

純金屬與鋁合金結合之殘留應力對腐蝕的影響

The Effect of Residual Stress on the Corrosion Behavior in Pure Metal/Al Alloy Joints

計畫編號：NSC 82-0113-E-019-076-T
執行期限：82/05/01 – 83/04/30

主持人：王星豪 海洋大學船舶機械系副教授
研究助理：單思宏 海洋大學船舶機械所研究生

一、中文摘要

本研究在探討以焊接為例，因製程所引起之局部異質性(Heterogeneity)或殘留應力(Residual Stress)在海洋應用環境中之腐蝕行為。一系列摩擦焊接之同金屬接合的碳鋼 / 碳鋼、不銹鋼 / 不銹鋼，與異金屬相接合的碳鋼 / 不銹鋼、純銅 / 5086鋁合金、純鋼 / 7075鋁合金之固態結合，用來探討接合區附近異質性存在對構件機械性質、化學腐蝕行為之影響。

一般所言摩擦焊有較佳之機械性質，極為籠統。經此研究結果，可較為具體指出摩擦焊接合棒，以鋼鐵為例，其接合區具有極佳抗扭力，斷裂位置均發生在素材，而非接合線上(Bond Line)。抗拉力言摩擦焊件較素材有較高的降伏強度及最大合的拉力斷裂位置卻發生在接合線上。摩擦焊件結合線附近硬度分佈呈現非均勻之分佈，與其焊接所使用壓力、材料熱傳導係數、材料之熱處理性等因素有關，導致內外徑硬度高低不一致，熱影響區大小及幾何形狀亦不同。

電弧自體接合的板狀純銅與鋁合金7075、5086、5356和2024接合，經X-Ray測量結果顯示，在對接焊道附近有拉伸殘留應力存在。依據

鋁合金端殘留應力測試趨勢，擇點做海水腐蝕測試，其結果顯示7075鋁合金之殘留拉應力焊道區，要比殘留壓縮應力存在的母材中間區為活性，故腐蝕會發生在成為陽極的焊道及其附近。反之，鋁合金5086、2024因正負殘留應力大小差距不大，則無非常明顯的腐蝕行為差異。

英文摘要

Friction welding and TIG welding of dissimilar metals were chosen as the examples to study the effect of local heterogeneity and residual stress induced by manufacturing process on the corrosion behavior indication. A series of solid-state bonding of similar metals and dissimilar metals by friction welding were utilized to investigate the influence of heterogeneity in the heat affected zone on the local mechanical properties and local electrical chemical corrosion behavior. This study points out the bond region of friction welding has an excellent torsion resistance than the base metals. Torsion fracture always occurs at the base metals rather at the bond line region. The similar and

dissimilar metal join of friction welding have the higher yield strength and ultimate tensile strength than the single base metal due to the metallurgical notch strengthening effect. However, in some cases of friction joints, the tensile fracture occurs at the bond line instead of base metal. Microhardness of the friction welding demonstrates a non-uniform distribution. Geometrical shape and size of the heat affected zone varies with the factors of external pressure, heat conductivity of the materials and heat-treatability of the materials etc. The pure copper plate was butt jointed with the aluminium alloy plate of 7075, 5086, 5356 and 2024 by autogeneous welding process of TIG. The results of surface residual stresses show that high tensile stress exists at the weld and the adjacent region of the weld. The results of corrosion illustrate that the high tensile stress area is more electro-chemically active than the compressive stress area. Thus corrosion prefers to happen at the anodic weld and the adjacent.

二、計畫緣由與目的

一般複合材料，或結構材料中，為同時兼顧強度、韌性和 / 或抗腐蝕性之要求，異金屬之相互接合、結合、包覆有所必要，但其界面結合之優良與否、殘留應力的存在、異質性的產生等，均會直接影響到複合材料之壽命及表現。

不同金屬間接合範圍極廣，一般熔接法、電阻焊接、電子束焊接接合困難的異種金屬焊接均可利用摩擦壓接。摩擦焊於工業上應用極廣，如車軸、氣閥、軸桿、渦輪、滾輪、活塞桿、管件、特殊螺栓、板手、千斤頂、鑽頭等等。然而焊接完加熱，焊件在焊道附近其與機械性質相關之硬度分佈、微觀組織、腐蝕性等，也會隨著受

