MD1D マグネシウム合金板の穴抜き加工

古閑 伸裕*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 50, No. 1 (2000), pp. 18-22

Piercing of MD1D magnesium alloy sheets

Nobuhiro KOGA*

Recently, the demand for magnesium alloy formed by thixomolding for use in home electric appliances and automobile parts has been rapidly growing, because of the need to reduce their weight and improve the heat radiation, electromagnetic shielding and recycling performances. In this study, I examined the possibility of press-piercing of a thixomolding-processed MD1D magnesium alloy sheet, which is believed to be difficult due to its low-ductility material, and also examined the appropriate processing conditions, by experiments. Results revealed that a pierced surface devoid of defects such as cracks is consistently obtained when the clearance between the punch and die is set at $10\%t$ or smaller in the press-piercing of a magnesium alloy sheet. Furthermore, from the results it was also clarified that piercing of a magnesium alloy sheet by the cut-off punching process, in which piercing and shaving are performed within 1 stroke of the press machine, provides a highly accurate hole in the entirely smooth shaved surface.

(Received July 23, 1999)

Keywords: *magnesium, thixomolding, shearing, piercing, shaving*

1. 緒 言

最近、軽量化やリサイクルの観点から、マグネシウム (Mg) 合金のチクソモルディングが様々な分野で注目を集めており、ノート型パーソナルコンピュータ (PC) に代表されるモバイル機器の分野では、すでに製品重量の20~30%を占めるハウジング部などにチクソモルディングにより成形された Mg 合金製部品が利用されはじめている¹⁾。このようにモバイル機器への Mg 合金の利用が急速に進んだ理由には、上記のほかに、Mg 合金が放熱、電磁シールド等の問題を効率よく解決できる特性を有することもある。また、軽量化の観点から Mg 合金の自動車用部品への適用も積極的に進められており²⁾、今後もその利用率はますます増加するものと考えられる。

さて、Mg 合金のチクソモルディングにおいては、プラスチックに比べ、湯流れは良好であるが、凝固収縮や熱膨張係数が大きく冷却速度が速いため、たとえば、成形品の穴部周囲にはひけやフローマークと呼ばれる製品欠陥が発生しやすいなどの問題が生じやすい。このため、チクソモルディング後に、何らかの後加工方法により穴あけを行う必要に迫られており、この穴あけ加工方法の選択がこの分野における大きな関心事となっている。

現在考えられる穴あけ加工法としては、ドリルやエンドミルなどによる機械加工、レーザ加工およびプレスによる塑性加工 (穴抜き加工) があり、生産効率の観点からはプレスによる穴抜き加工が最有力である。しかし、Mg 合金のせん断

(打抜き、穴抜き) における工具クリアランスと切口面形状の関係などが示された例³⁾はあるものの、実際に上述したような用途に用いられる脆性の高い Mg 合金のせん断において問題となる、切口面割れや切口近傍の脱落発生などについて調査された例は見当たらない。まして PC ハウジングなどで、押しボタン式のスイッチなどが組込まれる、平滑な穴内面性状が要求される高精度穴のプレスによる穴抜き加工の可能性などが検討された例はない。

そこで本研究では、Mg 合金板のプレスによる穴抜き加工の可能性を検討するとともに、割れ等の不良発生がない良好な切口面を安定して得るための加工条件を見出すための、せん断 (穴抜き) 特性調査実験と解析を行う。さらに、より高精度な切口面を得るための、プレスシュエビング法の Mg 合金板高精度穴抜き加工への適応性についても検討する。

2. 穴抜き加工

Mg 合金のせん断 (穴抜き) 特性を把握するため、せん断加工において、切口面性状等に大きな影響を及ぼす因子とされている工具クリアランス (Cb) の Mg 合金切口面性状に及ぼす影響について調査する。

2.1 穴抜き実験

2.1.1 条件および方法

実験には、PC ハウジング部材などに広く用いられている板厚 $t=1.8$ mm のチクソモルディングしたマグネシウム合金 (MD1D) 板を被せん断材として用いる。機械的性質と化学成分を Table 1 に示す。穴抜き型には、Fig. 1 に示す

* 日本工業大学工学部 (〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1)。Nippon Institute of Technology, Faculty of Engineering (4-1. Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama 345-8501).

