DOI:10.16731/j.cnki.1671-3133.2015.01.004

轮槽加工中铣削力与铣削温度分布规律研究*

许生福[1],陈惠贤[1],陈明[2],刘文泽[3]
(1 兰州理工大学机电工程学院,兰州 730050;2 上海交通大学,上海 200240;
3 东方汽轮机厂,德阳 618000)

摘要: 轮槽铣刀的改进往往是推动轮槽加工技术进步的最直接动力,而轮槽铣刀不同点的切削用量不同,很难测量出刀具不同点的力和温度。基于微元思想并利用标准盘铣刀和等效方法进行了铣削试验,得到了轮槽铣刀相应型线上铣削力与铣削温度的分布曲线并关注了危险点。

关键词: 枞树型轮槽铣刀;轮槽加工;铣削力;铣削温度
中图分类号: TG714　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1671—3133(2015)01—0078—04

Study on milling force and milling temperature distribution of milling cutter with fir-slot

Xu Shengfu[1],Chen Huixian[1],Chen Ming[2],Liu Wenze[3]
(1 School of Mechanical and Electrical Engineering ,Lanzhou University of Technology,
Lanzhou 730050,China;2 Shanghai Jiaotong University,Shanghai 200240,China;
3 Dongfang Turbine Corporation,Deyang 618000,Sichuan,China)

Abstract: Round the improvement of milling cutter with fir-slot is often driven wheel groove processing technology progress,and slotting cutter differences of different cutting parameter,it is difficult to measure milling force and milling temperature. Based on the elementary ideas and use the standard plate milling cutter and the equivalent method for the milling test,and milling force and milling temperature distribution curve of milling cutter with fir-slot had been got. Lastly pay attention to the danger point.

Key words: milling cutter with fir-slot; wheel groove machining; milling force; milling temperature

0 引言

汽轮机转子是汽轮机的动力部分,其加工质量直接关系到汽轮机的性能,其中转子轮槽的加工是转子加工中最关键、最困难的环节[1]。1 000MW汽轮机低压转子采用枞树型轮槽,该槽型尺寸大、形状复杂,刀具与工件表面接触面积较大,只能采用成形铣削加工,枞树型轮槽铣刀如图 1 所示。

在加工过程中切削区域温度高,不仅加速了刀具磨损,影响刀具寿命,同时也容易使加工后材料产生较大的残余应力,直接影响材料的疲劳强度、尺寸稳定性、使用寿命及可靠性,因而枞树型轮槽铣刀已成为汽轮机制造行业备受关注的刀具装备技术,决定着汽轮机转子轮槽加工质量和加工效率[2-5]。

目前国内主要有上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂及东方汽轮机厂等单位进行转子轮槽加工,其中哈尔滨汽轮机厂的刘力田等人[6]对其公司引进的一种用于 300MW、600MW 汽轮机枞树型轮槽加工的新型结构轮槽铣刀,从刀具结构、几何参数、刀具材料和刀具表面强化处理、切削用量等方面研究了该新型轮槽铣刀,并把该铣刀用于实际生产,提高了生产效率;徐艳等人[7]分别进行了枞树型轮槽粗加工、半精加工及精加工铣刀的设计与应用研究;美国 Westinghouse 公司选用 Ingersoll 机床厂制造的专用叶根槽铣床来加工转子枞树型叶根槽,铣削时采用成形铣刀,仅用粗铣、半精铣和精铣 3 刀即可完成加工[8]。

以上研究对轮槽铣刀铣削过程中的铣削力与铣削温度涉及甚少,一方面是由于轮槽铣削过程中环境的封闭性加之轮槽型线(如图 2 所示)的复杂性,刀具型线不同点的切削用量不同;另一方面是由于轮槽铣

* 国家科技重大专项课题资助项目(2012ZX04003-051)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

刀铣削数学模型的建立十分困难。基于此，本文利用盘铣刀的铣削力数学模型，通过等效方法（等效切削速度、等效切削厚度、等效每齿进给量）的实验原则，结合盘铣刀铣削试验，研究了轮槽铣刀铣削力与铣削温度的分布规律，为轮槽铣刀的设计和加工工艺的制定提供有益的借鉴。

