綜 説

電子ビームによる機械加工

谷 口 紀 男*

(昭和35年6月28日受理)

Electron Beam Machining

Norio TANIGUTI

(Yamanashi University)

1. 緒 言

電子工業、化学工業等の近代工業の急速な進展に伴って、それらに使用される特殊材料の精密加工が強く要請されるようになって来た。特に最近の傾向として所謂機器の微細化 (Miniaturization) の強い影響をうけて微少寸法の精密量産加工が大きい要望となって現われて来たのである。茲に述べんとしている電子ビームによる機械加工もその一環で、現在までの機械加工技術では到達しえないものの加工法として開発されつつあるものである。即ち非常に硬度の高い材料、又非常に靱い材料等に非常に小さい孔や溝を加工せんとする場合、或は μ 程度の小さい寸法のものの加工等である。これらは現在の手法をもってすれば、例えば放電加工等によって導電体ならば 0.08ϕ 位まで、深さで $1\sim 2\text{mm}$ 位までは精度よく又生産的なみで穿孔しうるし、又、絶縁体には超音波加工によって大体同程度のものが量産的な意味で加工され、大体において充分な精度と能率が満される。しかし、それ以下の細い孔になると、これらの方法をもってしても困難な仕事となってくる。

いうまでもなくいわゆる塑性材料にたいしても機械的な錐による孔あけが、 $0.1\sim 0.2\phi$ 程度を限度としているので、これ以下の寸法のもので放電加工でも困難な細孔はやはり何か新しい加工法によらねばならなくなっている。この様な意味で工具を必要としない電子ビーム機械加工が意味をもつようになって来たのである。

2. カールツアイス電子穿孔機

現在までに報告されている電子ビーム加工装置としては、西独のカールツアイス社のものがある。それは既に一カ年以上生産的な規模でサファイヤの軸受加工として $0.001''$ (0.025mm) の穿孔加工を行っているとの事で

* 山梨大学

第1図 電子穿孔機 (カールツアイス)

あり、特に注意すれば 0.001mm 位の穿孔も可能 (深さは 0.1mm) と報告されている。同社で製作した電子穿孔機の大体の構造は第1図に示すものである。即ち、カソードとして加熱されたタングステンフィラメントが用いられ、それは約 50KV の負の電圧がかかっている。それに電子ビームの集束のために図の如く四つに分れた制御電極が用いられている。これは 500V 前後カソードより低い電圧が与えられている。電子加速のためには接地したアノードがあり、二段の絞りをうけ、後段の電磁レンズで更に電子ビームを集束し、試料の所定点に電子ビームを集中せしめるのである。さらに細い電子ビームを得るにはもう一段の電磁レンズを用うるのである。この構造によって電子は約 $1\sim 2\times 10^{10}\text{ cm/sec}$ 位までに加速され且つ 1μ 程度の細いビームをもうることが出来

るのである。既述の電子ビームによる溶接と異なるところは、かなり強い電子ビームを特に細い線に（最小は 1μ 程度まで）集束せしめていることである。これについては後述する。なおビーム径は穿孔径の約半分位までの細いものにする必要があると述べられている。

なお実際の加工の際に試料の加工点は $3000\sim 6000^{\circ}\text{C}$ 位までの非常に高い温度になる様で、そのため、その加工点の近辺も温度が上り、従ってそれらの部分は当然変態点を越えており、冷却結晶組織を示すのである。しかし、この影響層は以下に述べる如く特別な工夫をすれば加工孔径の10%以下に押えることが出来る。すなわち、試料を間歇的な、すなわちパルスのビームで加熱して試料の平均温度上昇を押えるのである。

パルス発振器としては $1\sim 3000\text{c/s}$ の位の周波数のものを用い、パルス幅は $0.01\sim 0.00005\text{sec}$ である。この方法がツアイス社の特許となっている。すなわちビームがこのような方法で制御される時には、試料は電子の強い衝撃加熱を受け、それによって試料は瞬間的に電子のあつた極く狭い場所の材料のみを高温(6000°C 位)にし、蒸発させてしまうのである。

