

渗硅铝合金薄板储能点焊的研究

梁 勇 于尔靖 杭承钊 郑笔康
韩国昌 高群宇 赵成章

(中国科学院金属研究所)

摘要

本文叙述了添加两种垫层的电容储能点焊工艺;成功地解决了渗硅铝合金薄板的连接问题。对点焊过程中出现的电极粘结、裂纹和焊点强度等关键问题进行了研究:在电极与工件表面之间垫入锡或铅箔(厚度为0.30—0.45mm),消除了电极的严重粘结;采用镍或钼箔(厚度为0.03—0.05mm),作焊点接合面的中间垫层,提高了焊点的高温强度;研究了电极端部形状对焊点产生裂纹及粘结的影响。试验证明,采用球端电极能更有效地消除焊点裂纹和粘结。通过对结合面的金相观察,这种焊点结合不是形成熔核而是在脉冲电流加热和电极压力的作用下,结合面中心区的硅层熔化并向外挤出,在铝、镍之间产生固相结合。

一、前言

铝合金薄板作为耐高温材料,在使用时,必须复盖一层抗高温氧化渗硅涂层(硅层主要成份是 MoSi_2)。因此,点焊渗硅铝合金比不渗硅的要更加困难。到目前为止,只有文献[1]介绍了渗硅铝合金薄板(TZM)的连接问题:先焊接再渗硅的铝合金薄板只能采用铆钉连接。而点焊后再渗硅需采用气相渗硅,工艺复杂难于实现,尤其是在焊核内表面周围出现未渗区,不能有效地防止氧化。如果渗硅后再进行点焊,就避免了渗硅技术上的困难,防止了未渗区的出现。但这要解决由渗层所引起的下述关键问题:①电极与焊件渗层发生严重粘结(破坏了表面渗层,损坏了电极);②焊点内裂纹;③焊不牢,焊点强度波动大等。

上述现象产生原因,主要是由于表面有粗糙的硬而脆的渗层存在。渗层的主要成份是 MoSi_2 。 Mo 、 $\text{Mo}-0.5\text{Ti}$ 合金及 MoSi_2 的物理性能列于表1。从表1可知,硅层与 $\text{Mo}-0.5\text{Ti}$ 合金比较,其弹性模量大0.5倍,显微硬度值高6倍,热传导性能差2倍,比电阻值大3倍多,熔点低1/5左右,只有膨胀系数接近。在分析了硅层的上述性能之

参加此项工作的还有:王宏伟、郑凤珍、潘献党、陈永革。

表 1 渗硅层与钼合金物理性能的比较

物理性能	材料	MoSi ₂	Mo	Mo—0.5Ti
弹性模量	$\times 10^3 \text{kg/mm}^2, 20^\circ\text{C}$	43	28.5—30	
显微硬度	荷重50g, kg/mm^2	1200	160—185	200
熔点	℃	2030	2622	2610
热传导	$\text{Cal/cm}\cdot\text{C.s}, 20^\circ\text{C}$	0.116	0.35	0.234
比电阻	$\mu\Omega/\text{cm}$	21.6	5.2	5.2
膨胀系数	$\times 10^{-6}/\text{C}, 0\text{--}1200^\circ\text{C}$	5.1	4.9	5.1

后充分利用渗硅层性能有利方面，控制、克服不利方面，从而使上述三个关键问题获得了解决。所采用的添加两种作用不同垫层的电容储能点焊工艺示意图见图1。

从图中可看出，在球端电极和平端电极之间添加厚度为0.3~0.45mm锡片或铅片，避免了钨极直接与硬而脆的粗糙的硅层接触，同时利用低熔点锡的瞬时熔化和汽化冷却焊点表面；在结合面之间放入厚度为0.03~0.05mm的高熔点铌或钽箔，增加了结合面处的接触电阻和电场边缘效应，促使硅层熔化后被加压挤出，实现了钼与铌之间的良好结合。实验材料为0.3mm渗硅Mo—0.5Ti合金板。硅层厚度为0.008~0.025mm，钼合金成份见表2。

