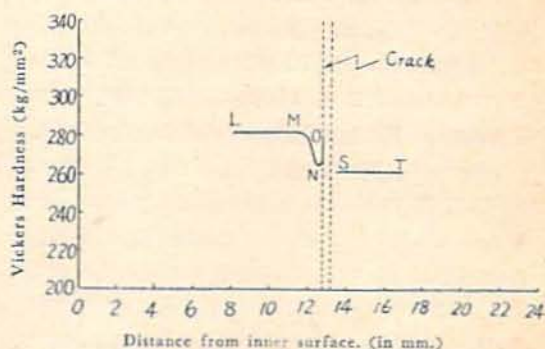


Fig. 5. Abrupt change in hardness between sides of the crack given in Photo. 2.

を測定し、軟鋼の場合と異なつて硬度一定領域及びそれに対応するノイマンバンドの方向数の規則性は認められない事を述べ、その理由として炭素鋼ではフェライト領域が少くノイマンバンドの発生が行はれ難いと考へた。又 Rinehart⁹⁾ は硬度一定領域の現はれる事は軟鋼の独特な性質であり、鋼、アルミニウム合金、真鍮等には現はれない事を報じている。Tardif¹⁰⁾ は Singh 等と同様の実験において $C=0.26\sim 0.30\%$ の炭素鋼を用いる時は硬度一定領域の現はれる事を示している。本実験の Ni-Cr 鋼の場合には軟鋼同様の硬度分布曲線を得たが、此の場合ノイマンバンドの有無を光学顕微鏡で観察する事は困難である。フライ試薬で腐蝕を施すと内径表面の薄層は直ちに黒色を帯び此の部分の迂り変形は断熱的に行はれた事を示す¹⁰⁾¹¹⁾。

2回爆轟を行った場合は、1回目の爆轟で既に内径は拡大している故、内壁と薬との間は1回目の場合より離れている。従つて内壁に対する爆轟圧は1回目の場合より小さいにも拘らず2回爆轟の時の硬度分布曲線は全領域にわたつて1回爆轟のものより上位にある。1回目の爆轟による応力波の通過により既に加工が起つている故、2回目の爆轟による応力波は加工に消耗される事が少く、1回目と同位置で考へれば強力な応力波が通過した事になり加工が更に行はれ、硬度が増加すると考へられる。

IV 実験-3. ジェット衝撃の場合

ノイマンジェット衝撃により得られた穿孔の表面と外周との間の半径方向の硬度測定は Singh, Gandhi¹²⁾ 及び Tardif¹³⁾ 等によつて行はれているが、穿孔方向の硬度測定は行っていない。本実験では列間隔1mm、点間隔0.2~0.4mmで硬度を測定し、穿孔方向についての硬度分布図を求める事を目的とした。

使用した薬は直径26mmの溶質 TNT/KDX=1/1、60瓦で、45°の軟鋼製(厚さ1mm)のV筒を有している。標的は径75mm、長さ50mmの軟鋼柱で、スタンドオフは50mmとした。Photo. 3は穿孔の中心を通る面で切断し、更に硬度測定用として片側だけを切出した試料をフライ試薬で腐蝕したものであるが、鋼材に見られる流線の移動により突質の移動している事が明瞭である。Fig. 6は $Hv=10$ の間隔で示した等高線の分布図である。穿孔面近傍を詳細に測定した例を Fig. 7に示す。此の図において穿孔面近傍に散在する $Hv=300$ 以上の極めて硬い部分は急熱急冷が行はれてパーライトがマルテン化した部分であり、これより少し内側に散在する $Hv=200$ 以下の低硬度部分は

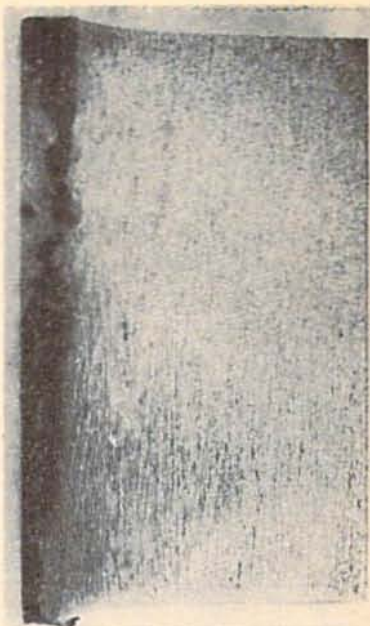


Photo. 3. The quarternary segment of the target for hardness measurement.

