Al-Zn-Mg 合金溶接部の切欠靱性におよぼす Fe および Si の影響*

福 井 利 安**

Toshiyasu Fukui : Effects of Fe and Si on the Notch Toughness of Al-Zn-Mg Alloy Welds. Experiments were carried out on the effects of Fe and Si contents on the notch toughness of Al-Zn-Mg alloy weld metals and their fracture characteristics.

The notch toughness of Al-Zn-Mg alloy weld metals was reduced considerably with increasing amounts of Fe and Si, while it was generally poorer than that of base plates. Fe, Si and Fe+Si, if these contents were equal, had almost the same influence on the notch toughness, but strictly speaking, the influence of Si was most remarkable.

Transgranular cracking or rupture was observed in a weld metal with low Fe and Si contents, but intergranular cracking was likely to appear in that with high Fe and Si contents. By electron fractography, the former showed a dimple pattern but the latter was apt to show a quasi-cleavage pattern.

(Received July 12, 1971)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾では Al-Zn-Mg 合金圧延材の破壊特性におよぼす Fe および Si の影響を調べ、Fe および Si 量の増加とともにその切欠靱性が著しく低下することを報告した。

ところで溶接金属では非平衡凝固による著しい偏析が見られ、各溶質元素の分布状態もかなり異なるのでその切欠靱性や破壊特性は圧延材の場合と著しく異なってくると思われる⁽²⁾⁽³⁾。そこで、本報では Al-Zn-Mg 合金溶接部の切欠靱性を前報と同様に調べ、Fe および Si の影響について検討した。

II. 実 験 方 法

供試材は前報⁽¹⁾と同一の Al-4.5 wt% Zn-1.5 wt% Mg-0.3 wt% Mn-0.2 wt% Zr 合金の圧延母材 (T 4 材) と同じロットより採取した溶加材 (共金) である。溶接は TIG 法で 4 mm 板は片面 1 パス、6 mm 板は両面各 1 パスの計 2 パス溶接でそれぞれ突合せ継手を作成した。

実験は前報同様シャルピー衝撃試験、切欠ならびに平滑引張試験および Navy tear 試験について行ない、Al-Zn-Mg 合金溶接部の切欠靱性におよぼす Fe および Si の影響を調査した。なお、以上の機械的性質はいずれも溶接後 30 日間の室温時効を施した後に調べたものである。Fig. 1 に試験片の概略図を示す。

III. 実 験 結 果

Fig. 2 に室温、 -75°C および -196°C における TIG 溶接部のシャルピー衝撃値を示す。試験温度が低下するにしたがいシャルピー衝撃値は低下するが、いずれの温度においても Fe および Si 量の増加とともにシャルピー衝撃値は著しく低下している。なお、前報⁽¹⁾の Fig. 2 と比較すれば明らかなように、同一成分であっても溶接材のシャルピー衝撃値は圧延材のそれよりかなり低い。

シャルピー衝撃試験片の破断部断面の顕微鏡組織を Photo. 1 に示す。室温試験材の場合、Fe および Si 量の少ない試料では必ずしも粒界破断とは限らず、粒内貫通型の

** 住友軽金属工業株式会社研究部 (Research Laboratory, Sumitomo Light Metal Ind., Ltd., Nagoya)

* 1971 年 5 月軽金属学会第 40 回春期大会に発表; アルミニウム合金の切欠靱性と破壊特性に関する研究 (第 2 報); ジェフリース賞金応募論文

(1) 福井: 金属学会誌, 35 (1971), 1035.

(2) A.T.D'Annessa : Weld. J., 44 (1965), 509 S.

(3) T.Fukui, Y.Sugiyama and S.Terai : Trans. JWS, 1 (1970), 216.