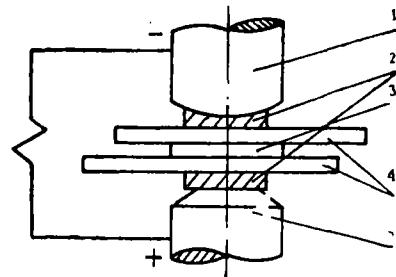


图1 渗硅钼合金薄板电容储能点焊
工艺示意图

1—球端电极 2—锡箔 3—铌箔
4—工件 5—平端电极

表 2 钼合金化学成份

元 素	Mo	Ti	O ₂
含 量 %	余 量	0.4—0.6	<0.01

试验是在充电电压为1000V，最大贮存能量为800J的储能焊机上进行的。经过反复试验，实现了渗硅钼合金薄板构件的连接，并投入小批生产。经1450℃以上高温使用表明，焊点质量可靠。

二、试验结果与讨论

1. 电极与焊件表面粘结

在焊件表面存在硅层的情况下，上下电极与工件接触面以及工件结合面的表面接触电阻都很大，在瞬时($<0.005\text{s}$)强大脉冲电流的作用下，使其表面温度接近于钼的再结晶温度。在电极压力的作用下，硅层与电极发生严重粘结，如图2(图版12)所示。

文献〔2〕、〔3〕介绍了在点焊钼合金薄板时，为避免产生粘结，在电极与工件之间，加一个高塑性低熔点导电性能良好的垫层。点焊渗硅钼合金薄板的试验表明，铅、

锡及其合金都是较为理想的垫层材料。用锡更为适合。但与点焊铝不同，经过大量点焊试验表明，若要消除粘结，垫层必须增厚，其厚度为0.3~0.45mm（点焊铝为0.05mm）。

为了减少电极粘结，还必须对工件与电极接触的表面进行光洁清理。焊件表面清理方法对表面接触电阻 R_k 的影响见表3。

表 3 工件表面清洗情况对表面接触电阻的影响

清 洗 情 况	渗硅铝合金板	染 有 油 污	用 苯 清 洗	砂 纸 打 磨 清 理
$R_k(\mu\Omega)$	410	550	373	288

从表3可看出，渗硅后的工件表面和染有油污的表面接触电阻变化较大。焊前必须将渗硅外表面用细砂纸打磨后，将浮沙去净，保持稳定的低接触电阻值。

2. 电极端面形状对粘结和焊点裂纹的影响

在有关接触焊文献中，球端电极通常推荐用于铝、镁、铜等弹性模量较小、易变形金属的点焊。对弹性模量大的铝合金薄板点焊尚未见到有采用球端电极的报道，一般采用平端电极^{[2][3]}。应用平端钨极试验也取得了较好的结果。但试验表明，平端电极与工件表面接触面积是不稳定的，其接触表面压力分布也是不均匀的，在瞬时脉冲加热的情况下，易发生粘结，特别是贯穿整个焊点的裂纹仍难避免。平端电极产生裂纹的形式见图3（图版12）。

采用球端钨极在保证焊牢的条件下，进行了球端半径对压痕尺寸影响的试验，如图4所示。从图中可看出，择选 $R=12$ mm，球端钨极是合适的，工件厚度只减少6%。

试验证明，球端电极在消除裂纹、粘结及稳定点焊工艺过程方面，表现出良好的效果。用X光透视逐点检查，比较平端电极与球端电极裂纹及粘结出现的统计几率见表4。

**表 4 平端与球端电极出现的裂
纹及粘结几率比较**

电极端部形状	平 端 电 极	球 端 电 极
统计总的焊点数 个	6000	5600
出现粘结焊点几率 %	6.6	0.5
出现裂纹焊点几率 %	6—12.0	0.01—0.85

