



中文版本



朱茂雅克

用于加热的元件的技术

第 21 章

铝外壳耐腐蚀性能

	Pt (铂或铱合金)	Au (金)	Ti (钛)	AlSi316L (牺牲性的)	Ag (银)	Ni (镍)	Ni (镍)	Ni (镍)	NiCu30 (蒙奈尔合金 400)	NiCr15Fe8 (哈氏合金 600)	Cu55Zn23Ni22	Cu (铜)	Al10Sn66Pb34	CuAl34 (黄铜)	Cu88Sn12 (青铜)	Sn (锡)	Pb (铅)	AlCuMg1 (硬铝合金)	软铝-碳钢	AlSi10Mg(铝硅合金)	Al99.5 (铝)	硬铝-硬铝的	AlMg5	ADC12 (铝合金)	Cd (镉)	Fe (铁)	Cr (铬)	AlMgSi0.7 (铝硅镁合金)	Sn75Zn25	Zn (锌)	AlPVD (物理气相沉积)	Mg (镁)
Pt (铂或铱合金)	0	130	250	250	350	430	430	430	430	450	570	600	650	650	770	800	840	940	1000	1065	1090	1095	1100	1100	1100	1105	1200	1200	1350	1400	1400	1500
Au (金)	130	0	110	110	220	300	300	300	300	320	410	470	520	610	670	710	810	870	935	950	955	970	970	970	970	975	1070	1070	1230	1270	1270	1520
Ti (钛)	250	110	0	0	110	180	180	180	200	320	350	400	520	550	590	690	750	815	840	845	850	850	850	850	855	855	950	950	1100	1150	1150	1700
AlSi316L (牺牲性的)	250	110	0	0	110	180	180	180	200	320	350	400	520	550	590	690	750	815	840	845	850	850	850	850	855	855	950	950	1100	1150	1150	1700
Ag (银)	350	220	100	100	0	80	80	80	80	100	220	250	300	420	450	490	590	650	715	740	745	750	750	750	755	850	850	1010	1050	1050	1600	
Ni (镍)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	680	665	670	670	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
NiCu30 (蒙奈尔合金 400)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	680	665	670	670	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
NiCr15Fe8 (哈氏合金 600)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	680	665	670	670	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
Cu55Zn23Ni22	450	320	200	200	100	20	20	20	20	120	150	200	320	350	380	490	550	615	640	645	650	650	650	655	655	750	750	910	950	950	1500	
Cu (铜)	570	440	320	320	220	140	140	140	120	0	30	80	200	230	270	370	430	495	520	525	530	530	530	530	535	630	630	780	830	830	1380	
Al10Sn66Pb34	600	470	350	350	250	170	170	170	150	30	0	50	170	200	210	310	400	465	490	495	500	500	500	505	505	600	600	760	800	800	1350	
CuAl34 (黄铜)	650	520	400	400	300	220	220	220	200	80	50	0	120	150	190	290	350	415	410	445	450	450	450	455	550	550	710	750	750	1300		
Cu88Sn12 (青铜)	770	640	520	520	420	340	340	340	320	200	170	120	0	30	70	170	230	295	320	325	330	330	330	330	335	430	430	590	630	630	1180	
Sn (锡)	800	670	550	550	450	370	370	370	350	230	200	150	30	0	40	140	200	265	290	295	300	300	300	300	305	400	400	560	600	600	1150	
Pb (铅)	840	710	590	590	490	410	410	410	380	270	240	190	70	40	0	100	160	225	250	255	260	260	260	260	265	360	360	520	560	560	1110	
AlCuMg1 (硬铝合金)	940	810	690	690	590	510	510	510	490	370	340	290	170	140	100	0	60	125	150	155	160	160	160	160	165	260	260	420	460	460	1010	
软铝-碳钢	1000	870	750	750	650	570	570	570	550	430	400	350	230	200	150	60	0	65	90	95	100	100	100	105	105	200	200	360	400	400	950	
AlSi10Mg(铝硅合金)	1065	935	815	815	715	635	635	635	615	495	465	415	295	265	225	125	65	0	25	30	35	35	35	40	135	135	295	355	355	885		
Al99.5 (铝)	1090	960	840	840	740	660	660	660	640	520	490	440	320	290	250	150	90	25	0	5	10	10	10	15	110	110	270	310	310	860		
硬铝-硬铝的	1095	965	845	845	745	665	665	665	645	525	495	445	325	295	255	155	95	30	5	0	5	5	5	10	105	105	265	305	305	855		
AlMg5	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	5	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850		
ADC12 (铝合金)	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	5	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850		
Cd (镉)	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	5	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850		
Fe (铁)	1105	975	855	855	755	675	675	675	655	535	505	455	335	305	265	165	105	40	15	10	5	5	5	0	95	95	255	295	295	845		
Cr (铬)	1200	1070	950	950	850	770	770	770	750	630	600	550	430	400	380	260	200	135	110	105	100	100	100	95	0	160	200	200	750			
AlMgSi0.7 (铝硅镁合金)	1200	1070	950	950	850	770	770	770	750	630	600	550	430	400	380	260	200	135	110	105	100	100	100	95	0	160	200	200	750			
Sn75Zn25	1350	1230	1110	1110	1010	930	930	930	910	790	760	710	590	560	520	420	360	295	270	265	260	260	260	225	160	160	0	40	40	590		
Zn (锌)	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550		
ZnAl4 (扎马克合金)	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550		
AlPVD (物理气相沉积)	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550		
Mg (镁)	1900	1820	1700	1700	1600	1600	1600	1600	1600	1520	1500	1390	1300	1180	1150	1110	1010	950	885	860	850	850	850	850	845	845	845	550	560	560	0	

