静 電 冷 却 現 象*

貴 志 浩 三** 江 田 弘** 涌 嶋 康 夫***

Electrostatic Cooling Phenomena

Kozo KISHI, Hiroshi EDA, Yasuo WAKUSHIMA

Recently, the *Design News* and *Electronic Design* frequently have reported some electrostatic cooling techniques in which the heat is very skillfully removed from a high temperature heat source using an electric device. This report has objects to define the heat removal efficiency of electrostatic cooling and to fathom the cause of this effect. And also, the effects due to electrostatic cooling are pursued on the dominant factors of the thermal damage in the cutting and welding processes. The main results obtained are shown in below.

(1) Most of the electric energy is converted into heat, sound, and light energies, forming an ion wind in the order of $10^{-2}\%$.

(2) The ion wind has the maximum intensity beneath the discharge wire and exponentially decreases as the distance increases from the wire end.

(3) When the cutting temperature is 900°C , for example, the electrostatic cooling lowers the temperature by $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ corresponding to 20–30%, while the cutting force somewhat increases. This value is invariant by the existence of the ion wind in electrostatic cooling.

1. 緒 言

著者らはこれまで加工変質層に関する一連の研究を数年来実施し、その生成機構、存在意義および制御方法に至るまで、理論から実用的段階までいろいろ追究してきた¹⁾。例えば切削や研削の加工変質層の生成機構は、切削、研削温度と切削、研削抵抗によって支配されることを明確にした²⁾。また、その軽減と制御はこの支配因子を機械的³⁾、電気的⁴⁾、化学的⁵⁾および金属材料⁶⁾に操作すれば、ある程度可能になることを証明した。

このような一連の研究のなかで、本報は電気的な操作方法としての一例を考えた。最近 *Design News*⁷⁾ や *Electronic Design*⁸⁾ などにしばしば紹介されている静電冷却の導入によって、温度や組織変化をある程度軽減できないかということである。この理論の一部はイオン風として、1709年の昔に F. Fauksbee (英) によって発見された。その後 Newton, Farady, Maxwell らの注目をひき、さらにその後定量的な解析は 19世紀末 A. P. Chattock らが開始した。この現象が伝熱工学の分野で注目されるようになったのは 1960年代で、主に工業的価値を見込んで米、英、西独、露において理論的、実験的研究が盛んになった。わが国では、山家・慈道⁹⁾および著者らによって 1960年末から基礎的な面と応用面に

ついて研究が開始された。このような静電冷却に関する一連の研究の結果、この方法が熱除去に対してかなり有効であることが明らかとなった。

本研究では、温度がどのように減少できるものかまず検討する。つまり各種電気的条件に対して温度低下やイオン風の存在の確認と、そのエネルギーなどの基礎的な事項を種々含めて行う。そしてこのような基礎の実験において得られた事実が、主に熱損傷などに問題がある切削加工や溶接加工などにおいて温度の減少や熱による組織変化の軽減に有効であろうと考え、主に工業的価値を見込んで実験を行った。また、これまでの研究はすべてコロナ放電における静電冷却の検討が行われているが、X線の被害やその他種々懸念される危険を防止したうえで、火花放電による切削温度の低下がもたらされるかどうかとも検討した。

2. 実験装置と方法

供試材料は表1に示す化学組成の鋼を用いた。0.97% C鋼は基礎的のデータをとるのに用い、0.25% C鋼は切削実験に用いた。冷却曲線は、図1に示す実験装置を用いて作成した。冷却曲線の記録は、酸素-プロパンガス(7)を用いて、加熱器(1)によって試験片(3)を加熱(酸素圧

表1 化学組成 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
No. 1	0.97	0.18	0.42	0.015	0.013	0.06	0.12	0.12
No. 2	0.25	0.27	0.57	0.008	0.016	—	0.06	—

