组合机床

改进涡轮叶片实现效率提升

一旦机床具备了在同一加工过程内完成金属 3D 打印和机加工的能力，即可以实现过去难以实现或成本过高的加工过程。

文 | Peter Zelinski

更多精彩请扫描二维码

通用电气公司可能是与增材制造（AM）的发展联系最为紧密的公司。该公司前沿航空推进系统（LEAP）喷气发动机喷嘴是增材制造的成功典范，其在 Pennsylvania 的 Pittsburgh 设立的增材工艺改进中心，并在全公司推行增材技术。最近，公司在完成收购后，成为了增材技术的供应商。但是其增材制造领域的重大进展是通用电气于 2015 年收购了 Alstom 公司，自此成为 Hamuel 涡轮叶片修复使用增材及减材加工中心的首个制造商。

自一项英国资助的研究项目证明可以将增材制造技术应用于涡轮叶片修复后，前 Alstom 公司高级工程师、现通用电气电力服务全球维修机构高级工程师 Hartmut Hähnle 就一直参与该技术的应用工作。他介绍，通用电气公司还在进一步发展涡轮叶片金属 3D 打印技术。他的团队最近在瑞士 Birr 的通用电力服务生产基地使用 Hamuel 机床维修叶片，并对叶片进行改造，提升其性能。

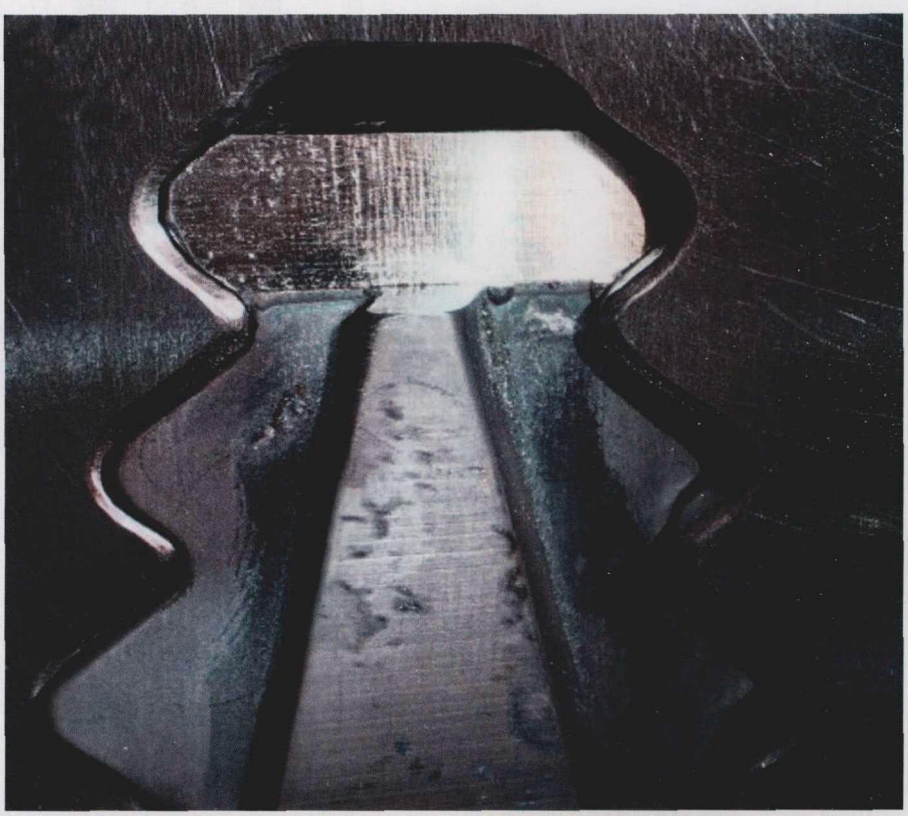

图 1 对已投入使用多年的涡轮叶片根部进行了改进。从前，此类叶片根部的插槽开口空间过大。性能数据分析结果显示，进一步收紧插槽可提升效率。将金属 3D 打印与制造相结合，就可以一次性完成这一作业。图中叶片根部更光亮的部分（即“杉树”形状的顶端）即为后来添加的叶片密封功能件

该机床使用了德克萨斯州 Hybrid Manufacturing Technologies 公司的“Ambit”系统以实现增材制造功能。将 Ambit 加工头嵌入机床主轴（与刀柄共用接口），使机床可以通过激光熔覆实现金属沉积。Hamuel 标准版本 HSTM 系列机床采用五轴铣削和全车削加工，能够在单次处理中完成复杂涡轮叶片的加工。组合增材或减材版

本的机床功能则更为强大，其直接使用金属沉积法将表面或形状接至工件上，并在同一加工循环内严格依据公差要求对工件进行加工。Hybrid 首席执行官杰 Jason Jones 表示，过去这些步骤需要在不同的机床上完成，而如今则得以实现“流程简化”，这是一大优势。不仅如此，从 Alstom 和通用电气的推广历程中可以发现，流程简化本身就可以提升生产力。

