

研磨

坯料研磨大型齿轮

这间工作坊通过研究前沿的研磨材料技术将坯料研磨成大型齿轮，巧妙减少了操作过程中的许多步骤，完美呈现光滑表面。

文 | Russ Willcutt



图1 罗利·塔格莱规划并操作公司的 Höfler Rapid 6000 仿形磨床，为矿业贡献了大量的 206 in 的研磨齿轮

生产的齿轮越大，就越没有机会在机器间移动齿轮。理想状态中，希望将坯料加载于机器上，操作周期开始，再卸载成品。尽管比较复杂，但是亚利桑那州坦佩的 L&H 工业已将这一理想变为现实。如今，研磨技术和装备设计能够实现车间一步到位，短时间内研磨齿轮，比如滚齿加工和成型加工。此外，研磨工艺可生产如镜面般光滑的表面，达到 AGMA 14 或更高的齿轮质量。

总经理加勒特·高曼说：“对于大齿轮，车间并不生产比矿业应用中更大的齿轮产品。有时为了操作比直径为 20 ft (1 ft = 304.8 mm) 还大的重型齿轮，公司在 2013 年购买了型号为 Höfler Rapid 6000 的 6 m 长的 CNC 仿形磨床。配合诺顿研磨材料，仿形磨床可鉴别用于维修和生产工作的磨轮。一旦安装了 Höfler，我们就开始尝试直接在坯料上研磨轮齿，最终大获全胜。每个月，我们都学到一些新知识，通过这些投入尽可能创造更多，也从磨削加工中收获了许多。”

大型齿轮

里昂·万德勒于 1964 年创立了 L&H 焊接与供应公司，这家坐落于美

国怀俄明州的吉列公司专营油田设备维修业务，后转型矿业。公司逐渐壮大，遍布美国五个地区，且在加拿大、墨西哥和智利都设有办事处，且在坦佩专营研磨操作。大约有一半的齿轮生产涵盖维修铁铲、拉铲挖土机和钻孔部件，其余生产业务主要注重零部件市场的产品供给。高曼先生说：“我们能生产 12 in (1 in = 25.4 mm) 小齿轮，并将小齿轮连起来合成 200 in 直径的大齿轮。目前，我们的研磨机生产出的最大齿轮直径为 243 in。”在购买 Höfler 研磨机之前，齿轮生产包括在专门的机器上处理裂纹、滚齿加工、成型加工、多重步骤及重复的安装。投资的决定涉及到简化工艺和复杂工序的后备方案。他接着说：“我们最初试图使用设备完成研磨过程，并在其他设备维修期间将齿轮移除车间。当我们越来越熟悉设备以后，我们开始思考如何充分利用资源生产设备并避免磨损。”

罗利·塔格莱是公司的老员工，他在加入 L&H 前，在他父亲的齿轮车间中工作了九年。进入公司后，他成为了研发和操作设备的领头人。习惯了手工操作设备，他很高兴有机会装配 CNC 设备，并最大限度地利用了 Höfler 工程师提供的培训。

塔格莱先生说：“他们参观我们公司，接受操作培训，我也始终与他们在德国的工程师保持联系。比如说，只要我们需要在研磨机上安装大型工件，Höfler 工程师就会前来指导，帮助我们在研磨轮齿前校准机器。工程师不能完全控制机器处于安全状态，所以我们在整个过程中相互协作。”

德国工程师负责监控大型 Höfler 设备，并与塔格莱先生进行视频交流。工作台上直径为 206 in 的齿轮旋转缓慢，显示在控制监测器上的坐标有些许调整，只有当每一个步骤过渡到下一个等级，虚拟的操作员才能给出信号，将流程转移至下一步骤。塔格莱先生说：“重量 ≥ 5 万 lb (1 lb = 0.453 592 37 kg)