加工製造影響，出現與母材有極大差異。這些微觀組織差異會直接影響到焊件的破壞性，以及其他破壞抗性，所以瞭解焊道附近之組織變化有助於控制焊件的可靠性。

基於局部微觀組織差異所引起的異質性 (Heterogeneity) 和電弧熔接熱應力所誘發之局部殘留應力，都會直接影響到焊件的抗破壞性質。本研究在探討，由不同結合方式所製造出之異質材料焊件，在焊道接口附近其微觀異質性 (Heterogeneity) 和焊件殘留應力大小，對海水腐蝕行為之反應，作為海洋環境應用上之評估。

三、研究方法及成果

基於銅鋁之間結合不易，而且無文獻數據可供參考，需要鏗而不捨的嚐試與努力。故本研究以 2 大方向 3 階段方式著手。2 大方向即：(1) 一系列摩擦焊之碳鋼 / 低合金鋼、中合金鋼 / 不銹鋼、不銹鋼 / 不銹鋼、純銅 / 5086 鋁合金和純銅 / 7075 鋁合金之固態結合物，用來作微觀異質性對腐蝕探討。(2) 純金屬 (如銅) 與航空用 2000、7000 系列或海洋用 5000 系列鋁合金以惰性氣體保護鎢極電弧焊所製成之純銅 / 2024 鋁合金、純銅 / 5356 鋁合金、純銅 / 5086 鋁合金和純銅 / 7075 鋁合金，異材結合物，用來做自體電弧焊接可行性嚐試和探討其殘留應力對腐蝕影響。

鋼鐵同材與異材圓棒摩擦焊 (第一階段)

以固態摩擦焊方式在壓力 20-35-60Kg/cm² 下，從事碳鋼 / 低合金鋼、中合金鋼 / 不銹鋼、不銹鋼 / 不銹鋼，相同金屬和異金屬之結合 (表 1)。低合金鋼 SS41、中合金鋼 S45C、不銹鋼 SUS304 圓棒直徑分別為 19mm, 20mm 和 19mm。一般而言，摩擦焊接頭有較佳之機械性質，頗為籠統，經本研究有系統之探討發現摩擦焊接頭有極優之抗扭強度及抗斷裂 (表 2、3 和 4)。但對軸向拉力卻不一定經得起考驗 (表 2)。故實際機械結構操

Table 1 Chemical composition analysis of base metals

STEEL	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
JIS SS41	0.15	0.19	0.44	0.029	0.012				
JIS S45C	0.41	0.28	0.80	0.015	0.017	0.22	0.17	0.05	0.22
*JIS SUS304	0.05	0.37	1.83	0.032	0.030	8.36	19.06	0.24	0.5

Unit:wt%

*V: 0.08%, W: 0.02%. Co: 0.17%

Table 2 Tensile properties of friction weld similar and dissimilar metal joints

STEEL JOINT	UTS(N/mm ²)	Y.S.(N/mm ²)	ELONGATION(%)	FRACTURED STEEL
SUS304-SUS304	683	583	27	BOND LINE
SUS304-S45C	727	603	22	BOND LINE
SUS304-SS41	585	552	15	SS41
SS41-S45C	615	589	17	SS41
SS41-SS41	577	462	15	BOND LINE
S45C-S45C	878	818	13	S45C

The results are average values.

Table 4 Results of torsion tests for base metal, similar and dissimilar metal joints

STEEL JOINT	DIAMETER (mm)	GAGE LENGTH (mm)	MAX. TORQUE (Kg-cm)	FRACTURED TWIST ANGLE(deg)	FRACTURED STEEL
SS41 (base metal)	9.05	30.071	734	* * * *	SS41
S45C (base metal)	90.4	28.861	1,035	237	S45C
SS41-SS41	9.09	28.849	785	428	SS41
S45C-S45C	8.98	29.453	1,070	241	S45C
SUS304-SS41	9.01	30.750	760	249	SS41
SUS304-S45C	9.00	26.077	1,075	280	S45C
SUS304-SUS304	9.01	30.620	1,295	1,191	SUS304

Table 3 Tensile properties of base metals

STEEL	UTS(N/mm ²)	Y.S.(N/mm ²)	ELONGATION(%)
JIS S45C	830	802	14
JIS SS41	505	479	23

作中軸桿斷裂發生在摩擦焊接頭上時，軸向拉力作用是導致主因。

部份腐蝕結果顯示S45C/S45C碳鋼同材相接其熱影響區(HAZ)之腐蝕電位無論靜態或動態(圖1)均較為活性，換言之熱影響區在海水

中會先比母材S45C腐蝕。異材SS41/SUS304結合焊件，碳鋼SS41一端類同S45C熱影響區，電化學電位略為活性(圖2)。不銹鋼一端則顯示母材與熱影響區之電化學腐蝕行為並無明顯差異。究其原因可能是孔蝕(pitting)腐蝕絲毫

