

UDC 539. 42:
539. 412:
539. 32

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-372

アルミニウム合金ZK141と2219-T87の
室温および77°Kにおける破壊じん性

寺田博之・角田義秋・中井暎一

1978年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

アルミニウム合金ZK141と2219-T87の 室温および77°Kにおける破壊じん性*

寺田博之** 角田義秋** 中井暎一**

1 まえがき

我国において開発が進められている液体酸素、水素ロケットに関連してタンク構造用材料として考えられている金属のうち2種類のアルミニウム合金ZK141と2219-T87について、室温および液体酸素温度における材料の一般的な機械的性質および破壊じん性を求める試験を行なった。

これら金属材料は液酸・液水ロケットタンク構造材料として欧米においても実績のあるもので、ZK141はヨーロッパで開発が進められているArianeのタンク材料である三元アルミ合金AZ5Gに相当する国産材料であり、また2219-T87は米国のSATURN S-IIおよびスペースシャトルの燃料タンク構造材料として用いられている。

これらの材料は一般に低温においても破壊特性が良いことが知られているが実機構造の設計に際しては実用環境温度（液体酸素では90°K、液体水素では20°K）における降伏応力や引張り強さなどの機械的特性値とともに溶接部の強度あるいは母材および溶接部近傍の破壊じん性などが十分に把握されていなければならない。

ここでは材料選定および構造設計のための基礎的な資料を得る目的で実用板厚に近い平板試験片を用いて両材料の機械的性質、溶接継手の引張り強さ、および溶接部とくにボンド部、溶着金属部および溶接熱影響部におけるき裂に対する破壊抵抗の実験的研究を行なった結果について報告する。

2 記号

σ_u	: 引張り強さ	(kg/mm ²)
σ_y	: 降伏応力(0.2%耐力)	(")
σ_c	: 公称破壊応力	(")

* 昭和53年9月7日受付

** 機体第二部

E	: 縦弾性係数	(kg/mm ²)
ϵ	: 伸び	(%)
$2a$: 初期切欠き長さ	(mm)
b	: 最大切欠き深さ	(")
W	: 板幅	(")
t	: 板厚	(")
K_c	: 破壊じん性	(kg/mm ^{3/2})
\tilde{v}	: 変動係数(標準偏差/サンプル平均値)	

3 材料および試験方法

供試材料のうち2219-T87は米国Alcoa社およびKaiser社の製品であり、ZK141は住友軽金属(株)の製品である。それらの化学成分をTable 1に示す。Table 1には比較のためにArianeのタンク構造材料として開発されたZ_u-M_g系アルミ合金AZ5Gの成分規格値¹⁾も合わせて示した。

試験片の形状寸法をFig 1.a), b)に示す。

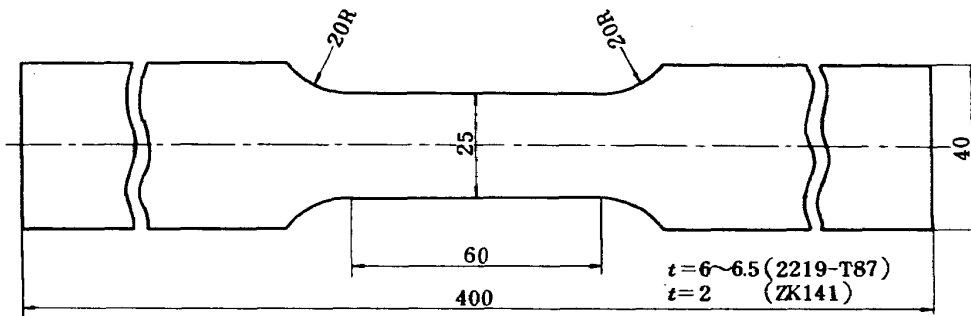
Fig 1.a)は材料の機械的諸性質を調べるための標準試験片で、その形状はJIS Z2201-5号試験片に準じた。Fig 1.b)は破壊じん性試験に供するためのもので、板の中央にSaw-Cutによる貫通切欠きまたは放電加工による半楕円状表面切欠きを有するものを用いた。

切欠き先端部の曲率半径はいずれの場合も0.05mm以下に加工されている。

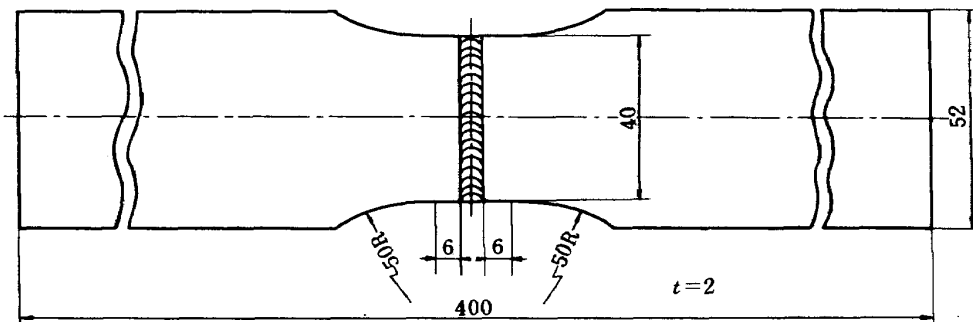
供試材の板厚はZK141でほぼ2mm、2219-T87で6.0~6.5mmであるが、タンク構造材料としてアルミニウム合金を用いるとタンクのスキン部分の板厚はほぼ1~2mmとなる。一方タンク構造としての剛性を持たせるためにケミカルリングなどによりアイングリッドやワッフル構造とした場合には構造物の溶接部分の板厚は5~6mm程度となることが予想されるが、供試材のうちZK141の板厚はタンク構造のスキン厚に、2219-T87の板厚はアイング

