

高频电路材料之铜箔概述

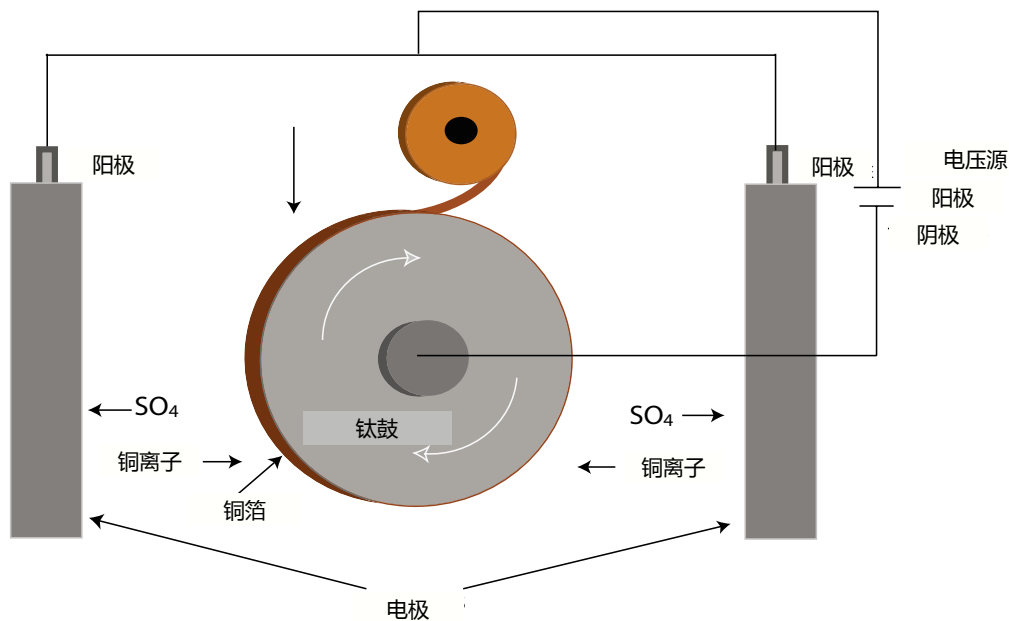
大多数罗杰斯的高频电路基板都要用到铜箔，在高可靠性的应用中，选择恰当的铜箔可以为电路提供最佳性能。

铜箔有多种不同的类型，比如存在重量（厚度）的差异，以及不同铜箔之间的特性也各不相同。了解它们之间的差异，可以帮助工程师在不同的应用环境下，选择正确的铜箔类型。

铜箔制造工艺

标准电解铜箔

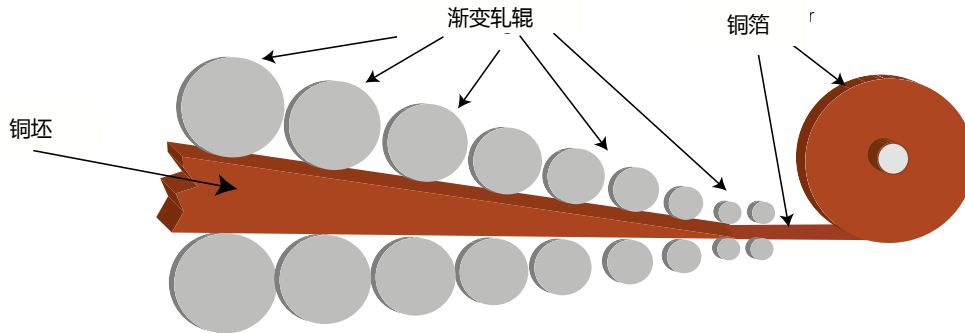
在电解铜箔的制造工艺中，铜箔是从含铜离子化学溶液中沉积到旋转的钛鼓上形成的。钛鼓与直流电压源相连，其中电源阴极连接到钛鼓上，阳极浸没在铜电解质溶液中。当施加电压时，钛鼓以非常慢的速度旋转，铜溶液里面的铜离子在电流的牵引下就会慢慢地沉积到钛鼓的阴极表面。钛鼓的内侧铜表面是较光滑的，而另一侧的铜表面相对而言较粗糙。钛鼓转动速度越慢，沉积的铜就会越厚，反之亦然。铜箔的光滑面和粗糙面在经过不同的处理流程后，就可以适用于印刷电路板的制作了。铜箔经过工艺处理后，可以增强铜与介质材料之间的结合力。另一个优点是，可以减缓铜的氧化来起到抗变色的作用。