Fig.1 Form and size of TIG-welded test specimens

Fig.2 Effects of Fe and Si contents on Charpy impact value of Al-Zn-Mg alloy welds

破断を示すこともあるが、Fe および Si 量が増すとほぼ全面的に粒界破断を示すようになる。しかし低温 (-196°C) 試験材では Fe および Si 量に関係なく、ほとんど粒界破断を示している。

Photo. 2 に室温におけるシャルピー衝撃試験材の電子顕微鏡破面を示す。Fe および Si が少ない試料では dimple pattern を示し延性破面を呈しているが、Fe および Si 量の多いものでは開き破面を呈し、quasi-cleavage に近い様相を示している。しかしながら全領域にわたってこの開き

Photo.1 Cross-sections of fractures in Charpy impact test specimens tested at room temperature and -196°C in Al-Zn-Mg alloy welds ($\times 400 \times \frac{1}{2}$)

Fe : 0.01%, Si : <0.01%

Photo.2 Electron fractographs of Charpy impact test specimens tested at room temperature in Al-Zn-Mg alloy welds ($\times 4000 \times \frac{3}{5}$)

破壊の様相が観察されるのではなく, dimple pattern と quasi-cleavage pattern が混在したような領域も少なからず認められた。

次に切欠靱性の評価を切欠一平滑引張試験で行なった。

Table 1 は TIG 溶接継手の切欠および平滑引張試験の結果である。それぞれの値は 3 点の測定値の平均で示した。切欠靱性を切欠強度比 σ_B'/σ_B で評価した場合, Fe および Si 量の増加にともない平滑材の引張強さは増大するのに対し, 切欠材のそれは減少するのでこの強度比 σ_B'/σ_B は著しく減少している。一方切欠降伏比 $\sigma_B'/\sigma_{0.2}$ で評価した場合, Fe および Si 量の増加にともない平滑材の耐力は少し減少

するが, 切欠材の引張強さの減少率の方が大きいので, この強度比 $\sigma_B'/\sigma_{0.2}$ は少し減少している。すなわち切欠強度比および切欠降伏比のいずれで評価しても, Fe および Si 量の増加とともに切欠靱性は低下していることがわかる。

Photo. 3 に切欠引張試験片の破断部断面を示す。Fe および Si 量の少ない試料では粒界破断のみならず粒内貫通型の破断を示しているが, Fe および Si 量の増加とともに粒界破断の傾向が明瞭になってくる。また部分的には dendrite cell 境界での破断も認められる。

Fig. 3 に Navy tear 試験の結果を示す。プロット点は 3 点の測定値の平均である。試験温度が低下すると最大荷重

Table 1 Notched and unnotched tensile properties and their ratios of Al-Zn-Mg alloy welds

Contents (%)		Tensile properties			Ratios		
Fe	Si	Unnotched			Notched		
		σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	δ (%)	σ_B' (kg/mm ²)	σ_B'/σ_B	$\sigma_B'/\sigma_{0.2}$
0.01	<0.01	29.9	19.7	9	28.7	0.96	1.46
0.10	0.04	31.6	18.9	10	27.3	0.86	1.44
0.26	0.08	31.8	18.4	10	25.5	0.80	1.39

Fe : 0.01% Fe : 0.10% Fe : 0.26%
Si : <0.01% Si : 0.04% Si : 0.08%

Photo. 3 Cross-sections of fractures in notched tensile test specimens tested at room temperature in Al-Zn-Mg alloy welds ($\times 400 \times \frac{1}{2}$)

は増大するが, 割れの発生および伝播エネルギーはともに著しく低下している。また, Fe および Si 量が増すとこれらのエネルギーはともに低下している。以上の結果は, 試験温度が低くなるにしたがい, また Fe および Si 量が増加するにしたがい靱性は失われていくことを示している。

この時の試験片の電子顕微鏡破面の一例を **Photo. 4** に示す。室温試験材では典型的な dimple pattern が認められ延性破断を呈しているが, Fe および Si 量が増すと dimple の形成が不規則的になり, またその数も減少して, 延性が少し失われていることがわかる。一方低温試験材では開き破面の様相を呈しているが, Fe および Si 量が増すといっそう平坦で脆い破面を示す傾向が強くなることが観察される。