Table 1 Chemical Composition

	Z _n	M _g	M _n	C _v	C _r	Z _r	T _i	F _e	S _i	Al
2219-T87	0.008	0.003	0.32	6.17	0.002	0.12	0.06	0.25	0.07	Bal.
ZK141	4.4	1.7	0.34	0.17	0.15	0.15	0.08	0.20	0.07	Bal.
AZ5G	4.1 ~4.9	0.9 ~1.4	<0.3	<0.1	0.15 ~0.35	0.05 ~0.25	<0.1	<0.4	<0.3	Bal.

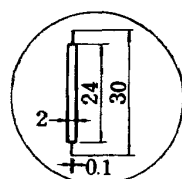
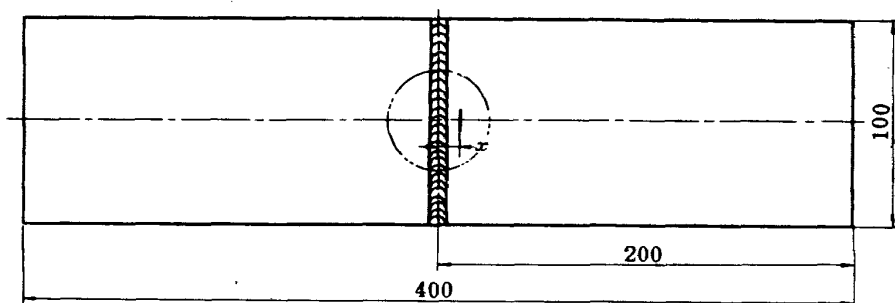


(1) Standard Specimen of 2219-T87 and ZK141 and Welded Joint Specimen of 2219-T87

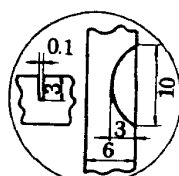


(2) Welded Joint Specimen of ZK141

Fig. 1.a Standard Specimen for Mechanical Property Measurement



(1) Through Crack



(2) Part-Through Crack

x=0	Base Metal, B.C.
x=2	Bond
x=6	H.A.Z.

t=6~6.5 (2219-T87)
t=2 (ZK141)

Fig 1.b Fracture Toughness Testing Specimen

リッド構造等にした場合の溶接部板厚に近いものとなっている。

溶接継手材の溶接方法はいずれも T.I.G 溶接である。

2219-T87 では溶接時の余盛りを削除して表面を平滑に仕上げたものを用い、ZK141 では余盛りを残したものを用いた。

用いた引張り試験機は航空宇宙技術研究所のアムスラー型万能試験機（島津製作所製、最大荷重容量 100 トン）である。

液体窒素温度における試験は、底部にスリットを持ち、発泡スチロールで内張りをした木製の冷却箱に試験片を貫通させ、その冷却箱に液体窒素を充満し、試験片の平行部が十分冷媒に浸漬されるようにして行なった。

なお、試験状況は既報²⁾で詳述したのでここではその記述を重複して行なわないこととする。また試験結果の解析に供するためにクリップゲージ形の伸び計を用いてき裂開口変位や応力一ひずみの関係などを求めたことも既報と同様である。

下記に各材料ごとの実施した試験項目を示す。

材料	試験項目 温度	標準 引張り 試験	溶接継 手強度 試験	破壊じん性試験	
				貫通 切欠き	表面 切欠き
ZK141	室温	○	○	○	—
	77°K	○	○	○	—
2219-T87	室温	○	○	○	○
	77°K	○	○	○	○

4 試験結果と解析

4.1 標準引張試験

標準引張り試験片および切欠きのない溶接継手試験片の室温および 77°K の試験結果から得られた両金属材料母材の機械的性質および溶接継手の強度をそれぞれ Table 2 および Table 3 に示す。

これらの測定結果から次のような事柄が観察される。

ZK141 については

○ 圧延方向に切り出した板（荷重方向と圧延方向が一致

Table 2 Mechanical Properties (Base Metal)

Material	Temp.	Loading Direction	Tensile Strength σ_u [kg/mm ²]	Yield Stress (0.2% offset) σ_y [kg/mm ²]	Elongation δ [%]	Young's Modulus E [kg/mm ²]	Number of Specimen	$\sim \nu$ for σ_u
2219-T87	R. T.	L	46.3	37.1	14.8	7,400	5	0.003
		T	45.7	36.6	13.4	7,400	3	0.001
	77°K	L	52.6	41.9	15.5	8,000	3	0.015
		T	53.9	41.2	14.4	8,000	3	0.048
ZK141	R. T.	L	42.8	38.8	14.5	7,460	3	0.010
		T	45.1	39.6	13.2	6,810	3	0.014
	77°K	L	52.8	46.7	19.0	7,530	3	0.019
		T	56.8	48.5	16.5	8,900	3	0.012

