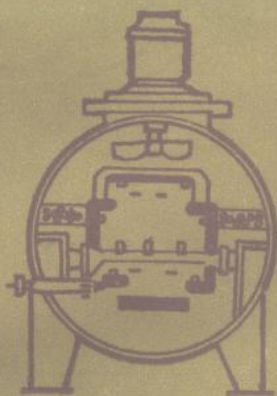


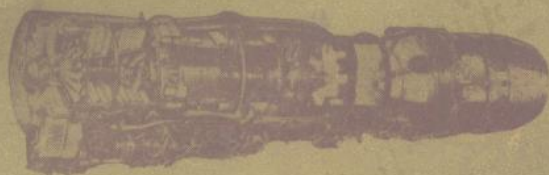
10
机械制造
实用新技术丛书



栗 枯 主 编

真 空 钎 焊

李培森 任耀文 燕泽明 编著



742
1
国防工业出版社

机械制造实用新技术丛书之十

77.742
251

真空钎焊

栗 枯 主编

李培森
任耀文 编著
燕泽明

国防工业出版社

内 容 简 介

真空钎焊技术在我国应用较晚，七十年代以来在使用和发展真空钎焊方面取得了较大的进展。

随着现代航空、航天和电子工业的发展和新材料不断的应用，真空钎焊与其它钎接技术相比有其特有的优点，应用必将更为广泛。

本书系统地介绍了国内外概况，反映了当前国内外真空钎焊的发展水平。主要包括：真空钎焊的基本原理，各种钎料的性能及选择方法，真空钎焊的工艺过程，各种材料及异种材料的真空钎焊，真空钎焊炉的使用与维护，并较详细地介绍了引进真空炉的性能和特点。

本书可供从事真空钎焊的工程技术人员和操作人员阅读，也可作为大专院校焊接专业师生的参考资料。

真 空 钎 焊

机械制造实用新技术丛书之十

栗 枯 主编

李培森

任耀文 编著

燕泽明

责任编辑 宋桂珍

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $31\frac{1}{4}$ 81千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷 印数：0,001—7,050册

统一书号：15034·2839 定价：0.66元

作者的话

现代航空发动机制造是机械制造业的一个重要方面，具有机械制造的基本特点。它又是技术集约性的工业，集中应用了很多新的技术和新的工艺，其中多数对于机械制造业具有普遍推广的价值。七十年代末，我国从英国引进了斯贝 MK202 发动机及其制造技术，同时又有选择地引进了一些先进的机床设备。这项技术在一定程度上比较完整地反映了近代航空发动机制造的先进水平，通过生产实践也证明了这一点。

为了交流的方便，也为了能有更多的人有机会了解这些制造技术，我们整理编写了这套资料，命名为《机械制造实用新技术丛书》。所以这样命名，是因为我们在编写中遵照了下述原则：

1. 实用性。尽量避免一般性的理论叙述，力求使读者能较快的在实践中运用；
2. 先进性。我们只选择了那些更新颖更有意义的资料；
3. 揉合了我们在斯贝发动机试制工作中的实践经验，还综合了不少有价值的参考资料。

作者期望本套丛书对机械工业，特别是航空发动机制造行业的人们有所帮助，这将是对我们最大的鼓舞。

由于我们视界较窄，水平有限，错误缺点难免存在，欢迎读者批评指正。

本丛书由粟祜同志主编。参加审校工作的有：唐宏霞、钟礼治、胡贤惠、谭杰巍、王克强、姜仁忠等同志。

在本丛书编写和出版的过程中，王德荣、黄家豪、郑宝湖、郭治国、姚静梅等高级工程师提供了许多宝贵意见，并参加了审校。还得到了国防科工委、航空工业部有关领导和同志们的大力支持及热情帮助，他们是魏祖冶、陈少中、任家耕和贾克琴、张

汉生等同志。

真空钎焊技术在我国应用较晚，七十年代以来有了较大的发展。随着现代航空、航天和电子工业的发展，以及新材料的不断出现，真空钎焊其特有的优点，必将得到更广泛的应用。作者希望通过本书的出版能够对提高我国真空钎焊的技术水平有所促进。