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of magnesium alloy

Mechanical properties		
Tensile strength	230 MPa	Proof strength 150 MPa
Elongation	3%	Hardness HB63
Shearing resistance	140 MPa	Impact strength 2.7 MPa
Young's modulus	45 GPa	Density 1,810 kg/m ³
Melting temperature	470~595°C	Specific heat 1.05 J/kg°C
n-value	0.258	
Chemical compositions (mass%)		
Al 8.9	Zn 0.6	Mn above 0.15
Si under 0.10	Cu under 0.030	Ni under 0.002
Fe under 0.005	Mg bal.

Fig. 1 Schematic illustration of the piercing tool.

構造の円形打抜き型を用い、これを32トンクランクプレスに取付け実験を行う。クリアランス (Cb) は、直径 $\phi 18$ mmのパンチと、穴径 $\phi 18.10$, 18.20 , 18.29 , 18.38 , 18.55 , 18.77 mmのダイとのそれぞれの組合せにより、 $Cb=2.8$, 5.6 , 8.1 , 10.6 , 15.3 , 21.4% t /sideの6条件とする。

2.1.2 実験結果および考察

6種類のCbでそれぞれ穴抜きした切口面のSEM観察結果をFig. 2に示す。材料分離後、工具でパニシまたは切口面同士のこすれによると思われる平滑面が切口面の一部に発生するものも認められたが、いずれのCbで穴抜きされた切口面も、ほぼ全面が破断面からなる分離面となることがわかった。図示はしないが、抜落とし側もほぼ同様の切口面性状であった。

Cbの影響については、Cbが 15.3 , 21.4% と大きな条件で打抜かれた切口面には、抜落とし側、穴側いずれも、割れ(クラック)や材料の一部が脱落したと思われる凹部の発生が認められた。これらに対し、Cbが 10.6% 以下の条件で穴抜きされた切口面には、割れや脱落部発生などの切口面不良は認められなかった。

Fig. 3に穴側切口面近傍の横断面形状を示す。この結果からも、 $Cb \leq 10.6\%$ で穴抜きすれば比較的凹凸の少ない切口横断面形状が得られること、また、この場合のだれ発生量はいずれのCbにおいても $3 \sim 5\%$ 程度と小さいものであることがわかった。

Fig. 2 Appearance of the pierced surfaces at various clearances (MD1D, $t=1.8$ mm). **Fig. 3** Cross sectional profiles of circularly pierced hole (MD1D, $t=1.8$ mm). **Fig. 4** Burr heights of hole occurring with various clearances (MD1D, $t=1.8$ mm).

Fig. 4には、各Cbで穴抜きされた穴部に発生したかえりの高さを測定した結果を示す。 $Cb \geq 15.3\%$ ではかえり高さが急増する現象が認められた。この $Cb \geq 15.3\%$ で発生した大きなかえりは、SEM観察結果から、穴抜き時に脱落しかかった材料の一部であることが判明した。この点からも

Fig. 5 Various cracks occurred by piercing of magnesium alloy sheets (MD1D, $t=1.8$ mm).

MD1D 板材の穴抜きでは、 $Cb \leq 10.6\%t$ の加工条件が適正と判断できた。

さて、鋼板などの金属材料のせん断（穴抜き）加工では、クリアランス（Cb）が15～20%程度まで大きくなっても、Cb が小さい場合に比べ、だれやかえりが増大したり切口面の板面に対する直角度が悪化するなどの精度悪化は生じるものの、Mg 合金板のように切口面に割れや脱落部が発生するといった不良は発生しない。そこで、Mg 合金（MD1D）板材せん断におけるこれら不良発生の原因を探るため、せん断切口面の良否に大きな影響を及ぼすと考えられる、せん断（穴抜き）途中のクラックの発生、成長の様子を観察することとした。

