

金属与金属的胶接

〔英〕 S. 塞默德杰夫

陆宏钧 译

国防工业出版社

译者的话

金属与金属的胶接和焊接、钎接、铆接、螺接等连接技术相比，发展较晚。但由于胶接具有减轻重量、简化工艺、降低成本、改善性能等一系列优点，其应用日益增多。与胶接有关的技术（如胶接检验）发展也很迅速。翻译本书的目的主要向国内从事这方面生产的工人和技术人员介绍这本书，供工作中参考。

由于译者水平所限，本书可能会有一些错误，希望广大读者批评指正。

译者

1974年

目 录

前言	5
一 绪论	7
1.1 焊接和钎接	8
1.2 铆接和螺接	8
1.3 压力连接	8
1.4 胶接	9
二 粘附的基本原理	13
三 胶粘剂的组成、分类及性能	17
3.1 胶粘剂的组成	17
3.2 胶粘剂的分类	20
3.3 结构胶粘剂	24
四 胶接工艺	33
4.1 表面准备	33
4.2 胶粘剂的制备和涂敷	41
4.3 待胶接零件的连接和胶粘剂的固化	54
4.4 机械加工工艺	58
五 胶接件的机械特性和性能	59
5.1 胶接强度	59
5.2 胶接接头中应力的分布	60
5.3 金属胶接接头的静强度	65
5.4 金属胶接接头的动强度	75
5.5 老化和忍受环境条件的能力	77
5.6 提高胶接接头强度的可能性	79

六 胶接件的试验和检验	82
6.1 金属胶接接头的破坏试验法	82
6.2 胶接件的非破坏性检验方法	92
七 胶接接头的设计	99
7.1 胶接中采用的接头型式	100
7.2 胶接接头尺寸的确定	106
7.3 铆接、螺接、焊接与金属胶粘剂的结合	110
八 金属胶接的应用	116
8.1 应用	116
8.2 用金属胶粘剂进行修理和修补	151
九 胶接夹层结构	156
9.1 夹层结构的材料	157
9.2 蜂窝夹芯的制造	159
9.3 蜂窝夹层结构的制造	161
9.4 结构特征	162
9.5 蜂窝夹层结构的应用	164
参考文献及一般书目	169

前 言

金属及其它非多孔性材料（玻璃、陶瓷等）的胶粘剂连接（胶接）在工程和工业的各个领域里都具有非常重要的意义。这种构成承载接头的新方法，不仅制造方便，而且充分地利用了被粘接部件的强度，同时提供稳定的结构。

设计人员已经发现，胶接为解决许多设计问题提供了新的途径。这不仅指接头的设计，而且包括所用材料的选择。此外，采用胶接方法，还能获得某些用其它方法难以制造的结构。

由于胶接的设计和工艺简单，所以往往也比较节省，而且能提高质量和强度，减轻重量，减少零件数和提高劳动生产率。

胶粘剂并不是什么新奇的东西，人们在日常生活中也已经普遍认为粘接是一种连接方法。但在推广金属和金属胶接的过程中，解决偏见、担心和踌躇等思想问题方面的困难要比工艺技术方面的困难大得多。

诚然，只要采用正确的工艺，并且在设计接头时选择合适的几何形状，几乎所有的材料都能粘接到一起。但事实上，只有很少数的工程师熟悉胶接和具有这方面的经验。由于这个原因，加上存在一些偏见，整个工业界在应用胶接技术和充分挖掘其潜力方面已经落后了。陈旧的偏见很难消除，许多工程师仍然觉得难以信赖金属和金属的胶接件。因此，需要对有关金属胶接的一些问题加以解释和澄清。

用胶粘剂连接金属只有 25 年左右的历史。但在这段时间内，人们已经积累了相当多的经验。有人估计，目前结构胶粘剂的年增长率为每年 20%。整个经济增长的速率要低得多，所以这个数字必然意味着，采用结构胶粘剂较其它连

