复合材料齿轮加工工艺

孙莉洁，杨引锋，刘勇
中国航发西安动力控制科技有限公司　陕西西安　710077

摘要：针对高强度耐磨聚醚醚酮复合材料齿轮出现的端面掉块、齿面划道问题，从材料特性、工艺方法等方面进行分析，提出压套方法及工装、磨削砂轮及参数的改进措施并进行加工验证，解决了复合材料齿轮的加工缺陷问题，保证了零件质量。

关键词：聚醚醚酮；复合材料齿轮；缺陷；压套；砂轮；磨齿

1　序言

高强度耐磨聚醚醚酮复合材料S-0203是一种适用于水环境的耐磨材料，用于常温、高温蒸汽环境以及干摩擦条件，应用于航天电解循环泵的齿轮类零件，工作环境为水环境，采用复合材料/金属的配副方式，有效解决了金属/金属配副方式的高摩擦、高磨损、卡滞和咬死等故障。该循环泵采用无侧板补偿的固定齿侧间隙的齿轮泵形式，通过电动机带动主、从动齿轮旋转，将泵进口的介质增压输送到出口。加工时对齿轮的端面及齿面精度要求较高。针对电解循环泵复合材料齿轮加工过程中出现的端面掉块、齿面划道等问题，对复合材料齿轮的加工工艺进行研究。

2　问题描述

齿轮组件如图1所示。在完成齿轮与齿轮轴压套装配后，箭头所示端面出现掉块缺陷，在体视显微镜（倍率为15×）下检查，掉块部位缺陷形貌如图2所示。

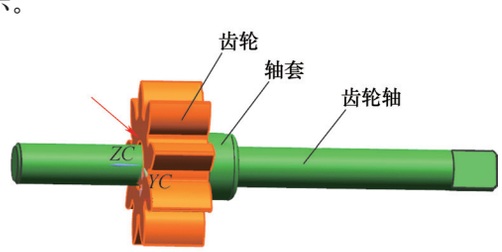


图1　齿轮组件

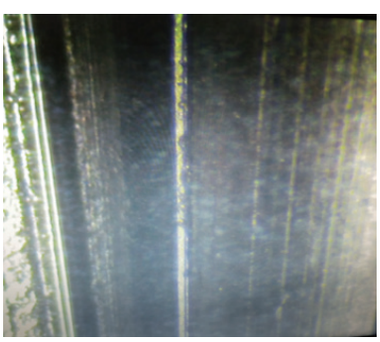


图2　掉块部位缺陷形貌

磨削齿面后，齿面沿齿向方向出现目视可见的明显划道，齿面划道缺陷形貌如图3所示。

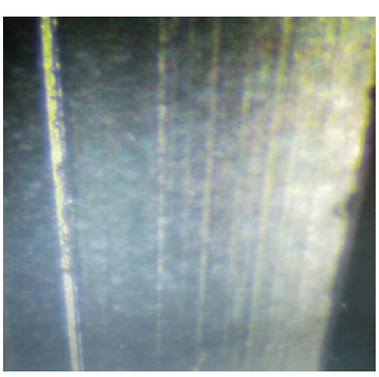


图3　齿面划道缺陷形貌

3　原因分析

3.1　材料分析

该齿轮材料S-0203为高强度耐磨聚醚醚酮复合材料，以短切碳纤维增强改性的聚醚醚酮为原料压

制而成。聚醚醚酮为半结晶性芳香族线性热塑性工程塑料，具有密度低（1.44g/cm^3）、质量轻、化学稳定性好、耐高温、耐酸碱、耐水解、耐磨及自润滑等综合性能，具有良好的冲击韧性；硬度低（邵氏硬度86～88HD），属于硬塑料，机械切削性能良好。在加工初期刀具、磨粒锋利时，可以承受较大的进给量；当刀具不锋利或砂轮气孔堵塞时，切削性能变差，导致产生剥落、掉块缺陷。

3.2 工艺分析

（1）掉块缺陷原因分析　存在掉块缺陷的端面涉及的加工工序有压套和磨端面工序。齿轮与齿轮轴的配合紧度为0.03～0.05mm，压套时采用图4所示常温压套装置，使用压力机在常温下压套，在齿轮轴上端面施加一定的压力，使齿轮轴压入非金属齿轮的内孔，目视齿轮轴与齿轮端面平齐。因齿轮的内孔与齿轮轴的外圆为紧配合，压套过程中复合材料齿轮会因挤压造成齿轮内孔和齿轮轴端面的相交处产生掉块缺陷。若压套后齿轮轴与齿轮端面不平齐，在磨端面过程中，不平齐部位无齿轮轴内部支撑，内孔弹性变形回缩，受砂轮磨削过程的剪切力，易产生剥落、掉块缺陷。