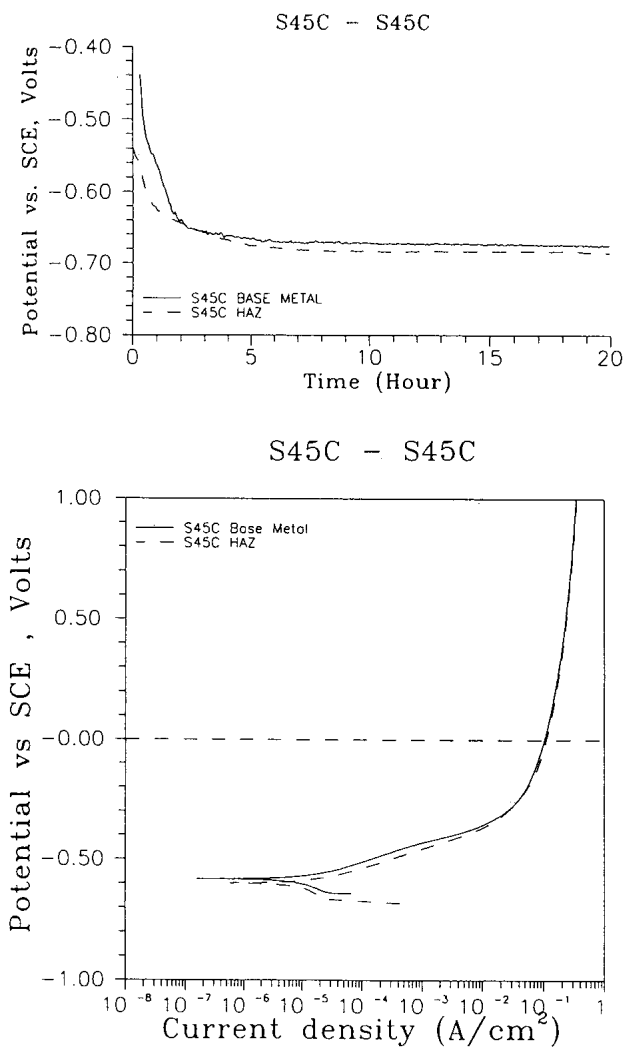


圖 1 (a) S45C/S45C 摩擦焊之各區開路電位
(b) S45C/S45C 在 3.5% NaCl 模擬海水中之動電位極化曲線

微觀組織變化之影響。

純銅 / 鋁合金棒材摩擦焊分析 (第二階段)

純無氧銅圓棒 (直徑 1 英吋, 25.4mm) 以連續驅動摩擦焊方式分別與直徑 1 英吋之鋁合金 7075、5086 圓棒以三種不同壓力 (1) 20-36-66Kg/cm² (2) 25-50-76Kg/cm² (例如銅 / 5086 鋁合金) (3) 30-66-86Kg/cm² (例如銅 / 7075 鋁合金) 相互固態結合。經初步敲擊試驗, 接頭無斷裂發生, 故接合性良好。

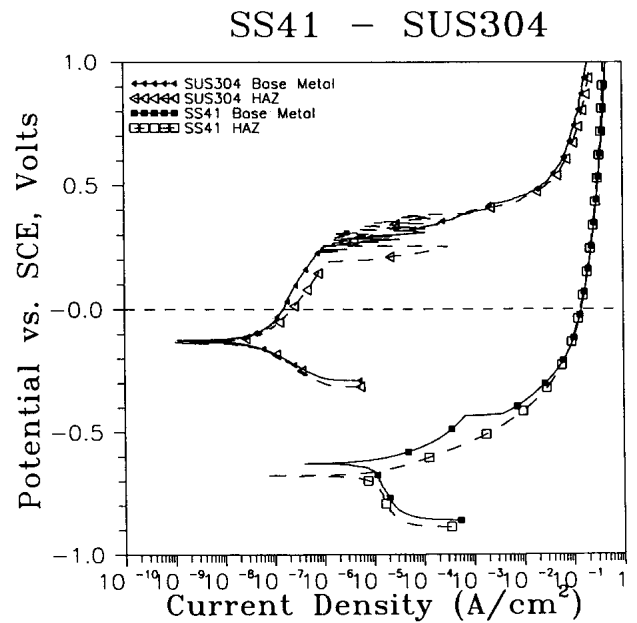


圖 2 SS41/SUS304 在 3.5% NaCl 模擬海水中之動電位極化曲線

依熱傳分析結果顯示快速摩擦接觸面所產生之輸入熱功率呈現一個與縱軸心對稱拋物線的半徑 r 函數關係, $q = 4\pi \int_0^R \mu(r) \cdot p(r) nr^2 dr$ 。簡言之, 溫度分佈由表面到內部軸心隨著半徑 r 的減小, 溫度成一半拋物線關係的降低。摩擦表面溫度不平均之分佈, 會直接影響到熱影響區的大小、形狀及其局部機械性質。