したがって電子ビームのエネルギーは殆どその加工された試料の蒸発に用いられるのである。換言すれば短い加熱時間のため試料の加熱は極くせまい領域のみでおこって熱伝導によって失われる熱は少ないと考えられるのである。勿論電子ビーム作用の時間は on の状態は極く短く、off の状態がずっと長くしてあるので試料は次の衝撃がくるまでに冷えてしまうという考えである。これ等について後節で今一度考察する。なお加工深さは最大 6mm 位までになるよう電子ビームの焦点深度を充分深くするよう、換言すれば細長いビームになるように調節することが出来る。これもツアイス社の特許になっている。又、孔径の測定のために光学顕微鏡を併用したり、電子線通過の総量を積算してそれによって加工寸法を制御したりすることも特許になっている。溝加工の幅は一度の仕事ではたいして大きくはし得ないが、試料を移動する装置さえ作ればよいので、 $50\times 10\text{mm}^2$ 位まで可能といっている。勿論細い溝加工の方が大切な仕事であり、それは 1μ 程度可能といっている。

なお、側面を垂直に加工するために電子ビームを制御する方式、円錐形にする制御方式、その他も自由に調節出来、工具の製作、摩擦も考えなくて済むことが何よりの電子ビーム機械加工の特徴である。

勿論一般的にこの電子ビームは貫通孔を作ってしまうわけであるが、ガスによる試料の切断加工等とちがって、この加工は試料を溶かして蒸発せしめてしまうのだから、電子ビームの制御を巧くやれば、加工深さを自由

第2図 電子穿孔機（カル、ツアイス）

に調節することが出来る。すなわち、入力、パルス幅、パルス周波数、電子ビーム密度、試料移動速度等を制御すればよいのである。電子ビームを磁気テープ等によって制御することが恐らく近い将来必ず可能となるので精度のよい、量産性のある自動機として三次元加工も必ず実現されるであろう。

又、ツアイスでは試料のある場所に圧力 0.1mmHg 程度の O_2 ガスを流入せしめれば、ダイヤモンドは 300°C 位の温度に保たれながら穿孔されることを述べている。

以上、主としてツアイス社の電子穿孔機についてのべたのであるが、電子線溶接用を兼ねた加工点の観察を行う事の出来る別の装置を参考のために示して置く。第2図に示すのがそれである。

3. 電子ビームの最小到達径について

小さい電子ビーム径をうることは X線 のマイクロアナライザーがかなり研究されておるが、 1μ の径はかなり難しいとおもわねばならない。ことに、安定度が問題と思われる。一般に考えられているように唯カソードが点源に近くなればそれで細いビームの焦点がえられるだけではないとおもわれる。

本加工の基礎となる電子ビームの最小到達径についての考察を阪大菅田教授の発表のものを紹介しておく。こ

第 3 図

これは電子ビームはそのままでは平行ビームとして安定しないので、求心的な力を与えねばならないことを述べたものである。第3図に示す如く平行電子ビームがあると、半径 r を通って毎秒 n 個の電子が Z 方向に出ているとする。その場合に電子ビームの強さ I は e を電子の電荷とすれば

$$I = ne \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。電子が Z 方向に v m/sec の速度をもっているとするれば、単位長さに存在する電子の数は n/v であり、この場合軸より距離 r の点の電界の強さ E_r は Gauss の法則より

$$E_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{e}{\varepsilon_0} \cdot \frac{n}{v} \cdot \frac{1}{r} \dots\dots\dots(2)$$

で与えられ、したがって静電界による半径方向の力は外向きで

$$F_e = eE_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{e^2}{\varepsilon_0} \cdot \frac{n}{v} \cdot \frac{1}{r} \dots\dots\dots(2)'$$

一方電子流によって生ずる磁界の磁束密度 B は

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 e}{2\pi} \cdot \frac{n}{r} \dots\dots\dots(3)$$

これによって電子に生ずる半径方向の力 F_m は、内向きで

$$F_m = -Bev = -\frac{\mu_0}{2\pi} e^2 n \frac{v}{r} \dots\dots\dots(3)'$$

従って両者の和としての合成力 F は

$$F = F_e + F_m = -\frac{e^2}{2\pi} n \left(\frac{1}{\varepsilon_0 v} - \mu_0 v \right) \dots\dots\dots(4)$$

$\varepsilon = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ の関係を用いて変形すれば

$$F = \frac{ne^2}{2\pi \varepsilon_0} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{1}{r} \left(1 - v^2/c^2 \right) \dots\dots\dots(5)$$