Fig. 3 Effects of Fe and Si contents on tear properties of Al-Zn-Mg alloy welds

以上の結果より、シャルピー衝撃値、切欠一平滑引張性質および tear 性質のいずれにおいても Al-Zn-Mg 合金溶接部の切欠靱性は、Fe および Si 量の増加とともに著しく低下することが明らかである。しかしながら Fe および Si の内、いずれが靱性に対しより支配的な影響力をもつかについては明らかでないので、次に Fe および Si をそれぞれ単独および同時添加 (Fe と Si はほぼ等量) せる試料で試験

した。この結果の一例を Fig.4 に TIG 溶接材について示す。これより明らかなごとく、Fe, Si および Fe+Si のいずれにおいても、その含有量が 0.1~0.2 wt% の範囲でシャルピー衝撃値の低下は最も著しく、0.2 wt% を超えるとこの低下率は小さくなる。また、Fe, Si および Fe+Si はいずれもほぼ同じ程度の作用をもつことがわかる。しかし強いといえば、Si の影響が最も強いように思われる。

IV. 考 察

Al-Zn-Mg 合金溶接部の靱性とその破壊特性に関しては、これまでもいくつかの報告があり、合金元素の影響⁽²⁾⁽⁴⁾、溶接後の時効による変化⁽³⁾⁽⁴⁾、溶加材や試験温度の影響^{(3)~(5)}、溶接凝固組織、例えば dendrite cell size や溶質元素——とくに主要合金元素の分布状態の影響⁽³⁾⁽⁶⁾などについて調べられている。しかしながら、本系合金溶接部の靱性におよぼす不純物としての Fe や Si の影響についてはほとんど検討されていない。

筆者ら⁽⁶⁾⁽⁷⁾は以前アルミニウム合金溶接部の強度、延性および靱性は dendrite cell の粗大化とともに著しく低下するが、同時に cell matrix での溶質濃度や cell 境界での第2相の分散度にも強く依存していることを示した。また、これらの機械的性質におよぼす不純物としての Fe や Si の影響も無視できない点を示唆した。

本実験では、Table 1, Fig.2 および 3 にも示したごとく、Al-Zn-Mg 合金溶接金属の切欠靱性は Fe および Si 量

Fig.4 Effects of Fe, Si and Fe+Si contents on Charpy impact value of Al-Zn-Mg alloy welds

(4) A.T.D'Annessa: Weld. J., **47** (1968), 462 S.

(5) 杉山, 福井: 溶接学会誌, **38** (1969), 79.

(6) 福井, 難波: 軽金属, **20** (1970), 458.

(7) 福井, 難波: 軽金属, **21** (1971), 482.

の増加とともに著しく低下することが明らかとなった。さらに、Fig. 4 に示すごとく、Fe および Si はそれぞれ単独で含まれていてもともに靱性を劣下させるようであり、Fe と Si はほぼ同じ程度の作用を示していることがわかった。

Photo. 5 にシャルピー衝撃試験片の破断部先端における割れ伝播部近傍での Fe および Si の分布状態を示す。Fe および Si、とくに Fe は凝固偏析により結晶粒界や dendrite cell 境界で高濃度であり第 2 相を形成していると思われるが、割れは Fe および Si の分布に沿って生じているように思われる。この結果より、Fe あるいは Si を含む第 2 相は組織的ノッチとなり、割れ発生の核作用をしたり、あるいは割れの伝播を助長したりするのではないかと推察される。Singh と Flemings⁽⁸⁾ は Al-Zn-Mg-Cu 合金、また Frederick ら⁽⁹⁾ は Al-Si-Mg 合金鋳物を用いて実験し、それぞれ分散して析出あるいは晶出せる第 2 相が割れ発生の核となっている点を指摘している。