Table 3 Strength of Welded Joint

Material	Temp.	Tensile Strength $\sigma_{u,w}$ [kg/mm ²]	Elongation (G.L. = 50 mm) δ [%]	Number of Specimen	$\sim \nu$ for $\sigma_{u,w}$
2219-T87	R. T.	28.2	—	3	0.060
	77°K	36.2	—	3	0.033
ZK141	R. T.	36.9	2.4	2	0.011
	77°K	44.2	2.4	2	0.001

するもの、これを以下L方向材という)の引張り強さ(σ_u)は、それに直交する方向の板(荷重方向と圧延方向が直交するもの、これを以下T方向材という)の値より、それぞれ室温で5.4%、77°Kで7.6%程度低い。

○試験温度と強さの関係では、T方向、L方向とも77°Kの引張り強さが室温の値に比べて23~26%高い。

以上の事は降伏応力(0.2%耐力)について比較した場合もほぼ同様であるが、各温度における降伏応力と引張り強さの比を求めると室温でその値は0.88~0.91であり、77°Kでは0.85~0.88と若干低い値を示している。

2219-T87については

○板の圧延方向の違いが材料の引張り強さや降伏応力に及ぼす影響はここで行った試験温度範囲内において2~3%程度以下であり、実験誤差の範囲と考えると差支えないようである。

○試験温度と強さの関係ではZK141の場合と同様77°Kの引張り強さおよび降伏応力は室温の値よりもそれぞれ14~18%および13%程度高い。

また降伏応力と引張り強さの比はいずれの試験温度においても0.80程度である。

各材料の溶接継手効率(溶接材の強さ/母材の引張り強さ)はZK141では室温で約0.82、77°Kで約0.78となり室温の効率の方がやや高く、一方2219-T87では室温で約0.61、77°Kで約0.67となって傾向は前者と逆になっている。またZK141の溶接効率が2219-T87の値より高いのは前者が溶接部に余盛りを残し、この部分の板厚が平滑部に比べて30~40%程度厚いためである。

またTable 2に示した変動係数(標準偏差/サンプルの平均値)から標準引張り試験における測定結果のばらつきは比較的小さいことがわかる。

4.2 破壊じん性試験

中央部に切欠きを有する板材の引張り試験の結果から、貫通切欠きと表面切欠きについてそれぞれ次式によって破壊じん性(K_c)を求めた。

1) 貫通切欠き²⁾

$$K_c = \sigma_c \sqrt{\pi a \cdot \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (1)$$

2) 表面切欠き³⁾

$$K_c = \frac{M_k \sigma_c \sqrt{\pi b}}{E(k)} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \quad (2)$$

ここで

$$E(k) : \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

(第二種完全楕円積分)

$$k^2 = 1 - b^2/a^2 \quad (\text{切欠き形状パラメータ})$$

M_k : 切欠きの形状による定数

(stress intensity magnification factor)

(1)式または(2)式によって求められた各温度における母材および溶接部材の破壊じん性をTable 4.a), b)およびFig 2.a), b)に示す。Tableに示した値は数個の試験片の単純平均値である。(なお、個々の試験結果の詳細は巻末の付表に与えた。)

測定値のばらつきを表現するために標準試験の場合と同様、変動係数を算出しTable中に示した。母材の破壊じん性値の変動係数は0.012~0.039と比較的小さく、これらの値は標準引張り試験におけるばらつきと同程度となっている。一方、溶接部ではこの値はかなり大きくばらつきが比較的大きいことを示している。

4.2.1 ZK141の破壊じん性

母材の破壊じん性はL方向、T方向とも77°Kの値が室温に比べ6~7%程度高いが、材料の引張り強さが温度の低下に伴って20%以上高くなっている割には、き裂に対する破壊抵抗の向上がそれほど期待できない。圧延方向と破壊じん性の関係はT方向材がL方向材よりわずかに高いようであるが、この試験温度範囲においては板の圧延方向がじん性に及ぼす影響は無視してよいと考えられる。

ASTM規格⁴⁾に従がい疲労き裂を施した試験片の室温における破壊じん性は切欠きを付したものより5%程度低い、サンプル数が少ないため定量的な議論はできない。

溶接部の破壊じん性は、いずれの試験温度においても溶接余盛の中央、ポンド部、熱影響部ともほぼ一定で部位による差異は明瞭でない。また溶接部の破壊じん性を母材のじん性と比較すれば室温では0.77~0.78、77°Kでは0.80~0.85となり、温度の低下とともに相対的に母材のじん性に近づく傾向が見られる。

一般に、同種の材料について破壊じん性を比較すると、金属の結晶粒子を細かくするなどして引張り強さや降伏応力などの機械的性質を改善しても破壊じん性が改善されなかったりむしろ低下する場合が多いが、母材を低温で試験することはTable 2からわかるように機械的性質を向上させた状態で破壊じん性試験を行なったことに相当し、従って機械的性質の向上ほどにはじん性値は向上しないと考えられる。一方溶接部では溶接の際に金属結晶粒子が一旦溶融し再結晶するとき粗大化するため、室温でのじん性が低下する一方、温度低下の影響に敏感でなくなるために低温におけるじん性値も比較的高くなるものと考えられる。