切口面不良の発生がなく良好な切口面が得られた $Cb=5.6\%t$ （パンチ食込み量： $K=15\%t$ ）と、割れや脱落部の切口面不良発生が顕著に認められた $Cb=20.4\%t$ （ $K=25\%t$ ）での、穴抜き途中のクラック発生、成長の様子を観察した結果を Fig. 5 に示す。

Cb が小さい場合（Fig. 5(a)）は、抜き輪郭のほぼ全域にわたり、パンチとダイの刃先をほぼ直線的に結ぶ線にクラックが発生、成長し材料分離が行われているのに対し、Cb が大きい場合（Fig. 5(b)～(d)）は、パンチ刃先近傍から発生したと思われるクラックの成長方向が、抜き輪郭場所の違いにより大きく変化する現象が認められた。すなわち、パンチ刃先近傍から発生し始めたと思われるクラックがダイ刃先近傍へほぼ直線的に成長する（Fig. 5(b)）場合も認められたが、パンチ刃先直下（Fig. 5(c)）や、ダイ刃先と反対方向の抜落とし側（off-cut）内部（Fig. 5(d)）へ成長し、最終的にダイ刃先近傍から発生、成長したと思われるクラックと会合し材料分離が行われる場合も認められた。Fig. 5(c)のようにクラックが発生、成長し材料分離が行われる場合は、切口面には大きな凹凸が発生することが予測される。また、Fig. 5(d)のように、同図中 A で示す大きな引張応力が作用するだれ発生部の材料表面部に割れが発生する現象も認められた。この場合はパンチの食込みがさらに大きくなると、抜落とし（off-cut）側切口面の凸部（Fig. 5 中 B 部）と穴側（remainder）凸部（C 部）がお互いこすられながら、または

Fig. 6 Distributions of hydrostatic stress analyzed by FEM (MD1D, $t=1.8$ mm).

破壊されながら移動することになるため、この場合には切口面内部への割れ発生や切口面での材料脱落の発生が予測される。

なお、念のため抜き輪郭の違いによりこのような切口面の不均一が発生するのは、金型の精度不良（クリアランスの不均一）によることも原因として考えられるため、 $Cb=21.4\%t$ で同型による鋼板（SPC, $t=1.8$ mm）の穴抜きを行ったが、この場合は、図示はしないが、抜き輪郭のいずれの箇所においても割れや脱落の発生は認められず、パンチとダイの刃先をほぼ直線的に結ぶ線にクラックが発生、成長し材料分離が行われることが確認され、MD1D 板材穴抜きにおけるクラック成長方向の不均一さは金型精度不良によるものではなく、MD1D 板材せん断における特有の現象であることが判明した。すなわち、MD1D 板材のせん断（打抜き、穴抜き）において割れや脱落発生のない良好な切口面を安定して得るためには、工具刃先の摩耗による実質的なクリアランスの増大なども考慮すると、一般の鋼板のせん断において推奨されている10%前後のクリアランスに比べてやや小さな10%未満のクリアランス設定が適正と判断できる。

2.2 穴抜き解析

前節の穴抜き（せん断）実験結果から、Mg 合金（MD1D）においては、工具クリアランス（Cb）が大きくなると、クラックの成長方向が、鋼板の場合のように一義的に決定されず、クリアランスがほぼ均一な単純輪郭の円形穴抜きであっても、抜き輪郭箇所のわずかな違いにより、クラックの成長方向が大きく変化する現象が認められた。そこでさらに、この MD1D 板材せん断における特有の現象に対する考察をより深めるため、 $Cb=5.6\%t$ と $Cb=20.4\%t$ でのせん断途中の材料内部の応力とひずみの分布をそれぞれ有限要素法解析により求め考察することとした。この場合、解析ソフトには DEFORM-2D を使い、被加工材の材料特性式は、穴抜き実験に用いた MD1D 板材の引張試験により求めたデータから近似し、 $\bar{\sigma}=661 \cdot \bar{\epsilon}^{0.258}$ とした。また、解析モデルは前節の実験と同一の板厚 $t=1.8$ mm の被加工材への $\phi 18$ mm のパンチによる穴抜き（打抜き）軸対象モデルとした。なお、前節で述べた MD1D 板材の穴抜きでは Cb の大小によらず、だれ発生量が3～5%であり、切口面全面が破断面であったことから、クラックが発生、成長し材料分離が行われるのは、いずれの Cb においてもパンチ食込み（K）が5%付近で