今 r をこのビームの外縁部と考えれば、一般に $v/c \ll 1$ であるから $F > 0$ となり、電子ビームはこの平行の形では安定せず、その力で必ず膨れていくのである。即ち n の多いもの、電子流の多いほどその力は大きいのである。

従って加工点にビームを集束させるには軸心に向う分速度 v_r がなければならない。即ち半径方向の電子の運動方程式をたてれば次の形となる。勿論 m は電子の質量である。

$$m \frac{dv_r}{dt} = F = -\frac{n e^2}{2\pi \varepsilon_0 v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{1}{r} \dots\dots\dots(6)$$

ここに $v_r = dr/dt$ を考えれば

$$v_r dv_r = -\frac{n e^2}{m 2\pi \varepsilon_0 v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \frac{dr}{r} \dots\dots\dots(7)$$

これを積分して 境界条件として $r=r_0$ で $v_r=v_{r_0}$ を与えたとし、 $v_r=0$ になる半径を $r=r_{\min}$ とすれば

$$\log \frac{r_0}{r_{\min}} = \frac{\pi \varepsilon_0 c}{m} \cdot \frac{\frac{v}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} v_{r_0}^2 \dots\dots\dots(8)$$

今軸心方向への分速度をうるのに静電圧 V_{r_0} を用いていたとすれば、次の関係が成立する。

$$\frac{1}{2} m v_{r_0}^2 = e V_{r_0}$$

これを用いれば

$$\begin{aligned} \log \frac{r_0}{r_{\min}} &= 2\pi \varepsilon_0 c \left(\frac{\frac{v}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \frac{V_{r_0}}{I} \\ &= \frac{1}{60} \left(\frac{\frac{v}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \frac{V_{r_0}}{I} \end{aligned}$$

一方

$$\begin{aligned} \frac{v}{c} &= \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{V_{r_0}^2}{m_0^2 c^4} \right)^2}} \\ &= \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 1.965 \times 10^{-6} V)^2}} \end{aligned}$$

において、 $\frac{v}{c} \ll 1$ として

$$\frac{r_{\min}}{r_0} = e^{-3.30 \times 10^{-5} \frac{V_{r_0}}{I} \sqrt{V}} \dots\dots\dots(9)$$

をうる。

この結果を菅田教授の計算によって図示すれば第4図に示す如くである。但し軸心方向への加速に $V_{r_0}=0.85$ Vなる静電圧を用うとしてである。即ち加速電圧電流その他の諸条件によって最小半径 $r_{\min}$ はある一定の限度が生ずるのである。

具体的にこの関係を眺めてみるため本電子ビーム加工

第 4 図

の場合にどの程度の電子流密度が必要かについては後節に更めて述べるが、茲では実際の装置の文献によって考えて見る。すなわち電子ビーム溶接関係のデータによれば、2~8mm² 面積に 10~50KW の動力（エネルギー速度、加熱速度）を注入しうることが述べられている。したがって電子加速電圧が仮りに 50KV とすれば、電子流密度は例えばエネルギー流密度 5KW/mm² の場合約 200mA/mm² 位となる。X線マイクロアナライザーの資料からも大体その位の値がえられている。

今これと比較するため第4図等を参考にして、始点の半径を $r_0=2\text{mm}$ として、加工点の半径を $r_{\min}=2 \times 10^{-3}\text{mm}$ とすれば $V=15\text{KV}$, $V_0=0.85\text{V}$ の条件で電流 0.5mA、したがってエネルギー流は $0.5\text{mA} \times 15\text{KV} = 7.5\text{W}$ 位となる。しかし、その集束点のエネルギー流密度は $7.5 / \frac{\pi}{4} (2 \times 10^{-3})^2 \div 2.5 \times 10^3 \text{KW/mm}^2$ 、電子流密度は $0.5 / \frac{\pi}{4} (2 \times 10^{-3})^2 \div 1.6 \times 10^3 \text{mA/mm}^2$ となる。この場合始点のエネルギー流密度は $7.5 / \frac{\pi}{4} (2)^2 \div 2.5 \text{W/mm}^2$ で決して多いものではないからこの仮定は無理ではない。したがって加工点のエネルギー密度は非常に大きくなっていくことがわかり、特殊な仕事の可能性も考えられるのである。なお長焦点にしないと前述の場合の如く加工の条件からいって困難となるので、集束を良くするための条件は仲々注意をせねばなるまいと思われる。