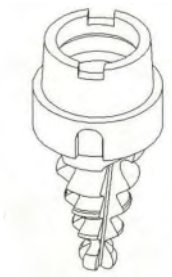


图 1　枞树型轮槽铣刀

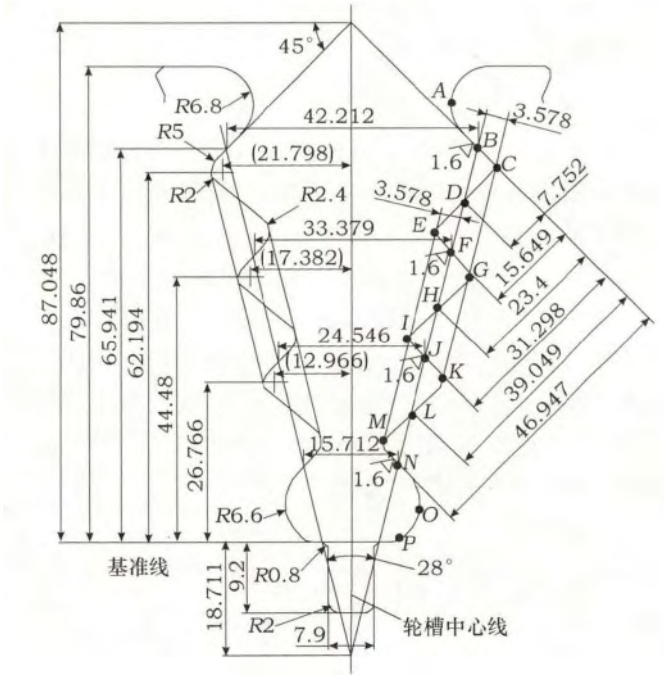


图 2　枞树型轮槽名义型线

1　试验原理

由于枞树型轮槽铣刀加工过程中刀具型线上不同点的切削速度、进给量和背吃刀量不同，各点产生的铣削力和铣削热不同，很难测量各点的力热分布情况。本试验通过采用标准盘铣刀模拟实际轮槽的加工条件，分析铣削过程中的铣削力和铣削温度分布情况。将枞树型轮槽铣刀上各点离散化，分别选取铣刀轮廓型线上的 16 个不同位置点 A ~ 点 P 作为研究对象（如图 2 所示），采用等效方法计算出标准盘铣刀进行铣削加工的加工参数。等效切削速度是指标准刀具按照成形铣刀的加工参数通过等效方法计算出的切削速度。等效切削厚度和等效每齿进给量只是成形铣刀和标准刀具切削时厚度和方式的相似性。根据式（1），由成形铣刀各点直径和转速计算出线速度，然后再由线速度和标准刀具直径计算出标准刀具转速。

$$\frac{\pi d_{成}\, n_{成}}{1\,000} = v = \frac{\pi d_{标}\, n_{标}}{1\,000} \tag{1}$$

式中：$d_{成}$ 为成形铣刀各点直径；$n_{成}$ 为成形铣刀转速；v 为刀具上点的线速度；$d_{标}$ 为标准刀具直径；$n_{标}$ 为标准刀具转速。

为了对铣削加工中切削层参数进行等效计算以及有效的建模分析，用面积等效法则把不规则的切削层等效成一个三角形，用规范的三角形代替实际加工的切削层，等效三角形的面积等于实际加工的切削层面积。采用等效三角形切削能更好地反映切削厚度的变化，从而更逼近地模拟铣刀切削时切入、切出时的实际情况。根据公式：

$$a_e = f_z \sin\theta \tag{2}$$

$$v_f = f_z z n / 60 \tag{3}$$

式中：a_e 为切削厚度；f_z 为标准盘铣刀的每齿进给量；θ 为标准盘铣刀铣削刃与工件切削时的接触角度；v_f 为铣削工件的进给速度；z 为标准盘铣刀的齿数；n 为标准盘铣刀的转速。

