小口径ノズルプラズマによる炭素鋼の焼入れ*

木 村 達 夫** 宮 崎 俊 行***

Surface Hardening of Carbon Steel produced
by Small Diameter Nozzle Plasma Arc

Tatsuo KIMURA and Toshiyuki MIYAZAKI

Surface hardening by laser or electron beam is due to the rapid heating and cooling rates, which are caused owing to the localized heating produced by high power density beams. The quantity of energy required for hardening is so small that the thermal distortion generated in the workpiece is little. The paper deals with surface hardening of carbon steel by a newly developed small diameter nozzle plasma arc machine which produces power density of about 10^6 W/cm² at the exit of the nozzle. Carbon steel of S 45 C is hardened with the width of about 0.8 mm and depth of about 0.1 mm and Vickers hardness of about 1 000 is obtained under working conditions of arc voltage of 43.5V, arc current of 12A and moving speed of workpiece of 3 m/min. The hardening capability is the same as that of laser or electron beam. The spreading of plasma arc beam was also discussed. The absorbed power density on the workpiece surface is estimated to be about 10^4 W/cm², which is obtained from heat conduction theory and experimental width of hardened region.

Key words: surface hardening, plasma, small diameter nozzle plasma arc, high power density, carbon steel, hardness

1. 緒 論

機械部品には、表面付近に最も強い負荷がかかる場合が多い。それゆえ、その表面付近のみの力学的強度を高くして、部品の耐久性を向上させることが一般的に行われる。この方法としては、古くから高周波焼入れがある。近年、電子・レーザビーム装置の性能向上によって、この局所的急速加熱・冷却性に注目した焼入れが可能となった。この焼入れの特長は、自己冷却によるものであり、焼入れに必要とするエネルギーは少なく、熱ひずみを小さくおさえることが可能である。また、必要とする部分だけに処理を施すことも可能となり、コスト的にもメリットは多い。

以上のように、電子・レーザビームによる焼入れの効果は大きい。これが可能となるのは、これらビームの高パワー密度のためである。すなわち、他の熱源であっても、高パワー密度であれば、同様の効果を期待できる。プラズマも高パワー密度であるが、焼入れに適用した例は少ない¹⁾。

我々は、新しく開発した小口径ノズルプラズマによっても、電子・レーザビームと同様に自己冷却による焼入れができることを確認したので報告する。

2. 実験方法および結果

2.1 実験装置および方法

使用した装置は、新しく開発したものであり²⁾、そのプラズマ発生部の概略を図1に示す。

直流電源によりタングステン電極(−)と試料(+)間に発生したアークは、小口径のプラズマスリーブノズルによって細く絞られる。さらに、アーク極の周囲にはシールドガスが流されており、熱的ピンチ効果によって高温プラズマが得られる。たとえば、スリーブノズル径は、直径0.1~0.3 mmであり、電流値は約10 Aである。それゆえ、ノズル径0.1 mm、電流10 Aでノズル出口の電流密度は、 10^5 A/cm²となる。一方、従来の装置は、ノズル径はmmオーダー、電流は数十A程度であるので、その密度は 10^3 A/cm²のオーダーとなり、本装置の密度の方が1~2けた高い値となる。

実験に用いた試料材質は、850°Cで焼きならししたS 45 Cであり、プラズマを照射しながらこれを移動させて焼入れを試みた。なお、ノズルと試料間の距離

* 原稿受付 昭和63年11月26日。昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和63年10月5日)にて発表

** 正 会 員 オリジン電気(株)(東京都豊島区高田1-18-1)

*** 正 会 員 職業訓練大学校(相模原市相原1960)

Fig. 1 Newly developed plasma arc generator

Table 1 Experimental Conditions

Nozzle diameter	0.2, 0.3 mm
Arc current	6-12 A
Gas pressure	0.2, 0.3 MPa
Distance from nozzle to workpiece	3, 5 mm
Moving speed	17-50 mm/s
Gas for plasma	Ar
Workpiece	S 45 C
Workpiece size	50×50×11 ^t
Matrix hardness HV	260

は、プラズマの広がり大きく影響するが、今回は、本処理の可能性の試みであり、3, 5 mmを採用した。これら実験条件をまとめて表1に示す。

実験試料は、走査方向に垂直に切断し、研磨後、ナイタルによって腐食し、顕微鏡で観察した。また、硬さは荷重0.98 Nのビッカース硬度計で求めた。なお、本論文では、焼入中央部の硬さを用いた。