图：电解铜制造工艺示意图

压延铜箔

压延铜箔是通过连续冷轧操作制成的。从纯铜坯料开始不断碾轧缩减厚度并延长长度。其表面的光滑程度取决于轧机的状态。



图：压延铜制造工艺示意图

电阻铜箔

在电解铜箔的粗糙面涂覆金属或合金，起到电阻层的作用。接下来就可以用镍颗粒粗化电阻层。

反转铜箔和LoPro铜箔

反转铜箔是将电解铜箔的光滑面进行处理。其过程是在光滑表面进行一层薄处理，将光滑表面变粗糙。目的是提高铜箔与电介质之间的结合力，并且增加铜箔的耐腐蚀性。在与介质材料结合压合成层压板时，经过处理的铜箔表面将被层压到电介质材料上。处理以后的铜面仍会比较光滑，而粗糙面仍旧非常粗糙。这是相对于标准电解铜的一个优势，在电路加工压干膜前之前，外层的粗糙面不需要再做其它任何机械或化学方面的处理。因为它本身的粗糙度已经足以保证干膜的附着力。

对于LoPro™铜箔，就是在反转铜箔的处理面增加了一层薄薄的粘合剂，形成了一个粘合性增强的物理层。与反转铜箔一样，经过粘合剂处理的面将与介电层相压合，可以获得更好的结合力。罗杰斯的RO4000系列材料就是采用LoPro铜箔的线路层压板。

晶体结构

电解铜的晶体颗粒在铜箔的Z轴上纵向生长。通常，电解铜箔的截面容易看到具有尖桩栅栏的外观，并具有垂直于铜箔平面的长晶体边界。压延铜的铜晶体结构在由铜块碾轧操作过程中被破坏了。它们的晶体结构比电解铜晶体小，具有不规则的球形形状，并且几乎平行于铜箔表面。

铜箔粗糙度测量

铜箔表面的粗糙度可以通过机械的或光学的方法来测量。许多文献中都提到“Rz”（峰谷）值，这是因为它通过机械方式的测量仪来测量得到。然而，根据我们的经验，通过非接触式白光干涉测量法测量到的铜箔表面的Sq（RMS）粗糙度与实际的导体损耗更一致。图1显示了使用非接触式白光干涉仪测量的罗杰斯PTFE和TMM层压板上使用的0.5oz电解铜箔的表面特征。表1显示了罗杰斯层压材料上使用的铜箔类型以及典型的粗糙度信息。最新的一项研究（参考文献7）表明，“上表面”粗糙度与介质面具具有完全不同的结构，它对传输线导体损耗几乎没有影响。

