

MAKE EVERY OUNCE COUNT  
每一盎司都举足轻重



## F 型压接 - 持久、全自动的铝线压接

### 白皮书

作者:

Dr.-Ing. Helge Schmidt, 端子和连接器研发高级工程师、经理 (德国, 本斯海姆)

Volker Seipel, PE 端子 / 连接技术经理 (德国, 本斯海姆)

Waldemar Stabroth, 全球端子和连接器平台工程总监 (德国, 本斯海姆)

## 摘要

铝 (Al) 材应用在汽车上可以减轻重量、有助于提高燃油经济性、降低二氧化碳排放。这一优势使得用铝材制作线束更具吸引力，它可以替代沉重的铜线。然而，为了实现持久可靠的电气连接，铝线压接需作特别的优化处理。本文主要讲述 TE Connectivity (TE) 专门为铝线应用而开发并已验证的新型 F 型压接。为全自动工艺而设计的压接筒可以避免常见的铝线压接问题，尤其是蠕变。标准家用车改用铝线和 F 型压接之后，根据线束的约束情况，其重量可以减少 2 至 3 公斤，并能达到降低材料成本的目的。

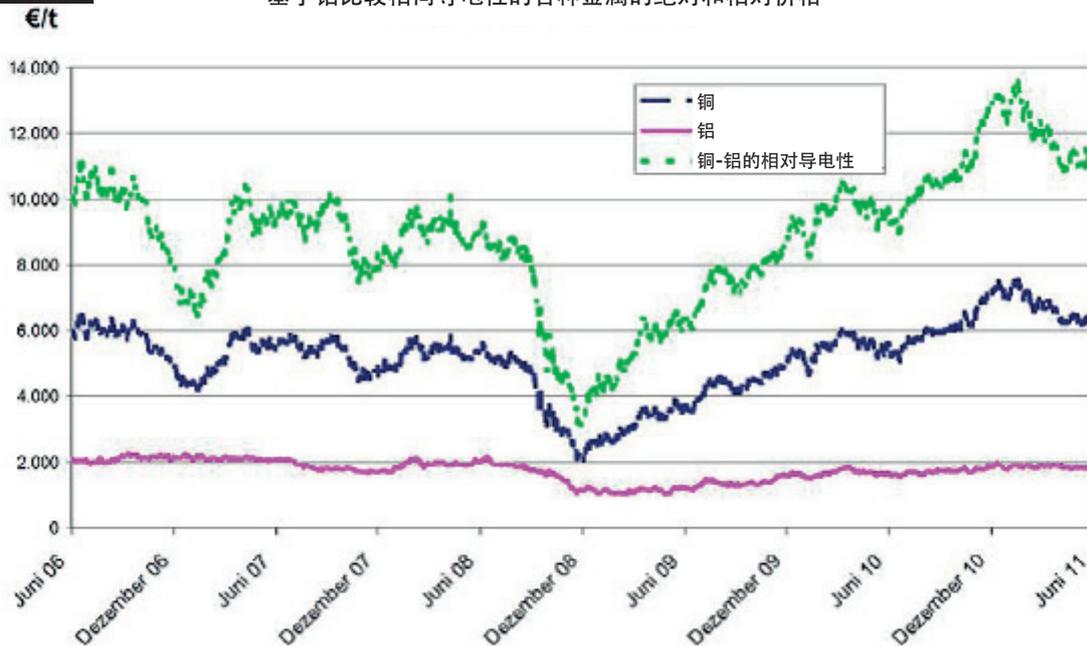
## 引言

铝 (Al) 具有良好的导电性，是作为电线的理想材料。铝线替代铜线可以满足汽车工程领域出现的两个关键需求：

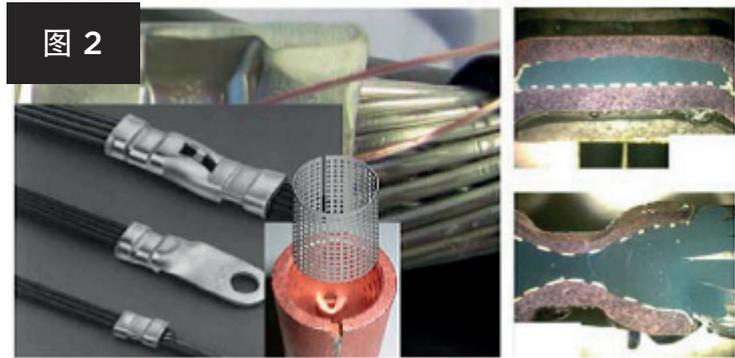