* 原稿受付 昭和50年2月2日。昭和49年度精機学会春季大会学術講演会(昭和49年4月7日)にて発表。

** 正 会 員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町 2753)

*** 学生会員 宇都宮大学大学院

力 3kgw/cm^2 、プロパン圧力 0.3kgw/cm^2)し、適当な温度に到達後加熱を停止し、その後、試験片に挿入してあるクロメル-アルメル熱電対(5)によって得られる熱起電力を自動平衡記録計によって得た。静電冷却に使用した高電圧、低電流用の直流発生装置(2)の放電は、陰極側の針プローブから陽極側の高温物体に静電気が流れるようになっている。放電に用いた針は黄銅製で、図2に示すような先端が非常にとがった形状のA、Bプローブである。次に切削実験は図3に示す装置を用い、被削材(1)(直径100 mm、長さ500 mm)を切削して行った。この時の静電冷却は、図2中のプローブBを切削点から切削進行方向へ円周上を70 mm行ったところで、その面直上5 mmのプローブ先端距離から放電させて冷却を行った。切削温度と切削抵抗は、被削材-工具(P 20)熱電対法と動力計(3)によって検出し、自動平衡記録計(5)とペンオシログラム(4)で記録した。静電冷却による金属組織に対する効果は、電子顕微鏡とX線マイクロアナライザおよびかたさ計などを用いて検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 静電冷却に関する基礎的実験

3.1.1 イオン風

イオン風が存在は、適当な印加電圧 V と電極間距離 H を与えることによって、例えば図4にみられるように、水面に“くぼみ”ができることから確認できる。この図はアルミナ粉末を水面に浮遊させてイオン風の水面近傍での動きをとらえている。このくぼみの最大直径 D と深さ d は、図5に示すように同一電圧 V では、水面から陰極までの距離 H が $H=40\text{ mm}$ から 10 mm に近づくにつれて、 D, d が増大する。すなわちイオン風によって水を排除するエネルギーは、電界強度が大なるほど増大することがわかる。イオン風による運動エネルギー $E_K(W)$ は、

$$E_K = \frac{1}{2} \sum_j \rho Q_j V_{ij}^2$$

で表される。ただし ρ : 空気密度(kg/m^3)、 Q_j : ある区

域の風量(cm^3/s)、 V_{ij} : ある区域のイオン風速(m/s)である。

また、電気エネルギー $P(W)$ は、

4: プローブ, 6: 自動平衡記録計
図1 静電冷却による冷却性能試験装置

図2 電極プローブ (A, B)

2: プローブ
図3 静電冷却を用いた切削実験装置

図4 イオン風の存在と挙動

図5 イオン風による水面のくぼみ直径と深さの変化

$$P = VI_c$$

で表される。ただし、 V : 印加電圧, I_c コロナ電流であ

図6 コロナ放電時の電極プローブ先端の輝光発生

る。ここで $V=40 \sim 10 \text{ kV}$, $H=40 \sim 10 \text{ mm}$ について, $E_k/P \times 100$ を求めてみると, 電気エネルギーに対してイオン風の運動エネルギーは約 $1.0 \sim 0.01\%$ 程度で非常に小さいエネルギーであることがわかる。

3.1.2 コロナ放電による静電冷却

コロナ放電によるイオン風は, 電極間距離を一定にして印加電圧 V を漸次増大すると, イオン風速が漸増する。そしてさらに V を大にすると, 陰極のプローブ先端に図6に示すような緑色輝光が発生する。さらに V を大にすると, 図7に示すように放電はコロナ放電から火花放電に変化する。火花放電になると, 電圧は低下し電流は著しく増大する。いま放電現象がコロナ放電の範囲で, V と H を変えている静電冷却を行うと, 図8に示すような結果を得る。この結果は, 加熱器で試験片を 900°C までいったん加熱後, 陰極にプローブAを使用して陽極円板(厚さ 10 mm , 直径 50 mm)を静電冷却した。この温度低下例は試料の円板中心で, その表面から 5 mm の深さの温度変化を実測した場合である。この場合, $H=50 \text{ mm}$ に一定として電圧 $V=35 \text{ kV}$ 以上になると, 放電は火花放電に変化する。この条件における静電冷却は, 例えば試験片温度 $\theta_w=200^\circ\text{C}$ にするための冷却時間は, $V=30 \text{ kV}$ の場合 11 min , 空冷では 18 min かかる。また $\theta_w=100^\circ\text{C}$ に要する冷却時間は, $V=30 \text{ kV}$ で 15 min , 空冷では 30 min かかる。このように静電冷却は θ_w が高いほど, 冷却速度が大になる傾向を示す。前述したようにイオン風の運動エネルギーは高々 1% 前後だから, これだけのエネルギーでは $\theta_w=900^\circ\text{C}$ の高温物体をこれだけ速い冷却速度で冷却することは, 理論的には考えられない。したがって, コロナ放電による静電冷却は, 何かイオン風のほかに除熱作用をする現象が存在するはずである。この点に関しては, 国内外を問わず多方面の研究者と接触して検討しているが, 現在まで不明である。

