镍基高温合金叶片高效加工研究

无锡透平叶片有限公司
国家能源大型涡轮叶片研发中心 （江苏 214174） 庄绪华 张家军 褚春祥 赵继丰

摘要：本文开展了某镍基高温合金叶片的高效加工研究，通过对型面及叶冠粗铣加工试验以及球头刀切削程序优化，优选出最佳性能的刀片，降低了刀具损耗，提高了加工效率。

工艺工程师 庄绪华

镍基高温合金具有较高的强度、抗高温氧化性等性能，被广泛应用于各种领域中，其加工时切削温度高、加工硬化及刀具磨损严重，是最难加工的材料之一。其难加工性主要表现在以下几方面：①常温和高温强度高，切削力大。②加工硬化倾向大，切削困难。③热导率低，加工过程中切削温度高。④刀具磨损严重。⑤工件易产生热变形，加工表面质量和精度不易保证。

公司某镍基高温合金叶片（见图1）的加工周期长，成本高，刀具消耗量大，导致员工换刀频繁，增加了劳动强度。鉴于目前公司制定的“降本增效”的方针，对于此类加工时间长、刀具消耗量大且加工成本高的叶片，十分有必要进行加工刀具及加工程序的优化，以达到降本增效的目的。

目前，公司某镍基高温合金叶片加工过程中（见图2），ϕ40R6圆刀片主要对叶片叶冠以及型面进行粗铣加工，加工范围大，刀片消耗量大，加工过程中需多次更换刀片，占用了操作工大量时间，增加了其劳动强度，降低了叶片加工效率。因此，十分有必要对ϕ40R6圆刀片进行优选试验，选出适合镍基高温合金叶片加工的圆刀片，减少刀具消耗、刀具更换次数以及加工时间。

图1 叶片毛坯状态

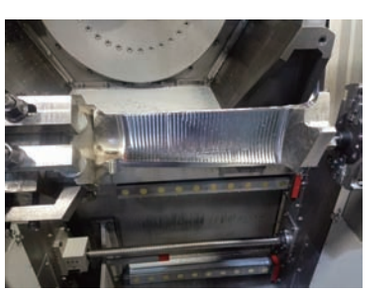


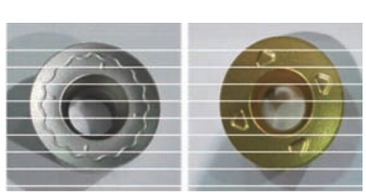
图2 叶片铣削过程

1. 试验刀片

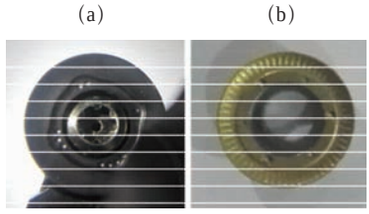
本次试验采用的ϕ40R6圆刀片有4种，分别为RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240（见图3a），RPHT-1204M0E-442X4、X500（见图3b），RPHT-1204M0T-6-ME07、F40M（见图3c），300B-1252E-ML G7D6 35（非标、见图3d），这4种刀片均为涂层刀片。

2. 试验材料及设备

试验材料为某镍基高温合金叶片，从叶冠到叶根依次为型面第一、二、三段；叶冠粗铣面包括进汽侧面、出汽侧面、背斜面（大）、背斜面（小）和锁



(a) (b)



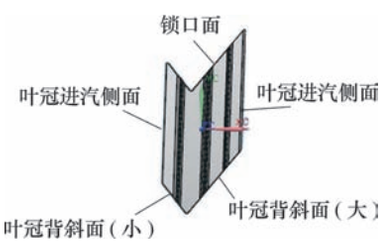
(c) (d)

图3 4种刀片

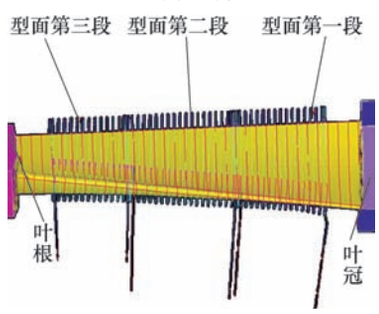
口面，如图4所示。加工设备为LIECHITI 1400*g*五轴数控加工中心（见图5），技术参数如表1所示。