再根据标准盘铣刀切削原理（如图 3 所示），得：

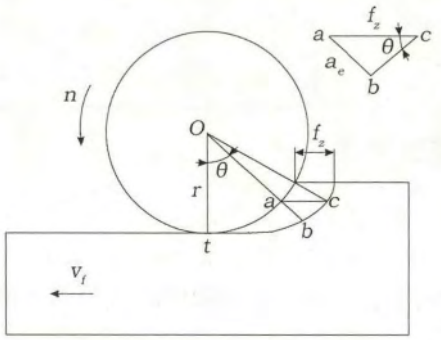


图 3　标准盘铣刀铣削原理图

$\triangle abc \backsim \triangle otb$，则：

$\frac{\overline{ac}}{\overline{ob}} = \frac{\overline{bc}}{\overline{ot}}$，即：

$$\frac{f_z}{\overline{ob}} = \frac{\overline{bc}}{r} \tag{4}$$

再有：

$$\overline{ob} = r + a_e \tag{5}$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对△abc 有:

$$\cos\theta = \frac{f_z^2 + \overline{bc}^2 - a_e^2}{2f_z\,\overline{bc}} \tag{6}$$

由式(4)~式(6)可确定出 $\theta_{成}$(成形铣刀铣削刃与工件切削时的接触角度),代入式(2)求出等效切削厚度 a_c。成形铣刀加工过程中的侧吃刀量 a_e 通过刀具图样来确定[9],此处取 $a_e = 0.5$mm。然后按照上述方法逆向求出标准盘铣刀的等效每齿进给量 f_z,再根据式(3)求出标准刀具的进给速度。

通过以上分析得出等效模型也即标准盘铣刀的切削参数,从而可以借助切削试验分析枞树型轮槽铣刀的铣削力与铣削温度分布情况。表 1 所示为标准盘铣刀铣削时的加工参数。

表 1　标准盘铣刀铣削时的加工参数

点号	切削速度 v_c/(m·min^{-1})	回转速度 n/(r·min^{-1})	进给速度 v_f/(mm·min^{-1})	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm
A	58.63	1 555.22	49.77	6	0.5
B	89.17	2 364.94	160.81	6	0.5
C	113.70	3 015.49	276.97	6	0.5
D	83.15	2 205.83	149.91	6	0.5
E	50.42	1 337.39	42.80	6	0.5
F	71.47	1 895.58	128.89	6	0.5
G	92.39	2 450.41	225.07	6	0.5
H	63.98	1 697.27	115.35	6	0.5
I	34.26	908.76	39.99	6	0.5
J	49.63	1 316.55	110.59	6	0.5
K	63.57	1 686.20	161.88	6	0.5
L	44.92	1 191.30	114.36	6	0.5
M	16.98	450.61	30.63	6	0.5
N	30.38	805.83	83.81	6	0.5
O	36.40	965.34	108.46	6	0.5
P	17.73	470.03	26.33	6	0.5

2　试验过程

枞树型轮槽铣刀铣削试验在 SKODA HCW3-200 数控镗铣床上进行。测力系统使用 KISTLER9272 四向压电式测力仪、KISTLER5017B 电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统。其中,KISTLER9272 四向压电式测力仪的基本技术参数:灵敏度为 0.05N,采样频率为 800Hz,量程为 ±5kN(X 向和 Y 向)、-5~20kN(Z 向),扭矩为 ±200N·m。测力系统坐标系定义为:沿刀具进给方向为 X 向,垂直进给方向为 Y 向,刀具轴线方向为 Z 向。试验温度测量采用夹丝法,能够直接对刀具-工件接触区域的温度进行测量,具有较高的准确性。铣削力测量系统原理如图 4 所示,铣削温度测量系统原理如图 5 所示。