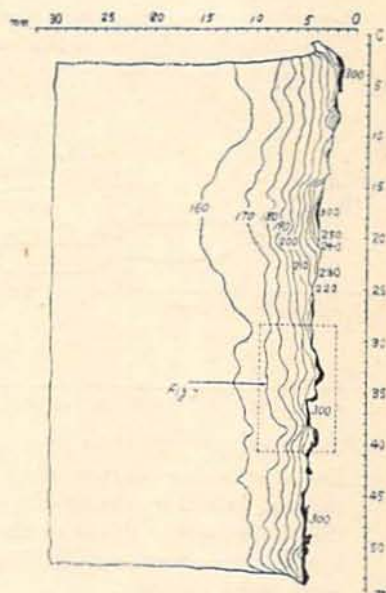


Fig. 6. The plateaus of hardness along the line parallel to the axis of the crater.

冷却速度がおそく焼鈍軟化された部分である。焼鈍された部分より外方は再び硬度が上昇し $Hv=240$ 位になつているが、これは冷間加工によるもので、前者とは異なつて熱的組織変化を受けていない領域である。又 Fig. 6によれば、殆んど垂直に穿孔された場合に

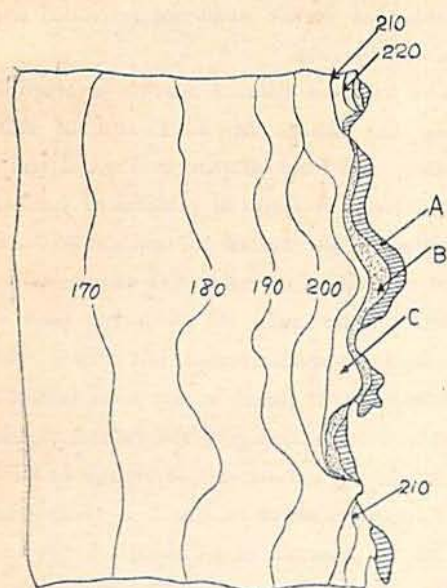


Fig. 7. Hardness-distribution of the region very near the surface of the crater. A: the hardened areas beyond $Hv=300$, in which pearlite changed into martensite. B: the softened areas below $Hv=200$, in which annealing occurred. C: area with deformed ferrite and pearlite grains.

は、全穿孔を通して穿孔方向の硬度分布は大体同様であると云へる。従つて又各部分の半径方向の硬度分布も大体類似している事が知られる。この事はノイマンジェット穿孔機構から考へて当然の事である。

V 総 括

(1) 軟鋼の場合において肉厚が Rinehart の実験の場合の $1/4$ になつても硬度分布曲線上に現はれる硬

度一定領域の段数は減ずる事なく 4~5 段に現はれる。自由面近傍に入射応力波と反射応力波との干渉による硬度の増加を認め得た。(2) Ni-Cr 鋼においても軟鋼の場合と同様な硬度分布が得られる。2 回繰返し爆轟を行う時硬度は増大するが、その分布の様相は 1 回爆轟のものに類似している。(3) ノイマンジェット衝撃の場合、穿孔方向の硬度分布は大体同様であり、従つて半径方向の硬度分布曲線は穿孔全体にわたつて類似している。硬度の詳細な測定によつて穿孔面近傍にマルテン化している部分と焼鈍軟化している部分とを区別し得た。