接方法，对工程技术人员来说，有着不可忽视的优点。

本书主要讨论金属和金属的胶接在各个不同工业部门（机械、电气、公益事业等）中的用途。因此，主要考察了胶接（机的方法以及胶接接头的性能、设计、试验和检验。对粘附作用的基本原理，胶粘剂的化学成分和制备，固化反应等也作了简要的讨论。书中还附有一张表，列出了一些粘接不同材料的特种胶粘剂的制造和供应厂商[●]，也讨论了已经采用了胶接方法的各种应用实例。有一点是必须注意的，本书内提到的某些技术可能包含在专利中。

近几年来，随着胶粘剂的发展，就有可能制造各种蜂窝夹层结构。因此本书中专有一章非常详细地讨论了这种结构。这种结构重量非常轻，而它强度-重量比和刚度-重量比非常高。与同样重量的板材相比，它的强度要大得多，比钢板大16倍，比铝板大10倍。因为性能优良，结构效能高，蜂窝夹层结构在飞机工业中很好地经受住了考验，在一般工程中的应用也日益增加。

因为英国工业界采用公制国际单位制，本书与英国标准一致，采用国际标准单位或这些单位适当的多次复合。

由于本书所举的例子涉及到工艺技术的许多方面，读者在其专业范围内要比作者精通得多，一定会发现错误和遗漏之处。作者和出版者将怀着感激的心情接受各种建议。

作者希望本书——这是他在英国的初次尝试，有助于克服许多工程师对一种新工艺担心的心情，为扩大胶粘剂在金属胶接中的应用作出贡献。

S. S.

● 中译本中略去此表（原书173~175页）。——译者注

一 绪 论

最近几十年内，化学工业在世界各地有了巨大的发展。在有机化学领域内大量研究的成果，出现了许多新材料。其中，塑料占有重要的地位。起初人们认为它们只是已用的某些材料的代用品，工程师们也把它们看作是劣等的材料。但是实践表明，塑料不仅代替了某些广泛使用的材料，而且在许多情况下还胜过它们。例如，不久以前，木材、纸张、皮革、橡胶、陶瓷和其它材料用的胶粘剂只能用植物性、动物性和矿物性物质来制造。但是，随着以塑料为基础的合成胶粘剂的发展，这些物质被取代了。最重要的是，合成产品具有更强的粘附作用和更好的耐久性。

早在几十年前，人们就确认，某些胶粘剂对金属有良好的粘附作用。这些胶粘剂，首先被应用于飞机工业中，但是其有系统的发展，只是在第二次世界大战中才开始。

通过正确的设计和合理地使用适当的胶粘剂，可以制造出可靠的高强度金属胶接组件。这些组件由于应力作用而产生的破坏现象，不是发生在粘接处，而是发生在金属内部。但是，为了获得良好的结果，有必要仔细地研究影响胶接接头质量和性能的各种因素。

不应该设想胶接将完全取代现在广泛采用的焊接、铆接和其它的机械连接方法。这些传统连接方法的应用，取决于各种不同情况下特定的条件。胶接也同样具有自己的特征。

下面简要地讨论和比较一下各种连接方法的优缺点。

1.1 焊接和钎接

只有被连接零件的材料相同时，才能进行焊接。焊接时的高温会引起金属显微结构的变化而影响强度。同时，在冷却过程中还产生内应力，引起结构的翘曲和变形。许多金属的焊接是很困难的，焊接后的强度也有下降。特别是高强度钢和轻合金，其中有一些可焊性很差，因此实际上也不采用焊接的方法。

采用钎接的方法，可以连接不同种金属，但有发生电偶腐蚀的危险（例如连接钢和铝）。要除去有腐蚀性的焊剂时，需要进行成本很高的中和处理。此外，钎接时要用许多贵重材料（例如1克焊料比1克最贵的环氧胶粘剂还要贵30%左右）。

1.2 铆接和螺接

铆接或螺接时要钻或冲连接孔，这就削弱了零件，并且产生了密封问题。此外，接头承受负载时，应力分布不均匀，在孔的周围出现峰值，这就需要加厚材料，引起结构重量的增加。应力分布不均匀也降低了疲劳强度。连接轻金属材料时，困难更多。其它一些缺点是：有产生毛细孔和接触腐蚀的危险；表面不平整；周期性负载作用下发生松动。而且，利用铆钉和螺钉来连接的工作往往既费工又费力。

