較的雑音を拾い易かったので今後プローブの形状、材質、接着の方法を検討する必要があるが、特に破壊過程に注目している場合に有効であると思われる。

これらの stress wave emission の測定結果と cup and cone 型の破壊過程の対応づけを行ってみると、stress wave emission の歪速度依存性からみてもクラックの伝播は比較的急激なプロセスであり、1 段目と 2 段目の急激な荷重の落下に対応するクラックの形成・伝播はもとより、Fig. 4 の点 D から点 G に至る大局的には比較的ゆるやかな勾配の荷重-伸び曲線もさらに比較的ゆるやかな部分と比較的急な部分とに分けられ、その比較的急な部分がセンタークラックのジグザグ成長に対応していると考えられる。

IV. 結 言

剛性を十分高めた引張装置系により、荷重-伸び曲線の連続的な測定と任意の点における試料の縦断面の観察を行い、タフピッチ銅丸棒の一軸引張において生じる cup and cone 型破壊のボイドの凝集による劣化領域の形成、クラックの形成・伝播による全体的な破断に至る過程に関し、次のような結論を得た。なお、この試料ではボイドは引張変形前に既に存在していた。

ネッキングが生じると試料の中央部のある大きさの領域でボイドの成長が著しく、荷重の急激な落下の開始点に近づくにつれボイドが数個凝集した劣化した領域が何箇所か形成される。この急激な荷重の落下の開始点以後は 3 段階に分けられると考えられる。

第 1 段階は、数箇所劣化した領域を結ぶ形でいくつかの小クラックが同時に形成される。これが普通に破断点

と呼ばれるものに対応する内部現象である。それがさらに連結してセンタークラックを形成する。この段階はかなり急激な荷重の落下として観測される。

第 2 段階は、センタークラックの周りのリング状の部分で塑性変形をしながらセンタークラックを拡張、クラック先端の剪断変形集中帯が外周へと伸びていく段階で、比較的ゆるやかな勾配の荷重-伸び曲線となって観測される。

第 3 段階は、クラック先端の剪断変形集中帯が試料の外壁にまで到達し、その部分の劣化が著しくその部分が急激に口を開いて全体的な破断をもたらす、これは再び急激な荷重の落下となって現われる。

クラック形成のメカニズムは、Rogers⁽⁵⁾が提案したボイドシート・メカニズムが働いている。

試料内部でのクラック形成・伝播に対応して stress wave emission が発生し、断面観察によるクラック形成・伝播過程とのよい対応がみられた。

なお、stress wave emission の測定装置に関して東京大学宇宙航空研究所の羽田野 甫氏の御協力を得た。ここに記して感謝する。

文 献

- (1) J.I. Bluhm and R.J. Morrissey : *Proc. 1st Int. Conf. on Fracture*, **3**(1965), 1739.
- (2) 大久保忠恒, 丹羽直毅 : 20 回塑加連講論 (1969-11 月), 89.
- (3) D.P. Clausing : *Trans. ASM*, **60**(1967), 504.
- (4) 羽田野 甫, 丹羽 登, 岸 輝雄, 堀内 良 : 非破壊検査, **21**(1972), 219.
- (5) H.C. Rogers : *Trans. Met. Soc. AIME*, **218**(1960), 498.

高珪素アルミニウム合金鋳物の 2 次元切削機構に及ぼす 加熱温度の影響

財 満 鎮 雄* 森 下 定**

Shigeo Zaima and Sadamu Morishita : On the Orthogonal Hot Machining of High Silicon Aluminium Cast Alloys. The orthogonal hot machining tests are carried out to confirm the adaptability of hot machining for high silicon aluminium alloys. The heating temperature at starting time of the tests are changed in the range of $-60 \sim 300^{\circ}\text{C}$ and the influences of heating temperature on the cutting mechanism of these alloys are investigated from the viewpoints of cutting resistance, change of shear angle, cutting ratio, growth of the built-up edge, roughness of the cut surface and others. The results are summarized as follows :

