高静圧下におけるガラス板の打抜き加工*

山口 勝美**, 五十君 清司***
社 本 英二†, 小 嶋 純 一††

Piercing Sheet Glass under High Pressure

Katsumi YAMAGUCHI, Kiyoshi ISOGIMI,
Eiji SHAMOTO, and Junichi KOJIMA

Many kinds of recently developed materials are very hard and brittle and it is very difficult and expensive to process these materials. So it is necessary to develop an easier and more economical method to process these materials. As an example, punching holes in sheet glass was studied in this paper. Because punching holes in sheet glass by ordinary methods is impossible, this paper presents a method for punching holes in sheet glass under statical high pressure. This research confirmed that it is possible to punch holes in sheet glass, and clarified the conditions needed to obtain good holes without defects.

Key Words: Manufacturing Technology, Piercing, Punching, Hydrostatic High Pressure, Glass Sheet, Brittleness

1. 結 言

近年、セラミックスなどの高硬度、高ぜい性材料の開発が進み、その加工法が問題となっている。現在、これらの材料はダイヤモンド研削や超音波加工などによって加工されることが多いが、これらの加工法は能率が悪くコストが高いものとなっている。もしこれらの材料に量産加工法が開発されれば、加工能率向上、加工コスト低下に貢献でき、材料の利用範囲を広げることができるだろう。

本研究は、これらの高ぜい性材料に対して量産可能な加工法を開発するための第1段階として、代表的ぜい性材料であるガラスの冷間打抜き加工を試みたもので、打抜き加工のための装置を試作し、打抜き可能な条件を明らかにしたものである。

2. 実 験 装 置

2.1 加工原理 一般に、ぜい性材料の破壊は材

料内部の欠陥やき裂の先端で局所的に生ずる応力集中によって起こるため、マクロな応力はかなり低い値で材料は破壊する。したがって、ぜい性材料を通常の打抜き方法で打ち抜こうとすると、打抜きに要する力によって、破壊しては困る場所で局部的応力が破壊を引き起こし材料の打抜き穴以外のところにクラックが生じたり破壊したりしてしまう。

そこで、ぜい性材料を打ち抜くためには、打抜き部分以外の材料内にあらかじめ圧縮応力場をつくり、打抜き時に生じる引張り応力に対抗させ、打抜き部分以外の破壊をおさえる方法が考えられる。本研究の実験装置は、このような原理から設計されたものである。

2.2 打抜き装置の構造 打抜き装置の全体図を図1に示し、その機構図を図2に示す。

図2で①がポンチ、②がダイスである。打抜きは、まず加圧板④、⑦で打ち抜こうとするガラス板を上下から極めて高い圧力で加圧してから行う。この装置におけるポンチの打抜き運動は、ボルト③に取付けたナット⑥を回転させることによりプッシング⑤を横方向にすべらせ、プッシングのテーパ部を介してポンチ①を下方向に押すことで行わせる。

ポンチとダイスの材質はSKD 11で、焼入れされたものである。また加圧板④、⑦はS 45 C 水焼入れで製

* 昭和59年10月16日 第62期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和61年1月25日。

** 正員、名古屋大学工学部 (〒466 名古屋市中種区不老町)。

*** 正員、三重大学工学部 (〒514 津市上浜町1515)。

† 学生員、名古屋大学大学院。

†† (株)東芝 (〒512 三重県三重郡朝日町縄生2121)。

作した。

ポンチとダイスのクリアランスの設定はダイス②を穴径の異なるものに取り替えることにより行った。

この装置は図1に示すようにすべてダイスセットに組み込まれ、ダイスセットごとプレスで加圧される。

なおポンチを一定速度で送り込むために、ナット⑥の締め付けはモータ駆動により行った。本実験でのポンチ送り速度はおよそ0.1 mm/sである。

2・3 打抜き装置の検出機構 打抜き過程を調べるためには、加工中の材料の変形やポンチにかかる荷重の経過を把握することが重要である。そこで、ポンチにかかる荷重とポンチストロークとを同時に検出した。その機構を図3、4に示す。

ポンチ荷重の測定は図3に示すようにポンチの一部を切欠き、その円柱の中央にプラス形のひずみゲージでホイートストンブリッジを形成させ、ひずみ計の温度補償をすると同時にポンチに加わる偏心荷重による曲げモーメントの影響を相殺させて、行った。

