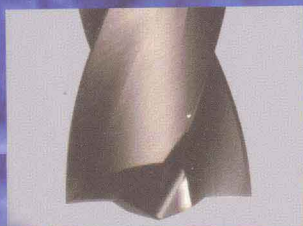




先进材料与制造技术译丛

Drilling of Composite Materials

复合材料制孔技术



【葡萄牙】J.Paulo Davim 著
陈明 安庆龙 明伟伟 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



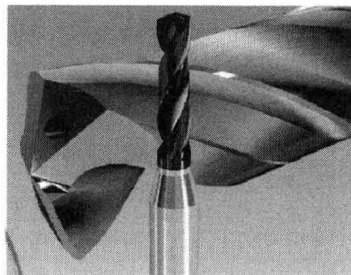
先进材料与制造技术译丛

装备科技译著出版基金

复合材料制孔技术

J. Paulo Davim 著

陈明 安庆龙 明伟伟 译



国防工业出版社

· 北京 ·

Drilling of Composite Materials

著作权合同登记 图字:军一2012-011 号

图书在版编目(CIP)数据

复合材料制孔技术/(葡)戴维姆(Davim,J. P.)著;陈明,安庆龙,

明伟伟译. —北京:国防工业出版社,2013. 8

书名原文:Drilling of composite materials

ISBN 978-7-118-08554-9

I. ①复... II. ①戴... ②陈... ③安... ④明... III. ①复合材料—
孔加工—研究 IV. ①TG52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 164151 号

Translation from the english language edition:

Drilling of composite materials by J. Paulo Davim

Copyright © 2009 by Nova Science Publishers, Inc.

本书简体中文版由 Nova Science Publishers, Inc. 授权国防工业出版社出版。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10¼ 字数 206 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717



译者的话

复合材料制孔技术

复合材料具有高的比强度、比刚度,优异的可设计性和抗疲劳性等优良的综合性能,广泛应用于航空航天结构设计中,复合材料的应用比例已经成为衡量飞机先进性的重要指标之一。钻削是复合材料零件制造过程中工作量最繁重的机械加工工序之一,例如一架波音 747 飞机有三百多万个连接孔,因此制孔效率直接关系到整个产品的生产周期。随着大飞机国家科技重大专项的实施和国家对军机研制质量和研制周期的要求越来越高,大量复合材料的应用势必对复合材料机械加工工艺与装备技术提出更高的要求。目前国内在复合材料相关刀具和加工工艺与质量控制方面还没有形成标准体系,基本参照金属加工技术路线,没有形成复合材料加工系列化刀具产品,相关质量标准和评价体系尚未建立,因而不能满足复合材料高效、精密加工要求。

由先进制造领域专家 J. Paulo Davim 联合国际多名学者编著的《复合材料制孔技术》一书,不仅深入浅出分析讨论了复合材料钻削加工机理,给出了多种制孔专用工具的详细分析和复合材料高效制孔的各种实施手段,而且书中还汇集了大量的可以直接应用的理论与工程经验公式,不同种类刀具应用于复合材料高效制孔实例更是让读者阅读后受益匪浅。

本书既注重对复合材料加工机理实质的分析,又注重复合材料高效制孔工艺实践,可使读者真正理解复合材料高效制孔技术实质,有助于解决工程实际问题。目前国内没有专门针对复合材料高效制孔机理、刀具和工艺技术方面的书籍,相信本书的出版可以填补这一空白。



本书由上海交通大学机械与动力工程学院陈明教授和安庆龙博士、明伟伟博士翻译并担任审校,参加翻译工作的还有董大鹏博士生和魏莹莹博士生,刘志强博士生、郑小虎博士生、牛秋林博士生和蔡晓江博士生在本书的校稿过程中也做了大量的工作。

本书感谢装备科技译著出版基金、国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2011ZX04015—031, 2012ZX04003—051, 2013ZX04009—031, 2012ZX04012—021, 2012ZX04003—031)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB731703, 2011CB706804)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA040104)、国家自然科学基金项目(51105253)以及上海市曙光计划跟踪项目“大型客机复合材料高效制孔成套工艺技术研究”的资助。