- 首先，铝的重量比铜 (Cu) 轻三分之二左右，这种轻型材料可以降低电缆线束的整体重量。即使考虑到导电性和密度的关系，具有相同电阻的铝线仍然比同等的铜线轻 50% 左右。这种减重对于降低燃料消耗具有重要作用，此外还能减少二氧化碳排放。轻型结构对于具有备用驱动系统的车辆（混合或电动汽车）来说同等重要，在电动模式下，可大大增加车辆行驶里程，从而有助于减小蓄电池的大小和重量。
- 其次，铝是一种供应量充足、容易获取的导电用的基础材料，而铜资源有限，属于“投资型”金属。这意味着铝的价格将相对稳定且低于铜价。粗略比较，铝价约为每公斤 2 欧元，而铜价约为每公斤 6 欧元（数据截止至 2011 年末），如图 1 所示。

图 1

基于铝比较相同导电性的各种金属的绝对和相对价格



- 自从 TE Connectivity 研发了用于连接铝线的 COPALUM 压接连接器，如图 2 所示，它在电力工程领域就得到了广泛的应用和好评。在 AMPLIVAR 压接及其产品系列中，TE Connectivity 还研发了用于铝线的解决方案，但是至今还没有应用于汽车行业。在过去的两年多时间内（自 2009 年以来），从这些产品中获取的宝贵经验已经用于工艺可靠，持久耐用的 F 型压接，压接的线径同样适用于汽车行业。下面将介绍这一汽车应用解决方案及其功能原理。



电源应用 COPALUM 压接连接

## 铝线压接面临的挑战

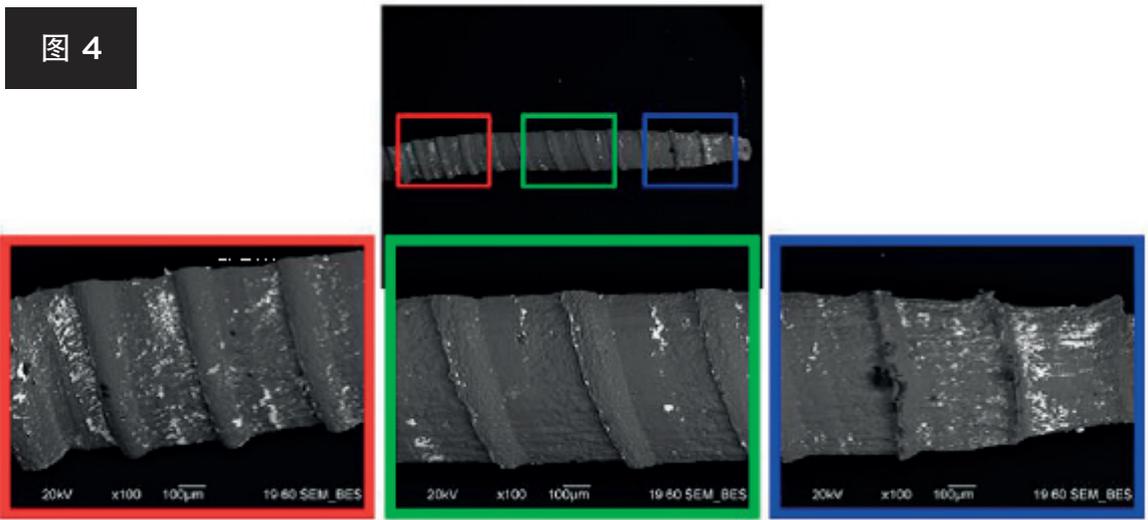
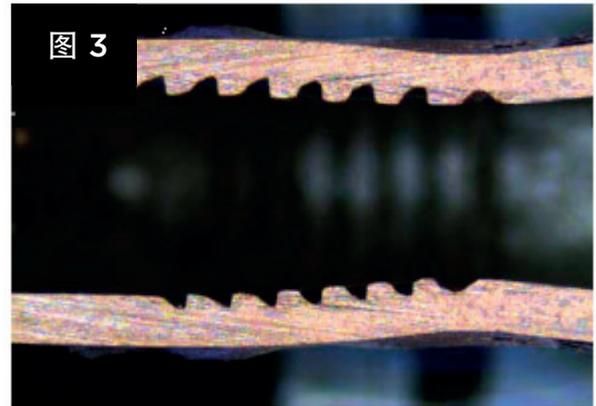
除了强度之外，铝作为导线材料，还有其他一些不利属性需要考虑：