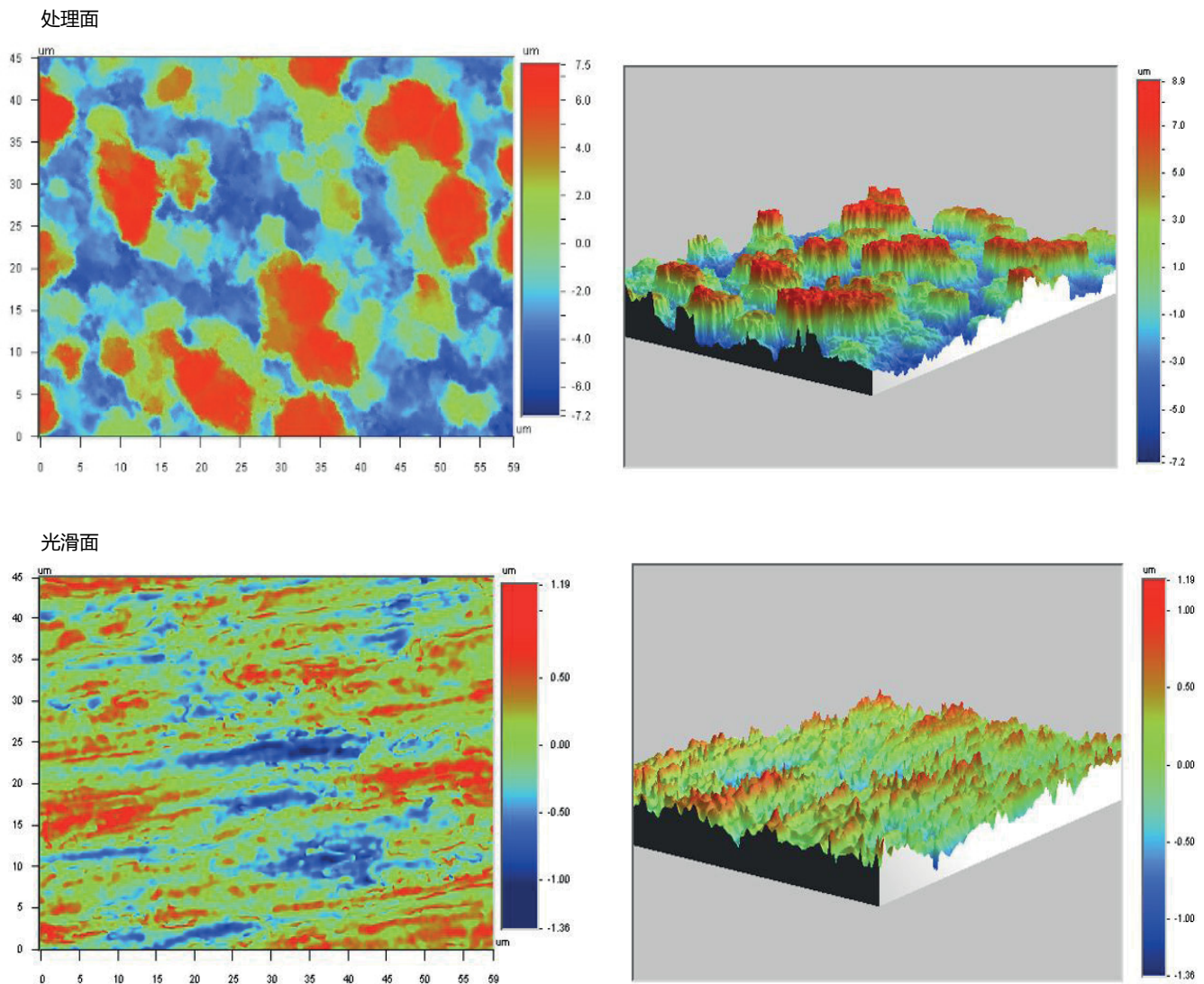


图1. 白光干涉测量得到的0.5oz电解铜箔的表面形态示意图

如表1所示，是使用光学测量仪测得不同厚度的电解铜箔和压延铜箔的粗糙度数据。表中还提到了罗杰斯公司的哪种层压板使用了哪种的铜箔类型。可以看到，压延铜是最光滑的铜箔。