在保证焊点直径 $d_w \leq 3$ mm条件下，克

服了压痕深的缺点后，充分发挥了球端电极特点的作用。球端电极能保证良好的对中度，接触面压力分布均匀，电极接触面积稳定，避免了局部过热，使通过焊点的电流密度、

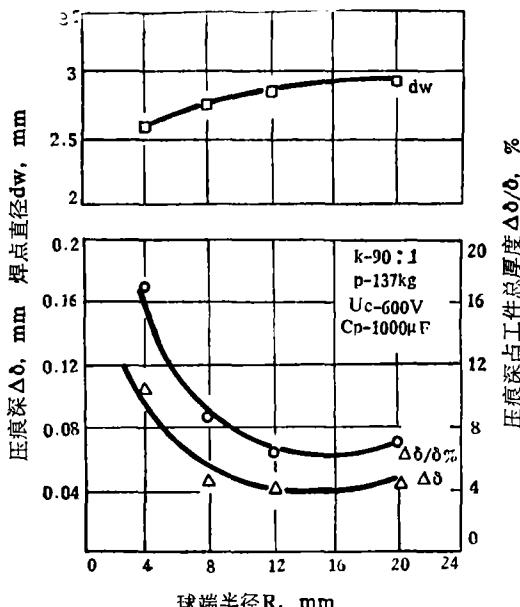


图4 电极球端半径与焊点尺寸的关系

温度变化和应力分布比较均匀对称，而且使得最大的电流与最大的压力之间对应匹配，都集中于焊点的中心区，从而有利于消除焊点裂纹。

3. 影响焊点强度的因素

为了测定影响焊点强度的因素，进行了如下的试验，其试件形式及尺寸如图 5。

①室温性能：试验采用拉伸速度为 6 mm/min

②高温性能：试验采用高频感应加热，铂—铑电偶接触测温，拉伸速度为 55 mm/min

③在点焊过程中采用撕裂试验的方法，检查焊点强度。

(1) 中间垫层对焊点强度的影响 被焊面之间加入或不加入中间垫层，其接触电阻变化情况见表 5。

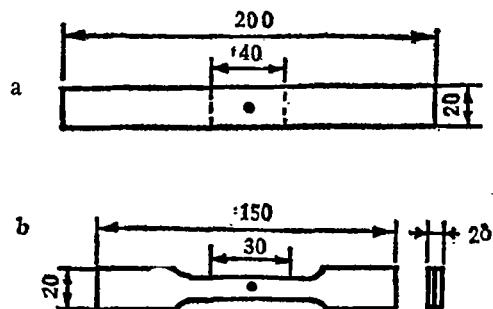


图 5 点焊试件几何尺寸

表 5 中间垫层对被焊面之间 R_k 的变化

上电极端面形状 工件表面情况	平端电极		球端电极	
	未渗硅	渗硅后	未渗硅	渗硅后
R _k ($\mu\Omega$)	未垫铌层	14	90	128
	垫铌层	43	102	390

从表 5 中看出，加入垫层使工件间接触电阻值增加。分别用厚度为 0.03~0.05mm 的镍、钛、铌、钽作为中间垫层与不加入垫层的点焊后进行了 1450℃ 三分钟空气中的烧蚀试验和 -196℃ 下振动及声振疲劳等试验。结果表明，加铌或钽垫层的焊点，具有较高的高温强度、抗氧化性能、抗低温振动和声振疲劳等性能。而加镍、钛垫层及不加垫层的焊点，高温时产生熔化、脱开或变脆现象。所以选定铌、钽箔作中间垫层材料。从图 6 可知，垫铌层具有较高的高温强度。

(2) 被焊表面状态对强度的影响 在相同的焊接规范条件下，室温抗剪强度试验见图 7。

从图 7 可知，被焊表面不经酸洗和打磨具有较高的强度，因此点焊时对被焊面只进行酒精清洗。

(3) 工艺参数对焊点强度的影响 点焊 0.3mm 渗硅的铝合金薄板时，焊点直径选在 2.5~3mm 之间。选定变压比为 k=90:1，可变的参数主要是 R（电极球端半径）、U_c（充电电压）、C_p（充电电容）及 P（电极压力）。为了获得良好的焊点表面质量和抗拉、剪强度的综合指标，寻找各工艺参数间的正确配合是十分重要的。