- 该轻质合金在机械负载下从 80℃ 左右开始出现蠕变趋势加剧，而铜要在 230℃ 以上才会一定程度上出现这一现象。因此，线束上铝和铜的连接点必须做特殊设计，从而保证产品生命周期内不丧失电气性能。
- 如果铝 - 铜连接点处出现潮气，铜 (0.3V) 和铝 (-1.69V) 之间就会出现电位差，导致两种金属中较活泼的金属 - 铝发生溶解。我们必须采取措施防止这种不良效应。
- 铝是一种韧性金属，对折弯很敏感。铝的机械强度只有铜的三分之一。用作导线材料时，为了达到电线本身以及连接点的拔出力强度要求，必须考虑这些属性。拔出力由汽车制造商决定，一般标准规定为 60 至 90 牛顿之间。
- 另一个技术挑战就是铝会形成致密并且极其坚硬的氧化层。该氧化层在保护材料不受循环腐蚀的同时，还兼有很强的绝缘特性。因此，要实现良好的电气连接，需要在压接时彻底破坏氧化层。

## 铝压接的功能特性

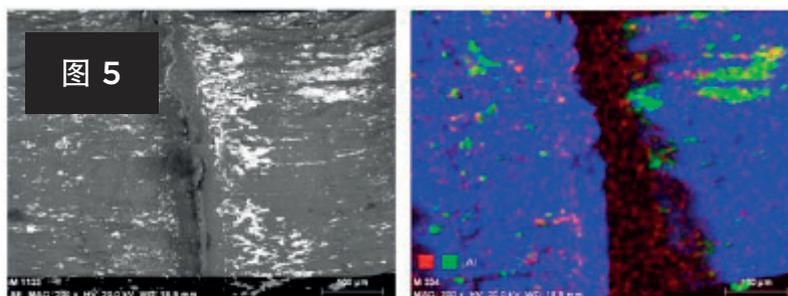
新研发的铝线压接连接解决方案是一种特殊的 F 型压接筒。F 型压接筒的设计和表面特性，特别是端子压接区域，是根据铝线材质量量身定制的：

- F 型压接筒的内侧具有尖锐锯齿状结构，表面呈现出“洗衣板”的外观，如图 3 所示。“鱼翅锯齿”这个词能准确描述卷边的轮廓。压接过程中，锯齿结构可以破坏氧化层，暴露下面的纯铝，从而通过局部冷焊建立导电的接触点。
- 压接过程中，利用铝固有的延展性。屈服点较低导致导线材料机械变形远大于铜套筒。变形引起材质沿锯齿边缘和锯齿内部两个方向流动，如图 4 所示。



采用最佳压接工艺的局部冷焊区域，经历 500 次从 -40℃ 至 130℃ 的温度循环后的截面图

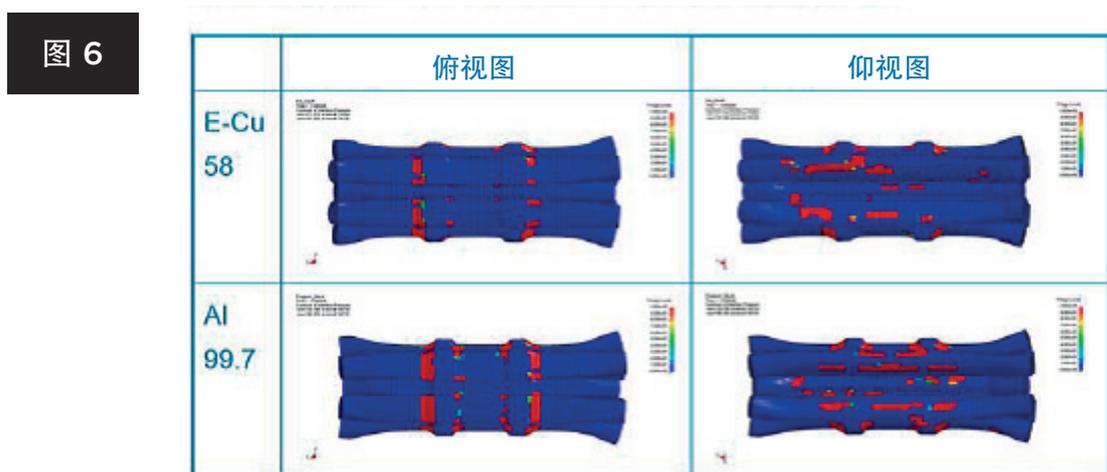
- 压接刀具完全闭合时，导线在机械冲击下纵向伸长，压接筒和导线之间形成了局部冷焊区域，如图 5 所示。因为这里利用了铝和铜能形成合金的原理，接触表面的晶格结构表明两种材质已经相互渗透。经过核实，冷焊表面占据的比例大于 5%，接触点的电阻水平类似于完全焊接。通过这种冶金法的连接，有效提高了导电耐久性。从机械的角度来讲，铝和铜之间的压接实际上比铝和铝之间的压接更牢靠。通过 1.5mm<sup>2</sup> 的电线截面证实，这种新型压接的拔出力为 80 牛顿。