“真空钎焊”由李培森、任耀文负责编写，其中第一至第四部分由李培森执笔，任耀文修改补充；第五部分由燕泽明执笔，任耀文、李培森修改补充。全书由刘凯金、唐宏霞审校，杨丽丽描图，最后由粟桔终审定稿。在编写过程中陈茂春、刘凯金提供了资料。对本书编写和出版过程中给予支持和帮助的同志，在此表示衷心谢意。

作者于西安
国营红旗机械厂

目 录

绪言	1
一、真空钎焊的基本原理	3
(一) 除金属氧化膜	3
(二) 液态钎料对基体金属的润湿	4
(三) 液态钎料与基体金属间的相互作用	6
二、钎料	11
(一) 银基钎料	11
(二) 铜基钎料	12
(三) 金基钎料	15
(四) 镍基钎料	15
(五) 钎料工艺性能的评定	21
(六) 钎料的选择	24
三、真空钎焊工艺	25
(一) 零件焊前准备	25
(二) 零件的组装与定位	30
(三) 装填钎料	31
(四) 真空钎焊使用的辅助材料	34
(五) 工艺参数的选择	36
(六) 影响真空钎焊质量的几种因素	42
(七) 钎焊质量的验收	43
(八) 钎焊缺陷的预防及消除措施	45
四、真空钎焊实例	50
(一) 铝及铝合金的真空钎焊	50
(二) 不锈钢的真空钎焊	53
(三) 高温合金的真空钎焊	59
(四) 金属与非金属的真空钎焊	62
(五) 真空钎焊在其它方面的应用	63

五、真空钎焊设备	75
(一) 钎焊技术对真空设备的基本要求	75
(二) 国内真空炉现状	76
(三) 典型真空炉简介	81
(四) 真空炉的使用与维护	90
附表	97

绪 言

真空钎焊是在真空气氛中，不用钎剂而进行钎焊的一种方法。最初仅在电子工业中钎焊铜和不锈钢。四十年代后期，随着航空发动机推重比的提高和耗油量的降低，使得航空发动机的涡轮进口温度、流量和增压比都大大提高。为了适应这种发展，相继研制和使用了许多新型高温合金。这些新合金采用氩弧焊容易产生时效应变和热裂纹。使用控制气氛钎焊，表面氧化膜难以除去，钎焊质量较差。真空钎焊满意地解决了这些新型材料的连接问题，并且能够获得优质钎焊接头。因此，在现代航空发动机制造中，真空钎焊已成为一种不可缺少的连接方法。同时也广泛用于宇航、原子能、电子等尖端科学，在化工、石油、医疗器械、工具制造、汽车制造以及其它机械制造工业中也有应用。

在我国，真空钎焊技术应用较晚，但发展迅速。主要用于电子器件、火箭发动机和航空发动机组件的钎焊。同时在其它工业中也有较多应用。真空钎焊技术能够如此迅速地发展和应用，是因为它与其它钎焊方法相比具有下列的优越性：

(1) 适宜于钎焊不锈钢、高温合金，尤其是含铝、钛量较高的耐热合金，能获得优质的钎焊接头。同时还适合于钛、锆、铌、钼、钨和钽等同种难熔合金或异种金属的连接。

(2) 在加热过程中，零件处于真空气氛中，不会出现氧化、增碳、脱碳、污染变质等；零件整体受热，热应力小，可将变形量控制到最小限度。

(3) 基体金属和钎料周围存在的低压能排除金属在钎焊温度下释放出来的挥发性杂质和气体，基体金属本身的性能也获得改善。

(4) 真空钎焊不用钎剂，不会出现气孔、夹渣缺陷；还可

8510199

省掉钎焊后清洗工序，节省时间，改善劳动条件。而且，不用钎剂对铝及其合金来说是非常有利的，因为残留在零件上的钎剂会产生腐蚀。

(5) 可将零件热处理工序与真空钎焊一起进行，也可将钎焊安排为最终工序。

(6) 真空钎焊后的零件表面清洁光亮，易于检查钎缝质量。

(7) 可钎焊多道邻近的钎缝，而且可根据炉子的容量，同炉钎焊多个组件，是一种高效的钎焊方法。

真空钎焊设备一次性投资大，使用消耗费用高，维修较复杂；钎料不宜含易挥发性元素；装配定位要求高，应用受到一定限制。

一 真空钎焊的基本原理

钎焊时金属表面的氧化膜影响液态钎料对基体金属的润湿性。钎焊过程中，如果不能有效地除去基体金属表面的氧化膜，就难以形成优质钎焊接头。不同的钎焊方法采用不同的除氧化膜和防氧化措施。一般钎焊方法都是以钎剂的化学作用或者以还原气氛的还原作用来除氧化膜的。