Photo. 5 Micro-structure and electron beam scanning image at the edge of fracture of a Charpy impact test specimen tested at -196°C in Al-Zn-Mg alloy welds containing 0.26% Fe and 0.08% Si simultaneously ($\times 500 \times$)

なお、本実験に用いた供試材の溶接凝固組織に形成される第 2 相は主として $\eta(\text{MgZn}_2)$ および $T\{(\text{Al}, \text{Zn})_{49}\text{Mg}_{32}\}$ 相であるが、不純物である Fe および Si 系のものとしては $\theta(\text{FeAl}_3)$ 、 $\alpha(\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si})$ および $\beta(\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2)$ などが考えられる。

アルミニウム合金の破壊靱性に関してはこれまでも実用材料を用いた多くの研究結果⁽²⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が報告されており、またその試験方法を含めた評価の方法についてもいくつかの提案がなされている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。しかしながら、Strain-Energy Release Rate, G や Stress-Intensity Factor, K に代表される破壊靱性は弾性応力下での不安定な割れの伝播あるいは低延性破壊への抵抗性を示すものであり、本研究で取り上げている切欠靱性とは区別して考えられるべきものである。また切欠靱性そのものにおいても割れの発生段階に主眼のあるものと割れの伝播に主眼のある場合の両方があり、その評価方法により必ずしも一定の結果が得られるとは限らない。

一般にアルミニウム合金およびその溶接部は極低温においても極端な脆性破壊を示すことなく、この破壊靱性はかなり優れていると考えられている⁽¹³⁾。Al-Zn-Mg 合金も例外ではなく十分に実用性を有するとされており、また実際の低温容器に用いられた例もある。しかしながら Al-Zn-Mg 合金は時効硬化型合金であり、D'Annessa⁽²⁾⁽⁴⁾ や筆者ら⁽³⁾ が示したように溶接後の室温時効とともに溶接金属の切欠靱性は低下する傾向にある。したがって Al-Zn-Mg 合金溶接部の靱性に関しては冶金学的には析出物の種類およびその形状の面よりも十分に検討されるべきであろう。

V. 総 括

本実験で得られた結果を総括すると次のごとくである。

(1) Al-Zn-Mg 合金溶接部の切欠靱性はシャルピー衝撃値、切欠強度比および tear 性質のいずれで評価しても、圧延材同様、Fe および Si 量の増加とともに著しく低下している。

(2) しかしながら溶接金属の靱性は圧延材の靱性に比べ全体的にかなり劣っている。

(3) 切欠靱性に影響する Fe、Si および Fe + Si の作用はほぼ同じ程度であるが、強いて言えば Si の影響が最も著しい。

(4) Fe および Si 量の少ない時は粒界破断のみならず粒内貫通型破断も示すが、Fe および Si 量の増加とともに粒界破断の傾向が明確になってくる。一方破面も、Fe および Si 量の増加にともない dimple を有する延性破壊より開き破壊的な色彩が強くなる。

(5) Fe および Si の分布は割れの伝播経路と密接な関係があるように思われる。

本研究を進めるに際し、種々有益な御助言を賜った住友軽金属工業研究部 寺井士郎博士および杉山禎彦氏に深く感謝致します。

- (8) S.N.Singh and M.C.Flemings : Trans.Met.Soc. AIME, **245**(1969), 1811.
- (9) S.F.Frederick and W.A.Bailey : Trans.Met.Soc. AIME, **242**(1968), 2063.
- (10) F.G.Nelson, J.G.Kaufman and M.Holt : Weld. J., **45**(1966), 321 S.
- (11) J. G. Kaufmann und M. Holt : Aluminium, **46**(1970), 103.
- (12) R. E. Zinkham and J. H. Dedrick : *Fracture*, Academic Press, New York and London, (1969), Chapter 6.
- (13) *Cryogenic Engineering News*, Business Communications, Inc., (1966), March and April.