铝表面的元素分布

- 压接区域仅有个别点的残余接触压强达到  $180\text{N}/\text{mm}^2(\text{MPa})$ ，如图 6 所示，几乎不会出现任何导致铝线从压接筒向外发生蠕变的情况。

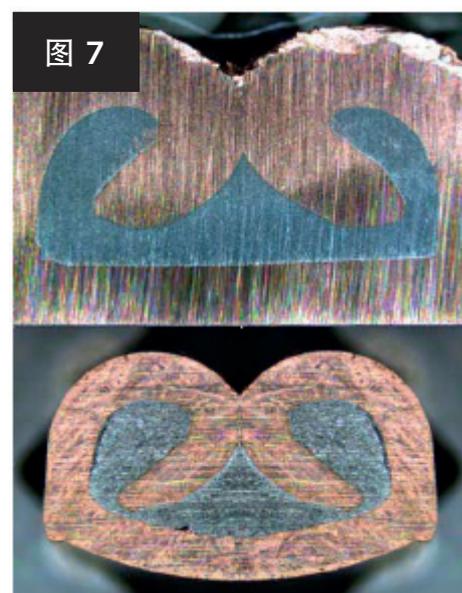
压接后绞线上的压力分布 [MPa]



因此，形成良好电性能的关键并不是压接区的残余应力，而是局部冷焊。两种导线压接的模拟仿真表明：压接后铝和铜线之间其实没有实质性差别。

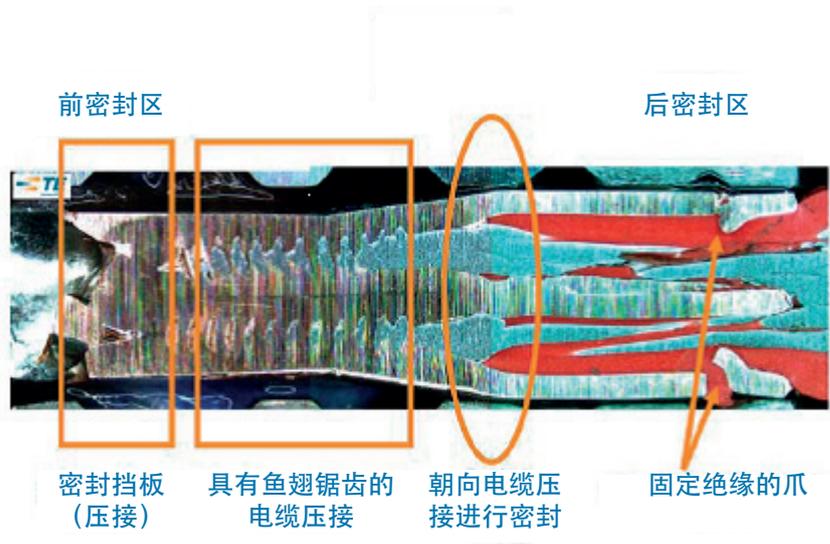
为了使铜与尽可能多的芯线接触且接触表面最大化，针对铝线的压接筒应尽量卷入芯线。铜线压接评估标准不适用于铝，同时压接亦不能触底，如图 7 所示。

- 压接筒的几何结构在后端具有一定坡度，避免在铝线上形成切口。导线的变形和伸长朝着端口后端逐渐变小，防止形成锐边和可能的断裂点。



- 为了防止电化学腐蚀，压接时将导线塑皮卷入压接筒的后端，如图 8 所示。压接筒前端通过卷入添加材料（密封带）以及密封贴点来实现腐蚀保护。所有这些元件和特征都整合在压接筒中。