なお、溶接部の破壊じん性について上述の溶融粗大化→再結晶の過程によって板の圧延方向の影響は一層弱まって

Table 4.a Fracture Toughness of 2219-T87

	Temp.	Crack Location	Loading Direction	K_c [$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^{3/2}}$]	No. of Specimen	\bar{v}
Through the Thickness Crack	*1 R.T.	Base Metal	L*4	178.5	4	0.022
			T*5	169.9	4	0.018
		B.C. *2	T	106.8	6	0.039
		Bond	T, L	100.7	12	0.065
		HAZ *3	T	119.3	6	0.020
	77°K	Base Metal	L	198.0	4	0.039
			T	177.9	1	—
		B.C.	T	126.3	6	0.034
		Bond	T, L	117.5	11	0.045
		HAZ	T	147.9	6	0.033
Part Through Crack	R.T.	Base Metal	L	111.2	1	—
			T	106.8	2	0.012
		B.C.	T	58.5	8	0.026
		Bond	T, L	54.8	14	0.034
		HAZ	T	68.1	7	0.031
	77°K	Base Metal	L	126.0	1	—
			T	121.8	1	—
		B.C.	T	64.7	8	0.022
		Bond	T, L	62.9	16	0.083
		HAZ	T	76.0	9	0.085

* 1 R.T. ; Room Temperature

* 2 B.C. ; Bead Center

* 3 HAZ ; Heat Affected Zone

* 4 L ; Plate Parallel to Rolling Direction

* 5 T ; Plate Transverse to Rolling Direction

Table 4.b Fracture Toughness of ZK141

	Temp.	Crack Location	Loading Direction	K_c [$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^{3/2}}$]	No. of Specimen	\bar{v}
Through the Thickness Crack	R.T.	Base Metal	L	14.24	5	0.004
				133.9*	1	—
		B.C.	T	14.43	5	0.025
				137.8*	2	0.023
		Bond	T	11.23	4	0.073
	HAZ	T	11.22	4	0.033	
	77°K	Base Metal	L	11.06	4	0.035
				15.26	3	0.016
		B.C.	T	15.50	3	0.018
		Bond	T	12.66	4	0.044
HAZ		T	13.18	3	0.036	
				12.47	4	0.030

