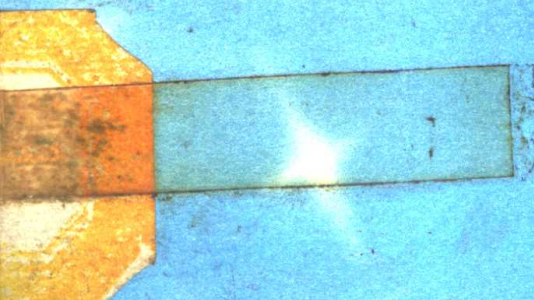




青年科学家著作丛书

益小苏 著

叠层胶粘复合材料概论



吉林科学技术出版社

青年科学家著作丛书

叠层胶粘 复合材料概论

益小苏 著

吉林科学技术出版社

内 容 提 要

本书基于大量翔实的实验研究结果,分8章介绍了金属结构粘接和叠层胶粘复合材料中有关粘附性能、力学性能和老化性能等基础知识。在分析了金属材料的表面结构以及金属-聚合物的粘附界面相之后,讲述了研究胶层力学行为的粘接试样问题,并以此为基础,逐章讨论了胶层的固化性质、蠕变性质、粘弹性质、疲劳性质和老化性质等等,根据实验结果,总结了规律,建立了一些初步的模型。除了胶层宏观性能的分析研究之外,还介绍了胶层中的力学微损伤和老化微损伤,并提出相应的胶层力学卸载的设计参数。本书以高性能结构粘接的设计选材准则、测试规范和一些胶层力学性能的数学描述模型结尾。

本书的对象为从事金属结构粘接以及叠层胶粘复合材料的设计、工艺和制造专业科技工作者,包括大专院校和科研院所中相关专业的教师、研究人员和研究生。

青年科学家著作丛书

叠层胶粘复合材料概论

益小苏 著

责任编辑:张瑛琳

封面设计:杨玉中

出版	吉林科学技术出版社	850×1168毫米32开本	8.75印张
		4插页	212 000字
发行	吉林省新华书店	1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷	
		印数: 1—1 280册	定价: 5.00元
印刷	长春新华印刷厂	ISBN 7-5384-0699-9/O·41	

祖国的希望 未来的曙光

——寄语青年科技工作者

王大珩

翻开吉林科学技术出版社送来的《青年科学家著作丛书》书目及作者名单，一个个自强好学，勇于探索创新的青年人仿佛就在眼前，使我欣慰，感到后生有望。所以在《丛书》编辑出版之际，我很乐于借此机会，同广大青年科技工作者讲几句共勉的话。

这些年来，一大批在五星红旗下诞生，成长起来的年轻科技工作者崭露头角，在面向国民经济主战场的应用研究和在基础科学以及高技术研究等诸多方面取得优异成就，有的跻于国际领先地位，或达到国际先进水平，有的填补国内空白，这些成果对推动科学技术进步，发展国民经济起到了重要作用。为鼓励青年科技工作者的科学研究和发明创造，中国科学技术协会、中国科学院分别设立了青年科技奖和青年科学家奖，规定每两年评选一次。首届青年科技奖评出 94 名，首届青年科学家奖评出 25 名，他们是从全国数以百万计的青年科技工作者中层层遴选出的佼佼者。

在此基础上，经过中国科协和中国科学院的推荐，吉林科学技术出版社编辑出版首届部分获奖者的著作，并获得长白山学术著作出版基金的资助，这对广大青年

CA 63/01

科技工作者是很大的鼓舞。出版社关心青年科技工作者的成长是值得赞扬的。

当今，在激烈的国际竞争中，重要的是看一个国家的综合国力，而其中重要的一个方面是科学技术的进步，所以各国都把科学技术作为推动经济发展和社会进步的重要手段。我国是一个拥有十一亿人口的大国，经济还很落后。但是我们有志气、有能力振兴中华，立足于世界民族之林。实现这样的宏愿，要靠我们几代人的艰苦奋斗。中国科学技术的兴旺发达要靠我们老中青科技工作者团结合作，但归根到底要靠你们青年人。长江后浪推前浪，一代更比一代强。党和人民把国家的前途、民族的命运寄托在你们青年人身上，正如江泽民同志所说：“你们是祖国希望所在，是中国未来的曙光。”

我们这些人都已年逾古稀，要你们接好班，要有理想、有志气。一个人也好，一个民族也好，都要有一点精神，要有使命感，要有民族自强心，要为国家、为民族争口气，奋发向上，勇于进取；作为优秀的青年科技人才，除业务上有突出成就外，还要有不计名利、无私奉献的高尚精神，现在尤其要提倡这种精神，还要有求实的科学态度，尊重知识，尊重他人的劳动；你们还要发扬中华民族的美德，那就是要有集体主义精神，要团结协作，自力更生，艰苦奋斗，不折不挠地去拼搏，满怀希望，开拓未来！