図1 打抜き装置全体図

図2 打抜き装置機構図

ポンチストロークの検出は、図4のように板ばねの片持ちはりにひずみゲージを上下対称位置に接着したものにより行った。はりの先端部が切欠きしたポンチと接しており、この部分の降下量をはりのたわみとしてひずみゲージによって検出し、ポンチストロークを求めた。

なおこれらの検出機構については、それぞれについて検定試験を行い、実用上十分な線形性と再現性を得た。

3. 緩衝材

2章で述べたように、本実験ではガラス板を圧縮した状態で打抜き加工を行うのであるが、加圧板で直接ガラス板を圧縮すると、図5に示すようにガラス全体が粉碎してしまいやすい。

これは、加圧板とガラス板の両方に微小なうねりや表面の凹凸があることや、上下の加圧板の平行度が完全でないことも原因の一つと考えられる。

図3 ポンチ荷重検出部

図4 ポンチストローク検出部

そこで本研究では、ガラス板と加圧板との間に軟質の薄板（緩衝材と名付ける）をはさむことを試みた。以下に、最適な緩衝材を選ぶために行った予備実験について述べる。

実験装置は2章で紹介した装置をそのまま使用した。加圧板は平面研削により表面粗さ $R_{\max}=3\ \mu\text{m}$ 以下に仕上げた。

本研究に使用したガラス板はすべて、市販透明普通板ガラスでありその表面粗さは $R_{\max}=1\ \mu\text{m}$ 以下である。この緩衝材の実験では、ガラス板の形状はすべて直径45 mmの円形とし、板厚は0.7 mmのものを使用した。

以上の実験条件で、各緩衝材について得られた結果を図6に示す。

図6の縦軸は所定の圧力を加えた時に粉碎せずに残るガラス板の面積の割合（残余率）を表している。図6より、本実験で扱った緩衝材の中では0.05 mm厚の銅はくが最もよく、最高圧力1000 MPaでも80%以上の残余率を示した。また、緩衝材を使用せず加圧板で直接ガラスを加圧する場合は、圧力400 MPaまではガラス板はほとんど粉碎しないがそれを超えると全面が粉碎してしまい原形をとどめない。

同じ材質の緩衝材では、薄いもののほうが残余率が良かった。これは、厚いものでは圧縮応力によって変形が起こり半径方向に広がりやすいため、ガラスに加わるはずの半径方向の拘束力が相対的に減少するためと思われる。

4. 打抜き実験

4.1 実験条件 3章で述べた予備実験の結果より、以後の実験では緩衝材として0.05 mm厚の銅はくを使用した。

試料ガラスは、すべて同じ市販透明普通板ガラスを使用し、板厚 t を0.4~2.0 mmの範囲で変化させた。ガラス板の形状は、直径45 mmの円形と、一辺50

mmの正方形の二つを用いた。

ポンチ直径 d は3 mmで一定とし、ダイス穴径 d' を3.05~9.00 mmの範囲で変化させることによりクリアランス c を変化させた。

なお実験条件を変えるパラメータは図7を参照して、

- (1) ガラス板を圧縮する圧力 P
- (2) 相対クリアランス c/t
- (3) 相対ポンチ直径 d/t

の三つを主なパラメータとし、これらの条件がいかなる条件を満たす時、ぜい性材料であるガラスを打ち抜くことができるかを調べた。

4.2 打抜き穴の形成 本装置による打抜き穴の例を図8に示す。

図6 各種緩衝材によるガラス板の残余率

図5 ガラス板粉碎例

図7 パラメータ説明図

図8(a)は本実験で行った打抜き穴の外観である。(b)は板の形状、穴の位置を変えた場合にも打抜きが可能であることを示すための例である。

また本実験では、加工中のガラスの挙動を知るために、ポンチストロークを途中で停止して打抜き途中のガラス断面を観察した。その写真を図9に示す。ここで(a)、(b)、(c)は打抜きの進行する順番を表している。

図9よりこの場合には、打抜き穴はまずポンチ側から最初のクラックが入り、その後内部に無数のクラックが入って穴が形成されている。また図9(c)を見るとクラックは途中で止まり加圧域には伸展せず穴が空いていることがわかる。