With increasing heating temperature, the cutting resistance decreases distinctly, but both the cutting ratio and shear angle increase slightly. At heating temperatures over 300°C , there seems

* 静岡大学工学部機械工学科 (Department of Mechanical Science, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu)

** 日本鋼管株式会社津造船所 (Tsu Shipyard, Nippon Kokan K.K., Tsu)

no difference due to the material between 13 and 19% Si alloys. In the case of 13% Si alloys, the formation of the built-up edge is conspicuous, but the size of the built-up edge is reduced with increasing heating temperature, and with the disappearance of the built-up edges at 200~300°C, the cut surface is remarkably improved. In the case of 19% Si alloys, the formation of the built-up edge is seldom observed and value of surface roughness is small, so the influences of heating temperature on the cut surface become very little.

(Received January 29, 1975)

I. 緒 言

アルミニウム-珪素系合金のうち、共晶合金(約 13% 珪素, ナトリウムで改良処理), 過共晶合金(17~23% 珪素, 赤燐処理)など高珪素アルミニウム合金鋳物は切削加工の際良好な仕上面が得られにくく⁽¹⁾, 工具摩耗もかなり認められる⁽²⁾いわゆる難削アルミニウムに属するものである。しかし, アルミニウム合金のうちでは熱膨張係数が小さい方であり, 高温強度があるので, ピストン材その他耐熱強度を必要とする部分に使用される傾向にある。著者らは, さきにこれら高珪素アルミニウム合金鋳物の切削加工に加熱切削を適用して被削性の向上を試みた⁽³⁾が, 切削開始時の被削材初期加熱温度が 100~300°C の範囲では加熱温度の上昇とともに切削抵抗は減少し, 剪断面における剪断応力, 摩擦角なども減少し, かつ切削仕上面も向上するようであった。しかし, 切削速度が上昇すれば切削温度を上昇させる効果に加わるので, 加熱温度のみの影響は明確ではなかった。

よって, 本報ではこれら高珪素アルミニウム合金について低速 2 次元加熱切削を実施し, 試料板の初期加熱温度を -60~300°C の範囲で変化し, 切削抵抗, 剪断角の変化, 切削比および構成刃先の生成状況, 切削面の表面あらさなどの諸点より切削機構に及ぼす加熱温度の影響を検討し, 前報で得られた本系合金に対する加熱切削の適用性を確かめるのを目的とした。

II. 供試試料および実験要項

実験に供した試料は Table 1 に示す化学成分の珪素量約 13, 19% のアルミニウム-珪素合金鋳物で, 板状金型鋳造材より 5mm×20mm×100mm に仕上げたものである。それらの顕微鏡組織は Photo.1 に示すように 13% 珪素材はいわゆる共晶シリミンの標準組織を示しており, 19% 珪素材は微細な板状珪素が多く散在しているのが認められる。また, それらのビッカース硬さは 13% 珪素材で Hv=58, 19% 珪素材で Hv=108 となり, 硬さからも化学成分, 顕微鏡組織からも前報⁽³⁾の試料とほぼ同様な試料とみることが出来る。

切削試験は Photo.2 に示す横フライス盤のテーブル横送りを利用した 2 次元切削装置に試料板を取付け, テーブルの上下をダイヤルゲージで読みとり, 切込みを与えた。試料板取付部の周囲を電熱線で取巻き, 石綿で保温して電気炉とし, 試料板に 100~300°C の加熱温度を与えた。

Photo.1 Microscopic structure of specimens used.
(a) 13% Si alloy, (b) 19% Si alloy

Photo.2 Orthogonal cutting apparatus used.

Table 1 Chemical compositions of specimens used.

Element Symbol	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mg (%)	Ni (%)	Ti (%)	Zn (%)	Cr (%)	Na (%)	P (%)	Al (%)
13% Si alloy	13.3	0.08	0.01	—	—	—	—	—	0.013	—	bal.
19% Si alloy	18.5	0.13	1.80	1.30	1.13	0.01	0.01	0.19	—	0.006	bal.