* Specimen with Fatigue Crack

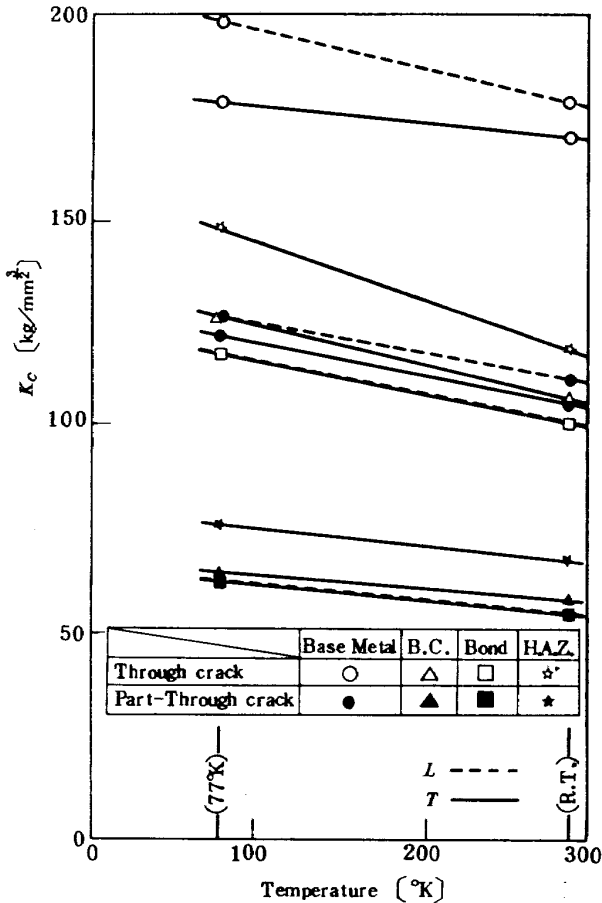


Fig. 2a Effect of Temperature on Fracture Toughness of 2219-T87

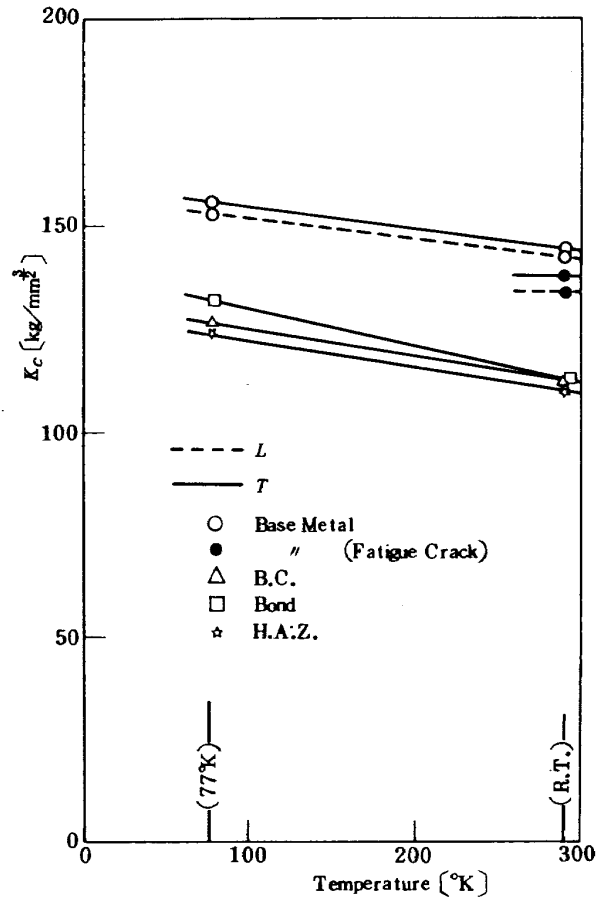


Fig. 2b Effect of Temperature on Fracture Toughness of ZK141

ることが予想されるため、T方向材のみの破壊じん性を求めるにとどまった。

4.2.2 2219-T87の破壊じん性

イ) 貫通切欠きをもつ母材

ZK141の場合と対照的に板の圧延方向が破壊じん性値に影響を及ぼし、L方向材のじん性値が室温で8%程度、77°Kで11%程度T方向材に比べて高い。これは材料の引張り強さや降伏応力がほとんど圧延方向の影響を受けていないことと比較して特徴的なことと言える。また試験温度とじん性の関係では、T方向、L方向とも温度の低下に伴って8~11%程度じん性が高くなっているが引張り強さや降伏応力の向上の程度(13~18%)には及ばない。

母材の室温における正味断面破壊応力はL方向材で材料の降伏応力の94~96%、T方向材で89~93%程度で77°KではL方向材で降伏応力の89~96%、T方向材では85%程度であった。

ロ) 貫通切欠きをもつ溶接継手材

溶接部ではボンド部のじん性が最も低く、室温で母材の

59%、77°Kで66%程度であり、次いで溶着金属部の破壊じん性が室温で母材の63%、77°Kで73%程度となっている。

熱影響部においても母材に比べてかなりのじん性低下が見られ、室温において母材の70%、77°Kにおいて83%程度の破壊抵抗をもつにすぎない。

また、Table中に示した試料のばらつきの程度を示す変動係数の比較から、溶接部近傍とくにボンド部のじん性のばらつきが母材等の場合に比べてかなり大きいことがわかる。これは、溶着金属部分が母材等に比べて金属組織的に不安定であることと、人工的に加工した切欠きの先端が必ずしも厳密にボンド境界面をとらえないで溶着金属あるいは熱影響部のいずれかの側に偏りやすいことによるものである。

ハ) 表面切欠きをもつ母材

表面切欠きを持つ母材の室温における公称破壊応力は両方向材とも材料の降伏応力と同程度あるいはわずかに上回っており、同様に77°Kにおいても正味破壊応力は降伏応力に近い。この程度の高い応力で破壊する場合に線形破壊力学的手法が有効に適用できるか否かは若干疑問が残るが

形式的に(2)式を適用して求められた Table 4. a) の K_c 値を比較すると、L 方向材の破壊じん性値が T 方向材の値よりいずれの試験温度においても 4% 程度高く、また試験温度とじん性値の関係については両方向材とも 77°K の値が室温の場合より 14% 程度高くなっており、この傾向は貫通切欠きを持つ母材の傾向とほぼ一致している。

二) 表面切欠きをもつ溶接継手材

溶接部の破壊じん性ではボンド部の値がいずれの試験温度でも最も低く、次いで溶着金属部分の値がこれに対して 3~7% 程度高く、さらに熱影響部のじん性はボンド部に比べて 20~25% 高くなっている。

溶接部のじん性と温度との関係については、いずれの部分の切欠きに対しても 77°K のじん性値が室温の値よりも 11~15% 程度高くなっている。

溶接部と母材の破壊じん性の比較に際して 4.2.1 で述べた理由から、熱影響部を除いて母材部の圧延方向の影響は無視できるものと考え、ここでは溶接部のじん性を T 方向母材のじん性との比較において検討する。

いずれの試験温度においてもボンド部のじん性は母材の 51%、溶着金属部では 55%、熱影響部では 63% 程度であった。

このことから、本供試材の製作にあたって行なわれた溶接施工条件のもとでは、溶接部の破壊じん性は母材の値の約 50% 程度と見積ることができる。

なお、測定した破壊じん性値のばらつきについては、溶着金属の中央部ではいずれの試験温度においてもばらつき(変動係数)が小さく比較的安定した値が得られているが、構造物の設計に際して強度を見積る場合にボンド部および熱影響部の 77°K におけるばらつきが比較的大きいことに注意を払う必要がある。

以上表面切欠きをもつ場合の破壊じん性を線形破壊力学の手法によって評価してきたが、2219-T87 などのように低温においても比較的高いじん性を示すような材料では、とくに小さな表面切欠きあるいは内部欠陥の評価にあたって次に記すような理由で正味断面応力によって設計応力を見積ってよいと考えられる。

1) 2219-T87 材のように母材の引張り強さが降伏応力よりもかなり大きい場合 ($\sigma_u/\sigma_y = 1.26 \sim 1.35$) には破断面が全面降伏しているとは言えないが⁵⁾、本実験による表面切欠き付試験片の正味断面破壊応力は室温および液体窒素温度とも材料の降伏応力程度となっており、切欠き先端に大きな塑性変形が生じている状態で線形破壊力学の手法を適用することが必ずしも妥当であるとは言えない。