碳鋼 / 不銹鋼, 純銅 / 7075 鋁合金摩擦焊接, 縱向硬度結果顯示除鋼鐵結合線 (Bond Line) 上因麻田散鐵生成相形成硬度較高外, 所有結合線鄰近熱影響區都會因晶粒細化, 而使硬度降低, 呈現軟化現象 (圖 3、4)。銅與鋁合金 5086 之結合則為 (圖 4), 因 5086 鋁合金為不可熱處理。故無所謂的熱影響區。縱向沿直徑四分之一硬度要比中心線硬度為高, 但對銅與鋁合金之雙金屬結合焊件其表面硬度、四分之一截面位置硬度、中心線位置硬度幾乎一致, 並無明顯差異。究其因, 銅、鋁合金之熱傳導度要比鋼鐵為佳, 故熱功及溫度較易傳導達到平衡, 導致不

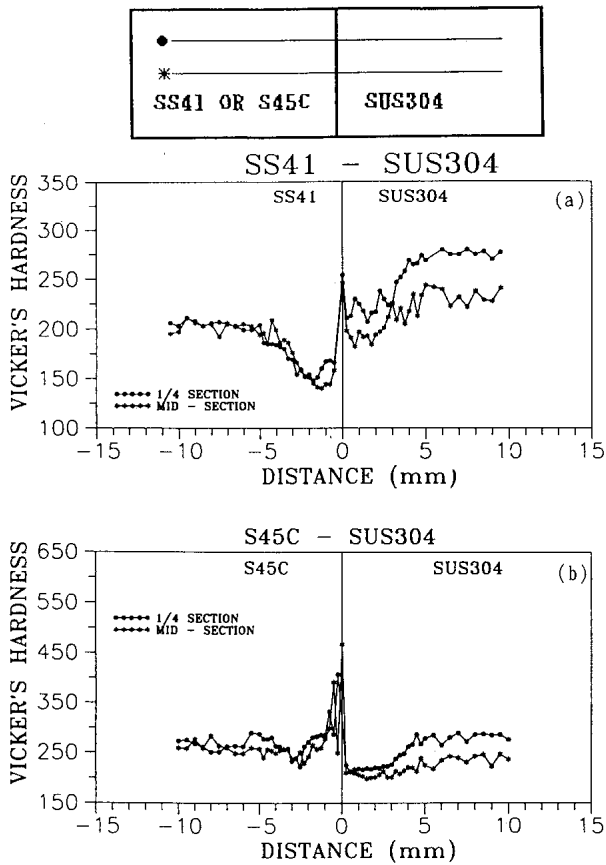


圖 3 鋼材雙金屬摩擦焊焊件，縱向軸向硬度分別在不同位置測試示意圖，(a)和(b)分別為實際硬度值與距離結合線遠近之關係

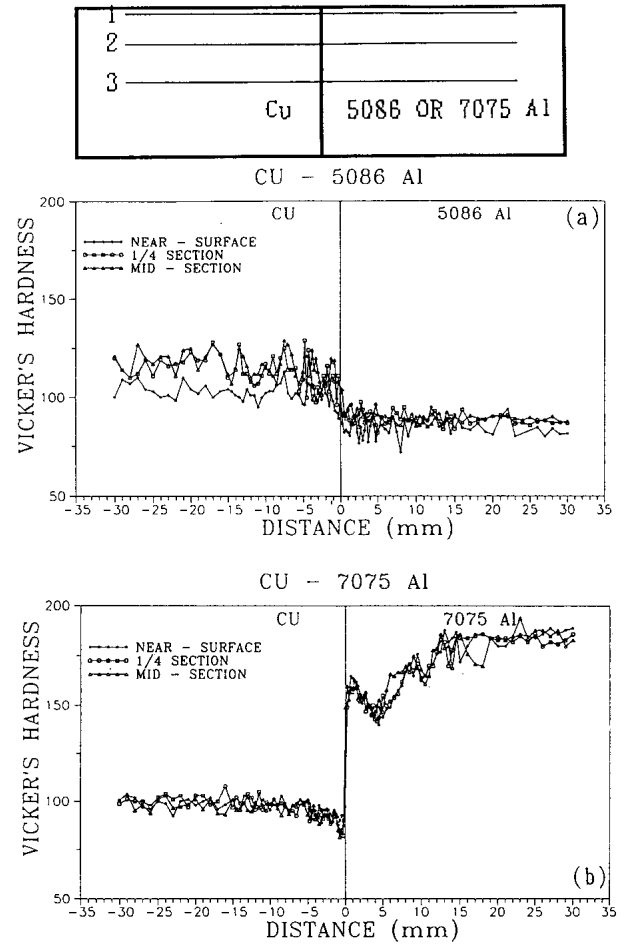


圖 4 銅 / 鋁合金摩擦焊焊件，縱向軸向硬度分別在不同位置測試示意圖，(a)和(b)分別為實際硬度值與距離結合線遠近之關係

同直徑之縱軸向硬度分佈趨勢一致。