3. 试验结果及分析

（1）刃口磨损。在各类难加工材料中，镍基高温合金是最难加工的材料之一，其相对加工性仅为45钢的5%～15%。塑性变

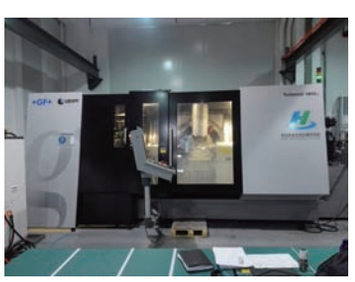


（a）叶片

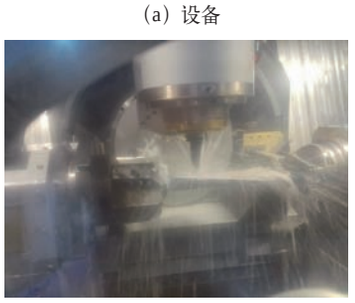


（b）叶冠

图4　某镍基高温合金叶片、叶冠及型面



（a）设备



（b）加工过程

图5　LIECHITI 1400*g*五轴数控加工中心工作状态

表1　LIECHITI 1400*g*技术参数

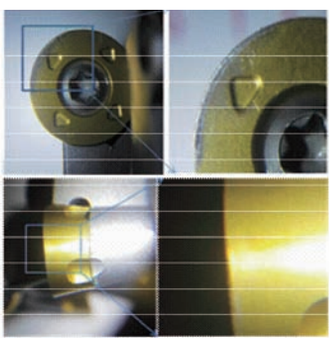
主轴	转速/（r·min^{-1}） 最大功率/kW	10～19 000 28
工作范围	*X*轴/mm *Y*轴/mm *Z*轴/mm *A*轴（°） *B*轴（°）	1 978 450 400 360 ±50
进给速度	*X*轴/（m·min^{-1}） *Y*轴/（m·min^{-1}） *Z*轴/（m·min^{-1}） *A*轴/（r·min^{-1}） *B*轴/（r·min^{-1}）	50 50 50 200 50
加速度	*X*轴/（m·s^{-2}） *Y*轴/（m·s^{-2}） *Z*轴/（m·s^{-2}） *A*轴/（°·s^{-2}） *B*轴/（°·s^{-2}）	5 10 10 50 000 2 500
刀具库	刀具数量/把 换刀时间/s	32 6
快移速度	直线轴/（m·min^{-1}）	62

形很大，切削力较大，切削温度高，加工硬化现象严重。由于镍基高温合金的这些特性，导致在切削过程中，刀片的磨损现象较为严重。通过观察切削刃口的磨损情况，能够较为明显地反映刀片的切削性能。

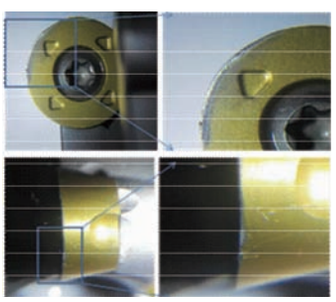
通过叶冠粗铣试验发现，对于叶冠5个面的粗铣，4种刀片的一个刃口便能一次加工完成；粗铣锁口面时，由于考虑到夹具结构及下刀位置，此处的铣削方式采用逆铣，因此锁口面粗铣时对刀片的伤害较大，4种刀片加工完锁口面后，刀片都已磨损严重，刀片不能继续使用，叶冠的粗铣加工4种刀片用量都为1片。因此，下面主要分析型面粗铣加工时刀片刃口的磨损情况。

图6所示为RPHT-1204M0E-442X4、X500刀片切削过程中刀片刃口磨损状态。从图6a可以看出，第一段型面加工完成，刀片轻微程度的磨损，前刀面涂层有剥落，后刀面无显著磨损；从图6b发现，完成前二段型面的加工后，前刀面磨损进一步加重，但属于正常磨损，涂层剥落进一步加重，后刀面小区域崩刃；从图6c发现，完成整个型面的加工后，刀片前刀面磨损严重，属于非正常磨损，发生崩刃，刀片已不能继续用于铣削加工。

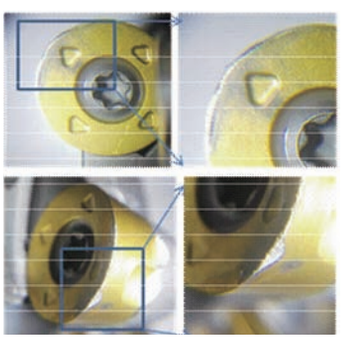
图7所示为300B-1252E-ML G7D6 35（非标）刀片切削过程中刃口磨损状态。为节省材料成本，此次试刀材料为前期第三段型面未铣削的叶片，从第三段型面开始铣削。从图7a发现，完成第三段型面粗铣后，刀片刃口已