2.2 実験結果

2.2.1 実験試料の組織例

図2にプラズマ照射後の試料(S 45 C)の断面例を示す。試料内部では、フェライトとパーライトよりなる典型的な亜共析鋼の組織を示すが、プラズマ照射による焼入層は白色のマルテンサイトの中にフェライトが存在する組織となっている。これらの境界は、図2(b)にも示されるように、非常に明りょうであり、フェライト中への炭素の拡散はほとんどないことが分かる。また、図2(c)には、試料の焼入部の表面写真を示す。

2.2.2 各焼入条件の影響

表1に示すように、この焼入れに影響するプラズマ照射条件はいくつか考えられる。それゆえ、これら各条件の焼入れへの影響を調べた。

1) 走査速度

図3に走査速度(試料とプラズマ間の相対速度)の焼入領域の広がりへの影響を示す。縦軸には、焼入幅、深さを示してある。幅は、図2に示す試料断面表面の幅で、深さは中央部の最大深さを示す。

図より明らかなように、幅、深さともに、速度が増加すると減少する。これは、電子ビームやレーザー焼入れと同じ傾向である。速度が速くなると、単位時間、単位面積当たりの照射エネルギーは減少するから、当然、温度上昇範囲も狭くなり、このようになる。

Fig. 2 Cross section (a,b) and surface (c) of hardened region

Nozzle diameter : 0.2 mm, Gas pressure : 0.3 MPa, Arc current : 12 A, Moving speed : 42 mm/s, Distance from nozzle to workpiece : 3 mm

Fig. 3 Relationships between moving speed, hardened width, depth and hardness
Nozzle diameter : 0.2 mm, Gas pressure : 0.3 MPa, Arc current : 12 A, Distance from nozzle to work-piece : 3 mm

表面中央における硬さも図3に示してある。HV = 750~1000の硬さを示すが、速度が遅い場合には、低い硬さを示す。しかし、水焼入れによる値(800程度)は得られている。さらに、最高硬さは、1000に達する場合もある。マルテンサイト組織は、一般には針状組織であるが、写真からは観察されないほど細くなっており、硬さも高くなることは当然のことと思われる。これらの結果より、本焼入れ法は、電子・レーザービーム焼入れと同じ効果を持つものといえる。

2) アーク電流

アーク電流の影響を調べた結果が図4である。この場合は、走査速度が17 mm/sと低いため、硬さも少し低い値を示している。アーク電流の増加と共に、焼入幅、深さ、硬さすべてが増加している。しかし、電流値6 Aでは、照射パワーが十分ではなく、焼入れできなかった。又、当然のことながら、幅広く、深い範囲に焼入れするためには、なるべくアーク電流値を高くすることが必要である。しかし、アーク電流値を上げると、試料が溶融し、溶融除去による溝が形成されるため、適切な電流値が存在する。

3) ノズル径およびノズル・試料間距離

ノズル径の影響を調べた結果が図5である。十分な硬さは得られていないが、ノズル径の効果は明らかである。アーク電流値が低すぎる(6 A)と、全く焼入れできないが、高くなる(12 A)とノズル径の影響は

Fig. 4 Relationships between arc current, hardened width, depth and hardness
Nozzle diameter : 0.2 mm, Gas pressure : 0.3 MPa, Moving speed : 17 mm/s, Distance from nozzle to work-piece : 5 mm

Fig. 5 Relationships between nozzle diameter, distance from nozzle to workpiece and hardness
Nozzle diameter : 0.2, 0.3, 0.2 mm
Gas pressure : 0.3, 0.3 MPa
Arc current : 6, 8, 10, 12 A
Moving speed : 17, 25, 50 mm/s
Distance from nozzle to workpiece : 5, 3, 5 mm

小さい。しかし、8, 10 A の場合は、ノズル径が0.2 mm では焼入れできず、0.3 mm ではできる。ノズル径が小さいほど、ノズル部のアーク電流密度は高くな

Fig. 6 Relationships between gas pressure and hardness
Moving speed: 17 mm/s, Distance from nozzle to work-piece: 5 mm,
Nozzle diameter: ● 0.3 mm, ○ 0.2 mm