本実験を援助された須藤功君に感謝の意を表する。

文 献

- 1) 野村, 遠藤, 今井, 行方: 火協誌 19, 349 (1958).
- 2) J. Pearson and J. S. Rinehart: J. Appl. Phys. 25, 778 (1954).
- 3) J. Pearson and J. S. Rinehart: J. Appl. Phys. 23, 434 (1952).
- 4) S. Singh, N. R. Krishnaswamy and A. Soundraraj: J. Appl. Phys. 27, 617 (1956).
- 5) 蓮井: 応用物理 25, 108 (1956).
- 6) J. S. Rinehart and J. Pearson: J. Appl. Phys. 23, 695 (1952).
- 7) S. Singh and P. N. Gandhi: Research 9, 55 (1956).
- 8) J. S. Rinehart: J. Appl. Phys. 22, 1086 (1951).
- 9) H. P. Tardif: Research 9, S 42 (1956).
- 10) C. Zener and J. H. Hollomon: J. Appl. Phys. 15, 22 (1944).
- 11) 野村, 飛沢, 高橋: 火協誌. 19, 263 (1958).

Explosive Attack on Metals, (IV)

Hardness-distribution within Steels Loaded by Detonation and Attacked by Metal Jet

by Yōkan Nomura, Makoto Endo, Hikotaro Imai and Jiro Namekata

(1) Using a hollow cylinder of mild steel (thickness of wall, 4 in.), Pearson and Rinehart studied on a distribution of hardness along a radius in a plane normal to the axis of the cylinder internally loaded with an explosive, and found four plateaus along

which the hardness remained constant. The present experiment has been carried out to test, whether the plateaus of constant hardness in a wall of a cylinder will disappear or decrease in number, when a thickness of a hollow cylinder reduced to $1/4$ comparing

with that of cylinder used by Pearson and Rinehart.

The firing arrangement for the present experiment is illustrated in Fig. 1. The cylinder of annealed mild steel (75mm., o. d. \times 21.7mm., i. d. \times 35mm.) was loaded with the detonation of cylindrical charge of TNT (dia. 21mm., 20g., density 1.44). By using the Leitz Durimet microhardness tester, the Vickers hardness was measured at interval of 0.1~0.2mm along a radius in a circular plane sectioned at a distance of 10mm from the top of the cylinder. Hardness-distance curves are shown in Fig. 2, in which zero distance corresponds to the expanded inner surface. The hardness curve are very similar to that given by Pearson and Rinehart. The number of plateau of constant hardness is four or five.

An increase in hardness could be found in a narrow zone very near the outer free surface of cylinder, and the microstructure of this zone shown two or more directions of Neumann bands in a ferrite grain (Photo. 1). This can be explained as the effect of an interference between incident and reflected stress waves.

(2) Heat-treated cylinders of Ni-Cr steel (JIS-SNC2) in stead of mild steel were loaded by detonation under the same condition as mentioned above. The present experiments were made to ascertain the existence of plateau of constant hardness within a wall along a radius, and also to compare the hardness-distribution within a wall loaded once or twice by detonation, since the

cylinder of Ni-Cr steel not fractured with repeated loading.

The hardness-distance curves obtained by using the charge of TNT and of RDX (density 1.58) are shown in Figs. 3 and 4, respectively. A series of plateaus of constant hardness in the wall of the cylinder of Ni-Cr steel as well as of mild steel are confirmed.

There is no crack in all planes used for the hardness measurement, but a ring crack (Photo. 2) was found in the plane sectioned at 20mm from the top of the cylinder loaded once with a detonation of charge of RDX. The hardness curve in Fig. 5 is characterized by the presence of an abrupt change in a narrow range between sides of the crack.

(3) A target (dia. 75 \times 50mm., C=0.17%) of mild steel was attacked with a metal jet produced from a charge of cast RDX/TNT =1/1 (60g., dia. 26mm.) with a mild steel liner of a 45° conical cavity (thickness 1mm., stand off 50mm.). The segment used for the hardness measurements is shown in Photo. 3. The plateaus of hardness along the direction of the axis of the crater produced by the metal jet in the target was studied. The hardness measurements were made at interval of 0.2~0.4mm. along lines, with interval of 1mm. From the plateaus in Fig. 6, it is said that the hardness-distribution is almost same over the range from the top to the base. Fig. 7 indicates that martensitic and annealed areas lie locally in the thin layer very near the surface of the crater (Defense Academy)