シャルピー式衝撃曲げ試験における歪分布について*

田 中 実** 梅 川 莊 吉**

Minoru Tanaka and Sokichi Umekawa: On the Strain Distributions of Broken Charpy Test Pieces. The object of this paper is to observe the strain distributions of Charpy V-notch test pieces broken in the range of 100°C to -196°C. Some fine-grained (grain size 10μ) and coarse-grained (grain size 78μ) test pieces of a low carbon steel were tested. The transition temperatures were evaluated at -10°C for the fine grained samples, and at 40°C (Trf) and at 0°C (Trd) for the coarse grained samples based on the load-time curves and the absorbed energy-temperature curves. The strain distributions were examined on the longitudinal outer surface (named X-Y plane), and the central section (named (X-Y)_M plane) which are both vertical to the notch of test piece. The strain distributions at the surface and the central section were measured by means of the microhardness test and the recrystallized grain observation, and also the amount of strain on the surface was confirmed by the distortion of the fine intercrossing which were printed photographically. The results obtained in this study are summarized as follows: (1) The strained region of (X-Y)_M plane spreads less than that of (X-Y) plane in all the cases. (2) Above the transition temperature, a strain of more than 10% appears over a wide region of 4~8 mm in breadth along the notch and the fractured face on the (X-Y) plane, and of 4~5 mm in breadth along the fractured face only on the (X-Y)_M plane. The minimum amount of strain at about 1 mm apart from the fractured face is estimated to be 30% on the (X-Y) plane and 25% on the (X-Y)_M plane. (3) At the transition temperature, the strain of about 10% appears over a region of 1.5~2 mm in breadth nearly parallel to the fractured face on the (X-Y) plane. The strained region on the (X-Y)_M plane, however, spreads circularly in a narrow band below the notch, and the amount of strain in this band is estimated to be about 7~8%. (4) Below the transition temperature, a little strained region appears in the vicinity of the fractured face on the (X-Y) plane; besides this, strained regions are hardly detectable except some twins on (X-Y)_M plane. (5) The volume of strained region corresponds to the crack initiation energy which is estimated from the load-time curve. (6) Although the transition temperature depends distinctly on the grain size of the test piece, the size of strained region is mainly affected by the test temperature level, not by the grain size.

(Received September 5, 1961)

I. 緒 言

近年、金属材料の脆性破壊或いは鋼の切欠脆性の問題は理論上ならびに実用上、その重要性が認められ多くの研究が行なわれるようになった。シャルピー式衝撃曲げ試験は鋼の切欠脆性を調べる上に簡便であるばかりでなく、遷移

温度の決定が容易であつて、最近ではその破断過程を詳細に検討し、亀裂の発生および伝播に分離考察せんとする方向に努力が向けられている⁽¹⁾。

著者らはシャルピー式衝撃曲げ試験の破断過程について荷重-時間曲線を観察する実験を行い、すでに二三の報告⁽²⁾を行なつた。本文は構造用炭素鋼を用い、破断試片の歪

** 東京工業大学 (Tokyo Institute of Technology, Tokyo)

* 1961年10月本会秋田大会に発表

(1) たとえば G.R. Irwin, J.A. Kies & H.L. Smith: Proc. ASTM, **58**(1958), 60.

(2) 田中, 梅川: 第1回材料試験連合講演会論文集, 95 (1958); 田中, 梅川, 陳: 同上第3回, 81 (1960).

分布について実験的考察を試みた結果の報告である。歪分布の測定については、硬度変化および歪模様によるもの⁽³⁾、あるいはX線回折および微小硬度分布によるもの⁽⁴⁾など若干の研究があるが、殆んど定性的なものに限られている。著者らはさらにある程度定量的な結果を求めるため、歪測定法に新たな考案を加え、4種類の測定法による結果を総合して各部分における最大の歪の分布につき考察した。

II. 実験方法

シャルピー式衝撃試験機は容量 30 kg-m であつて、V型標準切欠試片を用い、荷重-時間曲線は既報の装置⁽⁵⁾により求めた。試片は直径 16 mm の JIS S 15 C (C 0.13%, Si 0.27%, Mn 0.54%, P 0.019%, S 0.014%) 棒材より製作した。

実験はこれらの試片を真空中で 900°C 1 hr 加熱炉冷して、結晶粒の平均直径を約 10 μ にしたものと、同じく 1000°C 3 hr 加熱炉冷後 1200°C 1.5 hr 加熱炉冷して、結晶粒の平均直径を 78 μ に粗大化したものの2種類 (Photo.1) に

$\times 150 (\times 1/2)$

Photo.1 Microstructures of fine grained (left) and coarse grained (right) specimens.

