

前不久,国外一架民航客机在万米高空飞行时,发动机突然发生爆裂,部件碎片击穿客机舷窗,导致飞机瞬间失压。事后,有关部门调查称,事故原因是发动机风扇叶片发生断裂。

叶片是将燃料内能转化为飞机飞行动能的关键零部件,加工难度大、质量要求高。叶片一旦发生断裂,将对发动机内部造成连环破坏,给飞机带来致命损伤。

无论是过去的活塞发动机,还是现在的涡轮风扇发动机,都

是通过叶片对空气压缩做功,利用空气反作用力,为飞机提供飞行动能。从螺旋桨叶片,到风扇叶片、压气机叶片、涡轮叶片,航空发动机叶片历经多次更新迭代,变得质量更轻、强度更高、更耐高温。

叶片制造工艺每一次革新进步,都在推动着航空发动机性能不断跃升。看似小巧的“身板”,承载着人类孜孜以求的飞天梦,也是国家军事航空业发展壮大必须要迈过的一道“门槛”。

## 成都航宇公司总工程师宋扬、空军某航修厂专业工程师侯廷红为您解读航空发动机叶片的奥秘——

# 小小叶片如何驱动战机飞行

■邓杰文 罗娟

### 军工科普

#### “小身板”能量大,处处尽显“科技范”

现代战机多采用涡扇发动机。涡扇发动机前端的风扇吸入空气后,一部分空气进入发动机核心(也称内涵道),与燃料混合燃烧后排出;另一部分空气进入环绕发动机核心的外涵道,不进行燃烧,从涡轮发动机外壳向外喷出,形成推动飞机飞行的动能。

打开整流罩外壳,观察发动机内部,我们发现发动机叶片竟如此普通:不仅“长相一般”,身材也略显“矮小”。从前至后,一排排风扇叶片、压气机叶片、涡轮叶片错落排列。叶片排数与级数相同,排数越多、级数越大。

风扇叶片是“三兄弟”中的“高个子”,位于军用涡扇发动机最前端。为了适应超音速飞行,战机正面风阻面积不宜过大,风扇叶片尺寸设计有一定限制。因此,军用涡扇发动机风扇通常有多级叶片,确保产生足够的推力。

此外,风扇叶片的外形和内部结构,也是影响风扇对空气做功效率的重要因素。风扇叶片经历了窄弦实心叶片、宽弦空心叶片、复合材料叶片和整体叶盘的发展历程。由英国罗尔斯罗伊斯公司研发的EJ200涡扇发动机,采用了整体叶盘结构。

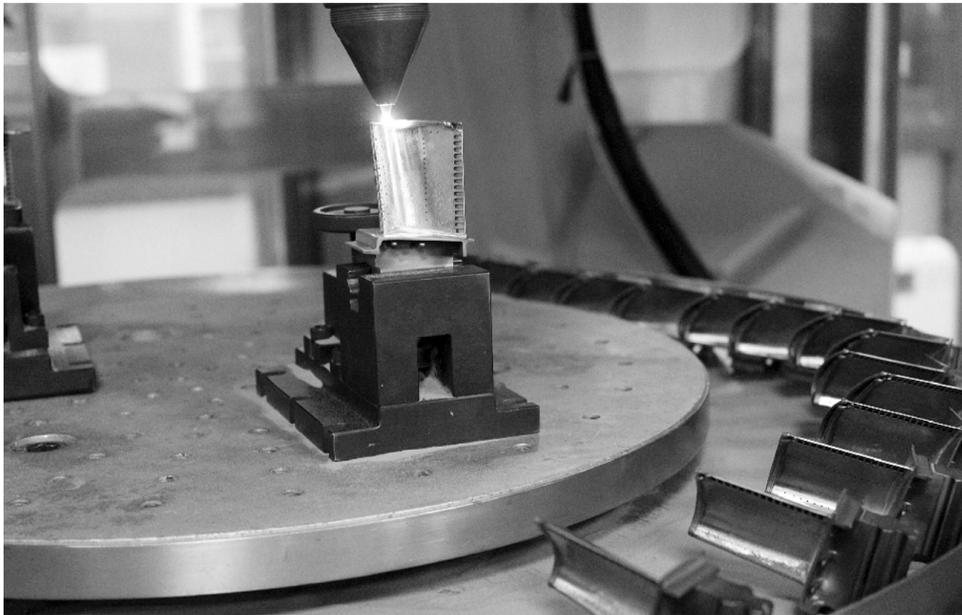
与传统分体式叶片和轮盘相比,整体叶盘将叶片和轮盘设计省去了传统连接所需的榫头、榫槽和锁紧装置,减少了零件数量,简化了发动机结构,同时采用新的宽弦、弯掠叶片和窄流道,进一步提高了气动效率。