5. 打抜き抵抗

加工中にポンチにかかる荷重がポンチストロークに応じて変化する様子を求めた例を図10, 11に示す。ここで縦軸は、ポンチにかかる荷重を打抜き円筒面の面積で割った値(この値は応力の次元をもつが事実上ポンチ荷重の変化を示すので、以後ポンチ荷重と呼ぶ)を用いた。図10は圧力 P を変化させた時の線図の例であり、図11は相対クリアランス c/t を変化させた

時の線図の例である。

図10, 11のように、ガラスの打抜きにおいてはまずポンチストロークに応じてほぼ直線的にポンチ荷重が上昇し、荷重がガラスの破壊点に達すると衝撃音とともに瞬時に打抜きが完了して荷重が減少する。このためガラスは延性材料の場合と異なり、先の荷重線図のように最高点において鋭く上がった線図となる。

これらの線図で、ポンチ荷重の最大値をガラスの打抜き抵抗とし、この値と圧力 P ならびに相対クリアランス c/t の関係を求めたものを図12に示す。

図10 圧力 P 変化による荷重線図

図11 c/t 変化による荷重線図

(a) (b)

図8 打抜き穴外観

(a) (b)

(c)
図9 打抜き途中のガラス断面

図12 打抜き抵抗と圧力 P の関係

図 12 より, 相対クリアランスが大きいほど, また圧力 P が低いほど打抜き抵抗は小さくなることがわかる。相対クリアランスが大きいほど打抜き抵抗が小さくなるのは, 相対クリアランスが小さい時に比べて同じポンチ荷重でも板断面に大きな曲げモーメントが生じ, そのため大きな引張り応力が生じてクラックが発生しやすくなるためと考えられる。また圧力 P が低いほど打抜き抵抗が小さくなるのは, ガラス内の圧縮応力が低くそれに対抗してクラックを発生させるのが容易であるためと考えられる。

打抜き加工においては, 打抜き抵抗が低いことが望ましいが, この目的を満たすためには, 上述のように相対クリアランスを大きくし圧力 P を低くすることになる。しかし相対クリアランスを大きくすれば, 打抜き穴の精度を下げる原因となりやすく, また圧力 P を低くするほど, 当然打抜き部分以外にクラックが発生する危険が大きくなる。このため良好な打抜き穴を得るためには, 必然的にある程度きびしい条件下で打抜き加工を行わなければならない。

6. 打抜き穴の評価

打抜き穴の性状は, 打抜き条件によっていろいろ異なったものとなる。その代表的なものを図 13 に示す。

すなわち条件によって, ほぼテーパ状の破断面だけのもの(a), 円周方向クラックの入るもの(b), 半径方向に微小クラックの入るもの(c), 半径方向に大きなクラックの入るもの(d)などに分けられる。

これらの板穴の性状を評価するために, 次のような基準を考えた。まず図 14 で, ガラスに損傷の見られる部分すなわち半径方向クラック, 円周方向クラック, 破断面のうちで, 最大なもの先端から他方の先端までの距離を最大寸法 $D_{\max}$ とする。この値が小さいほど損傷が小さくてよい。この最大寸法 $D_{\max}$ を相対的に評価するために相対損傷長さ $L=(D_{\max}-d)/2t$ を定義し, これを評価の基準とした。評価は 4 段階に分類し, 以下のように定めた。

(1) 評価○: 図 13(a)に示すように, 半径方向クラックが全くなく, 円周方向クラックはほとんど認められないもので, ほぼテーパ状の破断面だけでできているもの。相対損傷長さは $L < 1$ の範囲に入る。

(2) 評価□: 図 13(b)に示すように, 半径方向クラックがないもの, 円周方向クラックはあまり大きくなく, 相対損傷長さは, $1 \leq L < 2$ の範囲に入るもの。

(3) 評価△: 図 13(c)に示すように, クラック伸展の危険の多い半径方向クラックはあるが, その長

さは短いもの。通常, 円周方向クラックを伴っており, 相対損傷長さは, $1 \leq L < 2$ の範囲に入る。

(4) 評価×: 図 13(d)に示すように, 大きな半径方向クラックがあるか, または大きな円周方向クラックがあるもの。相対損傷長さは, $2 \leq L$ となるもの。破壊してしまったものはこの評価に入る。