（a）第一段型面



（b）第二段型面

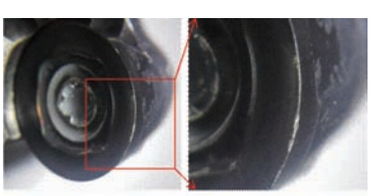


（c）第三段型面

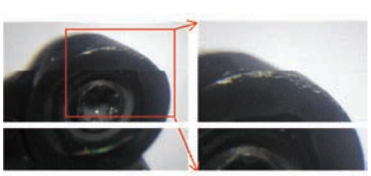
图6　RPHT-1204M0E-442X4、X500刀片切削磨损状态

发生磨损，能够看出刃口已有微小缺口；在该切削参数下，完成第一段型面加工后，如图7b所示，刀片磨损程度加重，刃口较大范围磨损，未发生崩刀；如图7c所示，完成第二段型面（总计三段型面）的加工后，刀片刃口磨损严重，刀片未崩刀，但是通过观察铣削后的叶片表面状况，发现表面质量较为毛糙，说明刀片已不能继续用于切削。

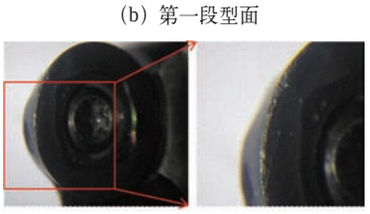
图8所示为RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片切削过程中刃口磨损状态。从图8a发现，完成第一段型面加工后，前、后刀面均未见显著磨损，涂层未见剥落，无崩刃；第二段型面粗铣完成后，刀片刃口轻微磨损，后刀面涂层稍有剥落，如图8b所示；从图8c中能够发现，完成叶片整个型面的粗铣加工后，刀片刃口磨损较轻，刀片涂层剥落未见加重，刀片切削性能较好，完成三段型面的铣削加工后，仍可继续使用。



（a）第三段型面



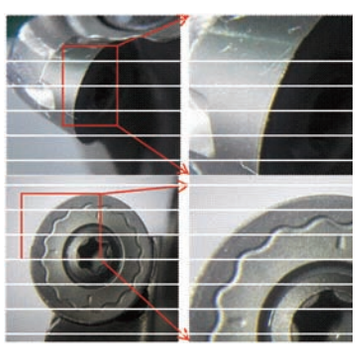
（b）第一段型面



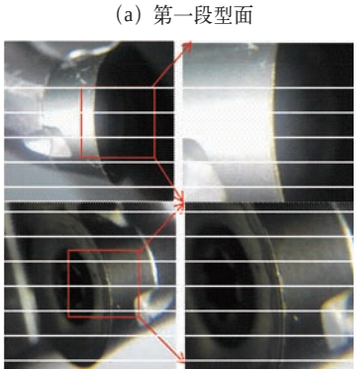
（c）第二段型面

图7　300B-1252E-ML G7D6 35刀片磨损状态

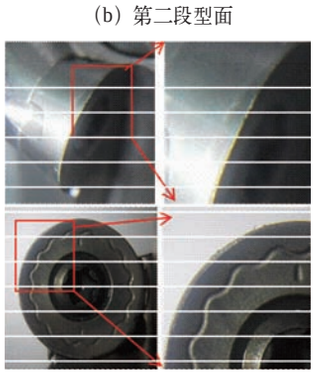
图9所示为RPHT-1204M0T-6-ME07、F40M刀片切削过程中刃口磨损状态。此次试刀材料为前期第二、三段型面未铣削的叶片，从第二段型面开始切削。从图9a中可以发现，完成第二、三段型面加工后，刀片金黄色涂层已发生剥落，并发生磨损，属于正常磨损，无崩刃；如9b所示，完成第一段型面（总计三段型面）的粗铣加工后，刀片已发生严重磨损，刃口有较大缺口，刀片严重磨损将对叶片加工表面产生影响，此时刀片已不能继续使用。