空气经过风扇初步压缩后,进入压气机继续加热加压。压气机叶片在“三兄弟”中最为“纤细”。叶片经过精密锻造、磨削抛光、表面强化等技术加工,被制成实心结构。为了获得更高的增压比、产生更大推力,空气通常需要经过多级压气机叶片压缩。

在EJ200发动机上,五级高压压气机转子采用整体叶盘结构。这一设计使压气机转子结构进一步简化,发动机重量减少30%以上。

压气机形成的高温高压气体与燃料混合,燃烧生成高温高压燃气,推动涡轮转动做功。涡轮叶片在“三兄弟”中堪称“八面玲珑”,面对高温、高压、腐蚀、磨损和复杂载荷等各种恶劣工况仍能应自如,而这一切都与它的“硬核”设计密不可分。

涡扇发动机的涡轮前温度非常高。如今,大多数涡轮叶片材料使用耐高温性强的镍基单晶高温合金。除了单晶高温合金,涡轮叶片上还应用了气冷空心结构和陶瓷热障涂层,既为叶片外部披上“防护服”,更在其内部装上“天然空调”,叶片的高温防护能力明显增强。各项新材料、新技术、新工艺不断投入应用,使得叶片小小的“身板”里满满都是“科技范”。



#### 战机的战力首先取决于发动机的推力,而推力则取决于涡轮叶片的耐高温能力

说起来颇有些传奇色彩,早期飞机上使用的螺旋桨,竟源自一次船舶航行试验的意外成果。

1837年,英国造船工程师史密斯等人驾驶“阿基米德”号蒸汽船展开航行试验。途中,螺旋推进器在碰到水中障碍物后发生断裂。尽管推进器只剩下一小截,但船的航行速度却比原来提高了一倍多。工程师们从中受到启发,发明了螺旋桨的雏形。直到1903年,“飞行者一号”试飞成功,螺旋桨才正式在飞机上应用。

最早的飞机螺旋桨采用木质双叶结构,像儿时玩具“竹蜻蜓”。这种螺旋桨结构在一战时期的战机上较为多见,英国“骆驼”式战机就是其中代表。当时,战机发动机功率较小,木质双叶螺旋桨已经完全可以满足其全部动力。

随着发动机功率不断提升,木质双叶结构难以适应飞机高速飞行的要求,增加螺旋桨桨叶数成为适应发动机功率、提高螺旋桨推力的常用方法。

进入喷气时代,螺旋桨桨叶逐渐退出历史舞台,取而代之的是集各种高科技于一身的涡轮叶片。

军用涡扇发动机的涡轮前温度,对发动机性能有着直接影响。高压涡轮进口温度每提升100℃,发动机推力提升10%。因此,涡轮叶片的耐高温能力越强,越有利于提升发动机性能。

上世纪40年代,科学家成功研制出第一块耐超高温合金,并应用到第一代军用涡扇发动机的涡轮叶片上。随后,涡轮叶片经历了两次重大变革:一是上世纪50年代出现的真空熔模铸造技术,能够大幅减少叶片有害杂质含量;二是上世纪60年代兴起的定向凝固合金技术,

使叶片的热疲劳性能得到明显提升。研究人员将定向凝固高温合金与简单的气冷技术结合,打造出第二代军用涡扇发动机的涡轮叶片。

20世纪70年代末,叶片制造工艺取得革命性突破,第一代单晶高温合金叶片正式问世。单晶高温合金叶片与单通道气膜冷却技术相结合,综合运用到第三代军用涡扇发动机的涡轮叶片上,涡轮前温度又一次得到大幅提升。

目前,新一代单晶高温合金和新型陶瓷基复合材料相继问世,多通道双层空心壁冷却技术也日趋成熟。涡轮叶片材料结构和制造工艺的变化,让战机飞行性能变得更加强大。

#### 叶片快速修复,像壁虎长出“尾巴”

战机高速飞行时,发动机叶片的工作条件是什么样的呢?