2) 表面切欠きあるいは内部欠陥は一般に貫通切欠きに比べてその形状寸法が小さいが、このように切欠き寸法が

板幅等に比べて小さいと切欠き破壊じん性に及ぼす効果が小さくなり、定量的に線形破壊力学理論から外れてくることが認められている⁶⁾。

また Table 4 a) において、表面切欠き付試験片の破壊じん性が貫通切欠き試験片の値に比べて母材に関しては 60~70% 程度、溶接部分に関してはそれぞれ、50~60% であるのは、表面切欠きの先端の応力状態が平面ひずみ状態 (K_{Ic}) に近い拘束をうけていることおよび上記の主として 2) の理由によるためであると思われる。

5 ま と め

アルミニウム合金 2219-T87 と ZK141 の室温および液体窒素温度 (77°K) における標準引張り試験ならびに溶接継手を含めた板材の破壊じん性試験の結果は次のように要約される。

○ 両金属の引張り強さおよび降伏応力の値は室温および 77°K において板の切出し方向ごとに比べればそれぞれほぼ等しいが、これらの値を温度との関係について見れば、77°K の強度 (σ_u および σ_y) は室温での値に比べて 10 数~20% 程度高い。また ZK141 では圧延に直交する方向の強度が圧延方向の値より若干高い。

○ 温度の低下はいずれの材料においても破壊じん性の向上をもたらしている。

○ 溶接時の入熱量などの条件は溶接部の破壊じん性や継手強度に影響を及ぼすことが予想されるが、本研究に供された溶接継手材のうち、2219-T87 で破壊じん性が最も低下しているのは溶接境界部で、その値は母材の破壊じん性の 50% 程度となる。一方 ZK141 では熱影響部の破壊じん性が母材の値の 75% 程度で最も低い。ただし、溶接後の余盛りの有無は試験結果に影響を及ぼし、ZK141 の余盛りを削除した場合は断面積の減少によって境界部、溶着金属部の破壊応力の低下が予想されるため、ここで ZK141 と 2219-T87 の溶接部の破壊じん性を直接比較してそれらの優劣を論ずることは妥当でない。

○ 2219-T87 の表面切欠き材の破壊じん性を形式的に線形破壊力学理論を用いて求めた値は、貫通切欠きの値に比べていずれも 50~60% であるが、低温においても 2219-T87 は延性的で小さな切欠きに対して鈍感であり、むしろ室温、77°K とも正味断面の降伏応力近傍で破壊が生ずると考えてよい。

○ 破壊じん性値のばらつきはいずれの材料においても溶接境界部で最も大きく設計強度等の計算に際しては統計処理を施した値を用いなければならない。

○ 両金属材料とも他のアルミニウム合金およびステンレス鋼 301-H 材に比べて^{2), 7)} 低温における破壊特性は優

れているので、破壊じん性の観点からはいずれも液酸・液水ロケットタンク構造材料として適していると言える。

本研究の供試材のうちZK141のT.I.G溶接は石川島播磨重工業(株)が実施したもの、また2219-T87については三菱重工業(株)が実施したものをを用いた。

参考文献

- 1) Eldo-Cecles/Esro-Cers, Scientific and Technical Review(1970), Vol. 2, No.4, (1970) p. 427.
- 2) 角田義秋, 寺田博之, 中井暎一, 埴武敏; 2014-T651アルミニウム合金とSUS301-H ステンレス鋼の室温および77°Kにおける破壊じん性, 航技研報告TR-535(1978)
- 3) Brown, W.F, Srawley, J.E. : Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410(1967)pp.114-116.
- 4) ASTM Standard, E399-74.
- 5) 寺田博之: き裂先端塑性域に線形な応力分布のある弾塑性モデルの解析, 航技研報告TR-293(1972).
- 6) Feddersen, C.E. : Evaluation and Prediction of the Residual Strength of Center-Cracked Tension Panels, ASTM STP486(1971)pp.50-78.
- 7) Campbell, J.E. : Fracture Toughness of High-Strength Alloys at Low Temperature-A Review, ASTM STP556(1974)pp. 3-20.

付表 破壊じん性の実測値

(1)