（a）第一段型面



（b）第二段型面



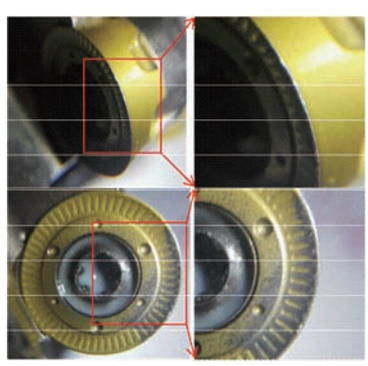
（c）第三段型面

图8　RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片磨损状态

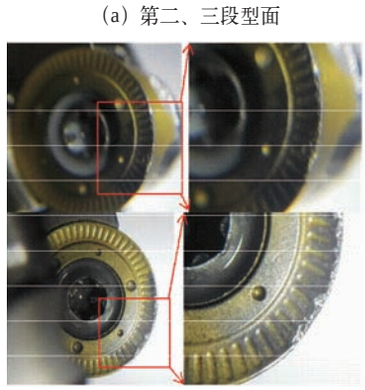
（2）切削效率、加工时间及刀具消耗。单位时间内去除的材料越多，切削效率就越高。切削效率与线速度V_c、背吃刀量a_p以及进给速度F相关，在背吃刀量相同的情况下，通过计算进给量就能间接反映材料的去除量，从而反映切削效率。4种刀片的进给量如表2所示。

表2　不同刀片的加工效率

刀片型号	进给速度F/（mm·min^{-1}）
RPHT 1204M0E 442X4、X500	382.17
RPHT1204M0T-6-ME07、F40M	334.39
RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240	390.13
300B-1252E-ML G7D6 35（非标）	278.66



（a）第二、三段型面



（b）第一段型面

图9　RPHT-1204M0T-6-ME07、F40M刀片磨损状态

从表2中发现，4种刀片进给速度的大小依次为：CTC5240＞X500＞F40M＞G7D6 35，RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片切削效率最高。通过分析切削过程中刀片的磨损情况以及4种不同刀片的切削效率，初步确定RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片为本次试验优选出的试验刀片。

从表2中能够看出，采用RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片加工某镍基高温合金叶片，每片减少换刀次数约4次；采用RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片加工，叶冠的粗铣需要一个刃口；粗铣三段型面需要刀片一个刃口，整个叶冠及型面粗铣加工只需2粒刀片，减少了操作员工的劳动强度。

采用RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片加工锁口部位的加工时间减少35%；由于刀片CTC5240一个刃口便可加工叶片三段型面，中间无需更换刀片刃口，因此，将型面粗铣的三段程序合并为一步，型面一次性加工完成，加工时间提高约30%。

4. 程序优化

（1）K6R3球头刀。目前，公司某镍基高温合金叶片K6R3球头刀加工部位包括叶冠锁口*R*角、叶根转接以及叶冠转接。根据公司目前的统计发现，叶冠锁口处加工过程中，K6R3球头刀磨损严重。因此主要针对此部位进行程序优化。

通过分析程序发现，原先程序中的加工叶冠锁口部位的线速度较高，由于切削变形区的晶格扭曲现象严重，使已加工表面产生冷作硬化，刀具机械磨损、粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损均比较严重，因此刀具消耗较大。适当地降低切削线速度，能够提高刀具的寿命。因此，为了提高刀具寿命，根据以往镍基高温合金的加工经验，把加工叶冠锁口部位的线速度降低约40%，其余切削参数不变。此时，K6R3球头刀总加工时间增加约4%，通过现场跟踪发现，每片叶片K6R3球头刀平均刀具消耗降低约20%，显然这样的程序优化，符合目前公司加工要求。

（2）K10R5球头刀。目前，公司某镍基高温合金叶片K10R5球头刀加工部位包括叶冠锁口*R*角、叶根转接以及叶冠转接。

通过分析程序发现，原先程序中加工叶冠锁口部位、叶冠及叶根转接部位的刀具线速度较高，导致刀具磨损较为严重。根据以往加工经验，将叶冠锁口部位K10R5的线速度降低约40%，对于叶冠及叶根转接部位的加工，为了能够改善刀具的磨损，同时不对加工效率影响太大，根据加工经验以及参考相关资料，将线速度降低8%，其余切削参数不变。程序优化后，K10R5总加工时间增加约24.6%，每片叶片K10R5球头刀平均刀具消耗降低约80%，显然这样的程序优化，符合目前公司的加工要求。