或直径 ≥ 170 in 的齿轮需要校准。工程师力求研究工件的质量和运动，以确保工件停在正确的位置，连接磨轮。装载齿轮前我们在研磨机上安装的最后一个零部件是一个 17 齿的小齿轮，机器为小齿轮调谐，我们得直接操作一个 9 万 lb 的齿轮。其实，当我安装这个大齿轮的时候，我直接向 Höfler 发送电子邮件，这样他们就知道我正在做这项任务，并且做好准备协助安装，安装不需要太长时间。”

然而，在任何机械加工过程中，都应为机器选择正确的操作工具，将机器的性能发挥到极致。机器标准的轮组运转得很好，比起大范围移除材料，这种方式更适合进行整修处理。塔格莱同样也在寻找，这正是机会光顾的时候。

应用研磨材料

作为诺顿研磨材料的应用工程师，菲尔·布兰德和来自研发中心的同事大卫·格雷汉姆一同工作，开发新的技术，顺应这个不断发展的制造产业。在位于马塞诸塞州诺斯波罗的希金斯研磨工艺中心 (HGTC) 里，格雷汉姆先生跨行业为顾客开发了多种产品与工艺流程。随着新研磨装备设计的引进以及新材料和不断复杂的部件几何尺寸要求的升级，他又在 HGTC 实验室为研磨设备开发了新产品。工艺经过检测后，正式在业内投入使用。高级轮组的晶粒形状、制定和连接也将得到优化。

正当诺顿为投入市场的新型磨床优化其研磨轮之时，布兰德先生接到了 L&H 区域经理斯科特·布兰德利的电话，他致电请求援助。他说道：“斯科特告诉我他购置了 Höfler Rapid 6000，国内没有几台这样的机器，他想确定是否用对了研磨轮。我从新轮组的改进中看到了机遇，因为 L&H 是全球实现 β 系数测定去权威的公司”。布兰德先生会亲自监督工程，并实地视察坦佩，与塔格莱先生一同监测诺顿研磨机地点轮组，最后向研发实验室汇报他的视察成果，



图2 诺顿公司生产的 TG II 研磨轮具有类似于稻米纹路的长且薄的挤压纹理，研磨轮有很好的耐磨性和良好的材料去除能力

以便后期进行制定调整。

经过初步的视察，布兰德先生已基本熟悉公司运作和各部门职能，他挑选了一些轮组模型。第一次的检测显示出许多需要考虑的因素，其中包括 NQX 轮组。塔格莱先生回忆说：“在材料去除方面，车间表现极为出色。但是生产的切屑总是堵塞在机器中。就像一种优质的钢丝绒，材质稠密，这样的切屑着实是个火灾隐患，因为它的材料是饱和的油冷介质，因此这一款并不实用。”

成功来得太突然，轮组恰恰具备 L&H 所寻求的特性：结实的材料去除和抛光可复验的表面修饰。TGII 挤压外轮有类似于面团或水稻一样长且细的纹理，纵横比为 8 : 1。纹理稀疏地排列，空隙中有去除材料和冷却剂。设备具有极强的内在动力并可进行高级金属切削流程。耐磨性好，轮组生产的切削屑可以轻松穿过研磨机并从退出机器出口处进行处理加工。

在滚铣刀上移动齿轮除了要求的安装，还需要有研磨机。诺顿的滚齿机与研磨证明了切割时间可以减少一半。

布兰德先生介绍了一款硬度为 28 ~ 32 HRC 由 4140 合金钢做成的齿轮，齿深度为 0.438 in，宽度为 7.25 in，共有 80 个齿。齿轮用碳化物作为滚刀，总切割时长为 8 h。有了 TGII 研磨轮，总体研磨和包衬耗时缩短到 4 h。通过系统方法，考虑研磨、加工材料、机器和工艺条件，研究表明研磨是滚铣和成型加工成本效益良好的选择，生产去除率为 7 in²/min/in。

