



图1 一架飞机有大约 60 m 长的排水管道。若在这些排水管道的内壁滋生了微生物，就意味着要付出高昂的维护保养费用，研发人员试图利用管道内表面的强化滚压来减少微生物的滋生

强化滚压

# 强化滚压工艺 优化薄壁管内表面质量

多特蒙德技术大学的研究人员研发了一套能够处理已完成表面和未完成表面薄壁管的强化滚压试验设备。利用这一试验设备将能为飞机提供一套可靠的供水、排水系统解决方案，它能够减少迄今为止最为常见的飞机供水系统管道内表面生物膜滋生的问题。

文 | Dirk Biermann, Hendrik Abrahams 和 Moritz Fuss

**供**水、排水管道内表面的生物膜滋生在飞机设计中是让人相当头痛的一个问题。微生物的滋生会导致供水管道横截面积的减小。在飞机的排水系统中，尤其是污染程度较重的排水管道中，滋生的微生物附聚在管道内表面会带来诸多不良后果。由于滋生的微生物堵塞了管道，因此经常需要对管道进行清理、疏通，甚至更换管道和管道附件，从而带来大量的停飞检修时间和高昂的

检修费用。在联邦政府“Nemako 新型防腐蚀航空材料”项目的框架内，多特蒙德技术大学的科研人员对材料表面抵抗微生物附聚的性能进行了检测试验。

## 薄壁管强化滚压工艺要求研发合适的试验设备

科研人员除研发合适的管道内表面镀层材料之外，也对管道表面的强化滚压技术进行了试验研究。试验时使用的

管材壁厚只有 0.7 mm 左右。进行强化滚压时，为了能够使用尽可能大的滚压力来进行滚压，首先就要有合适的试验设备。

为了保证能够对不同长度的薄壁管道进行试验，使强化滚压试验设备有着足够高的使用灵活性，试验设备是在 Giana GGB 560 型深孔钻削设备上进行的。这种深孔加工机床可以钻削长达 3 m 的深孔。除了完成常规的深孔钻削

任务之外，这一深孔钻还可以完成深孔的精密加工任务，例如刮削、滚压和强化滚压等精加工任务。

壁厚很薄的飞机管道对这一试验设备提出了很高的要求。为完成试验任务专门设计了薄壁管的装卡模具。薄壁管装卡模具的孔径与薄壁管的外径相同。安装时，薄壁管的端面贴靠在模具凸缘定位孔的底部。为了使强化滚压工具能够对管的总长进行强化滚压加工，模具孔内的定位凸台高度只有 0.5 mm，比管材的壁厚小 0.2 mm。另外，管材装卡护套包裹着需要强化滚压的管材，它防止了管材在很高径向滚压力的作用下产生不受控的扩张。这一防扩张装置由六块带花键槽弧形护块组成，极大地方便了组装和拆卸。

实验过程中，使用了 Ecoroll 股份公司研发生产的几种多滚压头的强化滚压工具。这种滚压工具带有八个滚压头，各个滚压头都由保持架保持其位置不变。滚压头的直径可以在公称直径  $-0.1 \sim +0.4$  mm 的范围内调节。由于被加工管材内径为 49.4 mm，因此所用滚压头的公称直径为 49.5 mm。

带有镀层材料的管材对强化滚压提出了特殊的要求

科研人员对带有镀层材料的管道进行了强化滚压试验，管材的镀层材料对强化滚压工艺过程提出了很高的要求。与不带镀层材料的管材强化滚压相比

较，此时的强化滚压就必须使用管材装卡护套了，只有这样才能防止管材的塑性变形。另外，在选择强化滚压力时也必须保证只有镀层材料本身才会产生塑性变形。

若镀层的基材出现了流动变形，则镀层的附着性能就大打折扣了，有时甚至会导致镀层脱落。出于这一原因，试验时使用的强化滚压头不再是行程调节的强化滚压头了，采用的是滚压力调节的强化滚压头。

强化滚压时，利用潜水泵从油箱中抽取深孔钻冷却油，再用高压泵将这些冷却润滑油喷射到管材中进行冷却润滑，所用高压泵的工作压力可以在 1.5 ~ 20 MPa 之间调节，冷却油喷口在强化滚压工具的两个液静力学滚压头处。1.5 MPa 的压力相当于 150 N 左右的滚压力。试验中使用的管材材料为符合 ASTM B 338 标准中焊接质量等级 2 级的钛管，这种钛管的外径为 50.8 mm，壁厚为 0.7 mm，这种钛管与飞机排水系统中使用的管材完全相同，管材的长度一般为 1 m。从节约成本、费用的角度考虑，试验时使用的管材长度仅为 0.3 m。