1990年2月

序

金属结构胶粘技术是现代结构制造技术中重要的内容，没有高性能的结构粘接技术，今天人类能达到的登月飞行、航天飞机或是磁悬浮高速列车等卓越的技术成就是不可想象的。即使在那些不完全属于高技术的领域里，金属粘接技术也发挥着举足轻重的作用。例如，在现代车辆的生产制造中，粘接工艺已经集成在每几秒钟一辆车辆的快速装配流水线里，成为车辆制造中不可分割的工艺组成部分。在许多特殊场合下的粘接往往是不可替代的，例如磁悬浮列车上的非磁金属结构的连接，除粘接之外甚至没有其他任何的连接措施可以选择。

粘接技术还导致产生了许多制造复合材料的新工艺，并由此产生出一系列金属叠层胶粘复合新材料。从广义上讲，一切结构复合材料的制造基础都是界面粘附，在这个意义上，也就是胶粘技术。总之，结构胶粘技术已成为衡量一个国家的工业技术水平、工艺制造水平及其复合材料研制水平的重要尺度之一。

金属结构粘接技术是一门交叉学科，它涉及材料学，也涉及工艺制造学，又涉及结构力学。金属粘接与金属焊接不一样，金属焊接的基础主要是金属材料之间的冶金过程，而金属粘接则主要是聚合物胶粘剂与金属表面之间的界面粘附过程。当粘附过程完成之后，影响粘接结构性能的主要因素又转变为聚合物胶层的力学性质以及聚合物材料和界面组织的老化降解过程。由于传统的分工，熟悉聚合物胶粘剂的多数是化学化工

方面的工作者，而应用胶粘剂进行金属粘接的则主要是从事机械制造方面的工作者，他们一般不熟悉聚合物材料，这样，就使现代结构粘接技术的推广和应用遇到很多的困难。益小苏同志的《叠层胶粘复合材料概论》一书，把重心放在材料与粘接结构上，力求从材料学、工艺学和力学这三者的统一性的角度分析研究金属叠层胶粘复合材料，这无疑是我国结构粘接研究领域中的一个值得庆祝的事情。

该书借助大量和丰富的实验研究结果，系统而深入地介绍了异质材料粘附界面的微观结构、聚合物胶粘层的固化过程和性质，对不同形式外力的响应特征和老化等等金属结构粘接中的基础性问题。同时，又从粘接结构设计的角度，介绍了设计参数、选材准则以及设计方法等基础内容，还在一定程度上触及到了材料性能和设计数据库方面的问题。本领域在这样一个深度上的研究工作，国内尚不多见。

应该特别强调一下的是，《叠层胶粘复合材料概论》一书着眼于批量生产的现代高性能粘接技术，突破了粘接专业书籍中面向修补操作的陈臼，使我们能够从中感受到国际上粘接工程前沿的脉搏跳动，这显然是与益小苏同志多年在国外的研究工作分不开的。

1985年春天，我率领中国代表团出席在法国斯特拉斯堡（Strasbourg）举行的国际焊接年会，在会上第一次认识了益小苏同志。当时，他正在联邦德国工作，风华正茂，是联邦德国赴会代表团中的一名年青成员。以后的几次国际会议上，我们又多次见面，他热情谦虚的待人风度给我留下很好的印象。当听说他回国后于1988年因粘接复合方面的工作荣获中国科学技术协会颁发的全国首届青年科技奖之后，我真为他而高兴。因此，益小苏同志嘱我为他的新著作序，我欣然应允，写成了以上的文字。

我祝益小苏同志再接再厉，取得更多更好的科研成就，也

祝更多的青年科技工作者脱颖而出，为繁荣我国的科技事业而奋斗。

潘际奎 1990年2月

(中国科学院学部委员，清华大学教授)

前 言

迄今为止，胶粘技术已走过了漫长的发展历程。在所有的连接技术中，胶粘技术算得上是应用最早，因而也是最古老的一种连接技术了。

连接技术属于制造工艺技术科学。近十多年来，国际上先进的制造工艺技术不断涌现，以计算机辅助设计和辅助制造为特征的现代制造工艺更是推陈出新，极大地改变着人类社会的面貌。在现代制造工艺技术、现代材料结构分析技术和计算机应用技术的推动下，金属材料的结构胶粘技术也在发生深刻的变化。一方面，人们不仅要求知道金属材料借助于聚合物基胶粘剂实现界面粘附的深入机理，而且要求能够在工业性批量生产的基础上，进行金属胶粘结构针对长时耐久使用性能的力学分析和强度设计；另一方面，金属胶接又在从它的传统领地如飞行器制造业等走向现代车辆制造业、造船业以及电子工业等其他制造业。在今天的形势下，术语“金属胶粘”已经与传统的、以个人经验为基础的配方→试粘→改配方→再试粘这样的胶粘技术不能同日而语。