①球端半径对高温抗拉、剪强度的影响：图 8 为球端半径对焊点高温强度的影响。

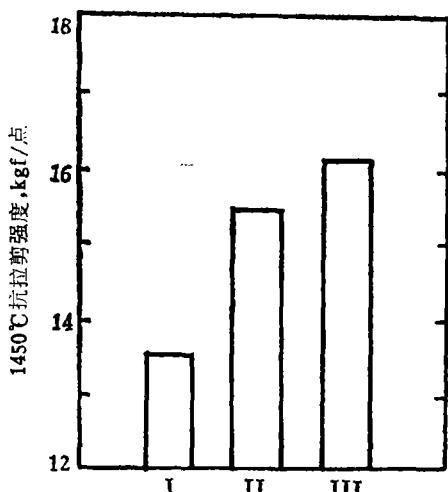


图6 中间垫层材料对焊点高温强度的影响
1—无垫层 11—垫钼箔 111—垫铌箔

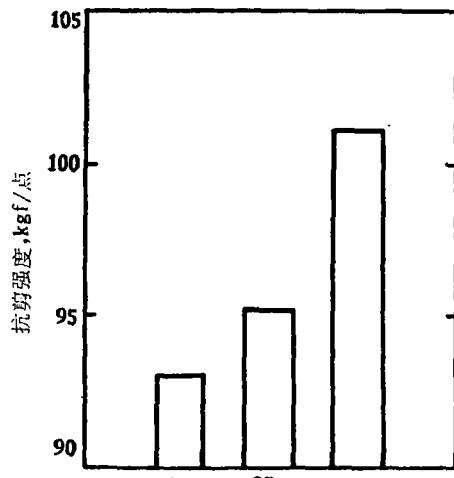


图7 被焊面清理状态对焊点强度的影响
1—用砂纸打磨 11—酸洗 111—酒精清理

从图8可看出，在点焊 $0.3+0.3\text{mm}$ 薄板的情况下，球端半径 R_k $\sim 12\text{mm}$ 范围内具有较高的高温强度。

②电极压力对焊点强度的影响：渗硅 0.3mm 钼合金板 R_k 与压力的变化关系，如图9所示。

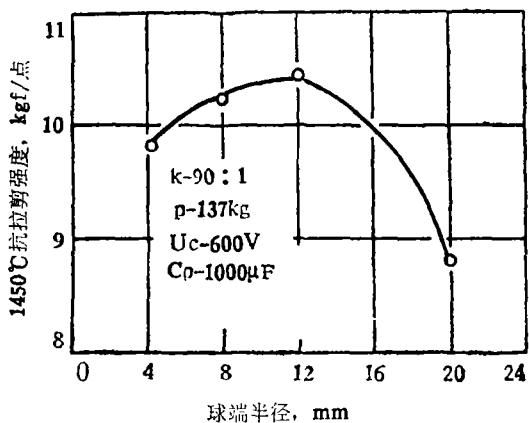


图8 球端半径对焊点高温强度的影响

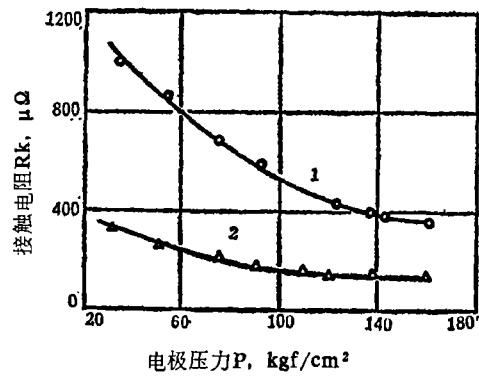


图9 渗硅Mo-0.5Ti薄板接触电阻与电极压力的关系
1—球端电极 2—平端电极

从图9可看出，压力大于 130公斤 时， R_k 变化缓慢。这个转变点的压力用 P_0 表示，合适的电极压力应选 $130\sim 140\text{公斤}$ 为宜。焊点抗剪强度与电极压力变化的关系见图10。抗剪强度最大值对应的电极压力约为 140公斤 。试验表明，当压力小于 100公斤 时，焊点容易发生粘结现象。