0-300 mV	301-500 mV	501-800 mV	> 800 mV
----------	------------	------------	----------

铝外壳耐腐蚀性能

耐腐蚀

铝外壳的户外使用

提及塑料外壳及其耐气候性。在此，我们将处理铝外壳及附件的耐腐蚀性。使用在外壳中的铝有两个级别：ADC12 箱用于交流电流，而 44,300 用于防火外壳。这两个等级具有良好的内部和外部耐腐蚀性能。

化学成份

材料及标准	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Ni	Sn	Ti	Al
EN AC 44300 DIN 1706 AlSi12(Fe)	10.5- 13.5	<0.10	-	<0.15	<0.55	<1	-	-	<0.15	剩余部分
ADC12 (JIS H5302:2000)	9.6- 12.0	1.5-3.5	<0.3	<1.0	<0.5	0.6-0.9	<0.5	<0.2	-	剩余部分

电化腐蚀，同样也称为双金属腐蚀

保护外壳属于一种特殊的情况，因为那会降低其寿命，取决于外壳的穿孔或闭合螺丝的完全锁定。这是电化腐蚀。

虽然大多数的标准规定，必须采取适当的防护措施，以避免电化腐蚀铝盒，然而均没有建议任何的解决方案或利用材料或精确的合金成份。

电化（双金属的）腐蚀是不同的金属在与电解液（例如水、海水）接触的情况下发生的一种电化学反应。这可能会导致与其他现象和分解的金属发生额外的腐蚀，其进展速度通常会更快。

根据两种金属及溶液，电位的差异会出现在两种金属之间。两种金属或两种不同的金属与同样的介质接触，通常会产生两种不同的电位。如果这两种金属连接电，它们的电位差会产生电化学反应，并形成电流。

最负极的金属（最不贵重的）是正极化的，而最正的金属是偏向负极的。在绝大多数的情况下，这样的组合会增加（最多和最负极）可侵蚀金属的腐蚀率，而且会减少最少的可腐蚀金属（最正极）的腐蚀率。

电化腐蚀外观的必需条件

当评估电化腐蚀的可能性时，电化腐蚀是需要仔细评估几种不同的因素。

双金属的腐蚀，需同时满足以下的条件：

- 电解质桥接两个金属件；
- 两金属之间的电气接触；
- 金属之间的电位差能产生一个显著的流体的电流；
- 在两种最优质的金属上持续的阴极反应；

注意：如果金属是干的，不会发生双金属（电偶）腐蚀。

电解质

电解质的导电性也将影响到攻击的程度。

当电解质的电导率低，腐蚀局限于两种金属之间的接触区。

当导电性的电解质增加，被腐蚀的表面也会加大。

金属之间的电气接触

如果是在两种金属之间通过干预绝缘体（如氧化铝、磷化、涂料、油等等）来防止电气接触的，电流不会流动并且没有腐蚀。

金属之间的电位差

该值越高，该现象的电动势就越大。数以百计的毫伏差很可能是电化腐蚀，但是 200-300mV 的差别不一定是有问题。

铝外壳耐腐蚀性能

在表中列出的各种金属和合金电化腐蚀电位给出了金属电位数值并通常参照甘汞电极标准 (S.C.E) 进行测量的。

“阳极的”金属如镁、锌和铝，比“阴极”的金属（钛、银、金）更容易腐蚀。

腐蚀是两种金属之间的电位差成比例量的。

这些数值被认为是金属和合金的电位，令提及的介质连接在一起。这些电位是试验值，必须要与热力学表中的标准电位值分开。实验的电位受如温度、搅拌和通风等参数的影响很大。此外，在它们是正还是负极的基础上（例如不锈钢与海水接触），在相同的环境条件下，一些金属会产生两个不同的电位。

