舞いツールによるスクリー圧縮機用ロータの精密仕上*

(第1報, 歯形が円弧の場合)

久曾神 煌**, 宗片 和 視***
田中政 則****, 豊山 晃**A Rotor Finishing Method in a Screw-Compressor by a Fly Tool
(1st Report; an Example of a Circular Arced Tooth-Profile)by Akira KYUSOJIN, Kazumi MUNEKATA,
Masanori TANAKA, and Akira TOYAMA

The purpose of this paper is to finish the helicoidal surface accurately by using a fly tool. A rotor used screw-compressor of a non-lubrication-type is used as an example of the helicoidal surface. In order to manufacture the rotor of a non-lubrication-type by a fly tool, cutter shape is numerically analyzed for the helicoidal rotor, having the circular arc in the section perpendicular to the rotor axis. Then, the rotor was hobbled with this cutter and measured by a three dimensional measuring machine. Furthermore, the cutter shape is analyzed for a helicoidal rotor, whose section is formed of plural curved lines. In the result, it is possible to manufacture the rotor of a non-lubrication-type by using a fly tool.

Key Words: Numerical Analysis, Fluid Transportation Systems, Fly Tool, Screw-Compressor

1. 結 言

舞いツールによるねじ状曲面の精密仕上を目的としその一例として無潤滑式のスクリー圧縮機用ロータを取り上げる。本研究では前段階として、軸直角断面が円弧のはず歯ロータを考え、これを加工するための舞いツールの刃形解析、ホブ盤による加工、三次元測定機によるロータの形状精度評価を行った。また実機のロータに近づけるために、軸直角断面が曲率の異なる円弧からなる歯形のはず歯ロータ加工用舞いツールの刃形解析も行った。

記 号

S : 舞いツールとロータとの中心間距離(mm)
 $2 \cdot R_w$: ロータの外径(mm)
 R : 歯形円弧の中心が存在する半径(mm)
 R_n : 歯形円弧のねじれ角を規定する半径(mm)
 N_e : 歯形円弧のねじれ角(rad)

HAN : 歯形円弧の半径(mm)

R_0 : はず歯ロータのピッチ円半径(mm)

ただし, $R_0 = R - HAS/2$ の関係がある。

R_{f0} : 舞いツールのピッチ円半径(mm)

ω_b : ロータの角速度(rad/s)

ω_f : 舞いツールの角速度(rad/s)

V_f : 舞いツールの垂直方向の送り速度(mm/s)

ただし, $V_f = a \cdot \omega_b \cdot t$ の関係があり, a は定数である。

N : 歯数

Ψ : 舞いツールの傾き角(rad)

t : 時間(s)

$XR = S - X_4 \cdot \cos(\omega_f \cdot t) - R \cdot \cos(\alpha)$

$dXR = X_4 \cdot \omega_f \cdot \sin(\omega_f \cdot t) + R \cdot d\alpha \cdot \sin(\alpha)$

$YR = Y_4 \cdot \cos(\Psi) + X_4 \cdot \sin(\omega_f \cdot t)$

$\times \sin(\Psi) + R \cdot \sin(\alpha)$

$dYR = X_4 \cdot \omega_f \cdot \cos(\omega_f \cdot t) \cdot \sin(\Psi)$

$+ R \cdot d\alpha \cdot \cos(\alpha)$

$\alpha = \omega_b \cdot t + \frac{\tan(N_e)}{R_n} \{ Y_4 \cdot \sin(\Psi)$

$- X_4 \cdot \sin(\omega_f \cdot t) \cdot \cos(\Psi) + a \cdot \omega_b \cdot t \}$

$d\alpha = \omega_b + \frac{\tan(N_e)}{R_n} \{ a \cdot \omega_b - X_4 \cdot \omega_f$

$\times \cos(\omega_f \cdot t) \cdot \cos(\Psi) \}$

* 昭和60年10月2日 第63期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年3月28日.