在金属结构胶粘技术更新和发展的同时，铝合金、钛合金、铝锂合金等轻金属合金材料也有了长足的发展。利用环氧树脂、酚醛树脂或者聚酰亚胺这样一些高性能的结构胶粘剂，利用现代胶粘工艺技术，人们又在研究面向尖端技术的轻合金板材叠层胶粘复合材料。发展相应的叠层胶粘复合结构的制造技术，从而导致复合异质新材料和异质材料复合新技术两个相关学科的蓬勃发展。轻合金板材叠层胶粘复合材料中的一个典型产品为铝合金-环氧树脂-铝合金-环氧树脂……奇数叠

层复合板，80年代初期发展起来的象

铝合金箔—芳纶纤维布—铝合金箔—芳纶纤维布—……
环氧树脂 环氧树脂 环氧树脂

这样的所谓超混杂复合材料，可称得上是轻合金板材叠层胶粘复合材料家族中的新成员，是这类叠层复合材料中的一个杰出代表。

本书以轻金属合金-聚合物叠层胶粘复合材料作为研究对象，利用丰富的实验数据和理论分析结果，比较系统地讨论了铝合金材料的表面氧化层结构与形貌；聚合物连接层的界面结构与形貌；连接层中的应力-应变分布规律；一维单轴剪切试样；固化条件和环境温度对连接层力学性能的影响；连接层的蠕变性质和疲劳性质；应力诱导微损伤活动；聚合物连接层以及铝合金界面结构的湿热老化现象和规律等等，比较详细地回答了在金属-聚合物界面粘附技术科学中和在叠层复合材料技术科学中的许多材料学问题和力学问题。相信本书所涉及的内容，不仅对材料研究工作者，而且对轻型结构的设计者和工艺制造者，对从事金属胶粘的同行们，都会有一定的帮助。

本书的大部分实验工作结果，来源于作者近几年的科研实践积累，其中有的内容已发表在联邦德国DVS出版社 (Deutscher Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf) 1988年出版的作者专著《Beitrag zum strukturabhängigen mechanischen Verhalten von Klebstoffsichten》^[1]以及其他许多中外文论文之中。但也有相当数量的研究成果是首次发表，特别是一些受国外工业研究部门委托的研究课题及其结果，由于当时对方的一些限制，一直未作公开披露。相信书中这方面的研究，也会引起国内相应工业部门的兴趣。

1980年至1986年间，作者在联邦德国学习和工作，先后到

过一些企业和研究部门从事合作研究，那时的工作构成了本书的基础。作者深深地感谢联邦德国DAAD基金会 (Der Deutsche Akademische Austauschdienst), AIF 基金会 (Allgemeine Industrielle Forschung), Paderborn 大学, MBB公司 (Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH), Henkel 公司和其他一些工业企业及研究团体对这项研究工作的支持和资助, 感谢 Paderborn 大学材料及连接技术研究所 (Laboratorium für Werkstoff-und Füge-technik) 所长、工学博士 Ortwin Hahn 教授对作者的指导和关心, 感谢他及所里其他同事对这项工作所表现出来的兴趣和与作者亲密无间的合作。没有充分的理解和高尚的友谊作为基础, 这样的工作是不可想象的。

回国以后, 中国科学院以首届青年奖励研究基金的形式, 继续支持和资助了作者在这个方向的研究工作, 王宽诚教育基金会也为作者的部分活动提供了外汇资助, 对此, 作者表示诚挚的感谢。

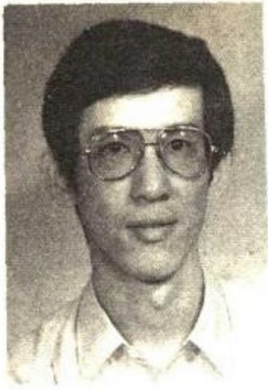
作者还要感谢中国科学院学部委员、清华大学教授潘际奎先生热情为本书作序。感谢吉林科学技术出版社和长白山学术著作出版基金会, 是他们给了我勇气完成这部著作。深谢他们对出版这本书所付出的劳动。