以罗尔斯罗伊斯公司研发的RB211涡扇发动机为例,风扇叶片绕轴旋转时,巨大的离心载荷相当于一辆M1A1主战坦克的重量。除离心载荷外,风扇叶片还要面对气动载荷、交变负荷,以及飞鸟、砂石等外物的“不期之遇”。

而涡轮叶片作为第一关键部件,要面对1000℃以上腐蚀燃气的正面冲击,还要抵挡来自燃气杂质的腐蚀。在这样恶劣条件下,涡轮叶片难保“金刚不坏之身”,出现裂纹、磨损、性能下降等情况在所难免。以国内某型发动机为例,全台发动机有2000多个叶片,如果磨损后一更换,其费用接近发动机整机采购价的2/3。另外,叶片制造加工难度大、质量要求高,其备件供应周期难以保证,无法满足发动机的维修保障需求。

那么,能否像壁虎重新长出“尾巴”,帮助发动机叶片实现“快速再生”?

航空发动机零部件再制造技术应运而生。该技术涵盖表面处理、增材制

造、焊接、热处理、涂层加工等多项先进工艺。经过再制造技术修复的磨损零部件,质量不低于新品。在国外,这一技术很早就已经被应用到发动机的叶片修复上。

每片叶片都有自己的“身份证”,诞生之初就会被打上标签。叶片每次磨损情况都将记入“病历档案”,并进行存档。“挂号”登记完毕后,接下来叶片将被推进“手术室”。一台“手术”大体分为以下3步:

第一步前期处理。对表面有保护涂层的叶片采用物理和化学方法进行去除,随后对叶片进行“全面体检”,发现“病灶”后,开展去除裂纹表面氧化膜、制备焊接坡口等“清理创口”工作。

第二步正式“手术”。应用焊接、钎焊、冷/热喷涂、增材制造等工艺方法,对叶片型面损伤的地方进行填补,再利用磨抛或机械加工等方法去除多余材料。

第三步后期处理。尽管叶片已“重获新生”,但仍需要接受多次“复检”,确保修复完成后不会出现二次损伤。随后,还要恢复叶片表面的“保护外套”,疏通堵塞的“呼吸通道”,调理表面的“健康状态”,方能领取质量合格证。

目前,不少国外公司在叶片修复技术上有着丰富的技术底蕴。例如,德国MTU公司与汉诺威激光研究中心应用激光立体成形制造技术来修复涡轮叶片。在国内,空军某航修厂经过10余年的努力探索,提出了发动机多型部件故障的解决方案,先后突破了一系列关键核心技术。

经过修复技术“治疗”,叶片能够像壁虎长出“尾巴”一样,在原有基础上实现“快速再生”,不仅使发动机维修周期明显缩短,而且为战机平安起降提供有力保障。

上图:航修厂技术人员采用激光增材技术修复叶片。

罗九龙摄



走进中国工业博物馆,一组志愿官兵挖战壕的群雕塑像映入眼帘,官兵们手中挥舞的军镐正是沈阳重型机器厂生产的。在那个艰苦卓绝的年代,老一辈工人创下了“19天生产10万把军镐”的纪录。抗美援朝战争,敌我实力差距悬殊,为保存我方有生力量,志愿军在前线广泛开展“坑道战”。当时,正值隆冬,皑皑白雪覆盖坚硬土石,志愿军官兵修筑坑道,急需一大批军镐。

### 沈阳重型机器厂——

# “19天生产10万把军镐”

■王欣 王旭

那时候,新中国百业待兴,钢材资源匮乏,生产技术落后。在这种艰苦条件下,沈阳重型机器厂毅然受领了制造军镐的艰巨任务。工厂发动工人拾捡废弃钢铁集中炼钢,老百姓纷纷捐出家中废旧钢材支援工厂。大家齐心协力,材料问题得以解决。