由于本书涉及的内容广泛、新颖,译者翻译时,难免存在不足,敬请广大读者批评指正。

译者

2013年6月

前言

复合材料制孔技术

钻削是最为复杂的机械加工过程之一,尤其当工件为复合材料时,钻削加工变得更为复杂。目前在钻削加工过程和复合材料结构设计方面已进行了大量的研究,但是关于复合材料的钻削加工方面尚缺少系统性研究。在复合材料结构应用场合,这显然会成为降低复合材料加工和装配成本的障碍。本书针对复合材料钻削进行了全面的文献综述,提出了许多重要的研究问题,结论部分针对这些问题进行了阐述,以迎接来自于复合材料钻削加工工艺过程分析与优化方面的挑战。

第1章——复合材料钻削分层对策:为了满足结构连接强度的需要,钻削是纤维增强复合材料二次加工中最常用的加工方式,而分层则是加工过程中存在的最严重的问题之一。这些不同尺寸的分层会对复合材料结构长期的可靠性造成威胁。本章针对不同类型钻削钻头使用过程中出现的分层现象进行了全面的分析。首先针对麻花钻钻削过程中开始发生分层时的临界钻削推力进行了理论预测,并将其与试验所测值进行了对比;然后对工业上应用较广的专用钻头如烛芯钻、锯钻、套料钻和阶梯钻等所具有的众所周知优点进行了阐述。此外,本章还针对不同类型钻头在钻孔时导向孔、钻头偏心距、刀具磨损以及钻孔出口支撑对分层的影响进行了分析,并基于本章所提出的模型构建了钻头设计指南,本方法可以用于不同类型钻头的加工性能评测和未来钻头的创新设计。

评估钻削过程中引起的材料分层损伤是相当困难的,尤其是碳纤维基复合材料,采用传统的可视化检测是难以检测的。此时需要采用医学上广泛应用的计算机断层扫描技术(CT)。相对于超声波检测技术,计算机断层扫描技术是一种较为行之有效的用于检测钻削分层损伤的方法。本章对不同类型钻头进行了大量的钻削试验,并采用计算机断层扫描技术对加工过程中产生的分层进行了测量。试验结果表明,计算机断层扫描技术可以成功地表述钻削推力与分层损伤之间的关系。

第2章——聚合物基复合材料钻削损伤的减少方法:在聚合物基复合材料钻

削中,可能会产生几种加工损伤,这些损伤有时会直接导致材料发生降解。本章针对提高制孔质量的基本方法进行文献综述。毫无疑问,聚合物基复合材料制孔产生的主要损伤依然是分层,在工件钻孔入口和出口都可能会发生分层现象。分层损伤的程度取决于临界钻削推力值,其大小取决于工件材料本身性能和复合材料板上的未变形切削层厚度。

第3章——聚合物基复合材料钻削加工中的分层综述:纤维增强复合材料结构钻削所伴随的分层现象,通常是复合材料结构应用的瓶颈。分层会降低零件结构强度,并使装配公差增大,最终导致抗疲劳性能恶化。纤维增强复合材料钻削分层的形成机理有两种:钻孔入口的剥离分层和钻孔出口的推出分层。减少聚合物基复合材料层板钻削分层的关键在于降低制孔过程中的钻削推力。由于聚合物基复合材料具有较低的导热系数,且塑料具有较低的转变温度(软化或熔融),因此钻削过程中所产生的热量会导致零件加工表面形成热损伤。目前,关于温度的测量方法和热损伤的表现形式方面的相关问题仍有待于解决。

本章侧重介绍了钻削推力、分层起始、分层形成机理以及分层测量与评估等方面的影响因素。尤其是聚合物基复合材料钻削无分层的相关技术。这些技术包括刀具几何参数和钻削加工参数优化技术;变进给技术;预加工技术(如采用阶梯钻和导向孔);背支撑技术。锯钻、烛芯钻、套料钻等专用钻头可以将钻削推力分布在钻头外缘,而不是集中在钻孔中心(例如麻花钻)。与普通麻花钻相比,这些专用钻头可以采用较大的进给率而不产生分层损伤。