3.2 静電冷却の実用的展開

3.2.1 コロナ放電と火花放電による切削温度

図7 火花放電

切削温度の上昇は工具寿命の減少，切削表面の熱損傷をもたらすために，これを制御することは工作物の精度向上に著しい寄与がある．図9,10の切削温度 θ_{wc} は乾式切削に比べE.C.（コロナ放電）の場合50～100°C，S.C.（火花放電）の場合100～250°C前後と共に低下する．また切削抵抗は切削温度の低下によってもたらされる被削材強度の増加によって見込まれる変化に対応して，逆に増大する．この火花放電（S.C.）は電圧 $V=5\sim 10$ kV，電流 $I_{s.c.}=3\sim 6$ mA，電極間距離 $H=5$ mmの条件で行い，放電位置は切削進行方向に被削材円周に沿った位置で行った．またコロナ放電（E.C.）は，切削点直上 $H=50$ mmの位置から， $V=30$ kV， $I_{E.c.}=75$ μ Aで行った．S.C.およびE.C.によってなぜ切削温度がこれほど低下するのか理論的検証は現在のところ得られていないが，いずれも乾式切削に比べ静電冷却によって著しい温度低下となることは図9,10から明らかである．また切削条件のうち送り速度および切込みが増加すると，切削温度は切削速度の高い範囲でより著しい温度低下をもたらす．

3.2.2 静電冷却による金属組織

高温物体あるいは切削温度が静電冷却によって温度低

図8 コロナ放電による冷却曲線

下をもたらされることは，金属組織にもその差が現れるはずである．図11の金属組織は図8のデータをとったときの使用試験片表面の組織である．この試験片は900°Cのオーステナイト化温度から焼入れを行いマルテンサイト組織にしたものを，実験に供与した．図11の例は，加熱器でいったん900°Cに加熱した後E.C. ($V=26$ kV， $I_{E.c.}=70$ μ A， $H=50$ mm)と空冷して得た組織の比較である．E.C.のパーライト組織は空冷に比べて，成長が小さいようすが認められる．つまりE.C.によるフェライト相とセメンタイト相の成長は空冷に比べて非常に遅いことがわかる．つまりE.C.で得られた相成長の大きさは，空冷に比べて小さい分だけ温度低下が大きいことを示している．このような結晶粒成長の変化は， H および V を変えた場合にも同様に現れ，その傾向は， H を小， V を大にするほど結晶粒の成長を抑制することになる．したがってこの H ， V の組合せによって生ずるフェライト相とセメンタイト相の大きさは，任意にこの範囲では得ることができる．しかしこの方法によって冷却速度を非常に増大したとしても，大形の実用材料に対して，一般の焼入れによって得られるようなマルテンサイト組織を作るほど冷却速度を高めることは困難である．

図12のX線マイクロアナライザ分析した記録例は，0.97% C鋼の円板（厚さ5 mm，直径50 mm）の半円形のものを溶接し，溶接部，境界部および被溶接部につい

切込み $d=0.5$ mm
送り速度 $f=0.04$ mm/rev
工具: P 20
寸法形状: JIS 33-2 型相当
図 9 コロナ放電 (E.C.)
と火花放電 (S.C.)
による切削例