** 正員, 長岡技術科学大学工学部 (〒949-54 長岡市上富岡町1603-1).

*** 学生員, 長岡技術科学大学大学院.

**** 北越工業(株)開発部 (〒959-01 新潟県西蒲原郡分水町大武新田113-1).

2. 理 論

2.1 刃形解析 軸直角断面が円弧のはず歯ロータを加工するための舞いツールの設定条件 (舞いツールの傾き角, ロータと舞いツールの角速度および舞いツールの送り速度との関係) は, 以下ようになる。

$$\Psi = N_e - \sin\left\{\frac{R_0 \cdot \cos(N_e) \cdot \omega_b}{R_{f0} \cdot \omega_f}\right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega_f = N \left\{1 + \frac{a \cdot \tan(N_e)}{R_n}\right\} \omega_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

この設定条件を満足し図1の状態では加工するときの舞いツールの刃形を求めるには, 初めに XYZ 座標系ではず歯歯面を方程式により表す。

$$\begin{aligned} &\left\{X - R \cdot \cos\left(\omega_b \cdot t + \frac{\tan(N_e) \cdot Z}{R_n}\right)\right\}^2 \\ &+ \left\{Y + R \cdot \sin\left(\omega_b \cdot t + \frac{\tan(N_e) \cdot Z}{R_n}\right)\right\}^2 \\ &= HAN^2 \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

次に $X_4 Y_4 Z_4$ 座標系においてははず歯歯面と舞いツールのすくい面との交線を求める。XYZ 座標系と $X_4 Y_4 Z_4$ 座標系の関係は以下ようになる。

$$\begin{aligned} X &= S - \cos(\omega_f \cdot t) \cdot X_4 - \sin(\omega_f \cdot t) \cdot Z_4 \\ Y &= \sin(\omega_f \cdot t) \cdot \sin(\Psi) \cdot X_4 + \cos(\Psi) \cdot Y_4 \\ &\quad - \cos(\omega_f \cdot t) \cdot \sin(\omega_f \cdot t) \cdot \sin(\Psi) \cdot Z_4 \\ Z &= a \cdot \omega_b \cdot t - \sin(\omega_f \cdot t) \cdot \cos(\Psi) \cdot X_4 \\ &\quad + \sin(\Psi) \cdot Y_4 + \cos(\omega_f \cdot t) \cdot \cos(\Psi) \cdot Z_4 \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

式(3)に式(4)を代入し, 舞いツールのすくい面 $Z_4=0$ と連立することにより, 交線の方程式は以下の

ようになる。

$$XR^2 + YR^2 - HAN^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

舞いツールの刃形形状は, 式(5)の包絡線を求めればよいので, 式(5)とこれを t で微分した方程式とを連立して求める。この式(5)を t で微分した方程式を以下に示す。

$$XR \cdot dXR + YR \cdot dYR = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

実際に式(5)と式(6)を代数的に連立して解くことが困難であるので, 二変数の修正ニュートン法を用いて解く。

以上は軸直角断面が円弧のはず歯ロータの場合である。実際は複数の曲線からなっているので, 軸直角断面が曲率の異なる二つの円弧からなるはず歯ロータを考え, 加工用舞いツール刃形を計算する。最も難しい二円弧の交点を加工する舞いツールの刃形部分を以下の方法により求める。

二つの曲線を曲線 A と曲線 B と考えて, 曲線 A の交線の方程式 $F_A(X_4, Y_4, t)=0$ とこの曲線を t で微分した方程式 $C_A(X_4, Y_4, t)=0$ と曲線 B の交線の方程式 $F_B(X_4, Y_4, t)=0$ の三式を連立して, 曲線 A と曲線 B の交点を加工する舞いツールの刃形部分を三変数の修正ニュートン法により求める。外の部分は, 軸直角断面が円弧のはず歯ロータと同様に求めることができる。

2.2 三次元測定機によるロータの形状精度評価方法 本研究で用いた形状精度評価方法は, 球面プローブと測定面を接触させて, このときの球面プローブの中心座標 P を測定する。この中心座標を通る球面プローブと理想歯面の共通法線を求め, これと球面およ