-60°C の場合には電気炉の電熱線を取はずしてドライアイスをつめ、一定の冷却温度を得た。なお、これらの場合の温度測定は試料板の切削予定面付近に直径 1.2 mmφ の小穴をあけ、アルメル-クロメル熱電対を挿入して行なった。被削材は切削熱のため次第に温度上昇することが考えられるので、被削材初期温度で管制し、切削中の見掛けの試料温度は一定になるように配慮した(後述のように、削り速度が $v=0.2$ mm/min の低速切削であるので、本実験範囲の切込みがそれぞれ $t_1=25, 50$ および 100μ の場合に対応する切削面積が 0.125, 0.250 および 0.500 mm^2 のいずれの場合にも、切削中熱電対の温度指示針が振れなかったため、切削中に被削材全体は切削熱のため加熱されることはないと判断した)。

切削条件はすくい角 30° 、逃げ角 8° の超硬合金(K20)付刃平バイトを使用し(すくい角を 30° としたのは構成刃先の生成を少なくし、その影響を少なくするためである)、削り速度は $v=0.2$ mm/min 一定、切込みを $t_1=25, 50$ および 100μ の 3 種類に変化した乾式 2 次元切削である。切削抵抗の測定はフライス盤オーバームに取付けた円板式工具動力計にひずみゲージを貼り付けて、主分力と背分力の 2 分力を求めた。切削仕上面あらさの測定は触針式連続指示型あらさ計(触針先端半径 5μ 、測定基準長さ 3 mm、縦倍率 $\times 1000$ 、横倍率 $\times 10$ 、カットオフ 0.75 mm)によって表面プロフィールを求め、10 点平均あらさを 1 試料について 2 回測定し、その算術平均をもって仕上面あらさ R_z とした。

III. 切削抵抗に及ぼす加熱温度の影響

いま、被削材温度と比切削抵抗(主分力 T_0 および背分力 F_0) の関係を求めてみれば Fig. 1 のようになる。13% 珪素材に比べ 19% 珪素材の方が切削抵抗はやや小さいが、いずれも被削材の温度上昇とともに切削抵抗はほぼ一様に減少し、かつ 13% 珪素材の方が減少割合は大きく、 300°C になれば 13% 珪素材と 19% 珪素材の差は少なくなることがわかる。前報での比較的大きい削り速度、切込みの実用切削条件の場合と同様な傾向結果が得られた。

一方、切削比 r_c (=切込み t_1 /切屑厚さ t_2) を求めてみれば例えば 13% 珪素材については Fig. 2 のようになる。多少の変動はみられるが、被削材加熱温度の上昇に伴い切削比はやや増加傾向を示し、切込みが大きいほど切削比は小さいものの、その増加割合は大きくなり、加熱温度が 300°C になれば切込みによる差はあまり認められない。これらの切削比から次式に従って剪断角 ϕ を求めれば⁽³⁾、例えば 13% 珪素材では Fig. 2 のようになる。ただし、 α はすくい角($=30^\circ$)

$$\tan \phi = r_c \cos \alpha / (1 - r_c \sin \alpha) \quad (1)$$

被削材の加熱温度による剪断角の変化傾向も切削比の変化と同様な傾向をとることがわかる。加熱温度の上昇とともに

Fig. 1 Relation between temperature of work and specific cutting force.

Fig. 2 Relation between temperature of work, cutting ratio and shear angle in the case of 13% Si alloy.