真空钎焊虽然没有钎剂的化学作用和还原性气氛的还原作用，但是，真空具有降低钎焊区的氧分压，可以除去焊件表面氧化膜，保护焊件不被氧化。这样在真空气氛中钎焊就能够获得高强度、光亮致密的接头。

表10-1 某些金属
氧化物的分解条件

(一) 除金属氧化膜
真空钎焊时去除氧化膜的机理，有如下几个方面：

1. 氧化膜在高温、高真空中可自行分解

真空钎焊时，氧化物的分解压力大于真空系统中的氧的分解压力时，零件表面的氧化物会自动分解。表10-1列出部分氧化物分解需要的真空条件。

表10-1是通过热力学计算得出的各种氧化物分解压力。可以看出，只有少数几种

金属氧化物	1360K时的分解压力 (托)
CuO	3.6
NiO	10^{-5}
CoO	10^{-7}
Fe ₂ O ₃	10^{-9}
MoO ₂	10^{-9}
WO ₂	10^{-10}
Cr ₂ O ₃	10^{-10}
SiO ₂	10^{-13}
MnO	10^{-10}
B ₂ O ₃	10^{-20}
V ₂ O ₃	10^{-20}
TiO ₂	10^{-24}
Al ₂ O ₃	10^{-29}

金属的氧化物在钎焊条件下可以自行分解。大多数金属氧化物不能分解。因此，氧化物自行分解不是真空钎焊时除氧化膜的主要

因素。

2. 金属元素和金属氧化物的挥发破坏了金属表面的氧化膜
表 10-2 是一些金属和金属氧化物的挥发条件。

表 10-2 某些金属和金属氧化物的挥发条件

金属元素	在 10^{-4} 托时的挥发温度(℃)	金属元素	在 10^{-4} 托时的挥发温度(℃)	金属氧化物	在 10^{-5} 托时的挥发温度(℃)	备注
Mn	790	Ni	1257	MnO ₂	600	
Al	808	Co	1362	WO ₂	800	
Cr	992	V	1584	NiO	1070	
Cu	1035	Mo	2093	V ₂ O ₃	1000~1200	
Si	1115	W	2760	Cr ₂ O ₃	1900	
B	1140					
Fe	1194					
Ti	1249					

由表 10-2 可知, 在较高的真空条件下, 某些金属元素的挥发温度并不高。金属氧化物 (MnO₂、WO₂ 等) 的挥发, 可以把这些氧化物除掉。

3. 在钎焊铝及其合金时, 有人认为去除氧化膜的机理是由于 Al₂O₃ 的热膨胀系数只有铝的三分之一, 加热时, 铝及铝合金急剧膨胀, 使得 Al₂O₃ 膜开裂, 液体钎料由裂开处流入氧化膜层下, 把氧化膜揭起并进一步挤碎。

4. 最近有人认为, 对高合金钢而言, 是由于氧化物破裂, 钎料渗入后与碳反应产生二氧化碳; 对铝合金而言, 是由于 Al₂O₃ 与碳作用生成了低价氧化物; 钛合金则是因为表面化合物 (C、N 等) 增厚而破裂。

真空钎焊可以去除铝、钛等氧化膜, 因此提高真空度和钎焊温度, 有利于除去金属氧化膜。

(二) 液态钎料对基体金属的润湿

液态钎料润湿基体金属表面是形成钎焊接头的必要条件。衡量液态钎料对基体金属润湿性的标准是润湿系数。它是液态钎料, 固体金属和钎焊气氛三者之间互相作用的结果。如图 10-1

所示，可通过公式计算：

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{固气}} - \sigma_{\text{固液}}}{\sigma_{\text{液气}}}$$