	番 号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性	
				$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right\}$	$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right\}$	$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^{\frac{3}{2}}} \right\}$	
2219-T87 貫通切欠き (室温)	L-4	母 材	L	23.7	35.4	174.9	
	L-5			25.2	35.9	182.3	
	L-7			25.0	35.5	181.4	
	L-8			23.8	35.4	175.3	
	平 均 値				24.4	35.6	178.5
	変 動 係 数				0.032	0.007	0.022
	T-1	母 材	T	24.1	34.2	173.9	
	T-2			23.2	33.1	168.3	
	T-3			23.0	32.7	167.0	
	T-9			23.4	33.4	170.3	
	平 均 値				23.4	33.4	169.9
	変 動 係 数				0.020	0.019	0.018
	BC-1	ビード中央	T	13.7	19.5	99.3	
	BC-2			15.1	21.6	110.0	
	BC-3			15.0	21.4	108.0	
	BC-4			15.3	21.8	111.1	
	BC-5			14.5	20.7	105.6	
	BC-6			14.6	20.9	106.3	
	平 均 値				14.7	21.0	106.8
	変 動 係 数				0.039	0.040	0.039
	Bond-1	ボント部	T	14.6	20.8	106.5	
	Bond-2			14.2	20.2	103.2	
	Bond-3			12.8	18.2	93.6	
	Bond-4			13.0	18.6	95.6	
	Bond-5			14.0	20.0	102.0	
	Bond-6			15.2	21.6	110.6	
	Bond-7		L	12.6	18.1	91.8	
	Bond-8			13.7	19.6	100.1	
	Bond-9			12.6	18.0	91.6	
	Bond-10			14.0	20.1	102.3	
Bond-11	13.9			19.8	101.0		
Bond-12	15.1			21.5	110.1		
平 均 値				13.8	19.7	100.7	
変 動 係 数				0.066	0.065	0.065	
H-1	熱影響部	T	16.1	23.1	116.4		
H-2			16.5	23.5	118.8		
H-3			16.3	23.3	117.3		
H-4			16.5	23.5	119.4		
H-5			17.0	24.3	123.9		
H-6			16.6	23.7	119.9		
平 均 値				16.5	23.6	119.3	
変 動 係 数				0.018	0.018	0.020	

(2)

	番 号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性	
				$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	
2219-T87 貫通切欠き(77°K)	L-1	母 材	L	28.0	39.9	203.6	
	L-2			26.2	37.4	190.5	
	L-3			26.4	37.7	192.0	
	L-6			28.3	40.2	205.6	
	平 均 値				27.2	38.8	198.0
	変 動 係 数				0.040	0.038	0.039
	T-4	母 材	T	24.5	34.9	177.9	
	BC-7	ビード中央	T	17.3	24.7	125.9	
	BC-8			18.5	26.4	134.6	
	BC-9			17.4	24.9	126.8	
	BC-10			17.0	24.2	123.3	
	BC-11			16.9	24.2	123.1	
	BC-12			17.0	24.3	123.9	
	平 均 値				17.4	24.8	126.3
	変 動 係 数				0.034	0.034	0.034
	Bond-13	ボンド部	T	17.6	25.1	127.4	
	Bond-14			15.7	22.4	113.6	
	Bond-15			16.0	22.9	116.4	
	Bond-16			15.6	22.2	113.2	
	Bond-17			16.2	23.2	118.6	
	Bond-18		L	14.7	21.1	106.8	
	Bond-19			16.2	23.1	117.3	
	Bond-20			16.7	23.5	121.4	
	Bond-21			16.7	23.9	122.1	
	Bond-22			16.2	23.1	117.4	
	Bond-23	16.5	23.5	118.7			
	平 均 値				16.2	23.1	117.5
	変 動 係 数				0.045	0.045	0.045
	H-7	熱影響部	T	20.9	29.8	150.7	
	H-8			19.5	27.9	142.0	
H-9	19.5			27.8	141.2		
H-10	20.9			29.8	151.9		
H-11	20.9			29.9	151.3		
H-12	20.6			29.4	150.4		
平 均 値				20.4	29.1	147.9	
変 動 係 数				0.034	0.034	0.033	

(3)

番号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性
			$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^{\frac{3}{2}}} \right]$
L-13	母材	L	35.9	38.1	1112
T-11	母材	T	34.2	36.3	1059
T-13			34.8	36.9	1077
平均値			34.5	36.6	1068
変動係数			0.011	0.012	0.012
SC-1	ビード中央	T	22.3	23.1	58.9
SC-2			22.3	23.1	58.7
SC-3			22.3	23.1	58.8
SC-4			21.9	22.6	57.0
SC-5			23.3	24.2	61.4
SC-6			21.6	22.4	56.3
SC-7			22.3	23.1	58.1
SC-8			22.3	23.1	58.9
平均値			22.3	23.1	58.5
変動係数			0.023	0.023	0.026
SB-1	ボンド部	L	20.2	21.0	53.4
SB-2			20.8	21.7	55.1
SB-3			21.2	22.0	56.2
SB-4			19.8	20.6	51.7
SB-5			21.3	22.1	56.4
SB-6			19.8	20.6	51.6
SB-7		T	21.6	22.4	57.9
SB-8			20.4	21.3	54.2
SB-9			20.8	21.7	54.7
SB-10			20.6	21.5	54.3
SB-11			22.0	22.8	57.5
SB-12			21.3	22.0	55.1
SB-13			20.9	21.7	55.2
SB-14			20.3	21.2	53.7
平均値			20.8	21.6	54.8
変動係数			0.031	0.030	0.034
SH-1	熱影響部	T	25.2	26.1	66.4
SH-2			24.8	25.6	64.6
SH-3			26.1	26.9	68.7
SH-4			27.3	28.1	70.8
SH-5			26.6	27.4	69.3
SH-6			27.1	27.7	67.4
SH-7			27.8	28.5	69.2
平均値			26.4	27.2	68.1
変動係数			0.042	0.039	0.031

2219-T87 表面切欠き (室温)

(4)