铜箔类型	重量或厚度	表面粗糙度 ^[1] Sq(μm)		产品型号
		介质面	上表面	
压延铜箔	1 oz (35 μm)	0.4	0.3	XtremeSpeed™ RO1200™, RO3003™, RO3035™, RT/duroid® 5870, 5880, 6002, 6202, CLTE™, CLTE-AT™, CLTE-XT™, CLTE-MW™, CuClad® 217, CuClad 233, CuClad 250, DiClad® 527, DiClad® 870, DiClad® 880, IsoClad® 917, IsoClad 933
	½ oz. (18 μm)	0.4	0.3	
电解铜箔	2 oz (70 μm)	1.6	0.4	TC350™, TC600™, AD250™, AD255™, AD300™, AD350™
	1 oz (35 μm)	1.5	0.4	
	½ oz. (18 μm)	1.6	0.4	
	2 oz (70 μm)	3.0	0.4	CuClad 217, CuClad 233, CuClad 250, DiClad 527, DiClad 870, DiClad 880, IsoClad 917, IsoClad 933, CuClad, CLTE, CLTE-AT, CLTE-XT, CLTE-MW, AD1000™
	1 oz (35 μm)	1.7	0.4	
	½ oz. (18 μm)	1.5	0.4	
	1 oz (35 μm)	2.4	0.4	RO3003, RO3006, RO3010, RO3035, RO3210, RT/duroid 5870, 5880, 5880LZ, 6002, 6035HTC (not available with 1/4 oz cu), 6202, 6006, 6010.2LM, TMM® 3,4, 6,10, 10i, 13i
	½ oz. (18 μm)	2.0	0.4	
	¼ oz. (9 μm)	1.3	0.4	
	4 oz (140 μm)	3.0	0.4	92ML™, 92ML StaCool
	3 oz (105 μm)	3.2	0.4	
	2 oz (70 μm)	3.5	0.4	Kappa™ 438, RO4003C™, RO4350B™, RO4360G2™, RO4533™, RO4534™, RO4535™, RO4730G3™ (1/2 oz & 1 oz only), RO4835™, 92ML, 92ML StaCool, CU4000™
	1 oz (35 μm)	3.2	0.4	
	½ oz. (18 μm)	2.8	0.4	
	1 oz (35 μm)	0.5	0.4	XtremeSpeed RO1200, AD300D™-IM™, AD255C™-IM, DiClad 880-IM
	½ oz. (18 μm)	0.5	0.4	XtremeSpeed RO1200
	2 oz (70 μm)	-	0.4	RO4835T™ RO3003G2™ (1/2 oz & 1 oz only)
	1 oz (35 μm)	-	0.4	
	½ oz. (18 μm)	0.7	0.4	
反转处理的低粗糙度 电解铜箔	2 oz (70 μm)	1.0	2.0	DiClad 527, DiClad 870, DiClad 880, IsoClad 917, IsoClad 933, CuClad 217, CuClad 233, CuClad 250, CLTE, CLTE-AT, CLTE-XT, CLTE-MW, AD1000, XtremeSpeed RO1200 (2 oz. only)
	1 oz (35 μm)	1.0	1.3	
	½ oz. (18 μm)	1.0	0.8	
	2 oz (70 μm)	1.0	1.8	AD250, AD255, AD300, AD350, RT/duroid 6002, 6006, 6010.2LM, 6202, 6002PR, 6202PR, TC350, TC350 Plus, TC600
	1 oz (35 μm)	1.0	1.5	
	½ oz. (18 μm)	1.0	1.0	
Lopro®铜箔	1 oz (35 μm)	0.9	1.3	RO4003C, RO4350B, RO4533, RO4534, RO4535, RO4725JXR™, RO4730JXR™, RO4730G3™, RO4830™, RO4835, CU4000 LoPro
	½ oz. (18 μm)	0.9	0.8	
电阻铜箔	NiCr Ticer TCR® ½ oz. (18 μm)	1.4	0.4	RO4003C, RO4350B, RO4360G2, RO4835
	OhmegaPly® ½ oz. (18 μm)	1.7	0.4	RO4003C
	OhmegaPly ½ oz. (18 μm)	1.2	0.4	CuClad 217, CuClad 233, CuClad 250, CLTE, CLTE-XT, DiClad 527, DiClad 870, DiClad 880, IsoClad 917, IsoClad 933, RO3003, RO3006, RO3010, RO3035, RO3210, RT/duroid 5870, 5880, 6002, 6202, 6006, 6010.2LM

表1：典型均方根粗糙度值

层压板的电性能

在波导中，导体的表面粗糙度对导体损耗有着显著的影响，这一点在微波工程的早期就已经被人们所熟知。1949年，S.P.Morgan（参考文献1）发表的数值模拟结果表明导体表面粗糙度可导致导体损耗成倍增加。Hammerstad和Jensen（参考文献2）将Morgan的模型和数据与微带设计方法结合起来。H&J的模型成为计算表面粗糙度对导体损耗影响的“教科书”（参考文献3）式的方法。随着使用更高频率和更薄层压板，研究发现H&J模型明显低估了表面粗糙度对导体损耗的影响（参考文献5，6）。“Hall-Huray”模型（参考文献4）是从“第一原则”分析发展而来，最近已经被商业仿真设计软件采用。

根据我们的经验，通过适当调整输入参数，“Hall-Huray”模型可以更准确预测不同层压板厚度和频率范围内的导体损耗。“Hall-Huray”模型已被纳入罗杰斯公司的阻抗和损耗计算器软件（MWI）中。我们目前正致力于开发最好的“Hall-Huray”输入参数来模拟罗杰斯的层压板性能。请在线查看罗杰斯官网的支持中心或联系您所在地区的罗杰斯销售工程师来获取最新信息。