Photo.2 Microstructures of specimens recrystallized at 700°C for 12hr. ($\times 150 \times 1/2$)

ついて遷移温度を求め、ついで遷移温度附近およびその上下の温度領域における破断試片について歪の測定を行なつた。歪の測定方法は次の通りである。

1. 網目焼付法

これは試片の表面にあらかじめ写真的方法によりグラビヤ印刷用の微細な格子状の網目を焼きつけ、その変形状態を観察する方法で、試片表面における歪に限られるが、比較的正確な測定が可能である。本実験においては、重クロム酸アンモニウムおよびポリビニルアルコールの混合液を切欠試片の側面に塗布して感光膜を形成せしめた。使用し

た網目の大きさは 1 in につき 150 本の割合であり、線の巾とその間隔の比は 1:3 である。

2. 再結晶法

これは次のごとき予備実験を行なつた後、微細結晶試片に対して採用した。すなわち、直径 16 mm、長さ 20 mm の圧縮試片 8 個、および直径 7 mm の標準引張試片 5 個を 900°C 3 hr 真空焼鈍し、それぞれ 0~27% の圧縮あるいは引張加工を与えた後 700°C 12 hr 真空加熱した。再結晶後の試片の顕微鏡写真は Photo.2 のごとくであり、圧縮、引張いずれの場合においても、再結晶粒の平均直径は加工度 0~7% の範囲では 15 μ 程度であるのに対し、加工度 10% のものは約 112 μ で最大となり、加工度 11~13% では 57~62 μ 、加工度 20% 附近では 30 μ 程度に減少する。この予備実験の結果を基準にして、破断後の試片につき結晶粒の成長状態から、試片の表面および内部の各断面における歪分布を推定した。

3. 硬度分布測定法

Fig.1 は前項と同様な圧縮試片に 0~20% の圧縮歪を与え、微小硬度計 (荷重 50 g) によつて硬度を測定した結果であり、この関係は引張加工試片についても一致することが確かめられたので、破断試片の硬度分布から歪分布の推定を行なつた。またこの方法は歪の極めて小さい範囲を除いては、試片内部の歪分布にもほぼ適用し得ることが認められた。

これらの結果を衝撃曲げのごとき複雑な 3 軸応力の場合に適用することは若干問題もあるが、試片の表面の歪について、上記の 3 方法を比較した結果、本研究においては

10% 程度の歪の範囲では定量的考察が可能であると認められた。

Fig.1 Effect of cold working on hardness.

なお、以上の実験に加えて、粗大結晶試片については結晶粒の変形を観察した。

III. 実験結果

(3) E.S.Bumps: Trans.AIME, 188(1952), 1067.

(4) 立花, 幸田: 本誌, 21(1957), 475.

(5) 田中, 梅川: 本誌, 21(1957), 221.

破断に要するエネルギーと温度との関係は **Fig.2** のごとくである。遷移温度は微細結晶試片では -10°C 附近 (Trd), 粗大結晶試片では $+40^{\circ}\text{C}$ (Trf) および 0°C (Trd) 附近の 2 個所に認められる。 **Photo.3 a~h** はこれらの破

Fig.2 Energy-temperature curves for the fine grained and coarse grained test pieces.

る 0°C および 15.5°C の破断においても認められた。 f のとき破断挙動は粗大結晶試片について見られる甚だ特長的なものであり、微細結晶試片においては僅かに -9°C のみに見られるごとく、破断過程の終りに近い部分に多少このような傾向が認められるに過ぎない。微細結晶試片に比べて、粗大結晶試片では亀裂伝播が容易であることが視われる。

このような破断試片について、それぞれ **Fig.3** に示す表面および断面の歪を測定した。 **Photo.4** は試片側面、すなわち **Fig.3** の X-Y 面にあらかじめ写真焼付した網目模様の変形を示したものである。この網目の変形から求めた試片の歪量が **Table 1** である。表中の x, y はそれぞれ切欠底部および破断面よりの距離で、歪を測定した位置を示し、 E_x, E_y は X 方向、Y 方向の歪を示している。

Photo.3 Load-time curves for fine grained and coarse grained test pieces tested at various temperatures.