按照过去制造工艺,工厂无法按期完成10万军镐的生产任务,如何提高生产效率成为摆在工人们面前的难题。当时,炼钢车间副主任祁宝仁带领工人们经过一轮轮技术攻关,研究出一套“叠芯串铸”新工艺:采取一个砂箱叠放多层铸模的方式,像“糖葫芦串”似的一次浇铸若干个小型铸钢块,一个模块就是一个铸钢料,这种工艺极大减少了切割和

锻造的工作量,有效提高了浇铸效率。

实际操作过程中,工人们又发现了一个棘手问题。“串铸”工作量极大,由于当时生产能力有限,工厂号召全厂工人投入到铸钢清砂工作中。不仅如此,沈阳市大小工厂也加入其中,大家团结一心、共克时艰。

镐头成型后,他们按照图纸要求,严格把控镐头打磨、碾尖、磨扁、开刃、淬火等一系列环节,确保镐头符合质量标准。工人们昼夜奋战在生产一线,仅用19天便完成了材料准备、工艺创新、制造军镐等任务,集智攻关解决了人力不足、技术改进等诸多难题,最终将10万把军镐如期交付前线部队。

一批批军镐顺利出厂,又源源不断地送往前线。在250余公里的正面和东西海岸以及战役纵深,志愿军构筑了大小坑道总长1250余公里。以坑道为骨干的坚固阵地防御体系为志愿军解决了敌人强大的空中打击下战场生存问题,官兵依靠坑道工事快速进行攻守转换,最终打败了“武装到牙齿”的对手,打破了美军不可战胜的神话。

图为志愿军挖战壕的群雕塑像。

资料照片

### 功勋兵工厂

### 历史钩沉

据记载,明代的抗倭名将戚继光就曾制造过一种名为“钢轮发火”的武器。它类似于现代地雷,战前埋于地下,当敌人踏动机索时,钢轮转动与火石急剧摩擦发火,进而引爆造成敌人伤亡。

在烽火硝烟的抗战时期,地雷战、地道战、麻雀战等敌后游击战,使日本侵略者陷于人民战争的汪洋大海。在斗争中,涌现出了一大批“土地雷专家”,石成玉就是其中一个代表。

巍巍太行,绵绵吕梁;群山叠翠,汾河荡漾。山西省长治市武乡县的八路军太行纪念馆,是远近闻名的红色旅游圣地。

“馆里收藏有八路军总部用过的行军锅、叶成焯团长牺牲时穿过的草鞋等红色文物,还有八路军地雷专家石成玉研制的地雷。”纪念馆宣教部主任田悦慧介绍,石成玉和八路军129师修械所同志研制出多个地雷品种,不仅沉重打击了侵华日军的嚣张气焰,更坚定了中华儿女抵抗日寇的信心,鼓舞了全国军民的抗战士气。

1904年,石成玉出生于河北永年县随家营村的一个农民家庭,8岁时就跟随父亲学习打铁。

“七七事变”后,侵华日军对华北进行疯狂进攻。石成玉目睹了敌人的残暴罪行,他恨透了日本侵略者,但是赤手空拳怎能打败日本侵略者呢?

一个偶然机会,石成玉在河里捞到几颗国民党军队撤退时丢下的手榴弹,因长时间浸泡在水中,手榴弹已无法使用。

石成玉此时表现出自己在弹药方面的过人天赋,他把手榴弹拆开,摸清结构,又买来制造手榴弹的必需品,很快把手榴弹修好了。

为了检验手榴弹的威力,石成玉带着几颗手榴弹,在公路上伏击了一辆日本军车并当场炸死多名敌人。

由于叛徒告密,气急败坏的日军抄了石成玉的家,并扬言:“抓住石成玉就地正法。”

之后,石成玉参加了八路军。根据石成玉的特长,组织将他安排到129师修械所,主要工作是研制地雷和手榴弹。

当时,地雷是一个神秘东西,不要说制造,就连图纸也没见过。不光如此,缺人手、少资金、没材料,这些都是摆在石成玉面前的难题。

按照上级给的简易示意图,石成玉用胶泥捏了地雷的壳体。大家一看,都说跟挂图上的形状差不多。于是,他们开始化铁,用沙子做模具,浇铸成一个20斤重的地雷壳体,再安上

# 八路军地雷专家石成玉

■刘任丰 杨冠鹏

雷管、装上炸药,一试威力真不小。

为了解决原材料不足的问题,石成玉和战友们研制出了用石头做的地雷。这种地雷不含金属,使得日军探雷器无法发现,爆炸后飞溅的碎石同样能产生较大杀伤力。他们把制造地雷的方法编成歌谣:“一块青石蛋,当中钻个眼,装上四两药,安上爆发管,黄土封好口,线子在外边,事先准备好,到处都能安。”