罗杰斯对铜箔的研究（参考文献5,6,7）还表明，铜箔粗糙度会影响传播常数，比较粗糙的铜箔表面会导致有效介电常数明显增加。图3显示了在4 mil液晶聚合物层压板（LCP）上，分别使用Sq值在0.4um到2.8um的铜箔，其50 欧姆传输线的介电常数情况。可以看到具有最大粗糙度铜箔的电路的Dk增加近10%。在“Hall-Huray”模型中没有考虑到铜箔粗糙程度对相位响应的影响。

铜箔表面粗糙度对插入损耗的影响非常明显（如图2）。在90 GHz下，由4mil厚的液晶聚合物（LCP）层压板、压延铜箔（蓝线）制成的50 欧姆传输线的插入损耗为2.2 dB/inch，该性能几乎与完全光滑的铜箔导体的模型完全相同。在相同的基板上采用标准电解铜箔，其Sq值为2.0um，插入损耗增大为3.7 dB /inch。图4显示了图2中所示数据的导体的铜箔表面粗糙度的形态。

微带线差分长度法，使用0.5oz铜箔的4mil LCP层压板的插入损耗

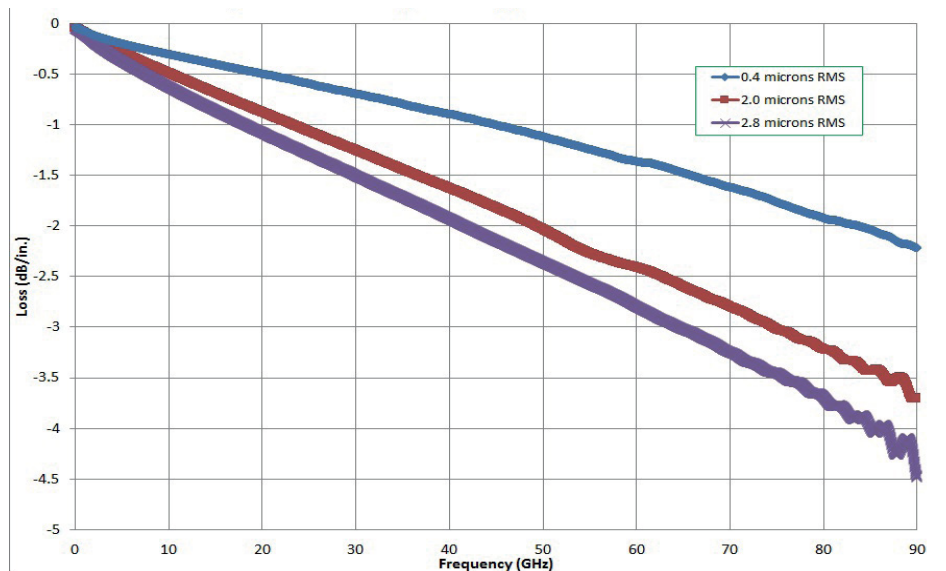


图2.不同铜箔粗糙度对微带线插入损耗的影响比较

微带线差分长度法，Dk随频率的变化
(使用4mil LCP，0.5oz铜箔的层压板)