飞机的排水管道也可以附带电镀层的防护镀层。这些防护镀层应是电镀的、含有钌颗粒的银镀层，这种结构的镀层会在其表面产生杀死微生物的微电场。因此，这种镀层是专门针对避免排水管

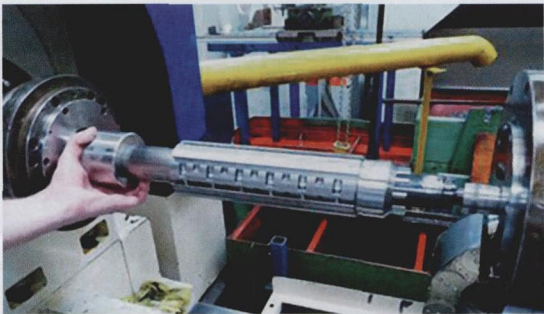


图 3 强化滚压工具有八个滚压头。包裹管材的管材护套由六块带花键槽的弧形块组成，有效地避免了管材不受控的扩张

微生物聚集而研发设计的保护镀层。

强化滚压速度、进给量和滚压余量有着决定性的意义

除了研发适合薄壁管强化滚压的工艺装备之外，强化滚压工艺参数对强化滚压工艺的结果也有着决定性意义。这里的工艺参数不仅仅指强化工艺的进给速度、进给量，而且包括了强化滚压的滚压余量。当强化滚压的余量过大时，除了会产生“滚压强化”的作用之外还会“挤压出”一些多余的金属材料，在壁厚很薄的管材中，这些“挤压出来的金属材料”会导致管材长度的伸长。由于管材的刚性较低，管材位于弧形块护套之外的部位会出现凸起的褶皱。

过大的滚压余量会带来管材的伸长。但管材的两端都是轴向固定的，故长度不变，因此会引起管材的褶皱。这些褶皱会导致强化滚压工具损坏，从而导致管材直径尺寸报废。为了避免强化滚压工具出现这样的损毁，最大的滚压余量应为 0.15 mm，这样才能得到理想的、强化了了的管材内表面。

试验项目的第一个目标是优化当前航空领域中使用的输水钛管的表面质量。这些钛管都是焊接而成的，由于其焊缝处的表面质量比较粗糙，因此易于微生物的附聚。通过滚压加工，应将焊接钛管的内表面滚压得非常光洁。图 7 所示就是强化滚压加工前后的粗糙度和晶格结构比较。质量检查的结果清楚地告诉我们：钛管的焊缝强化滚压平整了，与



图 2 在进行强化工艺试验时，研发人员使用的设备是 Giana GGB 560 型深孔钻削设备

别处的表面粗糙度没有差异。同时，专业的质量检验也证实了经强化滚压之后的表面质量有了明显地改进。在白光的高倍显微图片中可以清楚地看到：光滑的表面上有着轻微的黏连痕迹。这些黏连痕迹降低了强化滚压的工艺效果，使得总的粗糙度基本上处于强化滚压前的粗糙度水平之上。除此以外，这一工艺过程也有改变管材晶格的作用。强化滚压后，相对比较粗大的晶格明显变得更加细密了，这也是表面强度提高的一个标志。

强化滚压工艺提高了  
管材的机械性能

晶格结构的变化带来了机械性能的改变。通过强化滚压，管材内表面受到了压应力的作用。从而也就提高了强化滚压管材的疲劳强度。机械性能的提高可以用显微硬度的指标数据加以评判。图6所示的就是钛管内表面的硬化层。在强化滚压作用下，钛管内表面的硬度比强化滚压前大约提高了32%。由于钛管的壁厚较薄，因此可以说钛管整个壁厚的硬度都提高了。

除了对没有镀层材料的钛管强化滚压的结果进行分析评估之外，也对有保护镀层材料的钛管强化滚压的结果进行了分析评估。有镀层材料钛管的强化滚压使用的是液静力学控制的滚压头，这里的镀层是一种具有很好延展性的、非常容易产生变形的银镀层。由于这种镀层具有很好的变形性能，因此所选用的