第4章——复合材料零件加工质量影响因素研究:本章针对钻孔出口和孔壁的缺陷进行了试验研究。试验中选用 T700-M21 和 T2H-EH25 两种碳/环氧树脂长纤维复合材料。T700-M21(采用第三代树脂)的能量释放率远远大于 T2H-EH25(采用第二代树脂),这是因为在 T700-M21 基体中添加了热塑性颗粒。当采用一把新刀具进行钻孔试验时,发现两种材料具有相同的比切削压强。由于热塑性颗粒的存在,T700-M21 加工表面质量得到了一定改善。此外,T700-M21 材料钻孔出口处所测的分层因子也明显小于 T2H-EH25。

第5章——碳纤维复合材料钻削分层现象:本章内容主要涉及刀具几何参数和钻削加工参数对碳纤维复合材料钻削过程中分层的影响评估,通过针对具有不同几何参数的钻头开展钻削加工参数评估试验以获得最佳参数。除了这些工艺优化方面的研究工作之外,本章将研究刀具磨损对加工性能(尤其是分层)的影响。此外,为了实现碳纤维复合材料钻削过程中分层的在线监测和控制,还应用了声发

射技术。

第6章——基于人工神经网络的铝基复合材料钻削刀具磨损和比切削力建模:本章将基于反向传播算法(BP)的人工神经网络建模方法,分别建立刀具磨损、比切削力与切削参数(切削速度和进给率)和切削时间之间的非线性关系模型。建模结果表明,训练良好的BP神经网络模型能够根据切削参数和切削时间精确地预测出刀具磨损和比切削力。此外,研究结果还表明,刀具磨损主要受切削时间影响,而比切削力在很大程度上受进给率影响。

第7章——木质复合材料中密度纤维板钻削的分层分析:中密度纤维板(MDF)的应用越来越广泛,尤其在家具行业。钻削是纤维板之间连接的一个重要的加工工序,并且通常作为装配过程中的最终工序。在中密度纤维板钻削加工中,分层是一个非常严重的问题,需要对其进行控制。在本章中,采用正交试验设计方法对钻削中所伴随的分层进行了研究,试验中选用三尖钻和麻花钻两种不同的硬质合金钻头,采用回归分析和方差分析(ANOVA)方法获得了中密度纤维板钻削分层因子的经验公式,并详细地研究和总结了主轴转速、进给率等钻削参数以及它们之间的相互关系对分层的影响。

第8章——复合材料制孔的最新进展:钻削是最复杂的机械加工过程之一,当加工工件为复合材料时变得尤为复杂。目前关于钻削工艺和复合材料结构设计方面的研究很多,但尚缺乏针对复合材料钻削加工工艺方面的系统研究,这对于降低复合材料加工和装配成本来说是一个障碍。本章针对复合材料钻削作了一个全面的回顾,论述了许多重要的研究问题。作为全书的总结,本章研究了复材加工中的一些关键问题以应对来自复合材料钻削机理分析与工艺优化方面的挑战。

目 录

复合材料制孔技术

第 1 章 复合材料钻削分层对策	001
摘要	001
1.1 引言	001
1.1.1 研究背景	001
1.1.2 文献综述	002
1.2 基于钻削推力的分层模型	003
1.3 钻头几何形状的影响	005
1.3.1 钻头基本形式	005
1.3.2 复合钻头	010
1.3.3 钻头之间的对比与演化	014
1.4 导向孔的影响	015
1.5 钻头偏心的影响	017
1.5.1 偏心麻花钻	017
1.5.2 偏心烛芯钻	019
1.5.3 偏心锯钻	020
1.6 钻头磨损的影响	022
1.7 支撑垫板的影响	024
1.7.1 有支撑的锯钻制孔	024
1.7.2 有支撑的套料钻制孔	025
1.8 材料各向异性的影响	027
1.9 分层的测量	029
1.9.1 超声波 C 扫描	029
1.9.2 计算机断层扫描技术(CT)	030