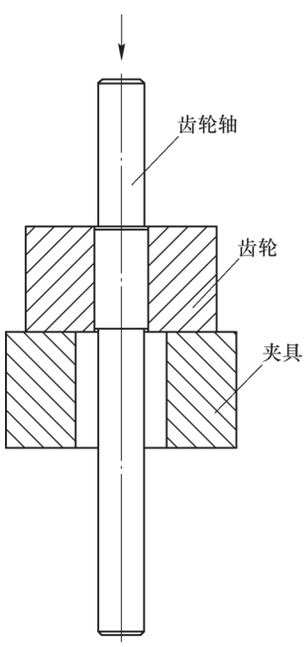


图4　常温压套装置示意

（2）齿面划道缺陷原因分析　齿面划道缺陷涉及的工序为磨齿工序。使用数控成形磨齿机磨削齿面，工件的装夹如图5所示。工件总长43.5mm，两端轴径为ϕ4mm，长径比接近11，刚性差。采用磨齿直接开齿的方法进行磨削，磨齿加工前后的工件如图6所示，齿顶圆ϕ16.5mm，齿根圆ϕ9.5mm，磨齿余量3.5mm。采用5SG100-FG12VS3P刚玉砂轮磨削齿面，磨削过程中该材料易掉渣，若砂轮修整不及时，易被切屑堵塞。工件长径比大，导致在加工过程中易弯曲变形，砂轮与齿面可能无法精确地贴合；同时砂轮偏软，磨粒还在锋利时就脱落，易在齿面形成划道缺陷。

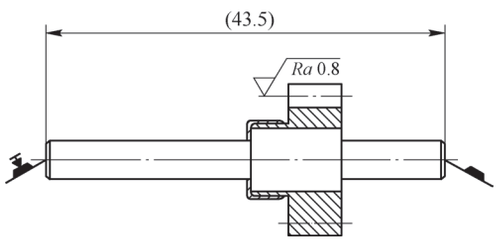
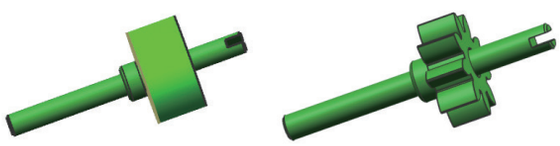


图5　磨齿时工件的装夹示意



a）加工前　　b）加工后

图6　磨齿加工前后的工件示意

4　对压套工艺的改进

4.1 对压套方法的改进

借鉴公司石墨衬套压入铝壳体内孔的热胀冷缩工艺方法，即壳体升温160～180℃，石墨液氮冷却至沸腾进行压套，满足壳体与衬套的配合紧度要求。复合材料齿轮与齿轮轴的压套，需将复合材料齿轮加热，齿轮轴冷冻。在温度参数方面无可供借鉴的数据，只能通过理论计算及试验确定温度参数。复合材料齿轮的热膨胀系数为5×10^{-5}/℃，当温度升高至170～180℃时，理论计算内孔会胀大0.034～0.036mm；齿轮轴的热膨胀系数为14×10^{-6}/℃，当温度降低至－50～－40℃时，理论计算齿轮轴外圆会缩小0.004～0.005mm。通过计算，热胀后的齿轮内孔与冷缩后的齿轮轴可以达到间隙配合。实际试验时，将齿轮放置在恒温烘箱中，随箱体温度加热至170～180℃，保持10min；将齿轮轴放置在低温冷冻箱内，随箱体冷却至－50～－40℃，保持10min，无需外力作用即可轻松完成压套，消除了复合材料齿轮与金属齿轮轴之间的机械挤压力。因

