浅析孔挤压强化技术研究

孙阔

(航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 黑龙江 哈尔滨 150066)

摘要:飞机是现代社会人们出行的重要方式。在飞机中,结构间需要进行连接。由于孔边的结构引力集中现象较为严重,主要的方式有螺接和铆接。飞机的孔结构本身,在长时间运行时非常容易产生断裂,进而为飞机的运行带来诸多的安全隐患。为了保障飞机飞行的安全性,需要提高孔的疲劳强度,这一过程需要通过诸多的技术来实现。最为常用的是孔挤压技术。本文首先从孔挤压强化技术基本概况和使用的技术出发,分析该技术的发展现状、抗疲劳强化的基本原理、工艺的影响因素、最后分析该技术的未来研究方向。

关键词:飞机结构;孔挤压;抗疲劳强化;技术研究;技术展望

0 引言

当下,飞机主要通过两种方法进行连接,分别是螺接和铆接。但在进行这两种连接方式时,存在着诸多的问题。首先,螺栓孔、铆接孔等会导致一些材料出现不连续的现象。其次,孔边的结构应力集中,会导致由于疲劳而产生的断裂现象,进而造成孔结构的失效,严重的甚至会造成难以预料的安全事故。当下直接影响飞机疲劳可靠性的便是连接孔,飞机的结构件出现失效的主要原因便在于连接孔的疲劳断裂。为了更好地解决这一问题,相关科研人员尝试过许多方法,其中最为可行和高效的便是孔挤压技术。孔挤压技术是一种强化手段,可以提高紧固孔疲劳,和当下的飞机设计理念相得益彰,还不会对飞机的结构产生破坏,是一种十分高效的解决方法。

1 抗疲劳制造技术发展历程和孔挤压的优势

1.1 早期抗疲劳制造技术的基本情况分析

为了解决航空材料孔疲劳的现象,科研人员研发了多种抗疲劳制造技术,早期主要有喷丸、感应淬火等。喷丸技术出现得较早,主要利用的是高压气流在孔壁上进行丸子粒的喷射,这时残余的压应力便会被引到孔壁上,疲劳裂纹产生的概率也会被大幅缩减。但是喷丸技术本身也存在着弊端。最为突出的一点是孔壁表面的粗糙度会增大。当表面的粗糙度增大以后,会大幅削减喷丸的强化作用。

感应淬火技术也在早期得到了广泛使用。这项技术 属于是物理表面强化,利用的原理是电磁感应原理。金 属的表面首先产生感应电流,一般密度都较高,接着会 对金属进行加热,一直达到奥氏体化状态为止,接着又 会经历快速冷却的状态,进而得到马氏体组织。但是这 项技术受到各类效应的影响,难以发挥出其优势。

1.2 激光冲击技术

激光冲击技术相对于早期的喷丸和感应淬火技术有了很大程度的改善和创新,是一种高能束表面强化技术。这项技术主要是通过强激光进行冲击波的诱导,进而达到强化金属表面机械性能的作用。这项技术定位较为准确,容易进行高效的控制,造成的污染也微乎其微。但这项技术仍然需要进行进一步的改善,主要在于激光冲击表面强化时使用的工艺会影响到疲劳增益,还会导致薄壁件弯曲等。

1.3 孔挤压技术基本概况和优势

在早期各种技术和激光冲击技术的基础上,科学家不断进行技术上的完善,又尝试了更为便捷的孔挤压技术。这项技术在当下,不论是国内还是国外,都受到了广泛的好评,也得到了最广泛的实践应用。这项技术的基本原理是把芯棒挤进连接孔,导致孔壁里的许多材料出现形变现象,在一系列的操作下可以使连接孔的疲劳强度获得一定程度的提高,除此以外,还可以提高孔壁的抗应力腐蚀等性能,大幅度提高紧固孔疲劳寿命。在实现以上效果的基础上,还不会对飞机本身的质量和材料、结构设计进行任何的破坏,同时成本较为低廉,可应用的孔径范围也相对较大。

2 孔挤压技术的发展现状

2.1 直接芯棒挤压

这一类型的孔挤压技术出现的最早,大约是 20 世纪的 50 年代前后。该技术的主要原理是将残余压应力引入到孔壁中去,进而使得连接孔的疲劳强度得以提升。在使用这项技术的过程中,存在着挤压过程轴向摩擦力过大的问题,会导致材料流向挤出端,并最终在这里堆积,需要利用砂纸进行打磨。除此以外,轴向容易划伤孔壁,需要进行划伤的消除。但这项技术本身操作的流程相对简单,容易进行制造和维修。