	番 号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性	
				$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right\}$	$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right\}$	$\left\{ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right\}$	
2219-T87 表面切欠き (77°K)	L-11	母材	L	40.6	43.1	126.0	
	T-12	母材	T	38.0	40.3	121.8	
	SC-9	ビード中央	T	24.5	25.4	64.6	
	SC-10			25.6	26.4	65.5	
	SC-11			25.1	26.0	65.4	
	SC-12			26.1	27.0	67.3	
	SC-13			24.1	24.9	62.8	
	SC-14			24.9	25.8	64.3	
	SC-15			24.2	25.0	63.1	
	SC-16			24.6	25.5	64.3	
	平 均 値				24.9	25.8	64.7
	変 動 係 数				0.028	0.027	0.022
	SB-15	ボンド部	L	23.5	24.4	61.9	
	SB-16			23.2	24.1	60.5	
	SB-17			23.9	24.8	61.9	
	SB-18			23.7	24.6	62.7	
	SB-19			27.2	28.2	71.4	
	SB-20		22.6	23.4	58.5		
	SB-21		23.1	23.8	59.2		
	SB-22		23.0	23.8	59.5		
	SB-23		T	23.9	24.8	62.0	
	SB-24			25.9	26.9	67.9	
	SB-25	30.2		31.3	78.4		
	SB-26	23.2		24.0	59.7		
	SB-27	22.4		23.4	60.0		
	SB-28	23.8		24.6	61.7		
	SB-29	25.0	25.9	64.0			
	SB-30	22.2	23.0	57.8			
	平 均 値				24.2	25.0	62.9
	変 動 係 数				0.086	0.086	0.083
	SH-8	熱影響部	T	31.4	32.6	83.2	
	SH-9			27.8	28.9	73.8	
	SH-10			26.4	27.3	68.0	
SH-11	33.6			34.9	88.9		
SH-12	27.4			28.4	72.3		
SH-13	28.2			29.1	72.9		
SH-14	27.4			28.3	71.5		
SH-15	30.0			31.0	77.4		
SH-16	29.5			30.5	76.1		
平 均 値				29.1	30.1	76.0	
変 動 係 数				0.079	0.080	0.085	

(5)

番号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性
			$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}\right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^{\frac{3}{2}}}\right]$
L-1	母材	L	28.5	40.1	1433
L-2			28.1	39.8	1425
L-3			28.0	39.6	1420
L-4			27.7	39.5	1420
L-5			27.6	39.5	1421
平均値			28.0	39.7	1424
変動係数			0.013	0.006	0.004
L-11	母材	L*1	26.0	37.1	1339
T-1	母材	T	27.3	38.7	139.2
T-2			29.2	41.4	148.9
T-4			27.8	39.4	141.3
T-5			28.3	40.5	146.1
T-6			28.4	40.6	145.4
平均値			28.2	40.1	144.3
変動係数			0.025	0.027	0.025
T-11	母材	T*1	19.8	26.5	135.5
T-12			21.6	27.8	140.0
平均値			—	27.1	137.8
変動係数			—	0.033	0.023
BC-1	ビード中央	T	23.3	32.9	118.2
BC-2			23.2	33.1	119.2
BC-3			22.3	31.5	113.1
BC-4			19.5	27.5	98.7
平均値			22.1	31.3	112.3
変動係数			0.079	0.028	0.073
B-1	ボンド部	T	21.1	29.6	106.0
B-2			22.6	32.0	115.0
B-3			22.8	32.1	114.8
B-4			22.2	31.5	112.8
平均値			22.2	31.3	112.2
変動係数			0.035	0.037	0.033
HZ-1	熱影響部	T	22.6	32.3	116.4
HZ-2			20.9	29.4	105.5
HZ-3			21.6	30.7	110.1
HZ-4			21.4	30.6	110.3
平均値			21.6	30.8	110.6
変動係数			0.034	0.039	0.035

ZK141 貫通切欠き (室温)

* 1 疲れき裂を有する試験片を使用。

(6)

	番 号	切欠き位置	荷重方向	公称応力	正味応力	破壊じん性
				$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$
ZK141 貫通切欠き(77°K)	L-7	母材	L	30.7	43.5	155.9
	L-8			30.1	42.4	152.0
	L-9			29.4	41.7	149.9
	平 均 値			30.1	42.6	152.6
	変 動 係 数			0.022	0.020	0.016
	T-3	母材	T	30.1	42.8	153.6
	T-7			29.8	42.5	152.5
	T-8			31.0	44.1	158.8
	平 均 値			30.3	43.1	155.0
	変 動 係 数			0.020	0.021	0.018
	BC-5	ビード中央	T	23.5	33.2	118.9
	BC-6			25.0	35.5	127.6
	BC-7			26.3	37.4	134.4
	BC-8			24.9	35.1	125.7
	平 均 値			24.9	35.3	126.6
	変 動 係 数			0.046	0.049	0.044
	B-5	ボンド部	T	26.4	37.2	133.3
	B-6			26.6	37.8	135.7
	B-7			24.8	35.2	126.5
	平 均 値			25.9	36.7	131.8
	変 動 係 数			0.038	0.036	0.036
	HZ-5	熱影響部	T	23.6	33.3	119.6
	HZ-6			25.1	35.7	128.1
	HZ-7			24.0	34.1	122.8
	HZ-8			25.3	35.8	128.4
	平 均 値			24.5	34.7	124.7
	変 動 係 数			0.035	0.034	0.030

航空宇宙技術研究所資料372号

昭和53年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)千182

印刷所 株式会社東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