1.10 结论	033
致谢	034
参考文献	034
第2章 聚合物基复合材料钻削损伤的减少方法	038
摘要	038
2.1 引言	038
2.2 专用钻头	039
2.3 钻削加工条件	041
2.4 钻削加工参数	044
2.5 结论	046
参考文献	047
第3章 聚合物基复合材料钻削加工中的分层综述	048
摘要	048
3.1 引言	048
3.2 分层机理	050
3.3 钻削轴向推力	051
3.4 损伤模型分析	053
3.5 分层的测量和评估	056
3.6 引发分层的影响因素	059
3.7 无分层制孔技术	063
3.8 结论	065
致谢	066
参考文献	066
第4章 复合材料零件加工质量影响因素研究	070
摘要	070
4.1 引言	070
4.2 试验装置	072
4.3 试验结果	073
4.4 结论	079
参考文献	080

第 5 章 碳纤维复合材料钻削分层现象 082

 摘要 082

 5.1 引言 082

 5.2 复合材料钻削优化试验 084

 5.2.1 试验描述 084

 5.2.2 结果与分析 087

 5.3 关于碳纤维复合材料钻削分层现象的监测 090

 5.4 结论 093

 参考文献 093

第 6 章 基于人工神经网络的铝基复合材料钻削刀具磨损和

 比切削力建模 095

 摘要 095

 6.1 引言 095

 6.2 神经网络模型的算法和体系结构 096

 6.3 训练和验证 097

 6.4 预测结果与讨论 099

 6.4.1 刀具磨损 101

 6.4.2 比切削力 102

 6.5 结论 102

 参考文献 102

第 7 章 木质复合材料中密度纤维板钻削的分层分析 104

 摘要 104

 7.1 引言 104

 7.2 试验内容 105

 7.3 结果与分析 107

 7.3.1 响应曲面分析 109

 7.3.2 加工参数效应分析 112

 7.4 结论 115

 参考文献 115

第 8 章 复合材料制孔的最新进展 118

摘要 118

8.1 复合材料介绍 118

8.2 复合材料制孔 121

8.2.1 钻削加工过程 122

8.2.2 断裂机制 123

8.2.3 钻削损伤 124

8.2.4 刀具材料和几何参数 126

8.2.5 其他选择措施 128

8.2.6 关于复合材料钻削工艺的一些见解 130

8.3 方法论 131

8.3.1 解析法 131

8.3.2 基于有限元分析的数值法 137

8.3.3 试验法 140

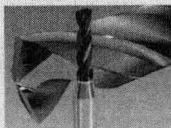
8.3.4 复合材料制孔方法展望 142

8.4 结论 142

致谢 143

参考文献 144

名词术语中英文对照 149



复合材料钻削分层对策

H.Hocheng^{*a} and C.C.Tsao^b

^aDepartment of Power Mechanical Engineering,
National Tsing Hua University, Hsinchu 30013, Taiwan

^bDepartment of Automatic Engineering,
Ta Hua Institute of Technology, Hsinchu 30740, Taiwan

摘要

在纤维增强复合材料钻削过程中,分层是最重要的问题之一。出于结构连接的需要,钻削仍然是二次机械加工中最常用的制孔方式。然而,大小不一的分层时常发生,将影响复合材料结构的长期稳定性。本章综合分析了不同钻削条件下的分层现象,对分层开始时的临界推力进行了理论预测,并与麻花钻制孔时的情况作了对比;对一些工业上常用的特殊钻头(例如烛芯钻、锯钻、套料钻和阶梯钻等)所为人熟知的优势作了原理性分析和阐述;此外,本章还针对不同钻头,分析了导向孔、钻头偏心距、刀具磨损以及出口支撑对分层的影响;最后,基于所建立的模型制定了钻头设计规范,可将其应用于各类钻头的性能检测和未来钻头的创新设计中。