るが、ノズル・試料間の距離が5 mmと大きくなると、プラズマの広がりも大きくなり、十分なパワー密度が得られなくなるものと思われる。なお、図3の条件でノズル径0.3 mmの場合は試料に熔融を生じた。これは、同一パワーであるので、パワー密度が高いこと、すなわち、0.3 mmのノズル径の方がプラズマの広がり小さいことを示すものである。この観点から、ノズル径0.2 mmの場合について、ノズル・試料間距離の影響を調べた結果も図5に示してある。距離が3 mmの場合は焼入れは可能であるが、5 mmでは不可能である。すなわち、プラズマガス圧力が一定のとき、小さなノズル径では、プラズマ飛程距離の増加によってプラズマの広がりが急激に大きくなることが分かる。

4) プラズマガス圧力

次に、プラズマガス圧力の影響を調べた。結果を図6に示す。アーク電流10 Aの時、圧力0.2 MPaでは焼入れはできないが、0.3 MPaでは可能である。また、12 Aの場合、ノズル径によっても異なり、径0.3 mmの場合は、ガス圧力0.2 MPaでHV 700程度の硬さが得られるが、径0.2 mmの時は焼入れできなかった。これらは、ノズル・試料間距離が5 mmの場合の結果である。前にも述べたように、プラズマの広がりが大きいためであり、ガス圧力もパワー密度の変化に影響する。

さらに、前節のノズル径の影響も考えると、ノズル

面積 $\times\sqrt{\text{ガス圧力}}$ で決定されるガス流量がプラズマの広がりに大きく影響するものと考えられる。

2.2.3 焼入部表面形状

図2(c)に示したように、焼入部の表面形状は変化しない。また、前加工の研削痕は、照射面および未照射面において同じように観察できる。既に述べた実験条件(図3～図6)の表面状態はこの写真例と同じである。それゆえ、表面形状の観察からは、熔融したとは認められない。

3. 検 討

3.1 アークプラズマ径

半無限体表面を無限遠から一定速度 U で直線上を移動してくるガウス分布の熱源を考える。その熱源に固定した x - y 座標系(原点をビーム中心とし、ビームの移動方向は x 軸の正方向と一致させる)においては、上昇温度分布は定常状態になり、表面の温度分布は次式で与えられる³⁾。

$$\frac{T\lambda r_0}{Q} = \frac{1}{\pi^{3/2}} \int_0^{\pi/2} \exp \left[\left\{ \left(m - \frac{1}{a} \right)^2 + \beta^2 \right\} \sin^2 \mu \right. \\ \left. - \frac{\tan^2 \mu}{a^2} - (m^2 + \beta^2) \right] d\mu \quad (1)$$

ここで、 T, λ, r_0, Q はそれぞれ、上昇温度、熱伝導率、熱源のパワー密度分布をガウス分布としたとき密度が $1/e$ になる半径距離(プラズマアーク半径)、全入力である。また、 $m = x/r_0$, $\beta = y/r_0$, $a = 4x/Ur_0$ であり、 x は温度伝導度である。

まず、試料に吸収される熱量を実験的に求めた。試料を流水で冷却しながら、プラズマ照射を行う。これ続けると、系全体の温度分布は定常状態に達する。それゆえ、水の上昇温度、流量から試料に吸収される熱量を求めることができる。この結果、図3に示したアーク電流12 A、ノズル・試料間距離3 mmの場合の値は、 $Q = 197$ Wであった。なお、放電圧力は43.5 Vで、プラズマ出力は522 Wであった。

アークプラズマのパワー密度分布は、レーザービームや電子ビームに対するようなナイフエッジ法は適用できない。プラズマを横切ってエッジを移動すると、エッジ自体が一方の電極を構成するから、エッジにすべてのパワーが流れ込むためである。それゆえ、ここではパワー密度分布をガウス分布と仮定し、式(1)と焼入幅の大きさより r_0 の値を推定した。

式(1)において、 $\beta = y/r_0 = 0$ の場合は、ビーム中心点の温度であり、図2, 3に示す焼入幅を $2w$ と置けば、 $\beta = w/r_0$ の曲線が、焼入端部の温度を示すこと