图4 当强化滚压的余量过大时，在弧形块护套外的管材部位会出现凸起的褶皱

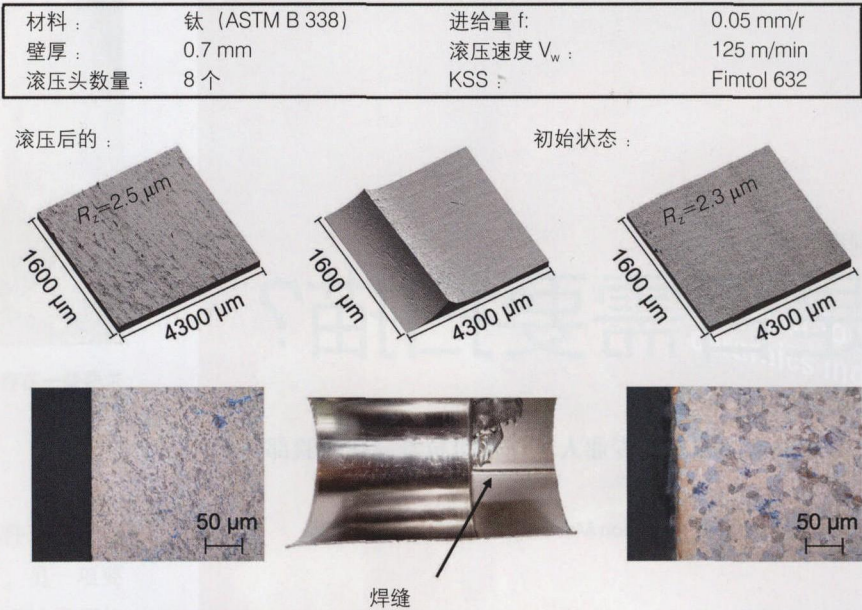


图5 强化滚压工艺对管道内表面粗糙度的影响

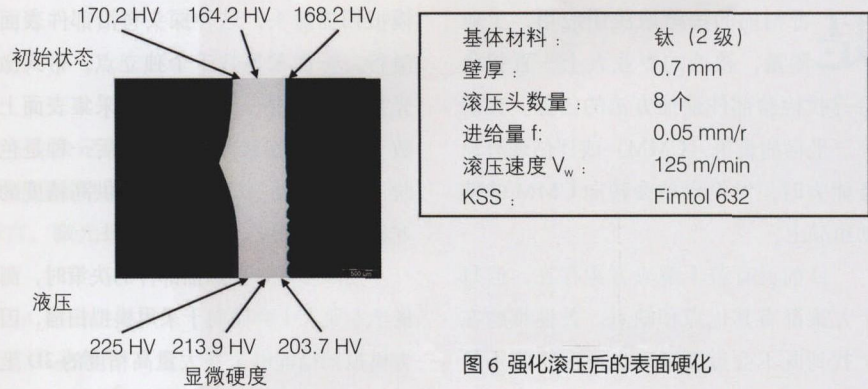


图6 强化滚压后的表面硬化

滚压力相对较低。与外部强化滚压工艺技术相比较，此时所使用的强化滚压力为150 N。这一滚压力换算成管道内壁强化滚压所用高压泵的工作压力时，相当于15 MPa的工作压力，利用这一滚压工具能够在有镀层材料的钛管内壁滚压出光洁的表面。在强化滚压之前，电镀的

镀层材料使得钛管内壁的粗糙度相对较差，强化滚压之后，镀层的表面相当光洁，其抵抗剥蚀性负荷的性能也大大提高了。

在科研项目的框架内完成了薄壁管强化滚压设备的研发设计。设计的装卡夹具和管道防护套管使得这一设备能够完成航空器壁厚0.7 mm排水系统管道的强化滚压。它能够把钛管焊接较粗糙的内壁滚压得非常光整，从而避免了微生物的附聚。

除此之外，管材的内表面也得到了硬化，提高了管材的机械性能。利用所研发设计的设备除了能完成没有电镀层的钛管强化滚压之外，也可以对有电镀层的钛管进行强化滚压。此时使用的创新性强化滚压工具不仅仅能够将内壁滚压得非常光洁，而且也提高了管材抵抗剥蚀性载荷的能力。[MM]