由于采用传统的视觉方法难以检测到分层,因此针对复合材料钻削引起的分层损伤进行评估是十分困难的,尤其是碳纤维复合材料。基于这种情况,本章提出了一种医学上广泛采用的计算机断层扫描技术(CT),通过将其与超声波检测技术作对比发现,计算机断层扫描技术是一种行之有效的复合材料制孔分层评估方法。本章针对不同钻头进行了大量的复合材料制孔试验,并采用 CT 对钻削分层进行了测量评估。试验结果表明,CT 可以很好的帮助阐明推力与钻削分层之间的关系。

1.1 引言

1.1.1 研究背景

纤维增强复合材料(FRP),例如碳纤维增强复合材料(CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP),以其高比硬度、高比强度、高阻尼、高抗腐蚀性和低热膨胀系数

等诸多优点,已被广泛应用于航空、国防和交通运输结构件以及体育休闲用品中。近年来,随着石油价格飞涨,关于交通运输行业中的节能问题备受关注。波音公司已经宣布,在梦想 787 客机主要结构件中,将采用 50% 以上的复合材料制造,包括机身和机翼。作为大型喷气运输机,787 相比于其他同大小的任何飞机节约 20% 以上的燃油,因而带来极大的经济效益^[1]。另外,与竞争型航空材料铝合金相比,复合材料耐用性更长,维护减少,未来发展潜力更强。在复合材料结构中,可以内嵌传感器,以获得和检测结构的健康状况,有助于维护规划。

由于 FRP 具有各向相异性和异质性,在制孔过程中会遇到一些其他材料不会出现的问题,例如分层、毛刺、吸水膨胀、分解和纤维拔出等。另一方面,FRP 结构和其他材料连接时常采用螺栓,连接有效性取决于孔的加工质量。目前,已有一些非传统的制孔工艺,例如激光制孔、水射流制孔(含有或者不含磨料)、超声波钻削、电火花加工(EDM)等,在某些场合可作为传统 FRP 钻削制孔工艺的替代者。但是,采用麻花钻的传统钻削方法,仍然是工业中最常用、最快捷、经济的制孔方式。麻花钻切削刃的几何角度和切削速度不是恒定的,它会沿着切削刃发生变化。一般来说,钻头的旋转和进给运动,使切削刃与工件之间产生相对运动而形成切屑。各个切削刃的切削速度与离旋转中心轴的距离成正比例关系。切削刃上各个点的切削效率不同,钻头外缘处的切削效率最高,中心处的切削效率最低,钻尖中心的切削速度为零,并没有发生切削行为。横刃会随着钻尖钻穿工件,将工件材料从中心向两边推开。在复合材料的实际钻削中,会使用各种各样的钻头,例如锯钻、烛芯钻、套料钻和阶梯钻等。

1.1.2 文献综述

在复合材料层压板钻削过程中,最重要的阶段发生在钻孔入口和出口附近,由于存在的剥离和推出效应,在这两个位置容易发生分层,导致大范围损伤。其中,由于钻头推力造成的分层损伤是钻削过程最主要的难题之一。通常认为存在一个“临界推力”,当钻削推力值小于临界推力时,不会发生分层损伤^[2]。许多文献指出,纤维增强复合材料钻削加工表面质量主要取决于钻头的几何形状、刀具材质以及钻削加工参数^[3-23]。文献[24]早在 1967 年就已经发现,在钻削的最后阶段,进给率的迅速增大会造成钻孔出口部位周围出现裂纹,而且进给载荷越大,裂纹越严重。文献[25]和[26]研究了分层的形成、扩展过程和检测,新型刀具设计以及切削加工条件对分层损伤的影响等。Friedrich 提出的扁钻和 S 钻钻尖,在航空以及汽车行业中很受欢迎^[27]。Haggerty 和 Ernst 研究发现,“螺旋状”钻尖钻头比传统钻头的钻削效果好很多^[28]。Wu 采用多面钻来减小钻削推力^[29]。Doerr 设计的钻头面向孔中心切削材料,同时在孔边缘进行剪切^[30],这样可以大大减少孔壁上的短纤维和拉毛现象,而传统刀具在孔中央进行切削,形成的切屑会挤压孔壁,造成孔