③ U_c 及 C_p 对焊点强度的影响：随着 U_c 的增加，焊点抗剪强度增加很快，但 U_c 大于 600V 后，焊点表面就发生粘结。因此充电电压是储能点焊一个敏感的调节参数，对焊点

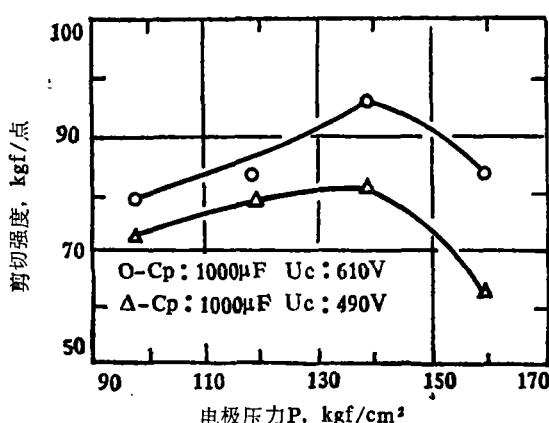


图10 电极压力对焊点强度的影响

基材力学性能的影响，进行了以下初步试验。采用图5 b 带有附加应力的点焊拉伸试件（其焊点直径与试件宽度之比 $d/b = 25 \sim 30\%$ ）进行了室温和高温性能对比测量，其结果见表6。表中试件均为同一张基材和同一炉渗硅。从表中可看出，渗硅基材上有焊点与没有焊点相比较，在室温和高温的力学性能上影响是不明显的。

表 6 带焊点的与无焊点渗硅 Mo-0.5Ti 薄板力学性能

试件 性 能	室温 15℃			1400℃		
	σ_b kgf/mm ²	$\delta\%$	断口位置	σ_b kgf/mm ²	$\delta\%$	断口位置
不带焊点	70.9	14.6		8.52—9.75 9.13	12—14 13.3	
带焊点	66.5—74 69.9	12—16 13.3	热影响区2个 基材1个	8.1—9.15 8.5	12.8—16.0 14.0	热影响区1个 基材2个

4. 焊点结合的实质

为了搞清渗硅钼合金球端钨极点焊结合的特征，即中间铌垫层及中间硅层在点焊结合过程中的作用及行为，借助金相及扫描电镜对焊点结合面进行了观察和分析。

(1) 宏观金相观察 从图11(图版12)中可以看到：

①焊点上下表面压坑内及其与基材的过渡处，渗硅层均完整无损地复盖在表面上。

②在焊点中心处的硅层被挤出结合面之外。更重要的是在铌箔周围产生一个环形均匀致密的三角形硅层堆积，十分理想地解决了结合面铌箔抗高温氧化问题。

③这种点焊在结合面上不形成熔核，焊点内铝合金基材只发生部分再结晶以致完全再结晶(当规范大时)，因此可以确定其结合是在熔点以下发生的。

(2) 显微金相观察 焊点中心结合面如图12、13(图版12)所示。

从图12、图13中可看出：

①中心部位铌与钼界面之间，已达到了原子间金属键的结合。

②中心部位的个别地方，铌、钼之间晶界已经消失，发生局部固溶。

强度、过烧和粘结影响较大。增加充电电容，对焊点过烧及粘结影响较小，但却能提高焊点抗剪强度。

综上所述，通过加铌箔垫层、对结合面进行酒精清洗以及选择合理工艺参数等措施后，提高了焊点强度，并解决了其稳定性问题。1450℃强度抽样统计试验表明，其中大于10kgf/点试样数占98%，高温平均强度为14.6kgf/点。