図 11
コロナ放電した組織変化

切込み $d=0.5$ mm, 送り速度 $f=0.08$ mm/rev,
工具: P 20, 寸法形状: JIS 33-2 型相当

図 10 コロナ放電と火花放電による切削例

$V=30$ kV, $A=250$ μA, $H=40$ mm

図 12 コロナ放電による溶接接合領域の元素濃度変化

$V=30\text{ kV}$, $A=250\text{ }\mu\text{A}$, $H=40\text{ mm}$

図 13 コロナ放電による溶接接合領域の組織変化

て X 線分析し, $\text{CK}\alpha$, $\text{FeK}\alpha$ および $\text{MnK}\alpha$ 特性 X 線によって各元素濃度の変化を示す. E.C. による C, Fe および Mn 元素濃度は空冷に比べ Mn 濃度が幾分高い値を示すが, C, Fe 元素について大差は認められない. また溶接部の酸化膜の生成量は, E.C. の V が大となり, H が小となるにつれて次第に減少する. 熱によって生ずる損傷の軽減は試料表面において特に著しい. 例えば, 図 13 は溶接部と母材との境界部, および母材の各組織の空冷と E.C. の比較であるが, マルテンサイト晶の針状が, E.C. の方が非常に大きく, 母相フェライト粒径が小さいことがわかる. これは試料表面に近づくほどその差が明らかである. このように金属組織は, 空冷に比べ E.C. によってある程度制御され, かつ温度変化に対応して結晶の成長を変える.

4. 結 言

静電冷却がイオン風によってもたらされるだけでなく, ほかに何らかの冷却作用があることを実験的に示し, さらに切削加工, 溶接加工など熱制御が必要とされる分野に応用できることを示した. 得られた主な結果を次に示す.

- (1) 静電冷却は物体が高温であるほど冷却速度が大となった.
- (2) イオン風の運動エネルギーは電気エネルギーの 1% 以下である.
- (3) 切削温度は, コロナ放電の場合 5~10%, 火花放

電の場合 15~20% 程度, 乾式切削に比べ減少する.

- (4) 静電冷却は切削温度を減少させるが, 切削抵抗は幾分増大する.
- (5) 静電冷却はパーライトの成長速度をある程度変える. この成長速度は印加電圧と電極間距離に主に支配される.
- (6) 溶接部の元素濃度の減少は静電冷却によってある程度軽減することができ, かつ酸化膜厚さも減少することができる.

本研究の実施に際して, 実験装置の作製と討論に加わっていただいた東邦金剛株式会社常務取締役井上睦博士および東洋研磨材株式会社技術部長波多野榮十氏に厚くお礼を申し上げる.

参 考 文 献

- 1) 江田 弘: 鋼の切削, 研削加工層の生成機構とその軽減に関する研究, 大阪大学学位論文 (1973).
- 2) K. Kishi & H. Eda: The Formation of the Surface Layer in Conventional Machining Process and Reduction of It, Proc. Int. Prod. Engg., Part II, (1974) 102.
- 3) H. Eda & K. Kishi: Improvement of Grinding Process for Difficult-to-Grind Materials by Acting the Jet Infusion of Grinding Fluids, Proc. Int. Prod. Engg., Part I, (1974) 665.
- 4) 貴志浩三, 江田 弘, 涌嶋康夫: 静電冷却の実用的展開, 昭和 49 年度精機学会春季大会 學術講演会 前刷 (1974) 71.
- 5) 貴志浩三, 江田 弘: 水素添加した鋼の研削加工, 精密機械, 38, 5 (1972) 449.
- 6) K. Kishi & H. Eda: High Temperature Grinding of Stainless Steels, Ann. CIRP, 21, 1, (1972) 75.
- 7) L. Soderholm: Electrostatics Keep Cutting Tool Cool, Design News, OEM 6, 18, (1973) 57.
- 8) J. McDermatt: High-voltage Ionic Discharge Provides Silent Efficient Cooling, Electronic Design, 14, (1971) 20.
- 9) 山家譲二, 慈道守男: バイト刃先の静電冷却, 第 10 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1973-5) 289.