壁拉毛现象。文献[5]、[31]和[33]中探讨了刀具磨损及其所带来的钻削推力增加。文献[34]针对复合材料钻削过程中减少分层的各种可行方法进行了综述。

一般来讲,钻头的钻削推力会使板层之间产生层间应力。当钻孔边缘的局部压应力超过基体的层间结合强度时,就会形成裂纹,并逐步扩展。考虑到影响复合材料层压板结构完整性的相关因素,钻削加工时的边缘分层会导致复合材料构件承载能力剧烈下降。钻削加工引起的分层现象在工件的入口侧和出口侧都可能会发生。研究人员采用理论分析与试验相结合的方法,研究发现钻削分层与钻头钻出时的推力有关。Hocheng 和 Dharan 建立了第一个用于确定钻头临界推力的解析模型^[35],他们应用线弹性断裂力学(LEFM)方法对临界推力进行了求解,这个临界推力将复合材料层压板的分层与钻削加工参数、复合材料特性联系起来。Jain 和 Yang 将复合材料的各向异性考虑在内,对上述理论进行了扩展^[8-9],建立了一个将进给率与分层相关联的模型^[8]。Everstine 和 Rogers 基于连续介质力学方法建立了一个解析模型,用于预测平行纤维在 0° 取向时的最小切削力^[36]。Sadat 通过有限元分析,对石墨纤维/树脂复合材料钻削加工中发生分层时的切削负载进行了预测^[37]。Zhang 提出了一个通用的合成矢量力学模型,用于预测不同板层位置发生分层时的临界推力^[38]。综上所述,以上研究都是将钻削推力简化为单一集中载荷,很少探讨麻花钻以外其他各类钻头几何形状对分层的影响。因此,针对各类不同几何形状钻头进行临界推力理论分析,可以进一步提高对有关复合材料钻削分层现象的认识水平。

1.2 基于钻削推力的分层模型

在复合材料层压板钻削过程中,随着钻头接近出口平面,承受钻削推力的未切削层厚度会逐渐减小,最底层将开始沿钻孔边缘与层间粘结剂分离。当某个点的负荷超过层间结合强度时,就会发生分层。文献[6]通过制孔试验收集机械加工数据的方式,对不同刀具、不同材料和不同加工参数条件下的分层进行了分析。但考虑到时间和成本因素,建立一个与材料特性和加工参数相关联、可用于预测分层开始的模型,将具有十分重要的意义^[39]。

图 1-1 为复合材料钻削示意图,图中描述了复合材料钻削模型。在分层扩展的过程中,钻头位移 dX 与钻削推力 F_A 所做的功有关, F_A 会导致板层发生弯曲使层间裂纹扩展。

能量平衡方程为

$$G_{IC}dA = F_A dX - dU \quad (1-1)$$

式中: dU 表示应变能的微分; dA 表示分层裂纹面积的增量; G_{IC} 表示模式 I 中单位

面积上的临界裂纹扩展能量。

Saghizadeh 和 Dhahran 假定 G_{IC} 值为应变率的一个函数常量^[40]。断裂力学适用于传统的各向同性材料,这在早期的文献中已得到证明^[41]。

图 1-2 为用于分析麻花钻制孔分层的圆板模型示意图。从图中可以看出,半径为 c ^① 的麻花钻在圆板中心施加载荷。图中 F_A 表示推力, X 表示位移, H 表示工件厚度, h 表示刀具下方的未切削层厚度, a 表示分层半径。

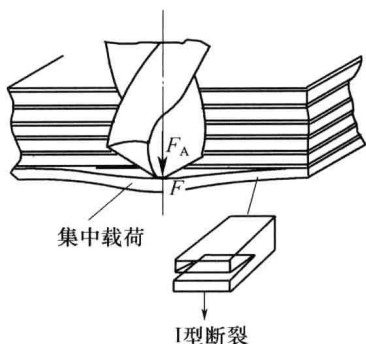


图 1-1 复合材料钻削示意图

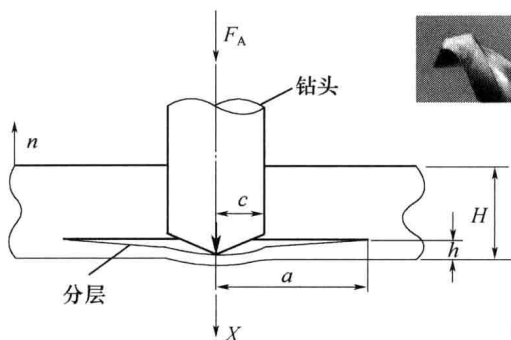


图 1-2 用于分层分析的圆板模型(麻花钻)