断の際の代表的な荷重-時間曲線である。a~d は微細結晶試片の破断状況である。a は最高荷重 (約 1.7t) に達して後さらに約 1 mS 間におよそ 0.1t 程の僅かな荷重の減少があり、その後時間とともになだらかに減少し、典型的な靱性破壊を示している。b は約 2.4 mS までは a と同様の挙動を示すが、以後荷重は急激な減少を示している。c, d は最高荷重 (約 1.0t および 0.6t) に達する時間は約 0.44 mS および 0.27 mS となる。e~h は粗大結晶試片の破断状況である。g, h は最高荷重に達する時間は約 0.31 mS および約 0.1 mS で互いに異なっている。この c, d, g, h の破断は他に観察した -60°C およびそれ以下の温度における荷重-時間曲線と同一の傾向を有し、破断面の様相からも遷移温度以下の脆性破壊と認められる。

その他の粗大結晶試片では e は a と同様で、最高荷重 (約 1.6t) に達して約 1.1 mS 間ほぼ一定荷重に保たれた後、時間と共になだらかに減少し、靱性破壊を示している。f は最高荷重に達するまでは e と同様な挙動を示すが、荷重は最高値より急激に減少し、急速な亀裂伝播過程を示している。この f と同じ挙動は Trf と Trd の範囲内にあ

Photo.5 は破断した微細結晶試片を 700°C 12 hr 真空加熱後の結晶粒の状態を示したものである。写真で明らかな

Fig.3 Locations and marks of examined planes.

ごとく、腐食程度の異なる二つの領域が存在する。破断面に接する領域は強く腐食され、結晶粒の粗大化が認められる。とくに、これら二つの領域の境界付近で粗大化が著しい。結晶粒の大きさにより、予備実験の結果からこれらの境界は約 10% の歪をうけた部分と考えられ、破断面に近づくとともにさらに大きな歪をうけたものと推定される。 **Photo.5-b** で下部に大きな変形部が観察されるのは、試験

Photo.4 Distorted figures of fine crossed lines printed on the surfaces of test pieces, a,b and c are of fine grained test pieces and d is of coarse grained test piece. ($\times 150 \times 1/2$)
(The data are summarized in Table 1.)

Table 1 Strain measured by fine crossed line printing method.

Photo.No.	Test temp.	x (mm)	y (mm)	$E_x(\%)$	$E_y(\%)$
4-a	13.5°	6.0	1.0	4	34
4-b	-10°	1.5	1.0	≈ 0	13
4-c	-60°	0.5	1.0	—	—
4-d	29°	2.0	1.0	10	18

機の振子に基づくものである。

Fig.4は破断した微細結晶試片の微小硬度計による硬度分布を測定した結果である。Fig.1の関係を参照して、歪10%をうけた領域の分布を破断試片について求めると、Photo.5における再結晶粒の粗大化部分に相当する。この実験では結晶粒の成長および硬度により推定した歪分布は互いに比較的良好一致が得られた。Photo.6は粗大結晶試片を100°C、29°C、および-60°Cで破断し、(X·Y)_M

Fig.4 Distributions of hardness. (V.H.N.)

Photo.5 Macroscopic structures of broken test pieces recrystallized at 700°C for 12hr. The planes and temperatures examined are as follows: a, b: X·Y, (X·Y)_M, 15.5°C, c, d, e, f: X·Y, (X·Y)_M, Y·Z, (Y·Z)_M, 0°C, g, h, i: X·Y, Y·Z, (Y·Z)_M, -9°C, j, k: X·Y, (X·Y)_M, -10°C, l, m, n: X·Y, (X·Y)_M, (Y·Z)_M, -20°C, o, p: X·Y, (X·Y)_M, -60°C.

面の切欠底部附近の結晶粒を示したものである。100°Cおよび29°Cの破断試片では結晶粒がほぼ同程度にかなり大きく変形を受けているのに対し、-60°Cの破断試片ではほとんど結晶粒は変形せず、二三の結晶粒に双晶が存在し、破断過程の特長を示している。なお、これらの結晶粒の状態から推定される変形領域は、上述の各測定による結果とほぼ一致することが認められた。

以上の測定および観察の結果を総合すると、破断試片の歪分布は次のごとく考えられる。

歪分布は遷移温度を境として著しく異なること、および同一試片にあつては内部に比し、表面において広範囲に亘つてゐることが注目される。遷移温度以上においては、たとえばPhoto.5-aに見られるごとく、10%程

度の歪の領域が、試片の表面では切欠溝の面より5~6.5 mm, 切欠底部では約4 mm, さらに破断面に沿って4~8

$V_{15.5^{\circ}\text{C}}: V_{-9^{\circ}\text{C}}: V_{-10^{\circ}\text{C}}: V_{-20^{\circ}\text{C}} \doteq 480:410:65:15$
また、荷重-時間曲線につき、荷重の明らかな減少が始ま