1.3 压力连接

用冷压或热压的方法进行连接，其应用范围有限，主要

用于圆柱形接头。这时需要高成本的紧公差加工。同时必须使被连接的零件获得过盈以产生相应的应力。

1.4 胶 接

1.4.1 优点

铆接和螺接时需要连接孔，使用胶粘剂时则不需要，因此不会减小材料的有效横截面积。因为胶接的温度比较低，就可避免焊接时因加热引起的结构变形、金相组织的改变以及涂层、退火状态的破坏，而且胶接能利用最薄的板材——特别是高强度材料的全部强度。

由于负载均匀分布在整个连接面上，无螺孔和焊缝，不会形成局部的应力集中，因而提高了疲劳寿命。在胶接构件中，疲劳裂纹的扩展很慢(见图 1.1)。这一点具有很重要的意义，特别是在飞机中。因为在制造飞机结构时，应使可能产生的疲劳裂纹不致于在采取挽救措施前就引起毁灭性的破坏。

由于没有铆钉头和难看的焊缝，而且被连接的板材也不会机械连接点之间起皱，因此，采用胶接可以获得光滑的外表面，从而改善了外观。在飞机工业和其它要求产品有光滑表面的工业中，在产品外貌与产品性能等量齐观时，这些性能是很重要的。

胶接不仅提供了配合表面之间结构上的联系，而且保证了密封。这就省去了专门的密封或垫密封片的工序，从而节省了时间，降低了成本。胶粘剂层对振动有阻尼作用，这就降低了声级。因为胶接接头中没有空穴和缝隙来存留潮气或其它腐蚀性物质，所以减少了腐蚀作用。胶粘剂又是电绝缘体，在两个表面之间形成阻挡层，使不同金属之间不可能产

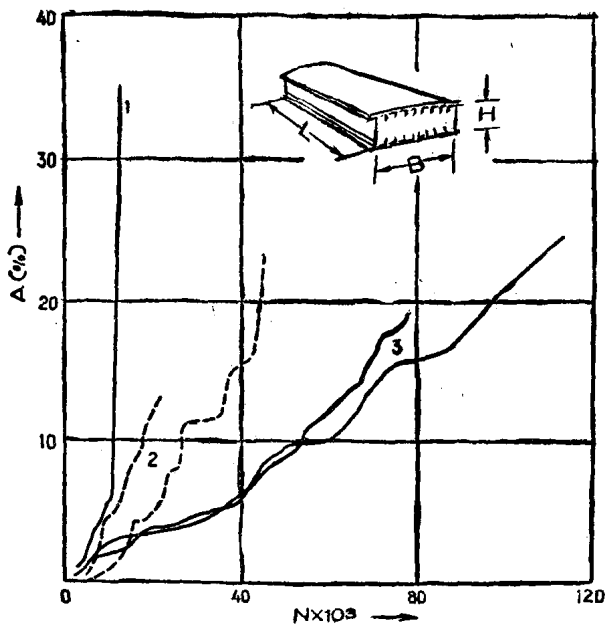


图1.1 A 与 N 的关系

A —箱形梁中失去了张力的横截面积 (%)； N —裂纹产生后所加的负载周期数，该梁是按照不同的设计制造的（见文献[1]，脉动应力为 $(84 \pm 42) \times 10^7$ 牛顿/米²时的试验结果）。 $L = 2500$ 毫米； $B = 460$ 毫米； $H = 127$ 毫米。1—盖板全部加强，用厚板加工而成；2—盖板上铆接有角形加强筋；3—盖板上胶接有角形加强筋。