式中 $\cos\theta$ ——润湿系数；

$\sigma_{\text{固气}}$ ——固体金属与钎焊气氛之间的界面张力；

$\sigma_{\text{固液}}$ ——固体金属与液态钎料之间的界面张力；

$\sigma_{\text{液气}}$ ——液态钎料与钎焊气氛之间的界面张力。

上式中 $\cos\theta$ 值越大，表示润湿性能越好，一般要求 $\cos\theta$ 值不少于0.94（即 $\theta > 20^\circ$ ），提高 $\cos\theta$ 值的措施有：

1. 提高 $\sigma_{\text{固气}}$

在一定的真空度下钎焊某种材料时， $\sigma_{\text{固气}}$ 是一个定值，主要由基体金属的性质来决定。但是，基体金属的表面情况对 $\sigma_{\text{固气}}$ 的影响极大。表面的油污，锈蚀会大大降低 $\sigma_{\text{固气}}$ 值。

因此，真空钎焊前清除零件表面的油、锈等污物，提高 $\sigma_{\text{固气}}$ 值。

2. 减小 $\sigma_{\text{固液}}$

在固体金属和液态钎料界面上，如存在氧化膜，就会妨碍液态钎料与基体金属的接触，削弱它们之间的附着力，使得液态钎料内部原子的内聚力和界面附着力的比值发生变化，使 $\sigma_{\text{固液}}$ 增大，润湿系数减小。因此，保证钎焊时炉内的真空度要求，可以有效地除去金属氧化膜。

3. 降低 $\sigma_{\text{液气}}$

在钎料中加入少量表面活性元素（Li、Si、B等）是降低 $\sigma_{\text{液气}}$ 的有效途径。

真空钎焊时，气相为压力极低的真空气氛，提高真空度能有效地降低 $\sigma_{\text{液气}}$ ，改善钎料的润湿性。

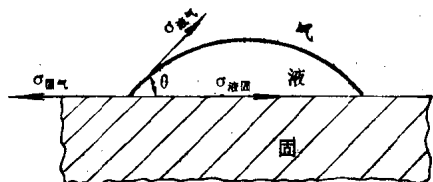


图10-1 液态钎料对固体金属的润湿

4. 提高钎焊温度

提高钎焊温度，使金属的原子活动能力增强，既可降低 $\sigma_{\text{液气}}$ ，又可降低 $\sigma_{\text{固液}}$ 。能提高钎料的润湿性。但是，钎焊温度的选择，首先应考虑对基体金属性能的影响，不能单考虑润湿性能。

(三) 液态钎料与基体金属间的相互作用

液态钎料如果能够润湿基体金属，则在毛细作用下填满接头间隙，形成钎焊接头。此时，能否形成优质的钎焊接头，还要根据液态钎料与基体金属之间的作用来决定。

1. 钎料元素向基体金属的扩散

钎焊时，钎料中合金元素会从高浓度向低浓度扩散，扩散量和扩散速度除与元素的浓度梯度有关外，还与扩散面积和扩散时间成正比。

扩散系数随着温度的升高而增加。扩散的结果，在靠近基体金属的钎缝附近形成固溶体（图 10-2）。这是钎焊时希望得到的钎焊接头组织。

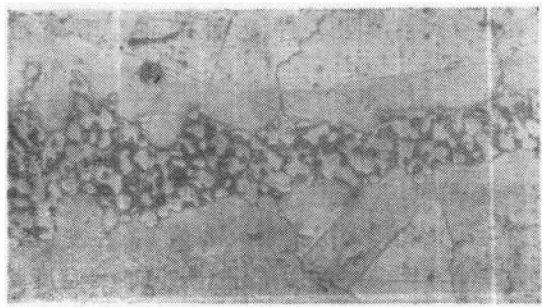


图10-2 NK5钎焊的GH-30试件

×200 1180℃ 5分钟 间隙0.04毫米

当钎料元素能与基体金属形成共晶体时，钎料组元会向基体金属的晶界扩散。其扩散量随着元素在基体中溶解度的减小而增大。钎料元素扩散至基体晶界，形成的低熔共晶体叫做晶间渗入