2.2 开缝衬套挤压

直接芯棒挤压的最大特点是操作工艺简单, 便于维 修和制造,但其自身存在着一定的局限性。为了克服这 些局限性, 科研工作者又进一步开发制造了开缝衬套挤 压。这项技术开始投入使用的时间大约是20世纪70年 代。这项技术主要的工作原理相较于直接芯棒挤压更加 复杂,需要在孔壁和芯棒之间进行衬套的预设,衬套需 要沿轴向有开缝。接着需要利用好芯棒,让其挤压衬套, 然后会发生弹性形变,形变的过程使得向四周的张力不 断扩大,进一步使孔壁的材料产生塑性形变。在这一过 程中, 芯棒和孔壁之间没有直接接触, 也不会产生过度 摩擦,可以有效规避孔壁轴向划伤现象的出现,同时还 可以方便孔壁材料进行径向扩张, 抑制材料流向挤出点, 使得孔挤压的效果更为明显。除此以外, 该项技术还可 以让孔挤压技术获得多维度的便利,其中十分值得一提 的是,它可以让这项工艺实现单边的操作,原本空间结 构对孔挤压的限制得到了一定程度的缩小, 更加方便地 应用于生产活动中。但这项技术本身仍然有一些弊端。 首先,在开缝的过程中容易在孔壁残留凸脊,会留下残 余的拉应力。其次,衬套提倡一次性使用,制作过程中 具有较高的难度系数,成本也比较昂贵。

2.3 球挤压

球挤压技术是在前两种技术的基础上发展并不断成熟的。球挤压技术主要利用的工具是一个钢球,钢球的直径需要相对大一点。在钢球和孔壁接触时,平面是一个较为窄小的圆环。由于接触面积较小,使得球挤压过程中的摩擦力也很小,会克服掉前两种技术的许多弊端。但这项技术很容易出现实施不当的问题,当这一问题出现以后,会进一步导致残余拉应力的产生,进而使得强化效果得到一定程度的削弱。科研工作者也发现了这一问题,后来又将球挤压发展成了正反双球挤压,弥补了原本球挤压技术上的一些不足。正反球挤压,顾名思义是使用两个球从正反两个方向分别进行挤压,这种方式更容易获得预期的挤压效果。

3 孔挤压抗疲劳强化机理

3.1 应力强化

在学术研究谈论的过程中,通常认为提高连接孔疲 劳强度的主要动力来自于残余的

压应力。残余的压应力在分布上有着明显的特征,通常来说区域比较大。同时峰值也相对较高,峰值一般都出现在孔壁的次表面。最主要的原因在于,完成挤压过程以后,表层的材料会出现反向屈服的现象,这一现象由残余的压应力诱导作用而形成。但是周边的残余应压力本身却不会对孔边的应力幅产生影响,只会提高实际的平均应力,使得疲劳裂纹产生的周期变长,裂纹产

生以后存活的时间也随之变长。除此以外,当残余压应力的力场深度不断增大时,还可以让疲劳裂纹的面积得到一定程度的扩展,并延长扩展阶段的寿命。但在进行应力强化的过程中,也存在着诸多的瓶颈。最为重要的一点便是挤入端残余压应力有限,需要进行优质力场的选取。

3.2 组织强化

在孔挤压的过程中,会对孔壁材料产生无形的影响。 最为显著的便是对其微观结构的影响,常见的有位错密 度的增加和位错缠结的产生等。这些变化的产生通常会 为整个过程带来便利,晶体的移动会受到一定程度的限 制,可以更好地进行抗疲劳的处理。在材料不同的情况 下,抗疲劳强化的基本原理也是呈现不同的状态。值得 关注的是,目前关于抗疲劳机理的研究仍然片面地停留 在残余压应力方面,在其他的细节处,尤其是微观结构 方面的的还比较欠缺。

3.3 孔挤压疲劳寿命增益来源及分配

孔挤压的疲劳增益主要来源于两方面,首先是裂纹的增生,然后是增生的裂纹进行拓展,两方面共同造成并加深了孔挤压的疲劳寿命增益。在相关的实践研究中还发现,疲劳寿命的增益来源和分配,由于在孔挤压过程中存在着工艺上的不同,常常难以得出较为中肯的结果。同时,研究假设的不同也会进一步导致最终的结论产生矛盾与分歧。

4 孔挤压工艺影响因素

4.1 挤压量

在挤压技术的所有关键参量中,挤压量是十分重要的一个。挤压量和残余应压力在一定范围内是成正相关的,随着挤压量的变小,残余的压应力也会变小,最终导致强化的效果被削弱。而随着挤压量的增大,也会出现诸多的问题,这时便需要更大的外力进行挤压过程的相关操作,难度系数较大,成本耗费也会更高,同时容易导致孔壁出现损伤,最终同样会导致强化效果被削弱。挤压量本身,也受到诸多因素的影响,主要有孔的材料、孔的深度以及孔之间的距离等。除此以外,叠层结构连接孔存在着一定的特殊性,需要格外加以关注。