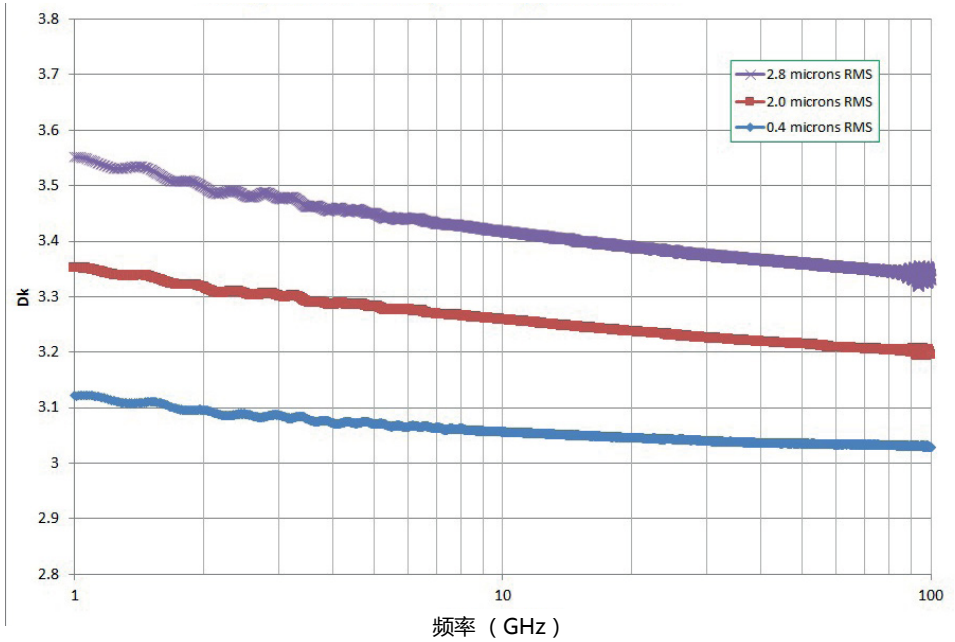


图3. 不同铜箔粗糙度对微带线介电常数的影响比较

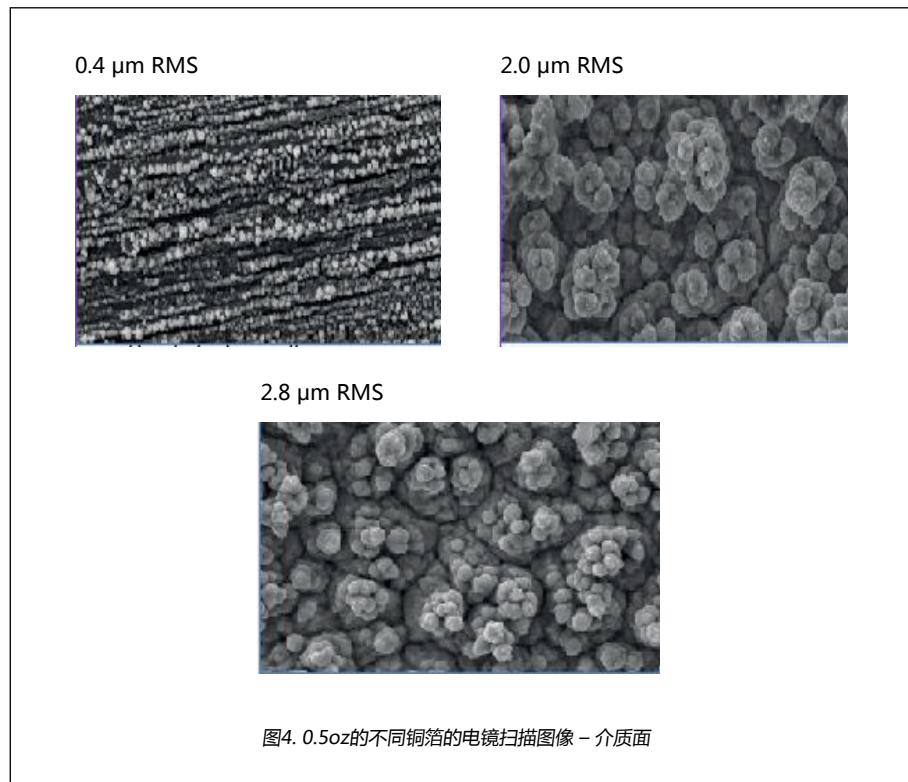


图4. 0.5oz的不同铜箔的电镜扫描图像 - 介质面

层压板的机械性能

A. 抗热冲击性

在某些快速热循环的极端条件下，电解铜箔在较窄的导体中可能出现热应力裂纹。但在同样的条件下，压延铜的抗裂性会有显著的提高。虽然电解铜箔有更大的拉伸强度和延展性，但压延铜箔在达到永久变形前具有更好的弹性延展性。

B. 铜箔结合力

由于树脂与金属的粘合主要是靠机械粘合，因此层压板的铜箔结合力大小与处理过的铜箔表面粗糙度直接相关。

C. 带状线结构的粘合（聚四氟乙烯基板）

SEM照片显示了不同铜箔类型和铜箔蚀刻后的介质表面之间的形貌和粗糙度的差异。如果电路板是粘接的，则对于电解铜箔而言，无需对电介质表面进行钠或等离子处理，但前提是要注意保护好表面。然而，对于压延铜电路板，由于其较小的铜箔表面粗糙度将导致比较差的机械结合力，因此表面处理对于可靠的粘接组装是必要的。

