Al-Mg-Si 系合金の切りくず折断性に及ぼす Si 粒子の影響

吉原 伸二*・平野 正和*・江藤武比古**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 51, No. 4 (2001), pp. 238-241

Effect of Si particles on chipping characteristics of Al-Mg-Si alloys during drilling operation

Shinji YOSHIHARA*, Masakazu HIRANO* and Takehiko ETO**

Effect of Si particles on chipping characteristics of 6061 aluminum alloys during drilling operations has been studied. The formation of fine chips was promoted when more than 2 mass% Si was contained in the above alloys. The number of chips per unit weight, a parameter of chip breaking characteristics, was inversely proportional to the square root of the spacing of Si particles. The mechanism of fine chip formation is as follows through the microscopic observation on the cross section of the chips. The plastic strain is introduced around hard Si particles due to cutting force during the chip formation. The internal stress comes out in Si particles to go critical value. Finally, the cracked Si particles promote the crack propagation across the chips to form fine ones during drilling.

(Received September 6, 2000)

Keywords: Al-Mg-Si alloy, Si-particles, machinability, fracture mechanism, crack propagation

1. 緒 言

アルミニウム合金の切削加工においては、とくに切りくずの折断性が劣ることが、切削加工時の生産性向上を図る上で課題となる。そのため、Pb, Bi などの低融点金属の添加により、切りくずの折断性を高めた2011合金および6262合金などが、切削用アルミニウム合金としておもに使用されている。これらの合金では、切削中の温度上昇に伴う Pb や Bi の溶融脆化作用により、切りくず内部に割れが発生しやすくなるため切りくずが折断しやすくなると考えられている¹⁾。しかしながら、近年の環境保全の観点から、有害な Pb を使用した材料の使用を規制する動きがあり²⁾、切削用アルミニウム合金でも Pb などの低融点金属を使用しない合金の開発が望まれている。

著者らは、6061合金をベース材に、低融点金属以外の添加元素が切りくず折断性に及ぼす影響を調査し、Si 添加が最も効果的であることを報告している^{3)~5)}。本研究では、6061に添加した Si 量を変化させ、穴あけ加工における切りくず折断性に及ぼす Si 粒子の役割を明らかにすることを目的と

し、破壊力学的視点からの考察を行った。

2. 供試材および試験方法

Table 1 に示すように、6061をベース材に Si を 2 mass%, 4 mass% および 6 mass% (以下, %) 添加し、直径155 mm のドリットに DC 铸造後、520°C で 4 h の均質化熱処理を行った。なお、2% Si 材、4% Si 材および 6% Si 材は亜共晶領域であり、一般に共晶 Si の改良処理として Na や Sr などが微量添加されるが⁶⁾、今回の供試材については、これら改良処理を行っていない。均質化熱処理後のドリットを、500°C の温度にて押出比12でφ46 mm の棒状に熱間押出を行い、530°C で 1 h の溶体化処理後水冷し、170°C で 6 h の時効処理を行って供試材とした。

引張試験は、荷重軸が押出方向と平行になるように、JIS 4号試験片を採取し、標点間距離50 mm、初期歪み速度 $1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、室温で実施した。

切削試験は Table 2 に示す条件で、市販のφ10 mm のストレートドリルを用いて穴あけ加工を行い、切りくずを採取した。切りくず折断性は、切りくず100 g 当たりの個数を計測

Table 1 Chemical compositions of alloys (mass%)

Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Pb	Bi	Al
6061	0.69	0.15	0.27	<0.01	0.89	0.05	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	bal.
2Si	2.05	0.18	0.24	<0.01	0.82	0.04	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	bal.
4Si	4.12	0.17	0.24	<0.01	0.86	0.05	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	bal.
6Si	6.15	0.16	0.28	<0.01	0.88	0.05	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	bal.

* (株)神戸製鋼所アルミ銅カンパニー長府製造所アルミ押出研究室 (〒752-0953 山口県下関市長府港町14-1)。Aluminum Extrusion Research Section, CHOFU PLANT, Aluminum & Copper company, KOBE STEEL, LTD. (14-1 Chofu Minato-machi, Shimonoseki-shi, Yamaguchi 752-0953)。

** (株)神戸製鋼所アルミ銅カンパニー基礎研究室 (神戸市)。Aluminum and Copper Research Section, Aluminum & Copper company, KOBE STEEL, LTD. (Kobe-shi, Hyogo)。

Table 2 Drilling test condition

Drill type	Straight shank
material	High speed steel
diameter	φ10 mm
geometry	Point angle 118° Helix angle 30°
Rotational speed	1500 rpm
Feed rate	0.2 mm/rev
Drilling depth	15 mm non-penetrate
Wetting agent	Emulsion type used

Fig. 1 Effect of Si content on tensile properties of 6061-T6 based alloys.