齿轮轴与齿轮零件体积较小，自身保温性较差，所以加热、冷却后应尽快完成压套，避免室温下零件温度恢复，影响压套质量。

4.2 对压套工装的改进

设计压套工装（见图7），将齿轮轴安装在压套工装内孔中，按图8a所示方向压入复合材料齿轮，压至与压套工装端面贴合（见图8b）。

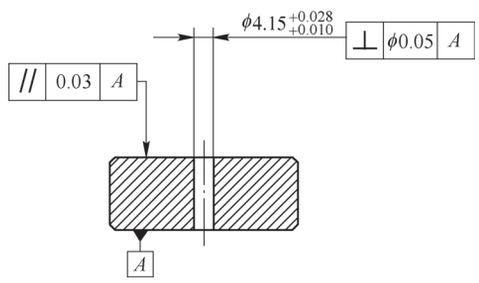
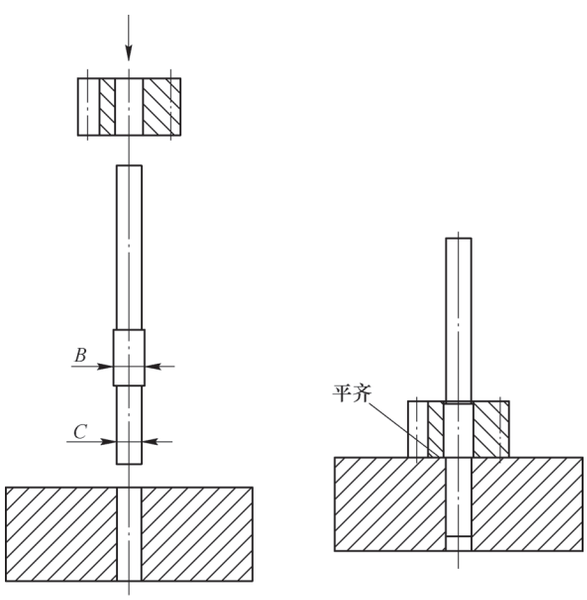


图7 压套工装



a）压套前　　b）压套后

图8 改进后压套示意

以齿轮轴C外圆定位进行压套，C外圆直径$4.15^{+0.02}_{0}$mm。复合材料齿轮配合的B外圆直径$4.8^{+0.01}_{0}$mm，B外圆端面倒角0.1mm×45°，即齿轮轴与压套工装配合面宽度仅0.220～0.235mm，压套工装的内孔与齿轮轴C外圆的间隙最小0.01mm，以确保齿轮轴装入压套工装后垂直度、端面贴合度良好。在压入复合材料齿轮时齿轮轴不能晃动，确保复合材料齿轮压入齿轮轴后与压套工装端面贴合度良好。以压套工装的端面为辅助基准定位面，使齿轮轴、复合材料齿轮均与压套工装端面平齐，可保证齿轮轴与复合材料齿轮端面压套后平齐，消除了复合材料齿轮在后续的磨削端面过程中，因凸出而受磨削剪切力，产生剥落、掉块缺陷。

实践证明，齿轮端面掉块缺陷产生的原因有两方面，一是压套时的挤压力造成掉块，二是压套后端面不平齐，在磨削过程中掉块。对压套工装及方法改进后，消除了压套时的内孔过盈挤压力，保证压套后齿轮端面平齐，采用体视显微镜（倍率为15×）进行检查，未发现掉块现象。

5 对磨齿工艺的改进

5.1 砂轮选型

因聚醚醚酮复合材料在我公司是首次加工，无相关的机械加工经验，通过查阅机械加工手册，同时结合聚醚醚酮材料特性，通过现场试验来确定砂轮磨料、硬度、结合剂及粒度。

（1）砂轮磨料的选择　主要取决于工件的材料。碳化硅磨料的砂轮适用于金属或非金属的外圆、内圆、平面和各种型面的磨削，可进行粗磨、半精磨、精磨及开槽等。由于聚醚醚酮复合材料为硬塑料，齿轮磨削为型面磨削，在磨齿时粗磨与精磨不更换砂轮，因此选择碳化硅磨料的砂轮。

（2）砂轮硬度的选择　硬度是指砂轮在外力作用下磨粒脱落的难易程度。硬度的选择主要取决于被磨削工件的材料、磨削效率和加工表面质量。磨削软材料时要选用较硬的砂轮；磨削硬材料时则要选择软砂轮；磨削软而韧性大的材料时，应选软一些的砂轮；端面磨削比圆周磨削使用的砂轮要软一些。聚醚醚酮复合材料为硬塑料，相对于金属材料，材料软且韧性大，采用成形磨齿的方法，应选择较软的砂轮，在磨削过程中砂轮出现堵塞时，磨粒易脱落，可以始终保持磨粒锋利。

（3）砂轮结合剂的选择　常见的砂轮结合剂有陶瓷结合剂和树脂结合剂。陶瓷结合剂具有气孔率大、磨耗小的优点，但不能承受剧烈振动，一般在35m/s以下的工作速度使用；树脂结合剂结合强度高，能在高速下进行工作，工作速度可高于50m/s，树脂结合剂的砂轮一般比陶瓷结合剂的硬度高。在高倍光学显微镜下观察聚醚醚酮复合材料的形貌，碳纤维填料直径约7μm，长度约140μm。由于磨削过程中碳纤维脱落后易堵塞砂轮气孔，导致砂轮