这些考虑表明，没有所需的试验的情况下，是难以预测其趋势，因为许多参数很可能扭转一些电偶的极性。

加重或减少的因素

两种金属的面积比：最坏的情况是当一个大的阴极表面（最阳性的材料）被电连接到一个小的阳极表面（最负性的金属）时，最负极的金属腐蚀速率可以是 100 或 1000 倍。

例如，把碟形温控器的铝的杯状件（直径 16mm）组装到不锈钢罐体时，如果满足必需的接合条件，将会导致这杯状件的快速腐蚀。

另一方面，如果接触表面减少，用不锈钢螺丝锁紧的铝盒，将会减少腐蚀。

优质金属的耐腐蚀性

- 不管它的电位，最优质金属的耐腐蚀性能显著地影响着双金属接合的动作。如果最优质的金属被腐蚀，其腐蚀产品也许是通过运动，使大部分正侵蚀的金属加速腐蚀。例如，铜，已被认为是一种优质的金属，其带铝的电偶是小的，产生的氧化物能腐蚀铝，在设计适用于铜导体的铝外壳的接地端子时这是极其重要的参数。

如果优质金属没被腐蚀（黄金、白金），即使金属将会结合但它将不存在电偶腐蚀的风险。

保护性金属涂层

通过在阴极涂抹带有一个类似的电位或接近阳极部件的位置涂保护性涂层，电化腐蚀会减少。

主要的设计规则：

- 舍弃的元素该是在阳极面并较小的。
- 注意小心使用具有完整涂层的紧固件。

示例：

- 在钢紧固的支撑 2024-T4 铝板上镀镉，将舍弃镉来代替腐蚀铝。（电位差是 100 至 200mV）

- 在钢紧固件上镀锌，将会舍弃锌来代替腐蚀铝。（电位差是 100 至 200mV）。

不要在钢紧固件上镀镍，因为在镍和铝之间的电位差太大 (450mV)，并会腐蚀铝。

注：目前的趋势是寻找取代镉的方案，因为其毒性大，而且被欧洲的 RoHS 指令所禁止。

一些双金属电化学结合的特殊情况

与镀锌钢和不锈钢接触会有腐蚀的风险

镀锌钢与不锈钢接触一般不认为是一个严重的腐蚀风险，除非是在很

铝外壳耐腐蚀性能

恶劣的环境中（海事类）。

在这些情况下，如绝缘隔板的预防措施，通常认为在大多数实际情况下是足以避免双金属腐蚀的。

不锈钢和铝之间的电化腐蚀

不锈钢的腐蚀电位是“负极的”，位于“优质的”区域。铝的腐蚀电位是“阳极的”并位于“非优质”区域，具有较大的电位差。

这意味着当放置在与铝接触而铝将会腐蚀的情况下，不锈钢不会电化腐蚀。

虽然相对不锈钢来说，铝是阳极的，但根据当地的条件，铝的表面面积相对不锈钢是大的，并且是可以接受的。在铝板或铝片上的不锈钢紧固件通常被认为是安全的，然而用铝铆钉或螺栓支撑不锈钢配件在一起是一个不明智的组合，有实际的腐蚀风险。

即使在金属之间没有绝缘，在大陆性气候的条件下，也有少许的腐蚀风险。

相比之下，在海洋环境中，已经可以观察到铝梯面上有严重的局部麻点腐蚀，那里是未绝缘的不锈钢螺栓用于固定梯面的位置。

然后在同一个梯子上，与有完好的绝缘垫圈一起的螺栓，在周围的铝上没有展示出任何的蚀损斑。

减少铝和不锈钢之间的电化腐蚀的机械方法

- 通过用电绝缘材料如塑料，来隔离两种材料，无论在什么地方都是实用的。

- 相对地避免次质金属（铝）的小面积和更优质金属（不锈钢）的大面积。

- 同样的金属或稀有金属（阴极，表中较大的号码）将应使用小紧固件和螺栓。

- 避免在不锈钢中有裂缝：由于缝隙内氧气耗尽，在不锈钢裂缝面前测绘到较少的优质电位。因此，将一个相对大的铝面积与一个带有小面积裂缝的不锈钢配件耦合在一起时，也许会导致快速攻击在裂缝内的材料而导致不锈钢腐蚀。