し、数が多いものほど優れると判定した⁷⁾。

また、供試材のSEM像を観察した。さらにEDX定性分析を行い、得られた画像より、画像解析装置MITANI MAC SCOPEを用いて、共晶Si（以下、Si粒子）およびSi系晶出物粒子の平均円相当径（以下、粒径）、個数および粒子間距離を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 引張特性

Fig. 1に引張試験結果を示す。ベース材の6061合金に比較して2%Si材で引張強さT.S.が若干上昇したが、さらにSiが増え4%Si材、6%Siと増加しても変化はなくほぼ一定であった。一方、耐力Y.S.はベース材と各Si添加材はほぼ同じであった。また伸びE.L.に関しては、ベース材に対し、2%Si材で若干伸びが増えた。さらにSiが増え4%Si材、6%Siと増加した場合にわずかな低下が見られた。

3.2 ミクロ組織

Fig. 2に供試材の代表的ミクロ組織を示す。Fig. 2は4%Si材であるが、Si粒子、Al-Fe-Si系晶出物およびMg-Si系晶出物が観察された。Fig. 3にこれらSi系晶出物の粒径および個数の測定結果を示す。Si粒子はベース材の6061には見られず、2%Si材、4%Si材および6%Si材に観察された。Si粒子の平均粒径は約4.5μmであり、Si量が増えてもほとんど同じであった。一方、Si量が増えるに従い、Si粒子の数は多くなった。二元系Al-Si状態図⁸⁾では2~6%Siは亜共晶範囲内であり、Si添加量が増えるに伴い、Si晶出量が増加したためと考えられる。また、Al-Fe-Si系晶出物およびMg-Si系晶出物は、平均粒径2~4μmであった。個数はSi粒子に比較して非常に少なかった。

一般にMg-Si系晶出物は、溶体化処理により固溶した後

Fig. 2 Constituent compounds in 4Si specimens.
a: Si, b: Al-Fe-Si, c: Mg-Si

Fig. 3 Morphology of Si-bearing particles as a function of Si contents.

にMg₂Siとして析出することでマトリックスを時効硬化させるが、観察された粒子は未固溶のMg-Si系晶出物と考えられる。一方Al-Fe-Si系晶出物は不溶性のため⁹⁾、生成量は凝固時に決定され、溶体化処理温度の影響はほとんどないと思われる。

以上より、Si量を増やした供試材に観察される晶出物は、ほとんどが状態図的に純SiのSi粒子であり、ごくわずかの未固溶のMg-Si系晶出物およびAl-Fe-Si系晶出物が混在していた。

3.3 切削特性および切りくず折断機構

Fig. 4に切削試験結果を示す。ベース材6061は比較的長い長ビッチ形の切りくずであり、ドリルに巻付きが発生し処理性が劣った。また単位重量100g当たりの切りくずの数は少なく、2000個/100g程度であった。一方Si量が増えると、切りくずが小さくなる傾向であり、ドリルへの巻付きも発生せず処理性に優れた。2%Si材の場合は、遷移折断型の切りくずであり、6%Si材の場合は扇形の切りくず形状であった。100g当たりの切りくずの数は多くなり、2%Si材で4000個/

Fig. 4 Effect of Si content on chipping characteristics of 6061-T6 based alloys.

Fig. 5 Microstructure of chip cross section of specimens
a) 6061 alloy, b) 6Si alloy

100 g, 6%Si 材で8000個/100 g 程度であった。以上のように本ドリル試験による切りくず形状は、供試材の Si 量が増えるに従い、長ピッチ型から遷移折断型、さらに扇形へと変化した。これらの変化は、切りくず生成過程において、ドリル溝および加工穴内壁との拘束力に影響を受けることが知られている¹⁰⁾、切削条件が同じ場合は、被削材の延性と関係するものと考えられる。ところが前掲の Fig. 1 に示した引張試験結果において、伸び EL は Si 量が増えても大きな低下は見られず、ほとんど同じであった。よってこれら切りくず折断機構に及ぼす Si 粒子の影響を検討するため、切りくずのミクロ観察を行い、破壊力学の視点から考察を行うこととした。Fig. 5 にベース材6061および6%Si 材の切りくず断面のミクロ組織を示す。6%Si 材の場合、切りくずのカールした表面側より、切りくず内部に向かうき裂が観察され、き裂は晶出物の内おもに Si 粒子を伝わりながら進展していた。Fig. 6 の切りくず断面 SEM 観察結果が示すように、Si 粒子

Fig. 6 Cracked Si particles in chip cross section of 6Si specimens. Marking of arrows are cracked Si particles. Gray particles: Si, Small white particles: Al-Fe-Si.

Fig. 7 Relation between square root of spacing of Si-bearing particles and number of chips.