一般化學成份改變、微觀組織不同和表面殘留應力大小不等，都會引起電化學腐蝕反應不同。純銅 / 7075鋁合金焊件在模擬海水中腐蝕實驗結果顯示鋁合金對鹵素氯離子之抗蝕性比銅差（如圖10），尤其鋁合金之熱影響區(HAZ)較母材更略為活腐蝕，並在動電位約0.1伏特附近有鈍化膜產生之傾向。鋁合金5086其腐蝕趨勢與7075相同，唯5086是不可熱處理之合金，熱影響區不僅硬度不變，而且其腐蝕電位也與母材一致。

純銅板 / 鋁合金板自體熔接殘留應力影響（第三階段）

純無氧銅板與不同鋁合金板用熱熔氣護鎢極電弧焊接接合。經若干嚐試，除2000系外，銅與5000系、7000系列鋁合金對接焊接性較差，需特別設計考量，才會有成功機會。將焊接成功之對接銅板 / 鋁合金板，選取四組做非破壞性X-光殘留應，局部腐蝕特性也在本研究探討中。

鋁合金部份之表面殘留應力用proto XRD 1000繞射儀在25Kv和5mA下，以two-tilt方法來量測殘留應力分佈。受限於儀器僅適用於鋼鐵及鋁合金，故銅端之殘留應力無法測試，僅能依理推斷殘留應力分佈趨勢（圖6和圖8）。銅與鋁合金7075或鋁合金5086對接後的表面殘留應力 σ_x

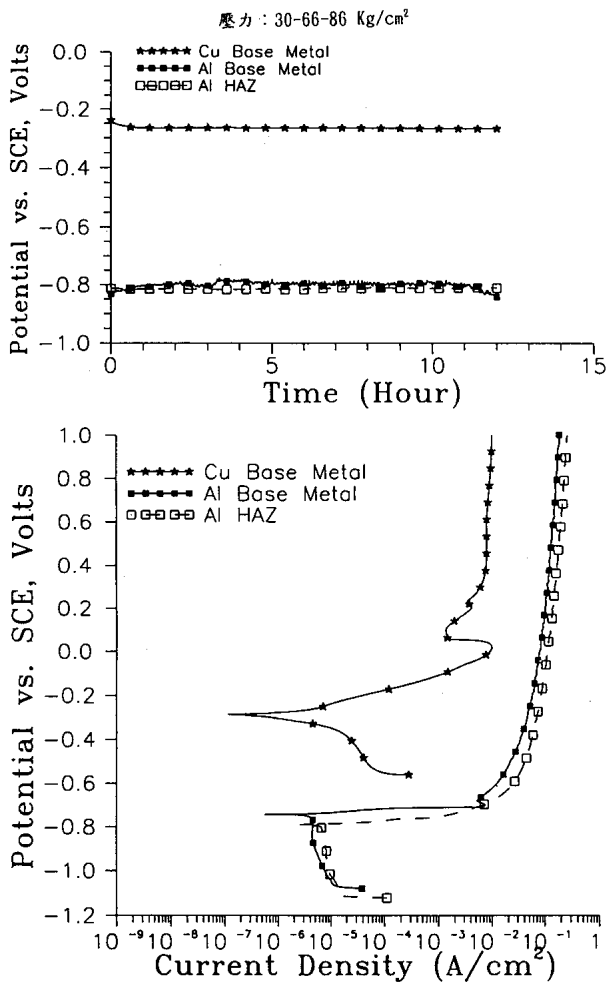


圖 5 Cu/7075 Al 焊件各區之腐蝕開路電位及極化曲線

分佈，沿X軸和Y軸方向分別顯示於圖6和圖8。在鋁板焊道附近平行焊道x-x方向，成一弧形的拉伸張力分佈（圖6）。橫穿焊道Y-Y方向的殘留應力分佈趨勢則大為不同。在鋁板中心附近具有較大壓縮應力，焊道及其附近則存在較大拉伸張力。