図1 舞いツールによる軸直角断面が円弧のはず歯ロータの加工概念図

び理想歯面との交点 P_h , T_h を求める。交点 P_h は測定面とプローブの接触点とみなす。また交点 P_h と T_h 間の長さ E を誤差として評価する。この概念図を図2に示す。

3. 舞いツールによる加工

実際に加工した軸直角断面が円弧のはず歯ロータの形状を図3に示す。図3のはず歯ロータを加工するための舞いツールをNC研削盤で加工した。その形状精度を図4に示す。この図において実線が解析結果であり、点線が実際に加工された結果である。これより形状精度が $76\mu\text{m}$ であることがわかる。

図2 ロータの形状精度評価方法の概念図

図3 軸直角断面が円弧のはず歯ロータ

図4 舞いツールの形状精度

4. 加工ロータの評価

4.1 形状精度 表1の切削条件により加工されたロータを三次元測定機を用いて2.2節の評価方法に基づいて評価する。加工ロータの測定位置を図5に示す。測定位置にかかわらず同様な結果が得られたので図6に代表として一例を示す。

図6における横軸は、加工ロータの測定点を角度により表示したもので、縦軸は加工ロータの法線方向の誤差である。また実線は形状精度 $76\mu\text{m}$ を有する舞い

表1 切削条件

MATERIAL OF ROTOR	S45C	
MATERIAL OF FLY TOOL	SKH9	
CUTTING SPEED	53 m/min	
	DEPTH OF CUT (mm)	FEED RATE (mm/rev)
ROUGHING	10	0.15
MEDIUM FINISHING	1	0.30
FINISHING	0.15	0.10

図5 加工ロータの測定位置

図6 加工ロータの形状精度

図7 加工ロータの表面あらさ

ツールにより実際に加工したときの形状精度を示し、点線は形状精度 $76\mu\text{m}$ を有する舞いツールにより加工するときの計算上の結果である。両曲線の差は最大 $18\mu\text{m}$ であった。これより形状精度 $76\mu\text{m}$ の舞いツールにより実際に加工したロータの形状精度は、 $58\mu\text{m}$ であることと、舞いツールが誤差なく加工できればロータの形状精度は $18\mu\text{m}$ になり得るということである。

4・2 表面あらさ 加工ロータの表面あらさをタリサーフにより測定した結果を図7に示す。

5. 結 言

無潤滑式スクリュウ圧縮機用ロータの舞いツールによる加工の可能性を明らかにするため、軸直角断面が円弧のはず歯ロータを取り上げ、加工用舞いツールの刃形解析、ホブ盤による加工、三次元測定機による形状

精度評価を行った。また軸直角断面が曲率の異なる二つの円弧からなる場合についても、加工用舞いツールの刃形解析を行った。この結果以下のことがいえる。

(1) 軸直角断面が複数の曲線からなるはず歯ロータを加工するための舞いツールの刃形形状は、サブミクロンの精度で求められる。

(2) 軸直角断面が円弧のはず歯ロータを、形状精度 $76\mu\text{m}$ を有する舞いツールにより加工した場合、加工ロータは形状精度 $58\mu\text{m}$ で加工できた。また舞いツールが理想的に成型できれば、加工ロータは形状精度 $18\mu\text{m}$ で加工可能であり、舞いツールのセッティング誤差などを取り除けば、 $10\mu\text{m}$ 以内の加工精度が可能と思われる。

(3) 舞いツールによる加工面は、表面あらさが cut-off 値 0.25mm に対して R_{max} 約 $6\mu\text{m}$ であるが、細かい凹凸や多角形誤差のない滑らかな面となっているので、スクリュウ圧縮機用ロータに適していると思われる。

以上より、無潤滑式のスクリュウ圧縮機用ロータを舞いツールにより加工可能であることがわかった。

文 献

- (1) Fushimi, T., Ariga, Y. and Nagata, S., *A Theoretically Formed Fly Tool Used For an Improved Gear Generating Process*, ASME, 84-DET-151, (1984).