（3）K12R6球头刀。目前，公司某镍基高温合金叶片K12R6球头刀加工部位包括叶根转接以及叶冠转接、根高及汽道。

通过分析程序发现，原程序中根高和汽道加工采用K16R8球头刀，切削完成后还存在较大加工余量，然后再用K12R6球头刀将转接及*R*角加工到位，此时，K12R6和K16R8球头刀都要进行大量铣削工作，加工时间较长。因此，采用K16R8直接将根高、汽道面直接加工到位，叶根、叶冠转接放0.35mm的余量给K12R6，采用K12R6将转接及*R*角加工到位。采用这种加工方法，K12R6球头刀的总加工时间降低约40.5%，每片叶片K12R6平均刀具消耗降低约67%，降低了成本，提高了加工效率，符合目前公司“降本增效”的要求。

（4）其余程序的优化。对程序进行了简单的优化，刀具消耗及程序加工时间未有大的变化，这里不做详细讨论。

5. 结语

本文对某镍基高温合金叶片开展刀具优选试验研究及程序优化，减少叶片加工刀具使用量、减少叶片加工时间、降低叶片加工成本，优选出适合镍基高温合金叶片加工的刀具，其研究成果也可推广至其他种类镍基高温合金以及其他材料的叶片，进而降低公司镍基高温合金叶片的加工成本、提高加工效率。主要结论如下：

（1）通过镍基高温合金叶片的切削试验并且跟踪某镍基高温合金叶片现场加工状态发现，RPHX-1204M4EN-M31、CTC5240刀片性能较好，单片叶片的40R6圆刀片的消耗降低约66.6%，加工时间降低约34.9%，减少了更换刀具次数及时间，减少了工人劳动强度，提高了生产效率。

双流道叶轮三维造型及数控加工制模探讨

泰州泰东泵业有限公司 （江苏 225300） 钱万钧

摘要：探讨借助CAD/CAM软件三维造型、自动编程和数控加工模具，验证叶轮CAD/CFD辅助水力设计、流场分析和性能预测的优化设计效果；利用MasterCAM软件仿真功能模拟验证数控加工可行性；选择合理的数控加工工艺，确保叶轮模具高质量、高精度，产品经过性能测试验证取得了满意的结果。

技术部长 钱万钧

叶轮是泵的核心零件，利用CAD/CFD技术对叶轮进行优化设计，不仅能够获得一个最佳的设计方案，还可以模拟预测泵的性能和流场细节分析；当然成功的设计需要进行产品验证，由于双流道叶轮内部流道形状复杂，不易直接机加工成形，常用造型模具进行铸造，而传统的手工制模与图样的要求误差较大，不准确的型线改变了设计的理想流场，造成泵的性能普遍偏低；本文借助CAD/CAM软件进行三维造型、自动编程、数控加工制模，利用MasterCAM软件仿真校验叶轮模具复杂曲面流道的数控加工有效合理性，适当微调和修改数控加工程序避免刀具干涉，提升数控加工程序的精准性和可靠性；制定合理的数控加工工艺，确保数控加工的叶轮模具实现高质量、高精度的要求，使设计与制造无缝衔接。

1. 双流道叶轮优化设计

双流道叶轮应用于输送污水污物介质环境，不仅希望高效节能，而且要求良好的无堵塞性能，本文采纳行业普遍采用的水力设计优化方法。

（1）建立设计变量。因双流道泵效率普遍比叶片式离心泵低3%～8%，优化设计的目标之一是提高泵的效率，其次选择合适的叶轮出口宽度b_2满足泵的无堵塞性能；方法是建立对泵的流量、扬程和效率有重要影响的设计变量，主要变量有叶轮的进口直径D_0、出口直径D_2、出口宽度b_2、外流道出口安放角β_2（见图1、图2），泵体蜗壳的喉部面积F_3等，通过约束设计变量使水力

（2）通过优化K12R6、K10R5及K6R3球头刀加工程序，单片叶片的K12R6、K10R5和K6R3刀具损耗分别降低约67%、80%和20%，刀具损耗大幅降低。

（3）通过刀具优选试验及程序优化，目前，单片叶片加工时间降低约15.8%，实现了提高加工效率、降低加工成本的目标。

参考文献：

[1] 林子皓，熊计，郭智兴，等. 高温合金切削刀具的研究现状及进展[J]. 硬质合金，2013， 30（06）：351-358.

[2] 袁亮. GH4169高温合金腐蚀加工及其对基体性能影响研究[D]. 南昌：南昌航空航天大学：硕士学位论文，2012.

[3] 瑞士GF阿奇夏米尔集团. LIECHITI 1400*g*设备手册[E]. 瑞士：瑞士GF阿奇夏米尔集团，2015.

MW（收稿日期：20170622）