4. 加工エネルギー流について

次に実際の加工に必要なエネルギー流について著者の

二三の計算結果を示すことにする。

電子ビーム等によって試料に与えられるエネルギーは大体次の如く流れると考えられる。

- (a) 試料の温度上昇
- (b) 試料の融解（相変化）
- (c) 試料の蒸発（相変化及び蒸発温度までの液体温度の上昇も含んで）
- (d) 試料表面よりの熱伝導による損失
- (e) 試料表面よりの熱輻射による損失
- (f) 試料表面よりの熱対流による損失
- (g) その他

この内(b)(c)は相変化に伴うもので他の現象と独立して推定しうるので、他の条件にかかわらず一定値と考える。又(a)は(d)(e)(f)の条件にともない、いわゆる熱伝導の問題としてある程度まで解析しうるものと思われる。(g)の項は融解物の攪拌、試料弾塑性変化のためのエネルギー等も考えねばならぬことを示すのであるが、これ等も結局は熱に変化するものと考えてよいので、極く小さい時定数を考えなければならない時のみ考えればよいものと思われるので、一般には無視してよいと思われる。

今最も簡単な場合として時計用軸受宝石としてのサファイヤ（アルミナ）の最も小さいもの（外径 0.4mm、内径 0.04mm、厚み 0.3mm）を孔明けする場合を考える。まず加工時間が充分に短くて且つ真空中という条件を考えて伝導、輻射、対流等による損失のない場合を考えれば、熱流は (a)(b)(c) のもののみを考えればよい。

したがって上述のプランク（素材）に 0.04mm の孔を 0.3mm の深さに加工するのに 10sec, 1sec, 10^{-1}sec , 10^{-2}sec , 10^{-3}sec 、等でその実質部を蒸発せしめるエネルギー関係を比べてみる。まずアルミナについての物性常数として

融解熱 ; $2.6 \times 10^3 \text{ cal/gr.}$ (2070°C 1気圧)

蒸発熱 ; 不 明 cal/gr. (計算上真空中でというこ

とも考えて融解熱の5倍と考えて置く)

比熱 c ; 0.18 cal/gr. °C

融点 ; 2070°C

熱伝導率 K ; 0.0065 cal/cm·sec

密度 ρ ; 3.99 gr/cm³

沸点 ; 調査中

を用いて計算してみる。まず仮定の加工時間 $\tau \text{ sec}$ に試料素材全体が融点近くまで温度が上がり、約 2000°C になり、それから後所定の孔のみがとけて蒸発してしまう一番エネルギーの多くいる場合の必要熱流 $Q_I \text{ cal/sec}$ を求めてみるに、

$$Q = \pi \left[\frac{\pi}{4} (0.04)^2 \times 0.03 \times 3.99 \times 0.18 \times 2000 \right. \\ \left. + \frac{\pi}{4} (0.004)^2 \times 0.03 \times 3.99 \times 2.6 \times 10^2 \times 6 \right] / \tau \\ \div 5.65 \times 10^{-2} / \tau \text{ (cal/sec)}$$

となり、次に最もエネルギーの少ない場合として素材は殆ど加熱されず孔部のみが加熱され融解され蒸発すると考える場合についてのそれを求めると、

$$Q_{II} = \frac{\pi}{4} (0.004)^2 \times 0.03 \times 3.99 \left\{ 6 \times 2.6 \times 10^2 \right. \\ \left. + 0.18 \times 2000 \right\} / \tau \div 2.87 \times 10^{-3} / \tau \text{ (cal/sec)}$$

となる。これを τ の種々の値について計算した結果は第1表に示す如くである。

比較のため銅について計算すれば、その物性常数は次の如くで、

融解熱 ; 43.2 cal/gr (1083°C, 1 atm)

(銀 融解熱 15.1 cal/gr, 1 atm, 960.5°C)

蒸発熱 ; 不明 cal/gr (400 cal/gr と推定する。真空中という事を考慮して)

(銀 蒸発熱 517 cal/gr, 1 atm, 1950°C)

融点 ; 1083°C (1 atm)

熱伝導率 K ; 0.908 cal/cm·sec.