益小苏

1990年12月

献给我的导师，
工学博士奥特文·哈恩教授
五十寿辰

MEINEM LEHRER,
HERRN PROFESSOR, DOKTOR-
INGENIEUR ORTWIN HAHN
ZUM 50. GEBURTSTAG GEWIDMET



益小苏，1953年12月生，1977年毕业于南京航空学院发动机工程系，1982年、1986年分别获联邦德国帕德博恩(Paderborn)大学机械工程系工学硕士和博士学位。现为浙江大学材料系教授。

目前从事高分子材料与复合材料的研究，包括聚烯烃材料和热致液晶高分子的分子自增强、金属与聚合物的界面粘附、塑料焊接工程等。著有《聚合物连接层的结构与力学性能》(联邦德国DVS出版社1988年)，在国内外学术刊物发表论文近40篇。

1988年获中国科协“首届全国青年科技奖”，1989年被团中央评为“全国科技教育新秀十杰”之一。

首批《青年科学家著作丛书》书目

- ☆ 圆薄板大挠度理论及应用
郑晓静 著
- ☆ 圆与曲线的直观度量
周 仪 著
- ☆ 反常规范理论导论
张耀中 著
- ☆ 合金价电子结构与成分设计
刘志林 著
- ☆ 叠层胶粘复合材料概论
益小苏 著
- ☆ 热点火理论
冯长根 著
- ☆ 人机控制系统
孔祥利 著
- ☆ 能量生态学引论
祖元刚 著
- ☆ 土-植物系统的水分动力学
邵明安 著
- ☆ 生物传感技术原理与应用
张先恩 著
- ☆ 城市经济区的理论与应用
顾朝林 著

目 录

第 1 章	金属-聚合物的粘附界面	(1)
1.1	铝合金材料	(2)
1.2	表面化学预处理	(3)
1.3	氧化铝层的结构与形貌	(5)
1.4	形貌结构模型	(12)
1.5	环氧树脂	(14)
1.6	其他聚合物胶粘剂	(21)
1.7	金属及其表面状态的影响	(26)
1.8	界面相的生成条件和规律	(33)
第 2 章	金属-聚合物叠层胶粘试样	(36)
2.1	层间受载状态	(37)
2.2	搭接端部的流胶	(43)
2.3	金属搭接板	(46)
2.4	单轴层间剪切	(48)
2.5	剪切响应曲线	(54)
2.6	典型的连接层应力-应变曲线	(56)
第 3 章	固化中和固化后的温度作用	(58)
3.1	固化条件与玻璃化转变温度	(59)
3.2	固化条件与剪切力学性能	(63)
3.3	环境温度与后固化现象	(69)
第 4 章	应力诱导胶层微损伤	(73)
4.1	材料结构中的非完善性	(74)
4.2	声发射表征胶层力学性能	(77)
4.3	界面质量的影响	(84)
4.4	临界声发射的比较承载状态	(89)
4.5	声发射临界状态与材料强度的关系	(94)

第 5 章	剪切蠕变与粘弹性	(96)
5.1	一般性讨论	(96)
5.2	温度的作用	(100)
5.3	柔量曲线	(103)
5.4	时温等效关系	(105)
5.5	卸载回复性能	(109)
5.6	蠕变微损伤	(111)
5.7	等时应力-应变曲线	(115)
5.8	蠕变的数学描述	(117)
5.9	损伤现象的电镜观察	(121)
第 6 章	对周期性载荷的动态力学响应	(124)
6.1	几个概念	(124)
6.2	试样问题	(127)
6.3	交变加载响应	(130)
6.4	脉动加载响应	(133)
6.5	胶层层厚的影响	(137)
6.6	波形的影响	(140)
6.7	材料变形能力的影响	(142)
第 7 章	环境老化问题	(144)
7.1	概述	(144)
7.2	实验方法	(146)
7.3	水分扩散的规律	(148)
7.4	胶层层厚的影响	(154)
7.5	水分扩散运动的计算	(159)
7.6	湿胀行为	(164)
7.7	湿热诱导的力学性能变化	(171)
7.8	测试温度的影响	(179)
7.9	湿热条件下的蠕变	(184)
7.10	胶层的微观老化现象	(188)
7.11	氧化铝结构的湿热老化	(197)
7.12	氧化铝结构的水解腐蚀模型	(204)
7.13	干燥脱水和阻水处理	(210)

7.14 其他典型环境条件.....	(220)
第 8 章 测试规范和数据数学处理.....	(222)
8.1 胶层的长时耐久性能及其测试方法.....	(223)
8.2 不同测试方法及其结果比较.....	(227)
8.3 一个模型的测试规范.....	(236)
8.4 考虑损伤影响的力学描述模型.....	(240)
8.5 胶层层厚及其数学处理.....	(245)
参考文献	(255)