图 8



因汽车行业批量生产的需求，铝线压接系统需要设计为全自动工艺。目前，在汽车厂商采用该压接的同时，我们正在开发量产模具（2012 年 5 月）。

## 减重的范例

线束属于汽车上较为复杂和沉重的部件，因此任何一点减重都是很有吸引力的。对于线束总重低于 30 公斤的中级普通汽车，我们利用模型计算分析其潜在的减重量。模型仅分析截面积大于  $0.75 \text{ mm}^2$  的导线，不包括信号线。用铝线代替铜线时，用截面尺寸大一个等级的材料来作替换。在这种情况下，重量可减少大约 7 公斤。在德国，近十年来，电源端子已经改用铝材，因而从现实情况来看，该案例研究中，每组线束的减重至少约在 2 至 3 公斤。

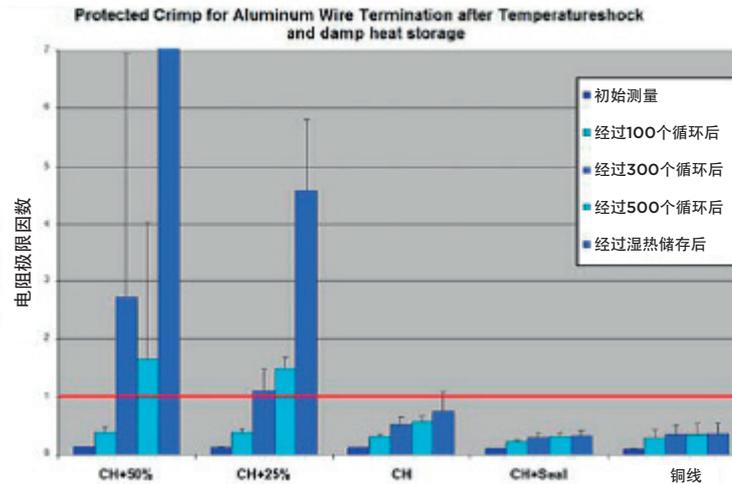
## 导线尺寸

尽管导电性良好，但铝的导电率仍只有铜的 65% 左右，因此替代铜线时通常需要使用更大的截面。一个有用的经验法则是将铜线换成铝线时，采用导线截面的下一个型号。但是，众所周知，现有的汽车线束公差带较宽，有一定安全余量。这就提供了另一种减重的可能性，目前还没开发这一潜能。设计线束和连接器时需要考虑实际负载情况（即任务剖面），而不是单独考虑最坏的情况，替代导线材料时导致的截面增加可以得到补偿，某些情况下甚至可以完全避免。

## 总结

全自动的新 F 型铝线压接已经可以进入到应用阶段，目前正用于某知名汽车制造厂。压接筒内持久良好的电气连接是由于压接过程中高度压缩以及产生的局部冷焊。反之，压接筒内的残余应力应足够低，以防导线蠕变。有效的腐蚀保护装置整合在压接筒内，使该连接适用于汽车车厢内的非密封连接器。经验证，铝压接在湿热环境下经过 500 个温度循环的温度冲击试验后仍然可靠，如图 9 所示。

图 9



然而，冷焊趋势取决于铝线的质量，因此必须特别注意铝线的表面规格。

该方法不需要线束制造商作任何根本性的更改。他们将需要适当的压接模具并且需要新的评估标准。以中型乘用车为例，实际减重可达 2 至 3 公斤，除此之外还可以降低材料成本。汽车制造商将开始运用这一技术。

## 作者：

Dr.-Ing. Helge Schmidt, 端子和连接器研发高级工程师、经理（德国，本斯海姆）

Volker Seipel, PE 端子 / 连接技术经理（德国，本斯海姆）

Waldemar Stabroth, 全球端子和连接器平台工程总监（德国，本斯海姆）

## 产品咨询联系方式：

Joeri Fryns, 端子和连接器产品营销经理

Joeri.fryns@te.com

Tyco Electronics AMP GmbH 是 TE Connectivity Ltd. 旗下的公司，  
AMPPerestr.12-14, 64625 本斯海姆 / 德国

[www.te.com](http://www.te.com)

© 2013 Tyco Electronics (Shanghai) Co., Ltd., a TE Connectivity Ltd. Company. All Rights Reserved.

TE Connectivity、TE connectivity（标识）、COPALUM和AMPLIVAR均为商标。

TE已尽最大努力确认本白皮书中信息的准确性，但TE并不保证本文不会出现任何纰漏；对信息的准确性、正确性、可靠性及现行有效性，亦不做任何其它表述或保证。对本文所涉及的信息，TE保留进行更改的权利，恕不另行通知。对本文所述信息，包括但不限于适销性或某一特定用途的适用性，TE 不做任何暗示性保证。本白皮书中的尺寸仅供参考，如有变化恕不另行通知。规格如有更改，恕不另行通知。有关最新尺寸和设计规格请咨询TE。