④带有焊点的基材力学性能：为了解焊点对渗硅 Mo-0.5Ti 构件

③中心部位以外焊点边沿过渡区的结合情况是，残留硅层不但与钼而且与铌结合得很好。

从多数焊点金相观察看出，焊点从中心到边沿都存在以上三种结合情况，但界面原子间金属键结合形式是主要的，这可用电镜观察焊点断口来进一步证实。

(3) 断口扫描电镜观察 利用扫描电镜，对焊点结合面中心区断口进行观察，其断口形貌如图14、15、16、17(图版13)所示。

从断口观察清楚地看到，中间垫层(如图15、图16中箭头所标出的，也如图14铌层电子图象所证实的)与钼合金的结合不是熔化结合也不是机械咬合，而是结合界面原子间金属键的结合。在个别区域已发生局部固溶而使铌、钼晶界消失，如图17所示(图17是图16局部界面放大观察)。

用电子探针和扫描电镜电子图象分析方法对结合面中心区进行硅的成份分析，均发现硅原子的存在很少，在仪器误差范围内。证明球端电极对排挤焊点中心区的硅层，是比较干净的。这对钼、铌金属之间界面良好结合创造了有利条件。

通过以上观察和分析认为，上述焊点结合特征是金属键固相结合。其过程是靠结合面的硅层，在瞬时脉冲电流的作用下首先熔化(其熔点较低，比铌、钼的熔点低400~500℃)，并在焊接电流与自身磁场相互作用所产生的电动力和电极压力作用下向焊点四周挤出。特别是因球端电极的压力分布从焊点中心区向边缘均匀降低，更有利于中心区首先熔化，向焊点直径四周挤出。在其他条件的配合下，使铌、钼之间直接发生固相结合。焊点结合的这种实质，可以说说明脆性倾向很大的渗硅钼合金的焊点，为什么能获得良好的强度，特别是良好的高温强度，抗低温振动疲劳及声振疲劳等性能。

三、结 论

1. 渗硅后的钼合金薄板可在一般大气条件下，采用添加两种垫层的电容储能点焊进行焊接，并成功地应用于1450℃以上高温条件使用的渗硅钼合金构件的连接。

2. 采用球端钨极，在电极与工件表面接触面之间，加入厚度为0.30~0.45mm锡箔，在被焊面之间，加入0.03~0.05mm的铌、钼箔，选择合适的工艺参数和对工件表面分别进行处理，解决了点焊过程中出现的电极粘结、裂纹及焊点强度等关键问题。

3. 渗硅钼合金薄板添加中间垫层储能点焊的结合，实质上不是形成熔核而是钼合金与铌产生固相结合。

(1979年8月13日收到)

参 考 文 献

- (1) Kummel, D. L. et al, Metal Progress, 93(1968), №3, 78.
- (2) Johnston, J. H. et al, Welding Journal, 33 (1954), №9, 449.
- (3) 刘建勋等, 点焊钼时粘结现象的研究, 第二届全国焊接年会论文。

CAPACITOR DISCHARGE SPOT WELDING OF COATED MOLYBDENUM ALLOY SHEET

Liang Yong, Yu Erjing, Hang Chengzhao, Zheng Bikang,
Han Guochang, Gao Jingyu and Zhao Chengzhang
(Institute of Metal Research, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the technique of applying insert-foils in capacitor discharge spot welding for a successful joining together of coated molybdenum alloy sheet is described. Methods have been developed, with which the main technical problems, such as sticking of coating to the electrode tip, cracking in the welded spot and deterioration of joint strength, were solved with satisfaction. Success in preventing sticking was achieved by inserting tin or lead foil (0.3~0.45mm thick) between electrode tips and workpiece. Increase of strength at high temperature was obtained by inserting niobium or tantalum foil (0.03~0.05mm thick) between the contact surfaces of workpieces. The effect of the shape of electrode tip on crack formation and sticking were investigated. It was shown that the electrode with domed tip was more effective in reducing cracking and sticking than that with flat tip. Metallographic examination showed that actually welding was not due to the formation of nugget, but due to the formation of solid phase bonding between niobium foil and molybdenum alloy sheet instead. Under the action of pulse current heating and electrode pressure, the coating in the joint centre melted and was squeezed out.