Photo.6 Microstructures of the regions in the vicinity of notch roots of coarse grained test pieces broken at various temperatures. ($\times 150 \times 1/2$)

mm に分布している。内部では切欠溝の面に沿う部分に歪はほとんどなく、破断面に沿って4~5 mm の範囲に分布する。最大歪は破断面より約1 mm 附近において、内部では少くとも25%, 表面では30% 以上である。遷移温度附近においては歪領域は著しく減少し、10% 程度の歪が試片の表面においては破断面に沿い1.5~2 mm に分布するが、内部においては切欠底部および振子に接した部分に僅か分布し、これよりさらに小さい7~8% 程度の歪がこれら二つの小さな領域を結び、ほぼ円弧状に分布している。遷移温度以下においては結晶成長からはたとえば Photo.5-o に見られるごとく、試片表面では破断面に近接して最大0.2 mm 程度の極めて小さな領域に歪が存在する。これに対し、内部では歪はほとんど認められず、他の方法でも歪を測定することは困難であるが、破断面に接する近傍の結晶において若干双晶変形が存在する。

歪測定の結果より、各温度 (t) における微細結晶の破断

Fig.5 Volume of strained region (V_t), and absorbed energy until the load begins to decrease distinctly (E_t), vs temperature.

試片の歪領域の大きさを V_t とし、極く概略の割合を求めると次のごとくである。

るまでの吸収エネルギーを E_t とし、これの各温度についての割合を求めると次のごとくである。

$$E_{13.5^{\circ}\text{C}}: E_{-9^{\circ}\text{C}}: E_{-10^{\circ}\text{C}}: E_{-20^{\circ}\text{C}} \doteq 100: 90: 10: 2$$

V_t および E_t を比較すると Fig.5 のごとくであり、これより歪の領域は荷重-時間曲線において荷重の明らかな減少が始まるまでの吸収エネルギーに対応すると推定される。

粗大結晶試片の0~29°C の破断試片は Photo.3-f のごとく荷重-時間曲線を示すことと対応して、歪が比較的狭い領域に限られることが観察され、亀裂伝播が比較的容易に行なわれていることが認められた。

以上の結果、荷重-時間曲線において、荷重の明らかな減少が始まるまでの吸収エネルギーは亀裂発生、それより後の吸収エネルギーは亀裂伝播にそれぞれ必要なエネルギーにはほぼ相当するものと推定される。

IV. 総 括

2種類の大きさの結晶粒を有する構造用炭素鋼について、シャルピー式衝撃曲げ試験を行ない、遷移温度およびその上下の温度領域における試片の歪分布を観察した結果は次のように要約される。

(1) 吸収エネルギー-温度曲線および荷重-時間曲線より遷移温度は微細結晶試片においては -10°C (Trd), 粗大結晶試片においては $+40^{\circ}\text{C}$ (Trf) および 0°C (Trd) にあることが求められた。すなわち、荷重-時間曲線の形状は遷移温度の上下では微細および粗大結晶試片ともに明らかに靱性および脆性破断に対応して変化しており、粗大結晶試片では0~29°C における破断挙動が最高荷重までは30°C 以上における靱性破断と同様であるが、最高荷重に達した後急激に荷重が減少して亀裂伝播の容易であることを示し、一方微細結晶試片では -9°C における破断挙動のみが若干これと類似する。

(2) 歪の測定は硬度分布、微細結晶試片については再結晶法、さらに表面については写真的方法による網目焼付法により行なつた。また、粗大結晶試片については結晶粒の変形より定性的な歪分布の観察を行なつた。歪領域は試験

温度に拘わりなく、表面に比し内部が小さい。遷移温度以上では歪は試片表面で切欠溝面および破断面に沿う広い領域に認められたが、内部では切欠底部から破断面に沿う領域のみに認められた。遷移温度附近では試片表面で破断面にはほぼ平行する分布が認められたが、内部では切欠底部および振子に接した部分に局所的な歪があり、これら二つの部分を結び、ほぼ円弧状に分布したさらに小さな歪が分布する。遷移温度以下においては、試片表面で破面に近接する極めて小さな領域に僅かの歪が認められたが、内部ではほとんど存在せず、双晶の形成が認められた。

歪領域の大きさは荷重-時間曲線において、荷重が明らかに減少し始めるまでの吸収エネルギーに対応する。ま

た、完全な脆性破断を示す温度より上の温度範囲において、粗大結晶試片に比し、亀裂伝播が容易に行なわれる傾向が認められる。この傾向はとくに遷移温度領域において著しい。すなわち、粗大結晶試片においては $+40\sim 0^{\circ}\text{C}$ の範囲で亀裂伝播が容易に行なわれるに対し、微細結晶試片においては -9°C においてのみこれに近い程度の亀裂伝播が認められる。これにより、荷重-時間曲線において荷重の明らかな減少が始まるまで、およびそれより後の吸収エネルギーが、それぞれ亀裂発生および伝播に要するエネルギーに対応するものと推定される。

終りに臨み、終始熱心に協力された篠田哲守、小林五郎両氏に謝意を表する。