的切削性能变差，所以应选择气孔率大的陶瓷结合剂。

（4）砂轮粒度的选择　粒度是指磨料的颗粒尺寸。用粗粒度的砂轮磨削时，生产效率高，但加工的工件表面粗糙；用细粒度的砂轮磨削时，加工的工件表面质量较好，尺寸精度高且质量稳定，但磨削效率低。粒度的选择主要取决于磨削工件的表面粗糙度和磨削效率，在满足表面粗糙度要求的前提下，应尽量选用粗粒度的砂轮，以保证较高的磨削效率。一般粗磨时选用粗粒度的砂轮，精磨时选用细粒度的砂轮。复合材料齿轮的模数为1.5，齿面的表面粗糙度值Ra=0.8μm，公法线变动量为0.015mm。由于齿轮模数小，齿面精度及表面粗糙度要求高，若采用粗粒度的砂轮，砂轮修型后齿面致密度不够，磨削时齿面精度及表面粗糙度不稳定，所以选取粒度80#、100#的砂轮进行试验。试验表明，粒度100#的砂轮磨削后的表面质量优于粒度80#砂轮磨削后的表面质量。

5.2　磨齿参数的改进

磨齿分为粗磨和精磨两个阶段。在粗磨齿阶段，应采用大进给量、大进给速度快速去除余量；在精磨齿阶段，应采用小进给量、小进给速度，以满足零件最终尺寸的稳定性及表面粗糙度要求。加工时共分9次走刀进给，因复合材料易堵塞砂轮，所以在每次进刀磨削结束后要修整砂轮。砂轮线速度为30m/s，具体的磨削参数见表1。

表1　磨削参数

加工阶段	走刀次序	磨削深度/mm	进给速度/（mm/min）	进刀次数	进给量/（mm/行程）
粗磨齿阶段	1	0.58	3000	16	前5次0.05，后11次0.03
	2	0.36	3000	12	0.03
	3	0.30	3000	10	0.03
	4	0.30	3000	10	0.03
	5	0.24	3000	8	0.03
	6	0.16	3000	8	0.02
	7	0.16	3000	8	0.02
精磨齿阶段	8	0.035	2000	3	第1次0.015，后2次0.01
	9	0.010	1500	2	0.005

选用GC100JVKS碳化硅砂轮代替原来的5SG100-FG12VS3P刚玉砂轮磨削齿面，试验表明，GC100JVKS碳化硅砂轮能够满足零件的加工要求，磨削加工过程质量稳定，表面无划道。

6　结束语

高强度耐磨聚醚醚酮复合材料S-0203加工缺陷产生的原因以及砂轮选型和修整经验总结如下。

1）齿轮端面掉块缺陷产生的原因是压套过程中的机械挤压力、磨削过程的剪切力；齿面划道缺陷产生的原因是所使用的砂轮过软，砂粒脱出后划伤齿面。

2）磨削时应采用硬度稍软、气孔率大的陶瓷结合剂碳化硅砂轮，即选择牌号中含C/GC（碳化硅）、H/J/K（软）、V（陶瓷结合剂）的砂轮。

3）复合材料S-0203是一种硬工程塑料，在磨削过程中易掉渣、易堵塞砂轮，需要及时修整砂轮，既要保持砂轮锋利，又要保证砂轮的磨削精度。

参考文献：

[1] 张照. 碳纤维织物增强聚醚醚酮基（CFF/PEEK）航空复合材料的制备及其界面改性[D]. 上海：东华大学，2017.

[2] 刘婷，南楠，吴冉. 数控成型磨齿机新工艺的研究与应用[J]. 机械制造，2015（1）：32-34.

[3] 张玉环，韩新艳，涂娇，等. 一种密封组件及其加工方法：CN106271381A[P]. 2017-01-04.

MW 20210318

专家点评

文章针对复合材料齿轮加工过程中存在的问题进行研究，在磨齿和压套工序采取合理的改进措施，解决了齿轮的加工和装配问题。

文章的亮点是善于分析零件的材料特性并借鉴成熟的工艺方法，通过热胀冷缩的压套方法，消除齿轮装配中的内孔挤压力。通过砂轮选型和磨齿参数的改进，消除齿面磨削缺陷。经现场工艺试验，正确掌握了聚醚醚酮复合材料齿轮的压装和磨削特性。