Fig. 7 Distributions of equivalent plastic strain analyzed by FEM (MD1D, $t=1.8$ mm).

あると判断し、 $K=5\%$ でのパンチ食込み時の応力、ひずみ解析を行うこととした。

Fig. 6に、クラック発生に大きな影響を及ぼすと考えられている静水圧^{4),5)}の分布を、Fig. 7にクラックの成長方向に影響を及ぼすと考えられる相当塑性ひずみ分布の解析結果をそれぞれ示す。クラックが発生しはじめるパンチ、ダイのそれぞれの両刃先近傍では、静水圧分布はいずれのCbにおいてもほぼ同様の分布傾向が認められた。また、相当塑性ひずみ分布については、Cb=5.6%ではパンチとダイのそれぞれの刃先をほぼ直線的に結ぶ線上の狭い領域で0.06の比較的大きなひずみの発生が認められたのに対し、Cb=20.4%ではクラックが連通し材料分離が行われるであろう部分には0.04程度の小さなひずみが比較的広い範囲で分布する傾向が認められた。

以上の解析結果から、MD1D板材のせん断においては、静水圧分布はCbの大小による大きな差異が認められなかったことから、いずれのCbにおいてもほぼ同程度のパンチ食込み時点でクラックが発生し材料分離が行われるであろうことが予測される。前述の穴抜き実験においても、いずれのCbで穴抜きされた切口面も全面破断面であったことから、Cbの大小によらず同程度の少ないパンチ食込み時点で材料分離がなされていると判断でき、上記解析結果に基づく予測は妥当なものと理解できる。さらに相当塑性ひずみ分布から、この食込み時点でパンチまたはダイ刃先からクラックが発生すると、そのクラックはより大きなひずみが発生している変形域内で成長すると考えられる。したがって、Cb=5.6%の条件ではパンチとダイのそれぞれの刃先間に発生している相当塑性ひずみが0.06の比較的狭い領域内で成長すると予測され、その結果、パンチとダイのそれぞれの刃先間ではほぼ直線的に材料分離が行われると考えられる。これに対し、Cb=20.4%ではクラックが発生、成長し材料分離が行われるであろうパンチとダイの両刃先間には0.04程度のひずみしか発生しておらず、またその発生範囲が比較的広いことから、クラックの成長方向が一義的に決定されにくいことが推察される。したがって、Cbが大きい場合はFig. 5(b), (c)に示すようにクラックが不規則に成長し切口面不良が発生したと考えられる。

3. シェービング加工

高精度な切口面性状が要求される穴を得るためのプレス加

Fig. 8 Forms and sizes of two kinds of punches used for cut-off punching process.

工法の一つにシェービング加工法がある。この加工法は、せん断加工により得られる凹凸の大きな切口面の表層部を削取り、平滑な切口面を得ることができる精密せん断法であり、一般にはせん断（穴抜き）とシェービングの2工程で加工が行われる。しかし大量生産が行われるPC部品などの加工においては、コスト増大の観点から加工工程数の増加は大きな問題となる。そこで本章では、2段パンチを使用し、プレスの1ストローク中に穴抜きとシェービングを行う削抜き法⁶⁾により、MD1D板材への高精度穴抜き（穴あけ）加工の可能性を実験的に調査検討することとした。