Hähnle 以图 3 中的叶片为例，介绍了其维修事宜。图中的镍合金叶片有“凹槽状”叶顶，能够减少涡轮叶顶和叶片环之间的缝隙。通常，凹槽状叶顶的修复由一台机床以增材制造的方式完成，而加工则使用另外一台机床。两款机床不仅设置不同，而且通常由不同的团队负责。相比之下，

图 2 图中的 Hamuel 车铣复合机床是一台“组合式”机床，能够在同一循环内完成金属增材和精密制造。该机床的增材制造能力得益于其安装的“Ambit”加工头。这一金属沉积头和机床刀柄共用一个主轴连接接口

广告

Hähnle 认为："与多台机床作业相比，只需使用单个夹紧装置可以省去工件转移和机床调整的时间。常规维修作业包括切割、包覆和修复等连续工序，而这种方法省掉了三道运输和夹紧工序中的两道。另外一大优势是数控加工机床的定位精度高。"其不仅在机加工方面发挥作用，也适用于材料沉积领域。

因此，Hähnle 认为这种数控加工机床的意义不再局限于传统的机床——正如瑞士军刀不仅仅是一把刀，智能手机也不仅仅是一部电话。Birr 的多数叶片仍然以传统方式进行维修（该工厂此类工作业务量很大），但有了组合增材或减材系统，那些更适宜一次性加工的零件就有了新的加工选项。

图 4 和图 5 中的叶片最适宜采用组合加工。多年来现场性能检测表明，为叶片添加新功能部件，可以更改其设计，提升涡轮效率。原始、传统的叶片根部及插槽所留出的空间超出了散热需求。空间过大会导致过量空气流向散热部位，而涡轮机内部压缩发电的空气量会相应减少，致使效率降低。通用电气工程师分析性能数据后认为，增加密封功能（增加叶片根部与插槽接触面积）能够在不影响散热的情况下提升功率效率。

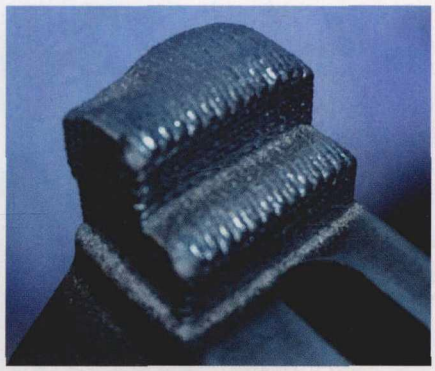

图 4 3D 打印工序单独完成的涡轮叶片根部密封功能件

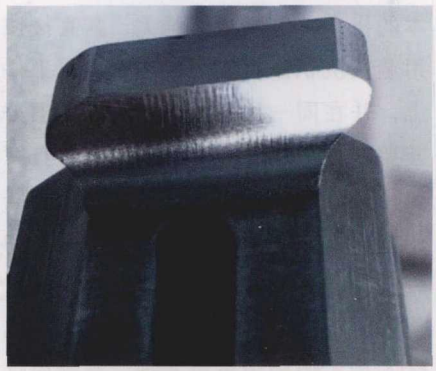

图 5 密封功能件的最终形状

在过去，由于符合这一条件的叶片数目较少，节约下来的费用尚不足以支付为实现新功能而增设的铸造工具费用，因此，这样的改动很难实现。然而，使用组合机床进行 3D 打印和铣削极大地提升了小批量改造的经济性。当这些叶片返回维修时，仅需在增材或减材机床上再加工一步，就可以实现新的密封功能。

值得注意的是，尽管叶片批量可能很小，但对于其工作量而言，必然会遇到一个典型的生产问题，即人为操作失误损坏 Ambit 加工头并导致机床故障，而拿到替换加工头需要七天时间。在此期间，机床无法进行 3D 打印，意味着待加工叶片只能按顺序排入计划，等待复工。

Jones 介绍，通用电气遇到此问题时，会向另外一家安装了 Ambit 加工头的机床拥有者求助，他们将叶片及增材数控程序发送到该机床拥有者处，并在那里完成 3D 打印作业。然后将零件运回 Birr，对该添加了新功能的零件进行探测，确定安装位置，并按照最终公差对其进行加工（Birr 的机床仍能完成剩余工序），这一方法体现了数控加工机床平台搭建系统的通用性。

Jones 认为，组合工序的这种冗余能力是一种生产优势。如果需要进行满负荷生产且生产规模比通用电气电力服务的现行生产规模更大，则可能需要多台组合机床，让工件在传统机械工厂中一样，在这些独立的机床间自由流通。

此外，Hähnle 从机床故障中学到了更重要的一课。那就是，为确保组合机床的生产力，一定要准备生产备用一样的熔覆头。MM

图 3 对凹槽叶顶进行修复。在叶顶上涂覆镍合金材料，并将其加工到最终尺寸