沸点 ; 2310°C (1 atm)

密度 ρ ; 8.93 gr/cm³

比熱 c ; 0.0974 cal/gr°C

前と同様な計算をすれば

$$Q_I = \left[\frac{\pi}{4} (0.004)^2 \times 0.03 \times 8.93 \times 0.0974 \times 1000 \right. \\ \left. + \frac{\pi}{4} (0.004)^2 \times 0.03 \times 8.93 \times (43.2 + 400) \right] / \tau \\ \div 3.4 \times 10^{-2} / \tau \text{ (cal/sec)}$$

$$Q_{II} = \frac{\pi}{4} (0.004)^2 \times 0.03 \times 8.93 (0.0974 \times 1000 \\ + 43.2 + 400) / \tau \div 1.79 \times 10^{-3} / \tau \text{ (cal/sec)}$$

すなわち加工時間が短いと当然のことながら大きいワッテージが必要となる。しかしこの例での一番大きい場合でも、エネルギー流密度は $235 / \frac{\pi}{4} (0.04)^2 \div 200$

KW/mm² となり、前述の最小到達ビーム径におけるものよりはゆとりがあることになる。又、加熱時間が長くなれば当然エネルギー流密度も下り、ワッテージもへるが、熱の伝導、輻射等による損失が増してくることが予測さ

第5図

れ、したがって、又試料がその加工点以外も温度が上って融解し加工精度も落ちることになる。

この事から試料の加工点に出来る限り大きいエネルギー流密度を与えて他の部分の温度上昇のない間にその点の実質部を蒸発せしめてしまうことが大切と考えられるのである。文献⁽⁶⁾によれば温度

度が上れば蒸発熱は非常に少なくなるのである。

以上の所論を今少し定量的に論じてみるため試料の温度分布等について考察してみる。まず、上の例の如くサファイヤの孔の内面が 2000°C に保たれ、外周 (0.4 mmφ) が 50°C に保たれている定常温度分布の場合をモデルとして考えてみる (その円環の上下に熱流損はないものと考えて)。第5図の附号を用いて温度分布を求めれば、

$$v = \frac{v_1 \ln(b/r) + v_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)}$$

の如くになり、第6図に示す如くなる。この場合の熱流 Q cal/sec は次の如くなる。

$$Q = -2\pi K \frac{(v_1 - v_2)}{\ln(b/a)} \times t \text{ (cal/sec)}$$

茲に、 K は熱伝導率にして、アルミナの場合 $K =$

第 1 表

加工時間 τ	サファイヤ				銅			
	全部 2000°C 蒸発		孔部のみ加熱蒸発		全部 1000°C 蒸発		孔部のみ加熱蒸発	
sec	cal/sec	watt	cal/sec	watt	cal/sec	watt	cal/sec	watt
10	5.65×10^{-3}	2.35×10^{-2}	2.87×10^{-4}	1.2×10^{-3}	3.47×10^{-3}	1.45×10^{-2}	1.79×10^{-4}	7.96×10^{-4}
1	5.65×10^{-2}	2.35×10^{-1}	2.87×10^{-3}	1.2×10^{-2}	3.47×10^{-2}	1.45×10^{-1}	1.79×10^{-3}	7.96×10^{-3}
0.1	5.65×10^{-1}	2.35	2.87×10^{-2}	1.2×10^{-1}	3.47×10^{-1}	1.45	1.79×10^{-2}	7.96×10^{-2}
0.01	5.65	2.35×10	2.87×10^{-1}	1.2	3.47	1.45×10	1.79×10^{-1}	7.96×10^{-1}
0.001	5.65×10	2.35×10^2	2.87	1.2×10	3.47×10	1.45×10^2	1.79	7.96

1 watt = 0.24 cal/sec., 外径 0.4mm, 内径 0.04mm, 厚み 0.3mm

第 6 図

0.0065(cal/cm·sec)、銅の場合 $K=0.908$ (cal/cm·sec) であるので、それを用いて計算すれば（銅の場合も一応内部温度 2000°C と仮定する）、 $2b=0.04$ mm, $2a=0.4$ mm, $t=0.3$ mm として

$$Q_{Al}=1.07 \text{ cal/sec} = 4.5 \text{ W}$$

$$Q_{Cu}=145 \text{ cal/sec}=605 \text{ W}$$

となる。

すなわち定常温度分布の時にはこの程度の熱流があるということである。この場合には温度勾配もかなりとれているので、融解部、非融解部との差がはっきりするので定常状態での加工もアルミナの場合は考えられなくもない。勿論表面を 50°C に保つ工夫があることはいうまでもない。これは前述の第 1 表に比べてそれほど大きいワッテージでもないからである。然し銅の場合には大きいワッテージを必要とするので困難である。