石成玉和战友们在地雷引爆方式上不断创新,先后制造出拉雷、踏雷、绊雷、胶皮雷、头发丝雷、车雷、虚实连环雷等多种“土地雷”,令敌人防不胜防。

曾任侵华日军独混第3旅团独立步兵第6大队代理大队长菊池重雄在日记中有这样的叙述:“(他们的)地雷效力很大。爆炸后,多数人炸得骨折流血,大半数人要被炸死。”

“铁西瓜”遍地开花,炸得日寇心惊胆战。作为中国人民同日本侵略者进行斗争的一种有效战法,地雷战狠狠打击了侵略者的气焰,充分显示了人民战争的巨大威力。

### 官田兵工厂——

# “多造枪支弹药消灭敌人”

■何鑫 袁玮骏

在工业和信息化部公布的第三批国家工业遗产认定名单中,官田兵工厂旧址赫然在列。官田兵工厂坐落于江西省兴国县兴莲乡官田村,是我党我军建立的第一个兵工厂。随着历史档案的逐渐解封,那段可歌可泣的故事也逐渐清晰。

1931年9月,红军以少胜多,取得了第三次“反围剿”的胜利,红军和地方武装发展快速,使得红军对枪支弹药的需求更加急切。如何解决缺少子弹的现状?中央革命军事委员会决定:在原有修械所和修械处的基础上,组建一个规模较大的兵工厂,担负日益繁重的修械和弹药生产任务。

为此,朱德总司令亲自为兵工厂选址。他实地考察发现,官田村房屋依山傍水而建,后山突兀,便于防空,是建设兵工厂的好地方。就这样,官田兵工厂在此诞生。

建立之初,兵工厂只有枪炮科和弹药科,技术力量极为薄弱,干部和工人仅300余人,厂房和设备十分简陋,只有200多把铁刀、100多把老虎钳、4座打铁炉,大部分制造工序需要工人用锉刀和磨子手工完成。在这样的条件下,老一辈工人开始自力更生、艰苦创业。

1932年4月,红军攻克国民党钟绍奎军的巢穴岩前,缴获了敌人兵工厂和造币厂的机器设备,参与运输的战士们心里明白这批设备对兵工厂的重要性,他们向指挥员立下军令状,誓死保护设备安全。

为了躲避敌机侦察,他们昼伏夜出,选择山间小路,采用“肩扛马拉”的方式,历经千辛万苦,才将这来之不易的设备安全运回官田。

随后,工厂发起了“多造枪支弹药消灭敌人”的号召,开展了轰轰烈烈的劳动竞赛。工人们热情高涨、干劲十足。火闭车间工人朱志听创造了日产火闭600个的纪录。在他的影响下,火



闭车间的定额提高到每天400个。

在大家齐心协力下,官田兵工厂迅速发展壮大,从初建时2个部门发展到后来7个部门,从原来300多人发展到上千人,从最初只能修理步枪、机枪和迫击炮发展到能手工试制步枪和造出完全合格的枪械。建厂2年多时间,官田兵工厂共修理步枪4万多支、迫击炮100多门、山炮2门、机枪2000多挺,制造子弹40多万发、手榴弹6万多枚、地雷5000多个。

1933年,兵工厂接到上级命令搬迁至瑞金。当时,红军正准备进行战略转移,兵工厂开足马力,加快生产。第二年10月,红军开始北上长征,除留下100多人坚持打游击外,其余工人分批跟随队伍进行长征。

如今,官田兵工厂已经退出了历史舞台,但它并未消逝在历史的浩瀚烟尘里。官田兵工厂旧址被认定为国家工业遗产,成为全国红色教育示范基地。

上图:官田兵工厂旧址。

资料照片

### 军工档案