布兰德先生介绍道：加工车间、大型齿轮制造商、维修和修理设备、变速箱重建、专业齿轮制造等都应考虑到研磨过程。这些包括较低成本、较少工序、更具竞争力的循环周期、减少工具库存及迅速应对客户的需求。“无论是何种的操作类型，除选择正确的研磨轮外，操作者都必须牢记以下几点：合理应用冷却剂、用喷嘴洗涤剂保持轮面的清洁、使用优质油冷介质，当然，你还需要一台结实、性能好的机器，但是 L&H 选择的研磨机就不存在这个问题，那机器简直就是万能的庞然大物。”布兰德先生说。

具有战略意义的流线型改革

这台大型机器的优点正在逐渐凸显。迄今为止，L&H 用 Höfler 直接在坯料上研磨了十多个齿轮，他在此过程中学到了很多。塔格莱先生说：“未经加工和研磨完工的区别告诉我们，在进行粗研磨时，你需要对轮组进行包衬处理。这样，你就能得到更好的齿形，因为轮组表面会由于磨损及材料组合而变形。”

在进行热处理时，还应注意一点。当完全在坯料上研磨欧美齿轮时，热处理应在粗化处理和精细加工之间进行。在初步加工阶段，操作员必须决定取多少库存到车间，这取决于齿轮是否需要渗碳或感应加热淬火，因为这些工



图 3 在 L&H 23 916 ft² 的车间里，设备正在零部件市场中为采矿应用替换齿轮，该车间占据了整个焊接车间和新办公地点

序与其他回火程序有不同的要求。之后齿轮又送回研磨机进行精加工。

这也是研磨工序的另一个好处。“你不能直接将预切割机的齿轮送去热处理，因为切割是有棱有角的，而且这还不是真正的标准齿形，所以如果你在预切割机上粗研磨轮齿，还需要在进行热处理前将它放在研磨机上。但是当你在研磨机上粗研磨轮齿之后，齿轮就可以放入烘箱中了，然后再送至研磨机处进行精细加工。”塔格莱先生说。

对于齿轮形状，这完全是程序操作的问题。塔格莱先生表示：“说实话，你可以研磨任何微小、纤细的轮齿或者宽厚的轮齿，这没什么影响。机器并不能区分这些不同。显然，你需要去除的材料越多，所需的时间就越多，但是无论齿轮的型号或几何结构如何，机器都是以同样的方式运转。”

造访 L&H 的那一天，高曼先生预料的购置研磨床后的情景真的发生了，公司于 70 年代定制的预切割机在工作台上初现故障，齿轮停止运转。有意思的是，那个齿轮正是这篇文章描述的那款。他说：“这项任务不需要赶进度，因此我们有时间想出解决方案，但是预切割机停运一个月了，我们还是没有任何进展。幸运的是，我们还有一个备份

计划。我们最终决定把齿轮从预切割机移至研磨机。预切割机载入时只切割了三个轮齿，因此还剩 37 个需要研磨机粗制。我们面临的唯一挑战就是当我们弄忘记移动齿轮并将它安装回去的时候。除了机器间的转换，预切割机未完成任务可交给研磨机继续进行，这样操作过程就顺利许多。在 Höfler 工程师的帮助下，当我们知道所有细节之后，我们就重新开始操作。”

前沿

在设备使用和工作流程方面，研磨机取得了很大的发展和变革。近期完工的 23 916 ft² 的膨胀机房是公司的焊接车间，提供了新的办公空间，可对现有的机器进行重新安置，大大提高了使用效率和材料处理的速率。

加勒特先生说道：“如今有了研磨机，我们可以把它的性能分解为如何处理事物，以及寻找机器配置实现现代化，并在车间中，完成每一道工序，我们还希望充分利用传统的设备，比如预切割机，但是为防止突发事件，始终保留一套备选方案也十分重要。现在，我们已经做好准备，而且正位于当今齿轮研磨技术的前列，这才是理想的落脚点。”