生电偶腐蚀作用。

由于取消了机械紧固件，并较好地利用了材料，就有可能使用较薄的材料。因此，减轻了重量，节省了标准紧固件（如螺钉、螺母、垫圈和卡子）。

然而，需要的话，胶粘剂也可与机械紧固件一起使用，起密封和均布负载的作用，并使接头具有极高的可靠性。

圆柱形接头中金属零件的间隙范围为 $0.05 \sim 0.15$ 毫米，

即在直径方向差 0.1~0.3 毫米。这样就不需要费时和昂贵的紧公差加工。

不仅不同的金属，而且用普通方法很难或不可能连接起来的不同材料（例如玻璃、陶瓷、木材、橡胶和塑料、水泥和石头），也能容易地用胶粘剂连接起来。

由于简化了设计和生产过程，采用胶接也提高了工艺水平。在胶接操作中无需熟练工人。实现自动化的过程比较快且简单。这种自动化操作，不论短周期运行还是连续生产，都能缩短生产时间和降低成本。

制造机械接头时需要在夹具中固定零件或钻孔、攻丝等，故采用胶接所需要的时间要短得多。在一次操作中可完成大面积和大批量零件的胶接。因为胶接所用的时间随零件大小的变化很小，这样就更多地节约了工时。而铆接与焊接的成本直接与表面积成正比。图 1.2 中的曲线表明了胶接的经济

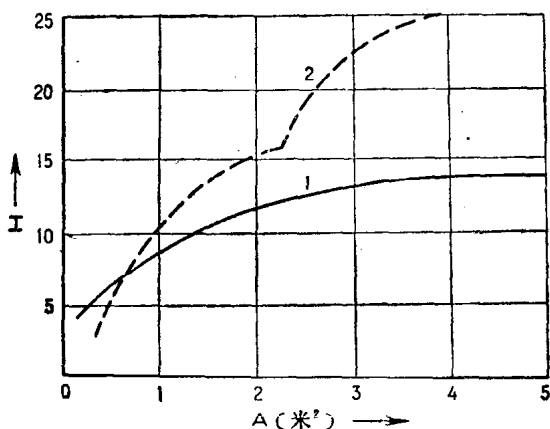


图1.2 生产工时(H)与面积(A)的关系

1—蒙皮和加强筋胶接件；2—同样的铆接件。

效果，并以同一部件和铆接进行了比较。

1.4.2 局限性

下面是胶接所固有的一些缺点：待胶接表面必须进行仔细的准备；在许多情况下，胶粘剂的各种组份要求精确称重并进行充分的混合；胶粘剂的固化需要比较长的周期；在处理胶粘剂时要采取安全措施；缺乏生产中满意地评价粘接性能的非破坏性方法；胶接接头对工作温度的升高比较敏感。

然而应当记住，尽管胶接越来越普遍地用作金属连接的方法，但它毕竟处于发展的最初阶段。人们正在研究新的胶粘剂，它们能在极端恶劣的环境条件下，更长时间地承受更高的负载。这些环境条件，除了紫外线和低温以外，还包括高真空紫外线、 x 射线、活性液体和燃料的侵蚀、高速或连续加载以及长期老化。

二 粘附的基本原理

胶粘剂的使用是一门已经高度成熟的古老的艺术。但是胶粘剂“为什么能粘接”的问题还没有被严密的阐明。胶接技术的进展，在某种程度上将依赖于这种技术从艺术到科学的发展。尽管已有了一些有关胶粘剂材料及其组成和用途的知识，这门工艺仍主要以经验判断为基础。

通常，胶接的过程分成三个阶段。第一阶段中涂敷胶粘剂；第二阶段中胶粘剂固化；第三阶段中其性质保持不变或基本不变。由于在胶接的不同阶段中发生的现象的特异性和多样性，要发展一种胶接理论是非常困难的。此外，胶接接头本身是一复杂的系统，它可以分成五层⁽¹⁾。根据某些科学家的意见⁽²⁾，甚至可以分成九层，如图2.1所示。其中每一层都有各自的几何尺寸，具有一系列独特的性质。