4.2 孔深径比

孔深径比也是孔挤压技术中的一个重要指标,主要指的是孔深度和终孔直径的比值。孔挤压技术在强化实施的过程中,随着深径比的增大,难度也会不断增加。在正常状态下,深径比需要控制在一个较小的数值范围内,一般来说不能超过5。除了深径比之外,孔径和孔深可以作为影响孔挤压工艺流程的单独元素。孔径与最佳挤压量息息相关,孔深和最佳挤压量在其他条件不变的情况下基本呈现反比的关系。

4.3 孔结构材料

孔挤压的强化,大多使用金属材料。应变硬化材料会促使残余压应力场延展,而进一步使得疲劳寿命延长。通过大量的实践研究发现,在孔挤压的作用下,韧性较好的材料可以获得过多的疲劳增益。材料本身会影响到整个工艺流程,而起决定性作用的,便是材料的微观结构。

4.4 孔初始几何模型

孔初始的几何模型,也会在一定程度上对孔挤压的基本工艺流程产生影响。通过相关的实验研究发现,初孔的几何模型结构,主要是影响残余应力场的基本特征,然后初孔会经历预制倒三角的过程,完成以后便开始孔挤压的具体流程,最终可以获得较为良好的疲劳增益。但是在整个过程中,对倒角的尺寸和角度都有着较为细致的要求。

4.5 挤压速度

挤压速度是孔挤压工艺中一个十分重要的元素,一般指的是芯棒经过连接孔的速度。在试验过程中,采用了有限元分析技术,最终发现挤压速度会直接影响到孔挤压的实施过程。除此以外,挤压速度也会进一步对后续的强化产生干扰。经过详细严谨的数据分析可以发现,挤压速度和实施强化的效果一般是呈现正比关系,也就是在试验的过程中要尽可能地提高挤压的速度。

5 孔挤压技术的发展方向

在未来,孔挤压技术还会有更多更深入的发展。首 先,研究的方向将不再局限于金属

材料,许多复合材料也还会囊括在内,一些复杂的结构也会参与到整个工艺中去。在分析抗疲劳强化机理的过程中,也不再仅仅依靠残余的压应力,而是会综合考量残余压应力和微观结构。孔挤压技术和工艺将得到更大程度的创新,可以引入沿厚度方向均匀分布,减少残余压应力对提高连接孔疲劳强度的阻碍。当下,有许多因素都会对孔挤压疲劳增益产生阻碍,未来会对这些因素进行研讨并弱化其阻碍作用,找出更为详细的影响因素。在研究方面,将会更加关注疲劳裂纹萌生和扩展的问题探究,找到两者之间的联系和权重关系。依据这些关系,进一步构建连接孔疲劳寿命预测的相关模型。除此以外,还会解决老龄飞机剩余疲劳强度不足、结构

修理连接孔处理等一系列衍生问题。同时研究更先进高效的技术,并完善相关的附件,加快国内生产衬套的效率,减少工艺过程中的各种限制,更好地完成整项工艺流程。

6 结语

孔挤压技术的发展也经历了几个阶段,同时也有诸多的分类,最主要的几个类别是直接芯棒挤压、球挤压、开缝衬套挤压。孔挤压工艺会受到诸多因素的影响,其中对其影响较大的几个因素分别是挤压量、材料、芯棒几何结构、孔结构材料、挤压速度等,需要在操作的过程中加以控制。最后,孔挤压技术在未来会不断走向成熟,并孕育着新的发展趋势,拥有着无限的潜力。

参考文献:

- [1] 王燕礼,朱有利,曹强,等. 孔挤压强化技术研究 进展与展望 [J]. 航空学报,2018,39(2):17.
- [2] 贾忠宁,韩苏征,胡忠会. 孔冷挤压强化疲劳增寿技术研究[J]. 制造业自动化,2017(12):4.
- [3] 王亮,汝继刚,李惠曲,等. 孔挤压强化工艺对7A12 铝合金组织及疲劳性能影响的研究[J]. 新技术新工艺,2014(011):14-17.
- [4] 杨兴宇,董立伟,郑小梅,等.某压气机轮盘均压孔挤压强化数值仿真和挤压头设计[J]. 航空动力学报,2013(8):8.
- [5] 王朝蜀. 内孔挤压强化板的弹塑性分析 [J]. 中国科学技术大学学报,1990,20(4):6.
- [6] 胡殿印,李雯竹,刘辉,潘锦超,王荣桥.GH4169 孔挤压强化工艺过程数值模拟[J]. 航空动力学报,2020,35(11):7.
- [7] 胡殿印,王荣桥,丁楠,等.一种涡轮盘孔挤压强化工艺三维数值仿真模拟方法: CN109033554A[P],2018.
- [8] 侯帅,朱有利 王燕礼,等. 孔冷挤压强化工艺的有限元分析及应用 [C]. 第七届全国机械工程博士论坛论文集,2015.

作者简介: 孙阔(1989.04-), 男,汉族,黑龙江哈尔滨人,本科,工程师,研究方向:机械加工技术。