同一母材，基於焊接受熱應力影響，不同位置誘導出正負大小不同殘留應力對局部腐蝕行為改變，顯示於圖7和圖9中。7075鋁合金板中心附近位置為壓縮應力，其相對應的開路電位及腐蝕電位較高（圖7）。近焊道處蝕電位略低（圖7），故比壓縮應力區為活性，腐蝕極易優先發生於此處，導致焊件破裂。5086鋁合金板的殘留

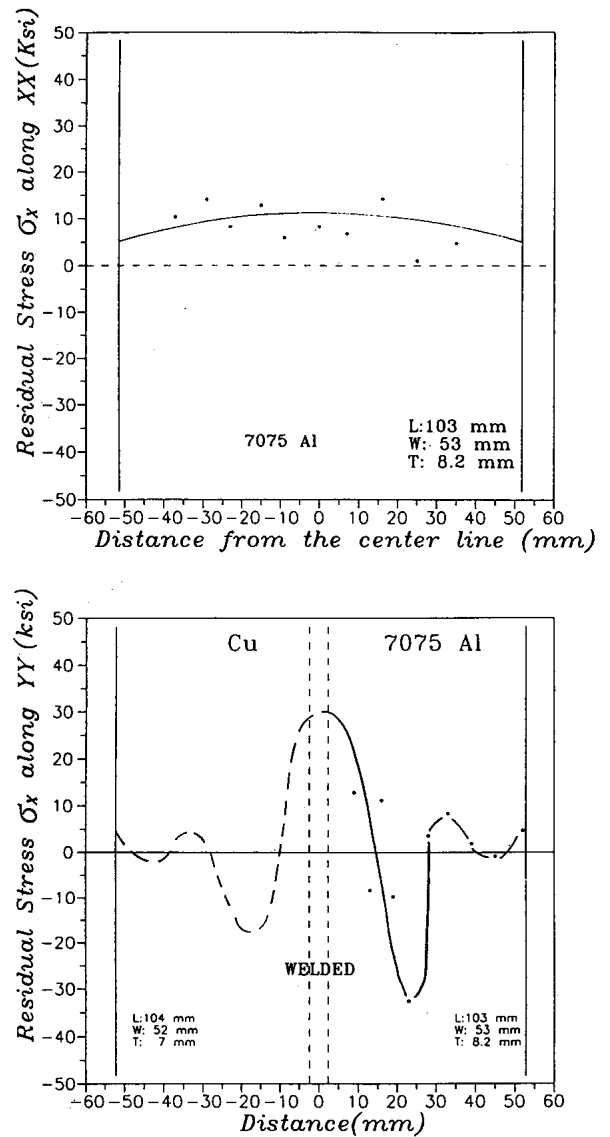


圖 6 Cu/7075 Al 對接焊件表面殘留應力分析

應力分佈趨勢（圖8），沿YY方向較上述的7075鋁合金（圖6）為緩和，即鋁板中心位置的壓縮應力及焊道區的拉伸應力相差不甚鉅，或許是導致腐蝕行為大體一致，不易區分的主因。同理2024鋁合金板的正負殘留應力相差不大，故壓縮應力區及張應力區的腐蝕行為也顯示無所差異（見圖10）。但在陽極腐蝕尾期（圖10），2024鋁合金張應力區的腐蝕電流密度（ $\sim 10^{-2} \text{A/cm}^2$ ），反而要比壓縮應力區的電流密度（ $\sim 0.4 \text{A/cm}^2$ ）為