- 例如通过用涂层，从周围的双金属连接中排除电解质。在两种金属中尽可能多地涂料：如果是没用的，涂最优质的金属。

- 密封：确保搭接面是防水的。

- 在螺丝头下采用抗腐蚀剂或化合物，或螺栓插入到异金属表面，不管紧固件之前是否已经电镀或已做其他处理。

- 在某些情况下，它可能在组装之前在搭接面应用一个有机涂层。这会应用在不要求电传导的接合处。

- 在实用的或不影响建议使用的装配中，应在接合处的外部涂上一层有效的涂层。

- 避免螺纹的接合，以让材料远离电位序。

铝对电耦合的限制及带化学转化表面处理的不锈钢保护

钢和不锈钢磷化膜

磷化膜是一种转化处理，用于形成膜层以获得一个带选择介质的基质反应。它特别适用于碳钢和不锈钢。就钢件来说，磷化膜主要是用来提高涂料的粘附性。

我们区分薄层磷酸盐（0.2-0.8 克 / 平方米），主要由磷酸铁、含磷酸锌的平均厚度（1.5-4 克 / 平方米）的磷酸盐层和重磷酸盐层（7-30 克 / 平方米）组成。

后者，由铁、锌和磷酸锰组成，即使在缺乏涂料时也可以用作防腐层。

至于铝不锈钢组件，建议在钢件上使用厚的及中等厚度的磷化膜。

铝外壳耐腐蚀性能

但是，理想的是通过磷化膜处理两种结构，因铝和钢的程序不同，因此是分开的。

磷酸铝涂层

由于这种金属与钢在汽车行业的结合使用，铝磷化表面处理占了一个重要的位置。金属浸入在磷酸的溶液中，它会腐蚀。

在攻击铝时，氢被释放，导致 pH 值局部增加，从而沉积略溶的三磷酸盐。其他的离子可被增加到容器里，锌，同样还有锰和镍。取得的膜层，不像磷酸铬膜层那样非结晶的，形成磷酸锌小结晶体（锰镍）。这些晶体的产生是通过把金属浸入到胶质的磷酸钛溶液中促成的。