になる。ここで、 r_0 の値は未知であるが、 w の値は図3のように実験的に得られる。また、焼入部の温度上昇は条件によって異なるが、端部の温度上昇は、すべての実験条件について一定と考えてよい。すなわち、この部分は、焼入れの臨界条件を示す。S45Cの水冷焼入れの時は、820～870°Cが適当といわれる⁴⁾。急速冷却の電子ビーム焼入れの場合は、800～900°Cと考えると、熱伝導の上からはほぼ妥当な結論が得られる⁵⁾。ここでは臨界焼入温度を820°C、すなわち、温度上昇を800°C(室温を20°C)と仮定して検討する。

式(1)は、試料の熱定数が一定の場合の温度上昇を与えるが、熱定数は温度によって変化する。それゆえ、ここでは、焼入部の温度は融点近くまで上昇することを考慮し、定数表に与えられた最高温度までのデータ⁶⁾を用いて次式より平均値を求めた。すなわち、熱伝導率 λ_m 、比熱 c_m をそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_m &= \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} \lambda \, dT \\ c_m &= \frac{1}{T_1 - T_0} \int_{T_0}^{T_1} c \, dT \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

より計算する。 $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 、 $T_1 = 1300^\circ\text{C}$ で、 $\lambda_m = 0.036 \text{ W/mm}\cdot\text{K}$ 、 $c_m = 0.63 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ を得る。密度 ρ は 7.85 g/cm^3 である。なおこの値は、S40Cについてであり、実験試料(S45C)とは異なるが、データが見あたらないためこの値を用いた。

図3のアーク電流12 A、ノズル・試料距離3 mm、走査速度 $U = 25 \text{ mm/s}$ の場合の焼入幅($2w$)0.94 mmについて、アークプラズマ半径 r_0 を種々変化させた場合の式(1)の計算結果を図7に示す。なお、この図には $\beta = 0$ 、すなわち、プラズマ中心部の試料表面の上昇温度も示してある。図より $r_0 = 0.80 \text{ mm}$ がこの焼入条件におけるプラズマ半径 r_0 であると推定できる。同様に他の走査速度の場合も求めると、0.72～0.77 mmとほぼ同じ値を得る。さらに、焼入部中央(プラズマ中心の試料表面)の温度は、図7より約1200°Cとなる。この値は、融点以下であり、まだ熔融は生じない。このようにして求めた図3のそれぞれの条件におけるプラズマ半径 r_0 を表2に示す。もし、焼入中央部で融点以上の温度が得られる場合は、次のように考える。鉄の融解熱は275 J/gであり、これを比熱で除して修正温度とすると約440 Kとなり⁷⁾、融点(1540°C)にこの値を加え、熔融が生ずるためには、計算上は1980 K以上の上昇温度が必要であるとして実際に熔融したかどうか判定できる。

3.2 冷却速度

Fig. 7 Temperature rises at the center and side edge of the hardened region

Nozzle diameter : 0.2 mm, Gas pressure : 0.3 MPa, Arc current : 12 A, Distance from nozzle to work-piece : 3 mm

Table 2 Calculated values of plasma radius and required power for hardening under the conditions of Fig. 3

Moving speed mm/s	25	33	42	50
Radius of plasma r_0 mm	0.80	0.77	0.72	0.72
Required power W	13.3	10.7	11.4	12.3
Absorbed power W	197			
Plasma arc power W	522			

式(1)は定常状態における温度分布のため時間が含まれていない。しかし、試料は移動しているため、試料の各点の温度は上昇、低下をする。試料の一点を考えると、 Δt 秒後には、x軸の方向に $U \cdot \Delta t$ だけ移動するから、 m の値は、 $\Delta m = U \cdot \Delta t / r_0$ だけ変化する。すなわち、加熱、冷却速度 $\partial T / \partial t$ は、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{QU}{\lambda r_0^2} - \frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{T \lambda r_0}{Q} \right) \quad (3)$$

で与えられる。

最高到達温度から700°Cまでの冷却の平均速度を、図3の実験において $r_0 = 0.75 \text{ mm}$ として求めると、25 mm/sの場合、焼入表面中心で $1.6 \times 10^4 \text{ K/s}$ 、端部で $9.7 \times 10^3 \text{ K/s}$ 、50 mm/sの場合、それぞれ $2.5 \times 10^4 \text{ K/s}$ 、 $1.6 \times 10^4 \text{ K/s}$ となる。走査速度によって冷却速度も当然異なる。また、この場合のプラズマ中心のパワー密度は約 $1.1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ となる。