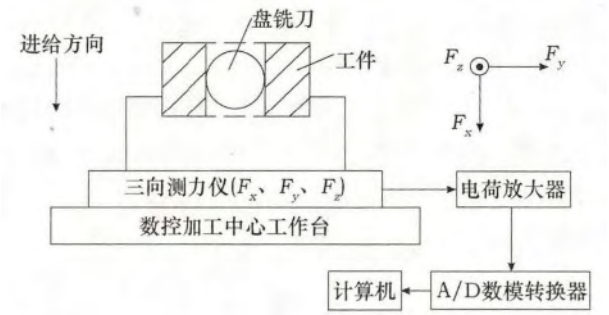


图 4　铣削力测量系统原理

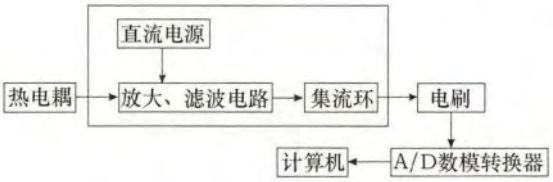


图 5　铣削温度测量系统原理

3　试验结果分析

枞树型轮槽型线上各点铣削力变化曲线如图 6 所示。从图 6 所示可看出,枞树型轮槽铣刀在铣削加工过程中沿刀具进给方向上的切削力 F_x 和垂直于进给方向上的切削力 F_y 远大于沿刀具轴线方向上的切削力 F_z;切削力 F_x 大小和切削力 F_y 大小相差不大,最大的 F_x 出现在点 N,最大的 F_y 出现在点 C,在以后的设计生产过程中应该给予注意;枞树型轮槽铣刀型线上点 A~点 P 的切削力 F_z 变化幅度不大,说明改变切削速度、切削进给量对刀具轴线方向上的力影响不大,有利于刀具系统刚性的满足。

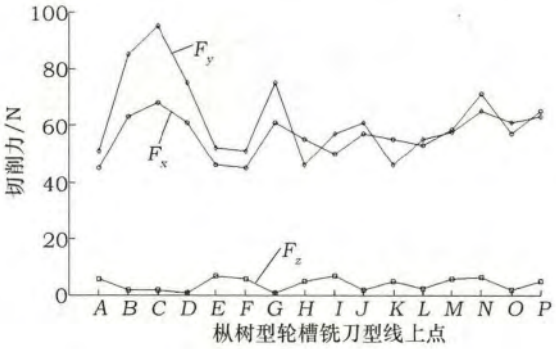
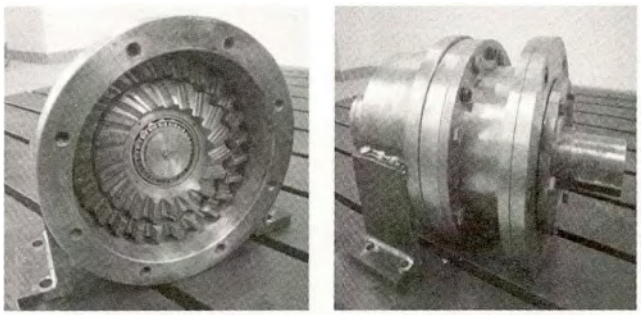


图 6　枞树型轮槽型线上各点铣削力变化曲线

枞树型轮槽型线上各点温度变化曲线如图 7 所示。从图 7 所示可看出,从点 A~点 P 的温度变化曲线和枞树型轮槽铣刀型线类似,每个齿的齿尖处温度最高,齿根处温度最低,最高的温度点出现在点 C,在

(下转第 124 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a) 双圆弧锥齿轮实物　　b) 章动减速器实物样机

图 14　双圆弧锥齿轮及章动减速器实物图

MATLAB 软件建立了可控精度的内、外锥齿轮三维齿廓雏形，并通过编程对该三维齿面进行剪裁。采用该方法建立的三维模型及加工后的实物样机为后续的研究奠定了基础。

同时，由于这种基于纯齿轮啮合原理建立的齿面方程是一种理想条件下的模型，未考虑误差参数对齿廓建模精度的影响，所以未来对多误差参数耦合下的双圆弧锥齿轮齿面建模还需进一步研究。

参 考 文 献:

[1]　邵家辉. 圆弧齿轮 [M]. 北京: 机械工业出版社，1994.