根据胶接接头的强度数据来研究粘附现象的实验方法只会造成混乱。另一方面，要把整个接头的性能与粘附现象的研究分割开来实际上也是非常困难的⁽³⁾。

首先，这是因为，用普通的试验方法（例如直拉、剪切或剥离试验）来测量塑性胶粘剂（如结构胶粘剂）和金属被粘接

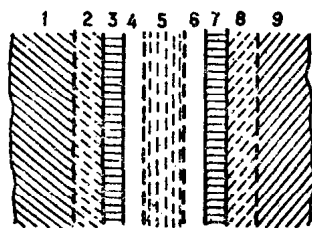


图2.1 胶接接头的分层情况（原理图）

1和9—被粘接件本体；2和8—被粘接件接近界面的原子层；3和7—厚度与原子或分子的大小相当的界面层；4和6—受界面影响的胶粘剂边界层，结构与本体不同；5—不受界面影响的胶粘剂本体。

件之间的粘附强度是不可能的。通常，塑性材料的强度低于粘附强度。在正常的接头中，破坏发生在胶粘剂层内。这样就不能确定实际的粘附强度。相反，被粘接件与胶粘剂之间界面区域的几何尺寸很小，用实验方法是不可及的。

目前，尚无适用于各种情形的理论，能令人满意地解释粘附现象的本质，以及在胶粘剂物质和被粘接件材料之间形成粘接的原理。粘接现象成为科学研究的对象只是三十年前的事。在早期的研究中，注意力主要集中在胶粘剂的性能上。对被粘接件的材料，只是从其表面的物理条件来考虑的。在过去，人们认为两个物体的粘接是由于胶粘剂粘在表面的凹凸处和细孔内的机械固定作用产生的。而现在，已经确切地知道，即使在粘接多孔表面时，同由于物理和化学现象而产生的特殊粘附相比较，这种所谓机械粘附也是第二位重要的。

此后几年中，有人认为，在许多情况下，胶粘剂与被粘接件表面之间发生了化学反应。由于这一原因，就从胶粘剂和被粘接件的材料方面去研究粘接。因而，对表面现象也赋予了更重要的意义。有人主张可以利用定向分子吸附层来影响胶粘剂和表面之间的相互反应。这样，浸润也就非常重要。只有用能浸润粘接面的胶粘剂才能进行胶接。若在胶粘剂和被粘接件的界面上吸附有表面活性添加剂就能改善浸润情况。

还有其它一些理论，试图以各种效应为基础来解释粘附现象的本质⁽⁴⁾。吸附理论是被广泛采用的一种。这种理论把粘附看成纯粹的表面过程（与吸附相似）；把胶粘剂和被粘接件之间形成粘接解释为主要是分子内力（氢键、偶极子-偶极子和伦敦-离散力）作用的结果⁽⁵⁾。de Bruyne, McLaren 和 Staverman 的著作发展了吸附理论。根据这一理论，只有

两种材料都是极性的，或都是非极性的时候，才能良好地粘附。否则，就对粘附有妨碍。决定粘接情况的主要因素是粘接表面的化学性能。高强度粘接的形成被解释成特殊的化学型或物理型分子力作用的结果。再近一些，Sharpe 和 Schonhorn 进一步发展了这种理论。根据材料的相对表面张力（实际上是表面自由能），来解释粘附现象。他们强调，在粘附现象中头等重要的性质是表面张力，而不是极性。

根据 Voyutskii 提出的扩散理论⁽⁶⁾，粘附现象是由于分子链或其碎片的扩散而形成的。这种扩散的结果，在胶粘剂和被粘接件之间形成了强有力的粘接。这种理论的基础是聚合物的基本特征（分子的链状结构，微布朗运动的能力）和聚合物成分中存在有极化基。

Deryagin 和 Krotova⁽⁷⁾ 是粘附现象的电理论的作者。这种理论基于这样的一个概念，即在胶粘剂膜和被粘接件之间的界面上由于其物质的接触而形成了双电层。他们认为形成粘接的原因是出现了起源于电的，即作用在分子、原子和离子间的引力。此外，物质的化学性质具有很重要的意义。应当指出，这种理论与吸附理论并不矛盾。