3.3 焼入れのエネルギー効率

本焼入れは、高パワー密度による急速加熱・急速冷却であるから、当然、エネルギー効率が低いことは予想できる。焼入部の走査方向に垂直な断面積を A とすると、走査速度 U の時、単位時間当たりの焼入体積は、 $A \cdot U$ で与えられる。すなわち、この体積の物質を室温 T_0 から焼入温度 T_h (820°C) まで上昇させる必要があるから、最低必要パワー P は、

$$P = AU \int_{T_0}^{T_h} \rho c \, dT \quad (4)$$

で与えられる。式(4)と入力パワー Q の比 P/Q が焼入れエネルギー効率である。図3のアーキ電流 12 A、ノズル・試料距離 3 mm の場合の最低必要パワー P も同様に表2に示す。効率は 10% 以下であり、したがって、入力パワーの 90% 以上は試料全体の温度上昇に消費されることになる。

4. 結 論

新しく開発した小口径ノズルプラズマ装置により、炭素鋼の表面焼入れを試み、以下の結論を得た。

- (1) 変態焼入れは可能であり、最高 1 000 近くのビッカース硬さが得られる。
- (2) 焼入条件として、走査速度、アーキ電流、ノズル径、ノズル・試料間距離、プラズマガス圧力

の影響は大きく、適正值が存在する。

- (3) プラズマの広がり方を推定する方法を示し、それにより、試料に加わるパワー密度を求めると $1.1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ となった。
- (4) プラズマエネルギーの 40% が試料に吸収される。しかし、焼入れに利用されたエネルギーはその 10% 以下であり、正味効率はプラズマ全パワーの 4% 以下である。

参 考 文 献

- 1) O. S. Kobayakov and E. G. Ginzburg: Micro-plasma Heating used in Hardening Technology Processes, Automatic Welding, (May 1988) 51.
- 2) 木村達夫, 小松秋男: 小口径ノズルプラズマ加工機の開発とその加工特性, 昭和 63 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1988) 841.
- 3) L. G. Pittaway: The Temperature Distribution in Thin Foil and Semi-infinite Target Bombarded by an Electron Beam, Proc. Electron Beam Symp. 5th Ann. Meetings, Alloy Electronics Corp., Mass., March 28-29, (1963) 88.
- 4) 歌川 寛: 金属熱処理技術の基礎, 啓学出版 (1981) 18.
- 5) 岩田 篤: 電子ビーム変態焼入れ, 精密機械, 48, 5 (1982) 635.
- 6) 日本鉄鋼協会編: 鉄鋼便覧, 第1巻, 第3版, 丸善 (1981) 215.
- 7) 宮崎俊行, 谷口紀男: 電子ビーム加工・レーザ加工における温度解析, 精密機械, 36, 1 (1970) 21.

(p. 1437 より続く)

自動車産業

自動車は 2% 前後の安定成長を継続、基幹産業としてあり続けるという明るい見通しが示された。わが国の自動車産業の現状は輸出、海外投資のいずれの局面においても厳しい状況を迎えているが、21 世紀へ向けて国内市場は 95 年で 780 万台程度(平均 2.2% 増)、2000 年で 850 万台程度(同 1.7% 増)の需要が見込め、欧米市場も穏やかに伸び、東南アジアでも特に台湾、韓国で 90 年代後半に本格的なモータリゼーション時代を迎えることから、自動車の役割はますます大きくなり、安定成長下で競争と協調が展開されることになる。

こうした中で、自動車産業は量的・質的变化に弾力的に対応することの可能な自動車の開発・生産・流通体制

を整備するとともに、経済社会・環境変化に対応するため車両制御技術、新素材、通信技術などの技術開発を進め、国際的には節度ある輸出態度の維持、輸出と現地生産の調和、現地経済への貢献、日本における輸入市場の拡大および外国製自動車部品の調達拡大——などに努める必要があるとしている。

また、安定成長を実現するため、① 全国的な高速道路ネットワークの整備、② 駐車場、アクセス道路整備と総合レジャー施設、オートパークなどソフトのインフラ整備、③ ユーザ負担の低減、④ 環境、安全、エネルギーなど社会的要請にこたえるための助成——が必要と強調しているのが特徴となっており、空洞化懸念などは薄らいでいるとしている。

(p. 1490 へ続く)