(图 10-3)。由于它较脆，对接头性能有不良的影响。

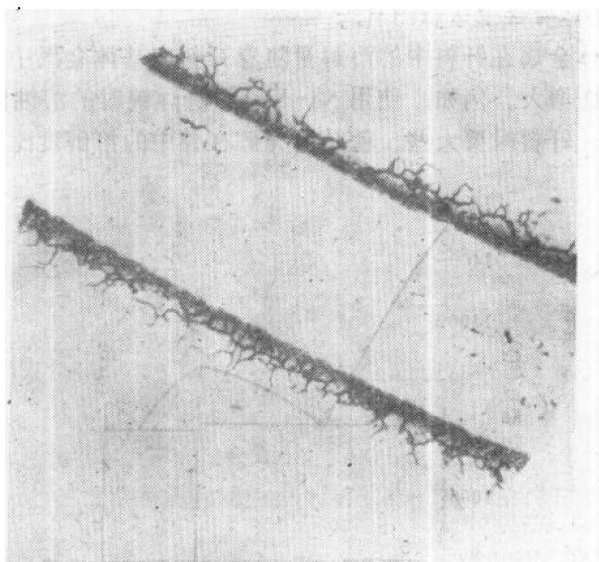


图10-3 NK3钎料钎焊CX-8时，出现的晶间渗入 ×170

2. 基体金属在液态钎料中溶解

如果基体金属和液态钎料是互溶的，在钎焊过程中，一部分基体金属有可能溶解于钎料中。只要溶解量在适当的范围内，对于接头性能是有利的。但溶解量不适当时，则使钎料的熔点提高，从而产生焊不透等缺陷。基体金属如过多地溶解到钎料中，则在基体金属上就会出现凹陷，甚至溶穿的现象。这种缺陷叫做溶蚀，必须避免。

影响基体金属在液态钎料中溶解的因素有：

(1) 钎焊温度

随着钎焊温度的升高，原子的扩散系数增大，一般基体金属向液体钎料的溶解量也增大。

(2) 钎焊保温时间愈长，基体金属的溶解量就愈多。延长保温时间会使钎料充分地扩散至基体内。当溶解度达到饱和后，

基体金属即在钎料中溶解。

(3) 与合金状态图有关

基体金属在钎料中的溶解量随着钎料在基体金属中的溶解度的减小而增大。例如，使用 Ni-B 钎料钎焊镍时的溶蚀倾向比使用 Ni-Si 钎料时要大些。就是因为硼在镍中的溶解度比硅小的缘故。

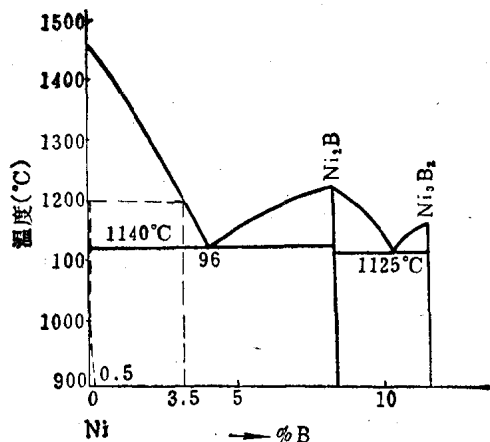


图10-4 Ni-B状态图一角

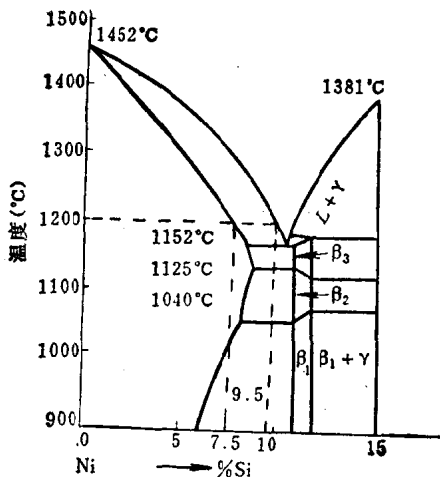


图10-5 Ni-Si状态图一角

故。图 10-4 是 Ni-B 状态图的一角。图 10-5 是 Ni-Si 状态图的一角。可以看出，在 1200°C 时，硼在镍中的溶解度极小，而硅的溶解度可达 7.5%。

3. 钎缝组织

(1) 在合金状态图上，如果基体金属能与钎料形成固溶体，或者基体金属与钎料合金的基体元素相同，则可得到固溶体组织的钎焊缝。这些钎焊接头塑性好，强度高。是理想的钎焊接头组织。