3.1 実験条件および方法

前章の穴抜き実験および解析の結果から、シェービング加工に供するブランクの穴抜き加工時のクリアランスCbは10.6%以下に設定すべきと判断できる。ただし、一對の段付きパンチとダイを用いる（穴抜きとシェービングを同一穴径のダイを用いて行う）削抜き加工では、穴抜き時のCbが小さすぎると、シェービングを行うに十分な取り代が得られないため、切口面全域にわたり平滑な仕上げ面（切削面）が得られなくなる恐れがある。そこで本実験では、Fig. 8(a), (b)に示す2種類のパンチを用い、いずれも割れなどの切口面不良が発生しない最大の工具クリアランス、すなわちCb=10.6% (0.19 mm/side) の条件（いずれのパンチ使用時においても穴径 $\phi 18.38$ mmのダイを使用）で穴抜きを行い、その後同一ストローク内でシェービングする削抜き加工を行うこととした。この場合、いずれのパンチを用いた場合も、シェービング時のクリアランスは、Cs=0.02 mm/sideとした。

3.2 実験結果および考察

まず、パンチAを用い、MD1D板材の削抜き（シェービング）加工を行ったところ、図示はしないが、ストローク末期でシェービングが行われず、穴抜き時の破断面が残存する切口面となった。このように全面平滑なシェービング面が得られなかった原因は、パンチの穴抜き部（Fig. 8(a)中の $\phi 18$ mmの部分）が、材料分離後も穴側切口面と強圧下で接しながら下降したため、穴抜き時に穴側被加工材に発生していたはね上がりや半径方向への移動（いずれも弾性変形）が十分に回復していない状態でシェービングが開始されたためと考えられる。

そこでつぎに、穴抜きにより発生した弾性変形が完全に回復した状態でシェービングが開始されるよう、Fig. 8(b)に示す、パンチ溝部のW寸法を被せん断材の板厚 ($t=1.8$

Fig. 9 Shaved surface of hole obtained by cut-off punching process of magnesium alloy sheet (MD1D, $t=1.8$ mm).

mm)に相当する大きさにしたパンチ B を用い削抜き加工を行った。その結果, Fig. 9 に示すように切口面のほぼ全域にわたり, 平滑な切削面を有する高精度の穴が得られた。得られた穴部に発生しただれ量は $1\sim 2\%$ 程度と小さく, また, かえり高さは $5\mu\text{m}$ 以下と小さなものであった。

なお, パンチ B を用いた削抜き加工において発生したシェービングくずは, 細かな針状に分断されており, 加工後パンチにからみつ়ことなくエア一圧により型外部へ容易に排

除できることが確認された。

4. 結 言

最近需要が急速に伸びている, チクソモールディング成形したマグネシウム合金 (MD1D) 板のプレスによるせん断 (穴抜き) 特性調査実験および解析を行った。その結果, 工具クリアランス $Cb \leq 10.6\%$ の条件で穴抜きを行えば, 割れや脱落などの不良発生がない切口面を得られることが明らかになった。また, Cb が大きな条件での穴抜きではクラックの成長方向が一義的に決定されないため, 割れや脱落の切口面不良が発生しやすくなることが調査実験や解析により明らかになった。

さらに同材のプレスシェービング加工法 (削抜き加工法) による高精度穴抜き加工の可能性を実験的に調査した。その結果, 穴抜き加工により発生した弾性変形が回復した後にシェービングが開始される工具条件で削抜き加工を行えば, 切口面のほぼ全面にわたり平滑な切削面を有する高精度の穴が, プレス 1 ストロークで得られることが判明した。

最後に, 本研究に対し, 御支援, 御協力をいただいた(株)エフテック, (株)日製メックスに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 日本マグネシウム協会編: 99 マグネシウムマニュアル, (1999), 35.
- 2) 真鍋 明: 第56回シンポジウムテキスト, 軽金属学会, (1999), 55.
- 3) Metals Handbook (9th edition), ASM, 14 (1988), 460.
- 4) 近藤一義: 精密機械, 31 (1965), 764.
- 5) 篠原宗憲, 宮川松男: 塑性と加工, 20 (1979), 398.
- 6) 中川威雄, 吉田清太: 塑性と加工, 10 (1969), 665.