在本模型中,假设层压板为纯弯曲且各向同性。在式(1-1)中,注意到

$$dA = \pi(a + da)(a + da) - \pi a^2 = 2\pi a da \quad (1-2)$$

对于承受集中载荷且底部已被夹紧的圆板,储存的应变能 U 在文献[42]已有阐述,为

$$U = \frac{8\pi M X^2}{a^2} \quad (1-3)$$

式中: M 为纤维增强复合材料单位宽度上的刚度,表示为

$$M = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1-4)$$

式中: E 表示杨氏模量; ν 表示材料的泊松比;位移 X 在文献[42]中已有阐述,为

$$X = \frac{F_A a^2}{16\pi M} \quad (1-5)$$

这样可以计算出裂纹开始扩展时的钻削推力^[35],为

$$F_A = \pi \sqrt{32 G_{IC} M} = \pi \left[\frac{8 G_{IC} E h^3}{3(1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (1-6)$$

为了避免钻削分层,所施加的推力不应超过这个值,该值是材料特性和未变形

① 原书中为直径 d 。

切削层厚度的函数,它与进给率密切相关。因此,解决分层的办法就是在钻削开始阶段以尽可能快的速度进行钻削。当钻头接近钻孔出口时,随着未切削层厚度逐渐减小,逐步降低进给率。图 1-3 为钻削推力与无量纲孔深的关系图^[35]。

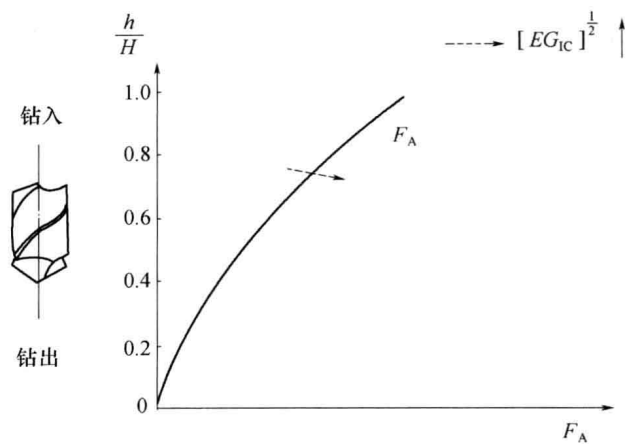


图 1-3 钻削推力与无量纲孔深的关系图^[35]

1.3 钻头几何形状的影响

1.3.1 钻头基本形式

1. 锯钻^[18]

图 1-4 为用于分析锯钻制孔分层的圆板模型示意图,其中 c 表示锯钻的半径。采用锯钻钻削复合材料层压板时,可以得到较好的加工质量,原因之一就是锯钻钻削复合材料层压板时推力被分配在钻头圆周。

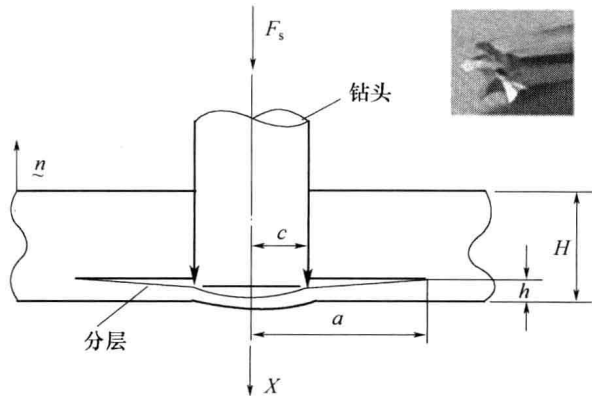


图 1-4 用于分层分析的圆板模型(锯钻)