[2]　段振云. 白川德共轭曲面的基本原理与斜航式法向圆弧螺旋锥齿轮传动的研究 [D]. 大连: 大连理工大学，2002: 2 – 4.

[3]　蔡英杰，姚立纲. 双圆弧螺旋锥齿轮章动传动运动和动力学仿真 [J]. 传动技术，2007，21(4) : 22 – 25.

[4]　谭小红. 双圆弧齿轮的建模与仿真 [D]. 太原: 太原理工大学，2004: 58 – 59.

[5]　Yao Ligang，Gu Bing. Mathematical modeling and simulation of the external and internal double circular-arc spiral bevel gears for the nutation drive [J]. Journal of Mechanical Design，ASME，2010(132) : 1 – 10.

[6]　黄淑娟. 双圆弧螺旋齿章动传动啮合分析与设计制造 [D]. 福州: 福州大学，2009: 21 – 23.

[7]　顾炳. 双圆弧螺旋锥齿轮章动传动数控成型原理及产品开发 [D]. 福州: 福州大学，2006.

作者简介: 张俊，硕士研究生，主要研究方向为复杂曲面建模及精确制造。

E-mail: zhangjun998866@ 163. com

收稿日期: 2013-01-08

(上接第 80 页)

以后的设计生产过程中应该给予注意，优化设计。

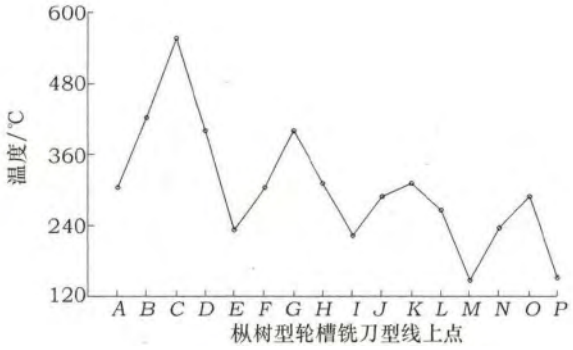


图 7　枞树型轮槽型线上各点温度变化曲线

4　结语

枞树型轮槽在铣削加工过程中铣削力与铣削温度的变化规律与其型线曲线变化规律相类似; 其在进给方向上的铣削力和垂直于进给方向上的铣削力远大于沿刀具轴线方向上的铣削力; 每个齿的齿尖处温度最高，齿根处温度最低。

参 考 文 献:

[1]　陈惠贤，葛庆安，姚运萍，等. 枞树型轮槽铣刀精密铲磨方法的研究 [J]. 工具技术，2004，38(6) : 25 – 27.

[2]　葛春新，陈富新，周月香，等. 1000MW 超超临界汽轮机低压转子国产化加工工艺研究 [J]. 热力透平，2009，38 (2) : 145 – 147.

[3]　韩雷，陈明，陈富新，等. 1000MW 汽轮机低压转子轮槽成形铣刀加工性能研究 [J]. 热力透平，2007，36(3) : 195 – 198.

[4]　Wyatt J E，Berry J T. A New Technique for the Determination of Superficial Residual Stresses Associated with Machining and Other Manufacturing Processes [J]. Journal of Materials Processing Technology ，2006(171) : 132 – 140.

[5]　Sharman A R C，Hughes J I，Ridgway K. An Analysis of the Re-sidual Stresses Generated in Inconel 718™ When Turning [J]. Journal of Materials Processing Technology，2006 (173) : 359 – 367.

[6]　刘力田，徐玉彬，汪津泽. 转子轮槽高效加工的试验 [J]. 机械工程师，2007(3) : 131 – 132.

[7]　徐艳，张伟，张昌成. 枞树型轮槽铣刀的设计与应用 [J]. 汽轮机技术，2001(12) : 379 – 381.

[8]　陈明，安庆龙，刘志强. 高速切削技术基础与应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社，2012.

作者简介: 许生福，硕士研究生，主要研究方向为刀具技术和成套装备及其自动化技术。

E-mail: x. s. f. 2009@ 163. com

收稿日期: 2013-12-02

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net