(2) 金属间化合物组织

金属间化合物一般硬而脆，会降低接头的塑性和强度。特别是当化合物形成连续层时，影响更大。因此，应尽量避免钎缝中出现化合物组织。图 10-6 是用 NK3 钎料钎焊 GH-30 时，接头中出现了金属间化合物。由 Ni-B 状态图（图 10-4）可知，当钎料中含硼量高于 4% 时，即可形成 Ni_2B 的金属间化合物。液态钎料结晶时，由于硼元素偏析可能产生金属间化合物。

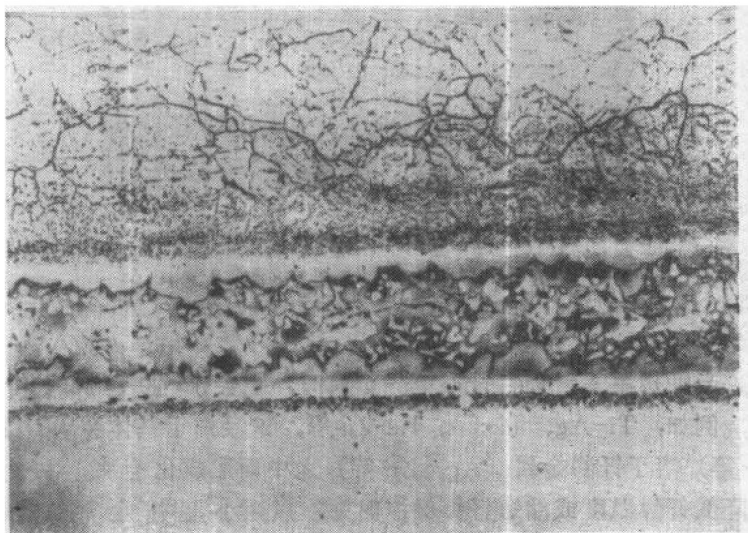


图10-6 NK3钎料钎焊的GH-30接头 $\times 200$ 10^{-4} 托 1080°C 5分钟

显然，如果接头间隙很小，硼、硅等形成化合物的元素就容易扩散到基体金属中，但由于结晶时间较短，就可减小或避免金属间化合物的形成（图 10-7）。当间隙一定时，提高钎焊温度或延长钎焊保温时间，增加硼、硅等元素的扩散量，也可减少或避免形成金属间化合物。

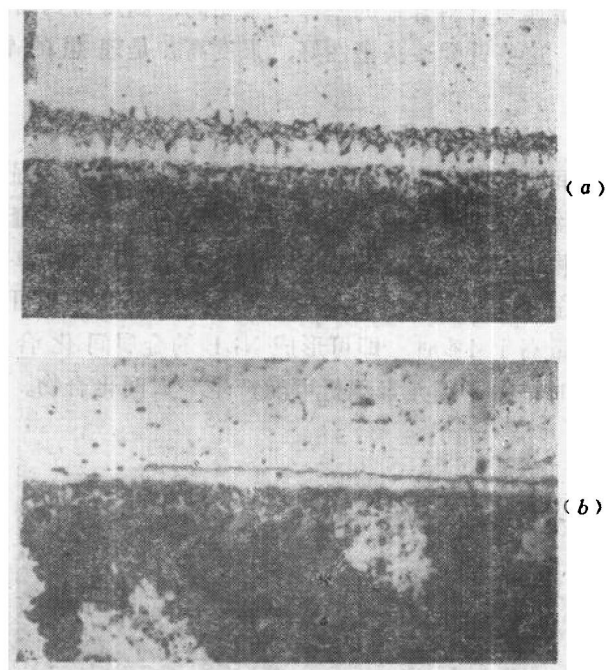


图10-7 接头间隙对金属间化合物的影响

NK5钎焊的叶片及盖板 $\times 25$

(a) 间隙0.18毫米；(b) 间隙 0.076毫米。

当使用单元素钎料钎焊单一金属时，也会产生金属间化合物，例如：Ti-Ag、Ti-Cu、Fe-Zn 等，这是由于基体金属(Ti、Fe 等)溶于钎料金属(Ag、Zn 等)之中而形成化合物。因此，应降低钎焊温度或缩短钎焊保温时间，以减小基体金属的溶解量，从而避免金属间化合物的形成。