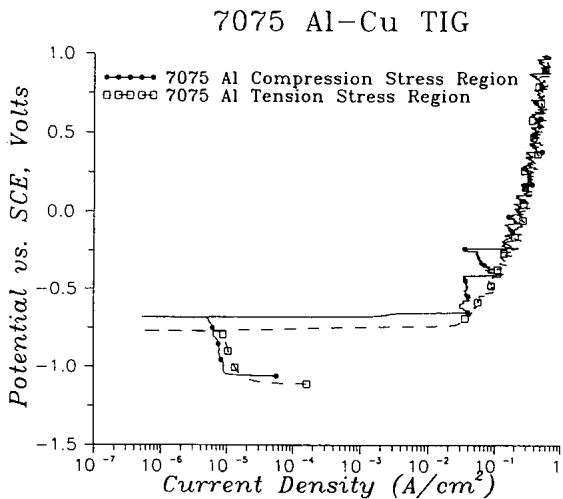
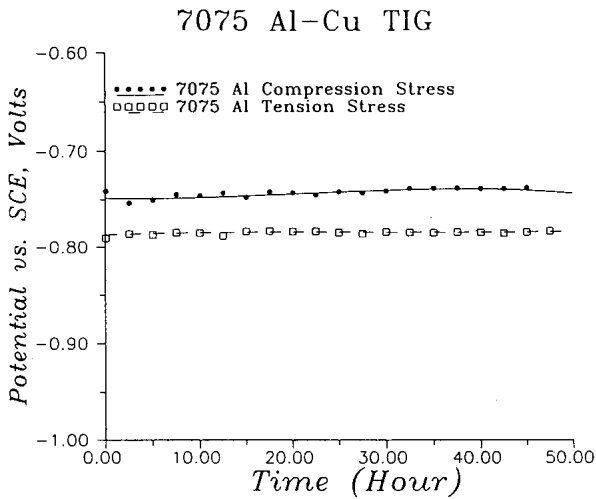


圖 7 7075鋁合金壓縮應力區及拉伸應力區在3.5% NaCl水中開路電位及腐蝕極化曲線圖

小。故殘留應力大小及趨勢相差在某一程度以上確實會對腐蝕化學造成影響。對某些合金言，甚至會影響到末期的陽極腐蝕行為的不同。實際海洋環境應用上之銅—鋁合金雙金屬接合焊件，因拉伸殘留應力在焊道及其附近存在，是引發焊道腐蝕破裂之主因。

四、結論與討論

(1)無論同材或異材，以摩擦焊方式固態接合之接頭可承受極大扭力強度，而無斷裂發生。反之，接頭部則有較差之中心軸向抗拉強度。例

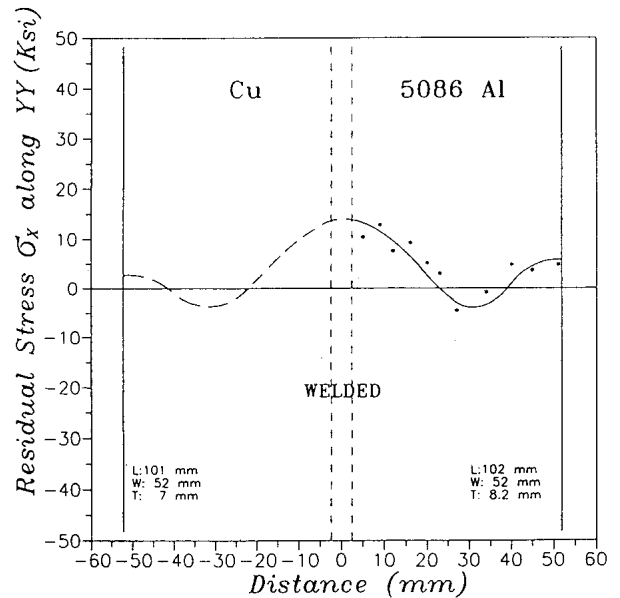
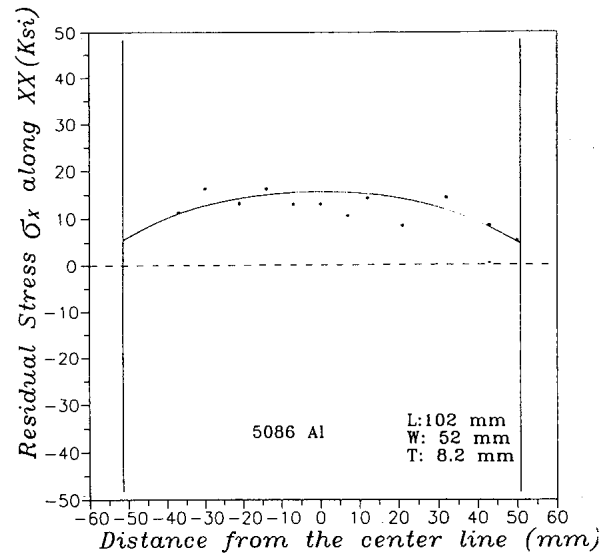


圖 8 Cu/5086 Al對接焊件表面殘留應力分析

如部份種類接頭如SUS304/SUS304、S45C/SUS304和SS41/SS41，其拉伸斷裂位置均在接合區(Bond Region)內。

- (2)從微觀組織上分析，固態摩擦焊有其優良之抗扭力強度，是基於熱影響局之細化結晶結構，形成冶金缺口存在，強化焊件機械性質，故此母材有較優之強度。
- (3)異材接合件各區腐蝕反應，顯示熱影響區