以上は外周よりの熱伝導による定常状態を考えたのであるが、この加工は真空中での作業であることを考えれば伝導、対流等はなく完全に外周辺よりの輻射のみによる熱損失しかないと考えられる。従って v_1 を内面の温度、 v_2 を外部輻射対象温度として、この場合の定常温度分布を取り扱えば、

$$v = \frac{v_1 \{1 + h b \ln(b/r)\} + h b v_2 \ln(r/a)}{1 + h b \ln(b/a)} \text{ (°C)}$$

となり、熱流は前と同じ条件で、

$$Q = \frac{2\pi(v_1 - v_2)b}{1 + h b \ln(b/a)} h K t \text{ (cal/sec)}$$

茲に $h=H/K$ (1/cm) H : surface conductivity (cal/cm²·sec·°C)で、それは真空中の場合 $H \div 1.48 \times$

10^{-4} (cal/cm²·sec·°K)(2000°C 前後より 0°C に輻射するとして) ととれば、

$$h_{Al} \div 2.28 \times 10^{-3} \text{ (1/cm)}, h_{Cu} = 1.628 \times 10^{-3} \text{ (1/cm)}$$

となり、

$$Q_{Al} = 4.67 \times 10^{-3} \text{ (W)}, Q_{Cu} = 4.68 \times 10^{-3} \text{ (W)}$$

となり、熱流は両者とも殆ど差はないし、且つ非常に少ないものである。勿論この場合外表面の温度を v_b とすれば、

$$\left(\frac{v_b}{v_1}\right)_{Al} = 0.990, \left(\frac{v_b}{v_1}\right)_{Cu} = 1 - 6.5 \times 10^{-3}$$

となり、内外表面が殆ど同一温度となる事が解る。したがって加工と関連づけて考えれば、多少とも温度をこのように定常加熱の方式であげておいて、孔部の加工は極く小さい面積に比較的大きい熱流を極く集中してやる方式をとれば、第 1 表からみて孔部の蒸発融解の熱流のみやればよいので有利ではないかとも考えられる。しかし、試

第 7 図

料全体が、2000°C 前後になっている場合融解部と非融解部との差が加工精度を定めることになるので、この点このような考え方に問題はあと思うが瞬間的に電子ビームをパーストする方法に対比して考えてよいこととおもわれる。

なお前述の仮定での試料の上下よりの熱輻射を推定するために最も簡単な例として第7図の如き中空球の例を考えて、これについて計算を行った。この結果は前と同様な計算方式で次の如くなる。

$$v = \frac{av_1\{hb^2+r(1-hb)\}+hb^2v_2(r-a)}{r\{hb^2+a(1+hb)\}}$$

$$Q = \frac{4\pi b^2 a(v_1 - v_2)}{\{hb^2 + a(1+hb)\}} h K$$

となり、温度分布は第6図中に示してある。熱流については $Q_{Al}=6.18 \times 10^{-3} (W)$, $Q_{Cu}=6.2 \times 10^{-3} (W)$ の値となり、大体面積増加に比例し前者より5割方多いが絶対値としては大した事はない。従って表面よりの輻射損失は大体その程度と考えてよいことがわかる。

而し広い面積をもつ試料に小さい孔をあけるような時にはこの輻射損失も大分大きくなるが、これらについては文献⁽⁴⁾を参照されたい。然し定常輻射の熱流の絶対値はそんなに大きくはならないので、却って試料の加熱のための定常温度分布になるまでの過熱熱流の方が大となるのである。

以上の事から当然この加工は電子ビームが、試料に与えるエネルギーに関する現象についての過渡現象を考え

ねばならないことがわかるのである。厳密な計算は困難であるので、モデル的なものとして一次元的な厚み方向の熱伝導を考えて計算してみれば、その結果は次の如くなる。即ち前述のモデルと同一の考え方で内部よりの定熱流 $Q_0 \text{ cal/sec}$ (熱流密度 $F_0 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$) が与えられた時の試料各部の時間に関しての温度分布の計算例を示せば第8図、第9図及び第10図の如くである。第8図は外表面が一定温度の仮定のもの、第9図はアルミナについて外表面輻射損失のあるもの、第10図は銅について外表面輻射損失のあるものである。