阳极化铝

阳极电镀包括通过阳极化加强自然氧化膜。厚的阳极化提供了一个良好的动电绝缘。

通过用非金属材料接合金属

适合于金属的接合，非金属材料必须是：

- 无腐蚀剂（盐）；
- 无酸或碱的材料（中性 pH 值）；
- 无碳或金属颗粒；
- 不得受到生物腐蚀；
- 不得有助真菌生长；
- 不得吸收或吸附水；

不要使用：当接合时，非金属材料将会引发金属腐蚀，例如有纤维质的增强型的塑料、碳或金属载荷树脂材料、石棉水泥复合材料。

在铝合金之间的电化连接

（黄色或蓝色突出标示的名称），以及其他的基础金属，在 2% 的盐溶液中。

当电耦合数值低于 300mV 时，外观没有显著的腐蚀。

	P(铂或铱合金)	Au(金)	Ti(钛)	AlSi316L(惰性的)	Ag(银)	Ni(镍)	NiCu30(蒙奈尔合金 400)	AlNiCo(镍铁合金 600)	Cu55Zn23Ni22	Cu	Al10Sn06P34	CuAu34(黄铜)	Cu88Sn12(青铜)	Sn	Pb	AlCuMg1(硬铝合金)	软铜/碳钢	AlSi10Mg(铝硅合金)	Al99.5(铝)	硬铜/硬铝	AlMg5	ADC12(铝合金)	Cd	Fe(铁)	Cr	AlMgSi0.7(铝镁硅合金)	Sn75Zn25	Zn	AlPVD(物理气相沉积)	Mg
Pt(铂或铱合金)	0	130	250	350	430	430	430	430	450	570	600	650	770	800	840	940	1000	1065	1090	1095	1100	1100	1100	1105	1200	1200	1350	1400	1400	1900
Au(金)	130	0	110	110	220	300	300	300	320	410	470	520	610	670	710	810	870	935	960	965	970	970	970	975	1070	1070	1230	1270	1820	
Ti(钛)	250	110	0	0	110	180	180	180	200	320	350	400	520	550	590	690	750	815	840	845	850	850	855	950	950	1100	1150	1150	1700	
AlSi316L(惰性的)	250	110	0	0	110	180	180	180	200	320	350	400	520	550	590	690	750	815	840	845	850	850	855	950	950	1100	1150	1150	1700	
Ag(银)	350	220	100	100	0	80	80	80	100	220	250	300	420	450	490	590	650	715	740	745	750	750	750	755	850	850	1010	1050	1600	
Ni(镍)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	660	665	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
NiCu30(蒙奈尔合金 400)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	660	665	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
NiCr15Fe8(哈镍合金 600)	430	300	180	180	80	0	0	0	20	110	170	220	340	370	410	510	570	635	660	665	670	670	675	770	770	930	970	970	1520	
Cu55Zn23Ni22	450	320	200	200	100	20	20	20	0	120	150	200	320	350	380	490	550	615	640	645	650	650	650	655	750	750	910	950	950	1500
Cu	570	440	320	320	220	140	140	140	120	0	30	80	200	230	270	370	430	495	520	525	530	530	530	535	630	630	780	830	1380	
Al10Sn06Pb34	600	470	350	350	250	170	170	170	150	30	50	170	200	210	310	310	400	465	490	495	500	500	500	505	600	600	760	800	830	1350
CuAu34(黄铜)	650	520	400	400	300	220	220	220	200	80	50	120	150	190	290	350	415	410	445	450	450	450	455	550	550	710	750	750	1300	
Cu88Sn12(青铜)	770	640	520	520	420	340	340	340	320	200	170	120	0	30	70	170	230	295	320	325	330	330	330	335	430	430	590	630	630	1180
Sn	800	670	550	550	450	370	370	370	350	230	200	150	30	0	40	140	200	265	290	295	300	300	300	305	400	400	560	600	600	1150
Pb	840	710	590	590	490	410	410	410	380	270	240	190	70	40	0	100	160	225	250	255	260	260	260	265	360	360	520	560	560	1110
AlCuMg1(硬铝合金)	940	810	690	690	590	510	510	510	490	370	340	290	170	140	100	0	60	125	150	155	160	160	160	165	260	260	420	460	460	950
软铜/碳钢	1000	870	750	750	650	570	570	570	550	430	400	350	230	200	150	60	0	65	90	95	100	100	100	105	200	200	360	400	400	850
AlSi10Mg(铝硅合金)	1065	935	815	815	715	635	635	635	615	495	465	415	295	265	225	125	65	0	25	30	35	35	35	40	135	135	295	355	355	885
Al99.5(铝)	1090	960	840	840	740	660	660	660	640	520	490	440	320	290	250	150	90	25	0	5	10	10	10	15	110	110	270	310	310	860
硬铜/硬铝	1095	965	845	845	745	665	665	665	645	525	495	445	325	295	255	155	95	30	5	0	5	5	5	10	105	105	265	305	305	855
AlMg5	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	0	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850
ADC12(铝合金)	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	0	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850
Cd	1100	970	850	850	750	670	670	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	0	0	0	0	5	100	100	260	300	300	850
Fe	1105	975	855	855	755	675	675	675	655	535	505	455	335	305	265	165	105	40	15	10	5	5	5	0	95	95	255	295	295	845
Cr	1200	1070	950	950	850	770	770	770	750	630	600	550	430	400	380	260	200	135	110	105	100	100	100	100	95	0	160	200	200	750
AlMgSi0.7(铝镁硅合金)	1200	1070	950	950	850	770	770	770	750	630	600	550	430	400	380	260	200	135	110	105	100	100	100	95	0	160	200	200	750	
Sn75Zn25	1350	1230	1110	1110	1010	930	930	930	910	790	760	710	590	560	520	420	360	295	270	265	260	260	260	225	160	160	0	40	40	590
Zn	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550
ZnAl4(铝/马氏体基压铸合金)	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550
AlPVD(物理气相沉积)	1400	1270	1150	1150	1050	970	970	970	950	830	800	750	630	600	560	460	400	335	310	305	300	300	300	295	200	200	40	0	0	550
Mg	1800	1820	1700	1700	1600	1600	1600	1600	1520	1500	1390	1300	1180	1150	1110	1010	950	885	860	850	850	850	850	845	845	845	590	560	560	0



铝外壳耐腐蚀性能

使用铝合金的其他限制

为了避免由于撞击或摩擦引燃的危险，防爆设备标准（IEC 60079-0）限制使用铝。

外壳 I 组：

铝 + 镁 + 钛的总重量应不超过 15% 的总重量（或镁 + 钛合金的总重量的 6%，不含铝），其将消除，该组大部分合金含铝。

第二组的外壳：

关于区域 0：铝 + 镁 + 钛 + 锆的总重量应不超过总重量的 10%（或镁 + 钛 + 锆合金不含有铝的总重量的 7.5%），将消除，此组及此区域大多数的合金含铝。

区域 1：镁的重量应不超过总重量的 7.5%。

区域 2：没有详述。