が脆性破壊している様子が特徴的に観察された。マトリックスが塑性変形して、Si 粒子に応力が集中し、Si 粒子自体が破壊したものと推定される。小林らは Al-Si 鋳物合金について、その破壊挙動を詳細に研究しており、シャルピー衝撃試験などで得られる破壊靱性値を向上させるには、Si 粒子を球状化させ応力集中を緩和し、Si 粒子の割れを抑制することが有効であるとしている^{11),12)}。一方、本供試材の切削試験の場合は、Si 粒子自体の割れが多数観察され、Si 粒子の割れ現象が切りくず折断性へ大きく影響しているものと考えられる。

ミクロ組織中の晶出物、分散粒子と破壊靱性 K_c の関係は、粒子間距離 S の平方根に比例して向上し、式(1)がアルミニウム合金の場合にも適用できることが、中井らにより示されている¹³⁾。

$$K_c = \{\sigma_y \cdot \varepsilon_F \cdot E \cdot f(n)\}^{1/2} S^{1/2} \quad (1)$$

Fig. 8 Schematic illustration of chip formation mechanism.

ここで, σ_y : 耐力, ε_F : クラック先端の最大歪み, E : ヤング率, n : 加工硬化指数であり, 式は荷重負荷時のき裂先端径が粒子間距離 S と等しくなると, き裂が進展するものとしている。

一方, Fig. 7 に Si 粒子および Si 系晶出物の粒子間距離の平方根と切りくずの数の関係を示す。本供試材の場合, Si 添加によって Si 粒子の数が増え粒子間隔が狭くなるに従い, 切りくずの数が増える傾向となった。これは, 切りくず生成の初期段階でそれぞれの Si 粒子に導入された割れが, 連結する容易さを示しているものと考えられる。Si 粒子に導入された割れは, 鋭利な形状であり, 割れの空洞自体を欠陥として考えた場合には, 応力集中係数が高くなる。すなわち Si 粒子に割れがいったん導入されると靱性の低い状態となり, その状態で外力を受けた場合, き裂が連結・進展し, 切りくず折断を容易にするものと推測される。切りくず折断の場合は, K_c は下がる方向であり, Si 粒子間隔が小さくなるほど, 切りくずの折断効率が上がるものと考えられる。なお Fig. 7 中の 6061 は, Si 粒子が見られないため, Si 添加材の持つ傾向線の延長上には位置しない。

以上より切削加工時の切りくず折断機構を Fig. 8 のように考える。Fig. 8a) より, 切りくず生成の第一段階で切りくず内部に塑性歪みが入る。Si 粒子は塑性変形しないので, 高い内部応力が発生し, Si 粒子自体に割れが導入される。第二段階の Fig. 8b) では, 切りくずは工具のすくい面に沿ってカール運動していき, 工具すくい面あるいは被削材自体に衝突することで, 切りくずの曲率半径が大きくなりカール内面に引張応力が発生する¹⁴⁾。この引張応力により, a) の段階で切りくず内部に導入された Si 自体の割れに応力集中し, き裂が伝播することで, 最終的な切りくずの破断へと至るものと推定される。

4. 結 言

6061 アルミニウム合金に Si を 2%, 4% および 6% 添加した押出材の切りくず折断性とマイクロ組織因子の関係を破壊力学的視点から考察した結果, 以下が明らかとなった。

- (1) 6061 をベースとして Si を 2% 以上添加することにより, 切りくず折断性は向上した。
- (2) 切りくず折断性は, ミクロ組織中の Si 粒子間距離の平方根と反比例の関係を持つ。
- (3) 切削加工時に工具から受けるマトリックスの塑性歪みにより, 切りくず内部の Si 粒子に内部応力が発生し割れを生じる。その割れが切りくずカール中のき裂伝播を容易にすることで, 折断性が向上する。

参 考 文 献

- 1) H. Yaguchi: Mater. Sci. Tech., 5 (1989), 255.
- 2) M. Colleen: SAE Technical paper No. 980459 (1998), 61.
- 3) 吉原伸二, 平野正和: 軽金属学会第93回秋期大会講演概要, (1997), 179.
- 4) 吉原伸二, 平野正和: 軽金属学会第94回春期大会講演概要, (1998), 301.
- 5) S. Yoshihara and M. Hirano: Proceeding of ICAA-6, (1998), 2029.
- 6) たとえば, 安達 充: 軽金属, 34 (1984), 361.
- 7) 浅野和彦: 軽金属, 21 (1971), 579.
- 8) P. M. Hansen: Constitution of Binary Alloys, McGrawhill, INC. (1958), 133.
- 9) 軽金属学会研究委員会編: 研究部会報告書 No. 26, (1992), 91.
- 10) 軽金属協会編: 新版アルミニウム技術便覧, カロス出版, (1996), 773.
- 11) 小林俊郎: 軽金属, 43 (1993), 472.
- 12) 軽金属学会研究委員会編: 研究部会報告書 No. 34, (1997), 12.
- 13) 中井 学, 江藤武比古: 軽金属, 45 (1995), 677.
- 14) 杉田忠彰: 基礎切削加工学, 共立出版, (1988), 100.