まず外表面一定温度のものの温度分布は全体初期温度 0°C として、

$$\frac{v}{\left(\frac{8F_0 l}{K\pi}\right)} = \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{x}{l}\right) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} e^{-(2n+1)^2 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 T} \times \sin \left\{ (2n+1) \frac{\pi}{2} \left(\frac{x}{l}\right) \right\}$$

但し $T = \kappa t / l^2 (0)$, $\kappa = K / \rho c \text{ (cm}^2/\text{sec)}$,

t : (sec), l : 厚み (cm)

アルミナの場合 $\kappa = 9.07 \times 10^{-3} \text{ (cm}^2/\text{sec)}$,

$T = 2.27 \times 10 \times t$, $l = 0.02 \text{ (cm)}$

銅の場合 $\kappa = 1.083 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$, $T = 2.71 \times 10^3 \times t$

$l = 0.02 \text{ cm}$

$x = l$ (加熱点) における熱流供給量 $Q_0 \text{ (cal/sec)}$

$= F_0 \times S = F_0 \times (2\pi b \times c)$ について、 $T = 0.01$ に対応するアルミナの時間 t は 0.00044 sec で、その点はその時間内

第 8 図

第 9 図

に $v=2000^\circ\text{C}$ なるまでの条件は、図より $(v/\frac{8F_0l}{K\pi}) = 0.15$ をえ、 $2b=0.2\text{mm}$ 、 $c=0.3\text{mm}$ とすれば、 $S=0.012\text{mm}^2$ で、

$$Q_{0Al}=1.4\text{ cal/sec}=6.8\text{W}$$

又その時の温度勾配は $0.8=x/l$ のところで 0 近くになっており、精密加工に適するごとくである。

$T=10$ に対する銅の時間は $3.69 \times 10^{-3}\text{ sec}$ で、それをその点が 2000°C に達する時間と考えれば、図より $(v/\frac{8F_0l}{K\pi})=1.24$ をえて、同様に、

$$Q_{0Cu}=3.62 \times 10^2\text{ cal/sec}=1.55 \times 10^3\text{ W}$$

となり、銅の場合の方が時間が長いのに非常に大きい入力が必要となることがわかる。即ち K が大なる如くである。この時の温度分布は可成り広くなって加工には適しない。従って $T=0.01$ をとれば $t=3.69 \times 10^{-6}\text{ sec}$ 位をとらねばならなくなり、 Q は 10^4 W のオーダーが必要となる。

外表面で輻射による熱損しかない時の温度分布は

$$\frac{v}{(F_0/L)} = 1 + L \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L(\alpha_n^2 + L^2)}{\alpha_n^2(L^2 + \alpha_n^2)} \cos\left(\alpha_n \frac{x}{l}\right) e^{-\alpha_n^2 T}$$

$$\alpha_n: \alpha \tan \alpha l = h \text{ の根, } L=hl$$

但し $F_0l/KL = F_0/H = Q_0/ES$ と変形され、これは材料に

第 10 図

よらない形となる。勿論この場合右辺は材料による変数 $L \cdot \alpha_n$ を含むので、夫々別の式となる。まずアルミナの場合は第9図をうる。すなわち $l=0.02\text{cm}$ 、 $H=1.48 \times$

$10^{-4} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$, $K=6.5 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$, $h=2.28 \times 10^{-2} \text{ }^1/\text{cm}$, $L=lh=4.56 \times 10^{-4}$, $S=2\pi \times 0.01 \times 0.03 \text{ cm}^2=1.885 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $T=(\kappa/l^2) t=2.27 \times 10 \times t=0.01$ において、 $t=4.5 \times 10^{-4} \text{ sec}$ において加熱端で $v=2000^\circ\text{C}$ に達するための条件より、 $v/(F_0/KL)=4.56 \times 10^{-4}$ を図よりとれば、それに必要な熱流 Q_{0A1} は、 $Q_{0A1}=1.225 \text{ cal/sec}=5.1 \text{ W}$ となる。その時の外表面温度 $v=1055^\circ\text{C}$ 、同様に $T=10$ において $t=4.5 \times 10^{-1} \text{ sec}$ の間のそれは $Q_{0A1}=1.26 \times 10^{-1} \text{ cal/sec}=0.48 \text{ W}$ となり、大体第1表の概算と近い値となってくる。