に切削比が増加すること、すなわち、剪断角が増加することは切屑の流出が容易になることを意味し、切削抵抗の減少につながるようになるが、Fig. 1 の切削抵抗の減少を考えればこの場合の剪断角の増加割合は比較的少ない感がする。しかし、前報で示したように加熱温度の上昇とともに被削材の硬さが減少し、 200°C をこえれば硬さは著しく低くなったこと⁽³⁾を考えれば、材料特性の変化が直接に切削抵抗の減少に大きく効いているとみられる。2 次元切削モデルにおいて、切削抵抗 R は剪断面の剪断応力 τ_s と切削機構に関する項 $K=1/\{\sin \phi \cos (\phi + \beta - \alpha)\}$ の積、すなわち、

$$R = (\tau_s A_0) / \{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)\} \quad (2)$$

で表わされ(ここで A_0 : 切削面積, β : 摩擦角), 加熱切削で切削抵抗が減少するのは剪断応力 τ_s の減少が大きく効いてくることを示した⁽³⁾が, 前報と同様にしてこの場合の剪断応力 τ_s と K 値を求めてみれば Fig. 3 のように, 両者とも被削材温度の上昇とともに減少するものの, 前者の減少が大きく影響することが確認された。

Fig. 3 Relation between temperature of work, shear stress and K -value.

IV. 構成刃先の挙動と切削仕上面

いま, 切削初期の被削材温度を -60°C , 室温 (25°C) および 300°C として, 13% 珪素材について切込み $t_1=100\mu$ の場合に切削を急停止し, 刃先近傍の被削材部分を切り出し, 樹脂に埋込んで顕微鏡観察をすれば Photo. 3 のようになる。写真にもみるように, すくい角 30° のバイトを用いても被削材温度が低い場合には構成刃先が大きく認められるが, 被削材の温度上昇とともに構成刃先の形状も小さくなり, 300°C ではほとんど認められなくなる。ここで, Photo. 3 のような写真から構成刃先の断面積をプランメータで測定し, 被削材の加熱温度との関係を求めれば Fig. 4 のようになる。13% 珪素材の方が全般的にみて構成刃先の生成は大きい, いずれも同様な傾向を示し, 加熱温度の上昇とともに構成刃先の断面積は急激に減少し, $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ では極めて小さいかあるいはほとんど認められない程度になる。以上の傾向は切込みが大きいほど著しく, 切込みが極めて小さい場合には -60°C の低温でも構成刃先の生成は極めて小さかった。前述のように, 被削材の加熱温度の上昇に伴う切削抵抗の減少には剪断面における剪断応力の低下が大きく効いているようであったが, 加熱温度の上昇に従って被削材の機械的性質が変化し, 構成刃先の生成状況の変化が切削機構に及ぼす影響が大きいことがわかる。

以上のように, 加熱温度が低い間には構成刃先の生成が旺盛であるのでいわゆる腹面の構成刃先⁽⁴⁾のため過切削が

Photo. 3 Built-up edges of 13% Si alloy in orthogonal cutting at various temperatures.
(a) -60°C , (b) 25°C , (c) 300°C

Fig. 4 Changes in sectional area of built-up edge with temperature of work.

認められ、切削機構は単純に取扱うことができない。切削を急停止して求めた Photo.3 のような刃先近傍の写真から、過切削量 Δt_1 を求めれば例えば 13% 珪素材では Fig.5 のようになり、100°C 以下の低温度では過切削量は無視できない値を示している。構成刃先の生成、分裂、脱落のサイクルと腹面の構成刃先部分の過切削作用とが切削方向

Fig.5 Changes in depth of over-cut due to built-up edge with temperature of work in the case of 13% Si alloy.

Photo.4 Orthogonal cut surfaces of 13% Si alloy at various temperatures.
(a) -60°C, (b) 25°C, (c) 300°C

仕上面あらさに与える影響は大きい。例えば、13% 珪素材の場合に切削を急停止して刃先後方の切削仕上面状況求めれば Photo.4 のようになる。これからみれば、加熱温度が低く構成刃先の生成が旺盛であったものほど、腹面の構成刃先部分の成長、脱落に伴う仕上面のあれが目立ち、構成刃先の大きさが小さくなる 100°C になれば、そのあれもかなり少なくなっているのがわかる。