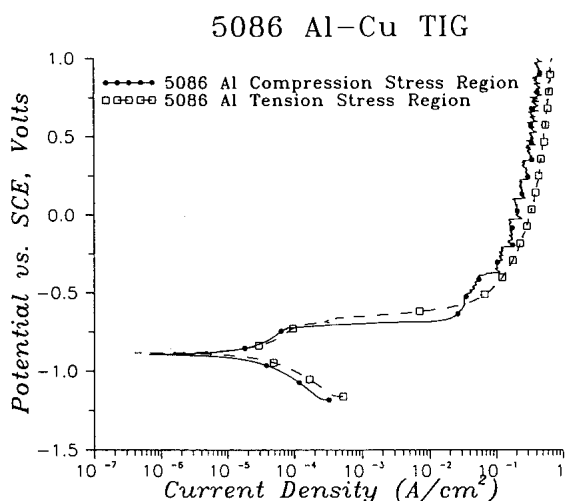


圖 9 5086 鋁合金壓縮應力區及拉伸應力區在 3.5% NaCl 水中開路電位及腐蝕極化曲線圖

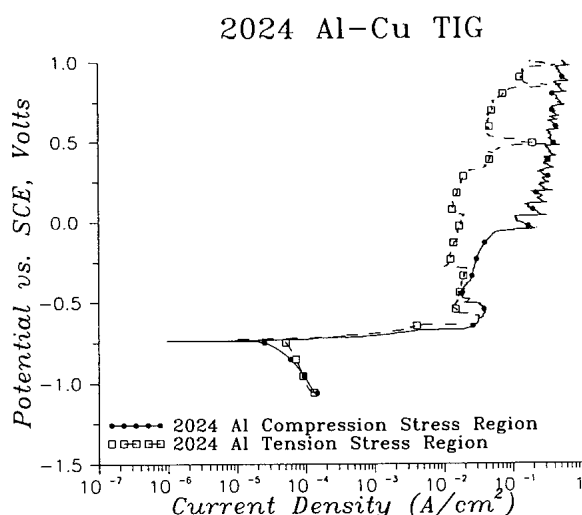


圖 10 2024 鋁合金壓縮應力區及拉伸應力區在 3.5% NaCl 水中開路電位及腐蝕極化曲線圖

(HAZ) 在 3.5% NaCl 模擬海水中有較低之電位。換言之，此區部熱影響區較母材部位容易腐蝕。不銹鋼則例外。

(4) 摩焊接合界面 (Bond Line) 呈現較高硬度，是基於高含碳量 (0.4% Carbon) 急速冷卻變態生成物產生之結果 (如 Lower Bainite, Widmanstätten Ferrite)。硬度曲線之低窪 (Valley) 部份，則代表回火之軟化現象。

(5) 銅 / 鋁異材金屬接合，用固態摩擦焊方式，其成功率是百分之百。反之，以 TIG 電弧焊，以液態熔融池來接銅 / 鋁合金，確有極大困難。板材厚薄、長短及焊接技巧，均需仔細控制。其原因是：(a) 銅與鋁合金熔點之差異。(b) 銅熱膨脹係數比鋁合金熱膨脹係數小，於熔池開始凝固時焊道產生高殘留張力 (Tension)，促使鋁合金容易斷裂。

(6) 焊道區鄰近之殘留拉伸應力會導致局部化學活性，是造成腐蝕破裂主要原因。

參考文獻

1. K.G.K, Murti and S. Sundaresan, Weld. J., Weld. Res. Supp., December, 327s (1985)
2. A.S. Seregin, Svar. Proiz., No. 4, 11 (1985) (Welding Production, No. 4, 21, 1985)
3. D. Yashan, S. Tsang, W.L. Johns and M.W. Doughty, Weld. J., August, 27 (1987)
4. A.S. Sergin, Svar. Proiz., No, 10, 7(1986) (Welding Production, No, 10, 5, 1986)
5. S.D. Bhole, Weld. J., Weld. Res. Supp., July, 168s (1991)
6. H.H. Koo and W.A. Baeslack III, Weld. J., Weld. Res. Supp., May, 147s (1992)
7. S.H. Wang, T.P. Tang, S.H. Shan, and J.K. Wu, "Ferrous Similar/Dissimilar Friction Welding", Submitted to Scripta Met. and Mat., June 1994.
8. K.K. Wang, WRC Bulletin 204.
9. 楊宏智, 周祖亮, 力學季刊, 第10卷, 第1期, 民國83, 第43頁。
10. F.P. Incropera, and D.P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, New York, P.755(1985).