附录

两种不同类型铜箔的不同制造方法导致了电气和机械性能的差异。表2中列出了其主要差异。

属性	电解铜箔				压延铜箔		
	¼ oz (8 µm)	½ oz (18 µm)	1 oz (35 µm)	2 oz (70 µm)	½ oz (18 µm)	1 oz (35 µm)	2 oz (70 µm)
拉伸强度 (kpsi)	15	33	40	40	20	22	28
延展率 (%)	2	2	3	3	8	13	27
体积电阻率 (Mohm•cm)		1.66	1.62	1.62	1.78	1.74	1.74

表2.典型的铜箔特性

*值表示与PTFE层压板相压合后的性能。

罗杰斯关于电阻铜箔外观和电阻率预期的声明

罗杰斯先进互联解决方案事业部（ACS）根据客户要求，可生产提供特定数量的电阻箔的覆铜板，这些电阻箔是采用减法处理的商用电阻铜箔。电阻铜箔技术使可以在提供的层压板加工的电路中直接得到所需的平面电阻。电阻铜箔因ACS提供的不同覆铜层压板产品而异。然而，ACS通常使用Ohmagply®电阻箔（来自Ohmag Technologies, Inc. <http://ohmag.com>）和TCR®电阻箔（来自Ticer Technologies, <http://www.ticer technologies.com>）。ACS鼓励客户在向罗杰斯下订单之前，研究可用的特定电阻箔产品以及每个供应商的性能和加工细节。

参考文献

1. S.P. Morgan, "Effect of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies," J. Applied Physics, p. 352, v. 20, 1949
2. E. Hammerstad and O. Jensen, "Accurate models of computer aided microstrip design," IEEE MTT-S Symposium Digest, p. 407, May 1980
3. D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd Edition, Wiley (1998)
4. P.G. Huray, O. Oluwafemi, J. Loyer, E. Bogatin, and X. Ye, "Impact of Copper Surface Texture on Loss: A model that works," DesignCon2010
5. A.F. Horn III, J. W. Reynolds, P. A. LaFrance, J. C. Rautio, "Effect of conductor profile on the insertion loss, phase constant, and dispersion of thin high frequency transmission lines," DesignCon2010
6. A. F. Horn, III, J. W. Reynolds, J. C. Rautio, "Conductor profile effects on the propagation constant of microstrip transmission line," Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International, pp 868-871
7. Allen F. Horn III, Patricia A. LaFrance, Christopher J. Caisse, John P. Coonrod, Bruce B. Fitts, "Effect of conductor profile structure on propagation in transmission lines," DesignCon2016

(1) 典型值代表了使用特定铜箔的多个批次材料所测得的平均值。

本数据资料表中所包含的信息旨在协助您采用罗杰斯的线路板材进行的设计，无意且不构成任何明示的或隐含的担保，包括对商品适销性、适用于特别目的等任何担保，亦不保证用户可在特定用途达到本数据表及加工说明中显示的结果。用户应负责确定罗杰斯线路板材料在每种应用中的适用性。

相关产品、技术和软件根据出口规定出口自美国，禁止违反美国法律。

罗杰斯标识, XtremeSpeed RO1200, ML Series, 92ML, StaCool, AD250, AD255, AD260, AD255C-IM, AD300, AD300D-IM, AD320, AD350, AD410, AD430, AD450, AD600, AD1000, CLTE, CLTE-AT, CLTE-XT, CLTE-MW, CuClad, CuClad 217, CuClad 233, CuClad 250, DiClad, DiClad 527, DiClad 870, DiClad 880, DiClad 880-IM, IsoClad, IsoClad 917, IsoClad 933, Kappa 438, LoPro, RO1200, RO3003, RO3006, RO3010, RO3035, RO3203, RO3206, RO3210, RO4003C, RO4350B, RO4360G2, RO4533, RO4534, RO4535, RO4725JXR, RO4730JXR, RO4730G3, RO4830, RO4835, RO4835T, RT/duroid, X T/duroid, TC350, TC600, 以及TMM 均为罗杰斯公司 (Rogers Corporation) 或其子公司的注册商标。

OhmegaPly 是 Ohmega Technologies, Inc. 的注册商标。

TCR 是 Nippon Mining & Metals Co., Ltd. 的注册商标。

Ticer Technologies 是 technology 的许可证，是 TCR 的注册商标。

Wyko 是 Veeco Instruments. 的注册商标。

© 2019年罗杰斯公司版权所有，保留所有权利。中国印刷。

发布于 1445 080819 出版号 #92-243CS