Fig.6 は切削方向のこれら切削仕上面あらさ R_z を求めたものである。13% 珪素材では構成刃先の生成が少なく過切削も少なくなる 100~200°C で急激に仕上面あらさの向上が目立ち、切込みが小さいときに仕上面の良好になっているのが著しいが、19% 珪素材では全体として仕上面あらさの値は小さく、Fig.4 にもみるように構成刃先の影響も少ないためか、加熱温度の仕上面あらさに与える効果はあまりない。19% 珪素材の仕上面を詳しくみれば、Photo.5 の例にもみるように組織中に分布した微細珪素結晶が切削面で掘り起されたような跡が多く認められ、また切屑断面の組織は Photo.6 のように室温での切屑には破砕された珪素結晶が多いが、300°C では大きな結晶粒のまま切屑に移行しているので、温度上昇に伴って切刃進行軌

Fig.6 Changes in roughness of the cut surface with temperature of work.

Photo.5 Micrographs of the cross section of the cut surface at various temperatures in the case of 19% Si alloy.
(a) 25°C, (b) 300°C

Photo.6 Micrographs of the cross section of chip at various temperatures in the case of 19% Si alloy. (a) 25°C, (b) 300°C

跡上の珪素結晶は破砕されるより掘り起こしが多く発生することになり、加熱温度が上昇し、構成刃先の生成が減少しても、13%珪素材の場合のように良好な仕上面になり得ないで、むしろ仕上面あらさの劣化がやや目立つようになることがあると思われる。

V. 結 言

以上、13% および 19% 珪素の高珪素アルミニウム合金鋳物について試料板の初期温度を $-60\sim 300^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化した低速 2 次元加熱切削を実施し、本系合金の加熱切削における切削機構に及ぼす加熱温度の影響を検討した。その結果、

(1) 比較的低温領域では 19% 珪素材の方が 13% 珪素材に比べて切削抵抗は大きく、被削材の温度上昇に伴う切削抵抗の減少割合も大きい、 300°C をこえれば両者の切削抵抗はほとんど差がないようになる。

(2) 被削材の加熱温度上昇とともに切削比はやや増加傾向を示し、切込みが大きいほど切削比は小さいものの温度による増加割合は大きく、 300°C 以上の加熱温度では切込みによる切削比の差はあまり認められない。また、加熱温度による剪断角の変化も切削比の場合とほぼ同様である。

(3) 全般的にみて 13% 珪素材の方が構成刃先の生成は大きい、加熱温度の上昇に伴って構成刃先の大きさは急激に減少し、 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ では極めて小さいかあるいはほとんど認められなくなる。構成刃先の生成が旺盛な場合、いわゆる腹面の構成刃先のため過切削が行なわれ、 100°C 以下の低温領域ではその過切削量が無視できず、そのため切削仕上面あらさに対して悪い影響を与える。

(4) 13% 珪素材では加熱温度の上昇とともに切削仕上面あらさの向上が目立ち、とくに $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ において急激に向上する。しかし、19% 珪素材では加熱温度が仕上面あらさに与える影響は小さいようで、全体として仕上面あらさの値は小さく、 300°C になれば組織中に分散する珪素結晶は刃先によって破砕されずに結晶のまま掘り起こされたようになり、温度上昇とともに仕上面あらさがやや劣化することもあった。

本報の実施に当たり、その費用の一部は(財)軽金属奨学会の研究資金によった。また、被削材試料の入手には日本軽金属株式会社東京支店技術サービス課各位の御好意に負うところが大きかった。付記して深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 財満鎮雄，北村利昭：金属学会誌，**36**(1972)，200.
- (2) 森永卓一，財満鎮雄，飯尾政次：金属学会誌，**30**(1966)，463.
- (3) 財満鎮雄，武田裕久，森下 定：金属学会誌，**38**(1974)，609.
- (4) 例えば，星 光一：金属切削，工業調査会，(1966)，64.