7. 打抜き加工条件

本実験で変化させた種々の条件のうちで, いかなる条件の組合せのとき良好な打抜き穴が得られるかを示したものが図 15 である。図 15 で良好な打抜き穴を得ることができたのは, ○で示された領域である。

図 15 より, 良好な打抜き穴を得るには, 圧力 P は高く, 相対クリアランス c/t は 0.3~0.7 の範囲におさえなければならない。相対クリアランスが小さいと円周方向クラックや半径方向クラックが発生しやすい。他方相対クリアランスが大きすぎると, 穴に大きなテーパがついて評価が下がる。

相対ポンチ直径 d/t に関しては, これが小さいほど

図 13 打抜き穴の代表例

図 14 相対損傷長さ説明図

図 15 打抜き加工可能条件

深穴を打ち抜くことになり、加工が困難になると考えられる。図 15 を見ると、 $d/t=1.50$ の条件では○の領域が狭くなっており、このことから、 $d/t=2$ を超えると穴加工が難しくなることが予想される。

結局、ガラス板に対する精度よい打抜き穴加工は、圧力 P が 400 MPa 程度以上で、相対クリアランスが 0.3~0.7 の範囲においてのみ可能であること、圧力 P が大きすぎるとガラス板の周辺部に欠陥が生じる問題のあること、相対ポンチ直径が 2 付近を下まわる

と急激に打抜き可能条件が狭められること、がわかった。

8. 結 言

本実験で用いた条件により、ぜい性材料であるガラスを打ち抜くことが可能であることが示された。そして良好な打抜き穴を得る条件を明らかにすることができた。

討 論

〔質問〕 神 馬 敬

〔東京工業大学精密工学研究所〕

高静圧を加えて打抜き加工を行う実験装置に興味深く拝見した。以下の点についてご見解をうかがいたい。

(1) 紙数の関係と思うが、佐藤ら(付1)(付3)によ

ってぜい性材料の側圧による切断が公表されているのを引用していないのは残念である。

(2) 打ち抜かれたガラス片が粉碎されて使用できないが、これについても、熱応力(付2)(付3)によるガラスの切断が発表されて実用されているのに引用がな

い。

(3) 打抜きという表現は慣用と異なると思う。

〔回答〕 (1), (2) ぜい性材料の加工という意味ではご指摘の文献を引用するのが適当であったかと思う。また、ガラスの加工という意味では多くの文献があるかと思う。ご指摘の文献は、側圧、熱応力を利用しクラックを発生させそれを加工に利用するのに対し、著者の方法は、高い静水圧をもって打抜きの際生ずるクラックの発生、伝ばを防ぐのが目的の手法である。その意味では通常の打抜きの文献のほうが近いものが多くあってこれを取り上げる必要があり膨大な文献になる。紙面の都合と本手法に狭く限った結果ご指摘の文献をあえて取り上げなかったことをご了承いただきたい。

(3) 本手法は打ち抜かれた穴側はくずとなるが、穴側も製品として利用できる方法も現在調べており、成功例もある。一応気持ちのうえでは打抜きという表現をしている。

〔質問〕 宮川 松 男〔長岡技術科学大学〕

実用に供しうるデータを提供していることに敬意を表す。

討論にならないと思うが、この種の研究に文献が全く引用されていないので、気のついたことを二、三お知らせしておきたいと思う。

ガラスの高静水圧利用による切断については、佐藤教授(元東京工業大学、現日本大学工学部)らの研究発表が本会でもあり、また、東洋ガラス(株)からの特許も出ていて、一部実用段階にある。

また、金属の高静水圧下のせん断挙動については、篠原(東京都立大学)ほかの研究が本会で公表され、金属アモルファス材料のせん断加工については、中川ほか(東京大学生産技術研究所)の研究もある。

これらは、著者らの研究の基礎的データの考察に欠かせないものと思うので、ぜひ、参考にしていただきたい。

〔回答〕 神馬氏への回答(1), (2)と同様である。なお、本手法は高静水圧下のガラスのせん断挙動を検討するところまで達していない。打抜きの可能性を示したものとご了解いただきたい。

(付1) 佐藤・綿住・佐伯, 塑性と加工, 18-201 (昭52), 821.

(付2) 佐藤・直久, 機論, 42-359 (昭51), 2250.

(付3) 佐藤, 材料の強度と塑性, (昭55), 198, 森北出版.