次に銅についての計算を行えば $h_{\text{em}}=1.628 \times 10^{-4} \text{ }^1/\text{cm}$ となり、したがって $L=lh=0.02 \times 1.628 \times 10^{-4}=3.256 \times 10^{-6}$ となり第10図をうる。

時間は $T=(K/l^2) t=2.707 \times 10^3 t$ より求められる。したがって今 $T=0.01$, $t=3.69 \times 10^{-6} \text{ sec}$ をとれば、加熱点において $v/(F_0/H)=3.26 \times 10^{-6}$, $v=2000^\circ\text{C}$ とすれば

$$Q_{0Cu}=F_0 S=1.71 \times 10^2 \text{ cal/sec}=713 \text{ W}$$

$$T=1, t=3.69 \times 10^{-4} \text{ sec} \text{ ととれば、} v/(F_0/H)=6.5 \times 10^{-3}, v=2000^\circ\text{C} \text{ となり、}$$

$$Q_{0Cu}=F_0 S=8.5 \times 10 \text{ cal/sec}=354 \text{ W}$$

又別の略算より求めれば、 $T=100$, $t=3.69 \times 10^{-2}$ ととれば、 $v/(F_0/H) \div 3.26 \times 10^{-4}$ となり、これより前と同様にして

$$Q_{0Cu}=1.71 \text{ cal/sec}=7 \text{ W}$$

したがって時間が短いと銅の場合急激に必要なワッテージが増える様である。しかし周辺定温の場合にくらべればずっと少なくてすむもののようである。

しかし温度勾配はよくないので精密加工という条件からみれば別の見方もあろう。

5. 結 言

以上の事から電子ビームによる加工を考えるに定常状態で穿孔をする事もアルミナ等の場合は表面伝導冷却の形をとれば、可能性もあるが銅等では困難である。又、表面放射の時は定常状態での加工は試料が殆ど同一温度となって不可能である。従って断続的に電子ビームを試

料にあててやるパルス方式をとることが望まれる。すなわち瞬間的に加熱して加熱点の近くのみを急激に温度を上げ、融解蒸発せしめて試料の実質部をとりさるのである。そのことの可能な事は加熱による試料温度変化の過渡現象の考察で明かであろう。但し冷却を能率よく行わねば加工時間が長くなるので好ましくないで、その限界は多くの議論の存するところと考えられる。又、熱応力による材料の破壊等も試料によっては考慮せねばならないのではないと思われるが、それについては目下検討中である。

本加工法の特徴としては前述の如く微細寸法加工がその第一の利点であるが、同時にその微細加工のための工具の不要である事もなんといっても大きい利点である。この点をよく用うれば必ずや優れた加工法となるものと思われる。勿論材料を余り撰択しないことも利点であろう。又欠陥としては真空中の操作であるため多くの困難のある事が当然ながら予測され、設備費は高価になり、加工技術も仲々困難と思われる。

現在までにこの方法が用いられているのは前述のカールプアイスをのぞけばまだ余り扱っていないと思われるが、Nylon ノズル、V.T.R 用のヘッド、カラーテレビ用グリッド、或はマイクロモジュールやモレトロニックスの仕事等に適用されかかっているようである。

いづれにしても他の加工法で困難な仕事のみについてこの方式は現在では適用さるべきで時計用宝石加工等は特に細い 0.04 mm 等の如きものに限られるのではないかと思われる。

〔文 献 及 び 特 許〕

- 1) カールプアイス:「電子による穿孔装置」昭32-7198
- 2) ヴェー、ツェーヘレウス、ゲゼルシャフト:「ビーム状粒子線の加熱により固体に微細孔を穿つ装置」昭 32-9697
- 3) カールプアイス:「荷電粒子による材料加工法」昭 34-5404
- 4) 谷口紀男:荷電ビーム研究会資料 No.5 昭 35-5-15
- 5) Berg. R. T: *American Machinist* Mar 9.115 (1959)
- 6) K. H. Steigerberg: 4th I. C. E. B.