遗憾的是，现有的解释粘接原理的理论仍是不完善的，还不能说明物质化学结构与它们的粘接特性之间的关系。而这一点，有非常重要的意义，在研制新的具有预定性能的胶粘剂时就是这样。有关粘接机理，材料的化学性质以及粘接接头设计的更多知识将产生一门意义明确的关于粘附的科学，使胶粘剂的应用更加广泛。

在理论上可能得到的和实际上能达到的粘附能力之间存在有差别。在任何胶粘剂-被粘接件系统中，决定最终胶

接强度(实测值)的因素及其与可能的最大胶接强度(理论值)之间的关系表示于图2.2中。该图发表在文献〔8〕中，没有定量地描述各种因素之间的关系。

可能得到的最大粘附力 A ，是考虑了材料中所有的物理和化学作用力后的理想粘附力。由于实际上不可能创造分子接近的条件，故永远也不能得到满足 A 的条件。

损失量 L 取决于胶粘剂浸润被粘接件的能力。这种能力用浸润角来定量地测量。它由胶粘剂的表面张力，被粘接件和周围的空气情况来决定。

损失量 S 进一步降低了胶接强度，是由胶粘剂-被粘接件界面上尺寸的变化产生的内应力所造成的。这种尺寸上的变化，可能只是由于溶剂挥发、交联反应和结晶而使胶粘剂层体积发生变化而引起的；也可能是由于温度变化而使界面产生不同程度的膨胀的结果，或者是由于接头浸在水或其它液体、蒸汽中发生吸附而引起的。

损失量 E ，进一步降低了可能得到的最大胶接强度，使它等于实测值。这一损失的产生可由各人根据具体情况解释。最常见的原因是吸入了空气、异物的污染(金属或灰尘)，以及被粘接件表面过分不规则。

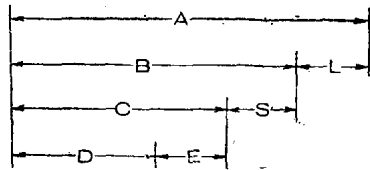


图2.2 决定胶接件强度的因素

A —由于原子和分子间的引力而可能得到的最大吸附能力； B —由胶粘剂和被粘接件形成分子接近的能力决定的胶接强度； C —剩余的强度； D —施加外力使胶接件破坏时测得的强度； L —由于不完全浸润而产生的强度损失； S —由于胶接件中的内应力(由收缩、热运动、吸附等引起)造成的强度损失； E —由于试验的缺陷或胶粘剂层内的空穴引起的强度损失。

三 胶粘剂的组成、分类及性能

3.1 胶粘剂的组成

在适当的条件下，通过表面接触，可以用许多化学结构不同的物质，将材料连接在一起。但是，并不能就此认为，这些物质都是胶粘剂。例如，金属或玻璃之间的水凝固后，能连接得很牢固，但并不能认为冰是胶粘剂。因为，只有在低温下才能做到这一点，因此也无法应用于工程实际中。

典型的胶粘剂，既具有一定的物理性质，又具有一定的机械性能，因此它们能够在不改变两物体结构的情况下，将物体连接在一起。对胶粘剂的基本要求是：

- 1 在形成连接的某个阶段，它们应该是流体；
- 2 在流体状态时，它们能完全浸润被粘接件的表面；
- 3 能凝固成坚硬的固体或粘滞的凝胶体。

胶粘剂由几种成分组成⁽¹⁾。其中一种或最多两种基本的物质称为粘接剂。这些物质是树脂，即活性的胶粘材料。它们具有为保证要求的胶接强度所必需的粘附和聚合的能力。胶粘剂的其它成分为：

- 1 固化剂或硬化剂 这是用来引起固化粘接剂的化学过程的化学试剂。固化剂的选择取决于可能的操作和固化方法，以及对固化产物性能的要求。它们可以以液体或粉末的形式分开供应，也可由厂家将它们并在粘接剂树脂内。在后一种情况下，固化剂用加热、加压的方法或二者之一来活化。

1105046