工業分野における高出力ディスクレーザーの応用

Rüdiger BROCKMANN¹, David HAVRILLA², 若林 浩次³

¹TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Aichhalder Str. 39, D-78713 Schramberg, Germany

²TRUMPF Inc., 47711 Clipper St., Plymouth, MI 48170, USA

³トルンプ(株) レーザ事業部 (〒226-0006 神奈川県横浜市緑区白山1-18-2)

Industrial Application of High-Power Disk Lasers

Rüdiger BROCKMANN,¹ David HAVRILLA,² and Koji WAKABAYASHI³

¹TRUMPF Laser GmbH + Co. KG, Aichhalder Str. 39, D-78713 Schramberg, Germany

²TRUMPF Inc., 47711 Clipper St., Plymouth, MI 48170, USA

³TRUMPF Corp., 1-18-2, Hakusan, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-0006, Japan

(Received March 18, 2008)

Laser welding has become one of the fastest growing areas for industrial laser applications. The increasing cost effectiveness of the laser process is enabled by the development of new highly efficient laser sources, such as the Disk laser, coupled with decreasing cost per Watt. We introduced the Disk laser several years ago, and today it has become the most reliable laser tool on the market. The excellent beam quality and output powers of up to 10 kW enable its application in the automotive industry as well as in the range of thick plate welding, such as heavy construction and ship building. This serves as an overview of the most recent developments on our Disk laser and its industrial applications like cutting, welding, remote welding and hybrid welding, too. The future prospects regarding increased power and even further improved productivity and economics are presented.

Key Words: Laser welding, Disk laser, Automotive industry, Remote welding

1. はじめに

過去2年間、工業分野における1 kW以上の高出力が必要な切断と溶接において、CO₂レーザー、ディスクレーザー、ファイバレーザーの優劣が競われてきた。CO₂レーザーは、ビーム品質が高く、本質的に加工能力も高いことから、高品質が要求される厚板切断に使用されてきた。また、CO₂レーザーは照射時に発生するプラズマによるレーザー吸収によりスパッタの発生が少ないため、厚板のレーザー溶接にも適している。反面、CO₂レーザーの欠点は、ミラー方式のレーザー伝播システムが必要になることである。この伝播システムの制約上、フレキシブルなロボットの使用は困難となる。一方、ロボットの使用は生産システムの複雑さを低減するので、要するコストを大幅に節約することができる。このコスト削減は、波長が1 μm帯の固体レーザーを使用し、光ファイバでレーザー光をフレキシブルに伝播させることで可能となる。薄板加工の場合、特にロボットを使用してレーザー光を操作する溶接と切断では、光ファイバによるレーザー伝播が殆んどを占めている。従来、光ファイバによる数kWオーダーのレーザー伝播を行うのは、ランプ励起

式Nd:YAGレーザーだけであった。しかし、最近の薄板ディスクレーザーはCO₂レーザーと遜色ない、場合によってはむしろ優れているビーム品質と加工能力を誇る。このビーム品質と出力のスケラビリティによって、最も有望な用途、例えば厚板の溶接、電子ビームほどの狭いシームの溶接などが経済的かつ効果的に工業生産可能となった。これらの出力用途は我々の高出力ディスクレーザーにより実現可能に至ったのである¹⁻⁵⁾。

2. 薄板ディスクレーザー

ディスクレーザーは研究開発を通して、10 kW以上の出力を確保することが可能となった。ディスクレーザーのビーム品質は、用途に応じて変化する。例えば、2 mm-mrad(1 kW)、8 mm-mrad(2-8 kW)、12 mm-mrad(10 kW)という具合である。ディスクレーザーは一体化モジュール構造を採用しているため、部品を素早く交換でき、レーザーの始動時間、つまりアップタイムの短縮が可能となった。既に昨年時点で600台以上のディスクレーザーのキャビティと2400個以上のダイオードモジュールが多種多様な製造現場で稼働している。しかも、殆んどのコンポーネン

トは15年以上の実績がある。例えば、レーザー伝播用光ファイバ、ビームスイッチ、加工光学系などは、ランプ励起レーザーシステムで使用されていた頃から改善改良を重ねてきている。また、薄板ディスクレーザーのダイオードの保証寿命は20,000時間にまで拡張している。故障が発生した場合には、現場でダイオードモジュールを素早く交換することができる。4kW以上の高出力では、ダイオード出力バックアップ機能によって、何らかの原因でひとつのダイオードモジュールに異常が発生しても、他のモジュールがカバーすることで、レーザー装置を停止せずに稼働を続けることができる。ダイオードレーザーは薄板ディスクの励起に使用され、レーザーの光路を決めている部品の配置は非常にシンプルで、励起光は最高で20回ディスクを通過する。これによってディスクレーザーの効率が高められる。Fig. 1はディスクのキャビティ構造を示す。ここで、ディスクは真中に取り付けられ、ダイオードレーザーによって左右上下方向から励起される。

ダイオード励起ディスクレーザーで得られる高いビーム品質は、主にレーザー媒体からの熱拡散効率が高いことに起因する。ディスク(直径約14 mm、板厚0.15 mm)は水冷式ブロック(ヒートシンク)に取り付けられており、ディスクは極めて薄いためブロックと面で接する、つまり表面積/レーザー媒体体積の比率が高い。これによって、冷却効率が非常に高く、熱勾配は殆んどない。

ディスクレーザーの出力制御には次の2通りの方法がある。最初の方法は、ディスク1個の出力を励起源の出力で直接制御する方法である。ディスクレーザーの励起源は独立したモジュールから構成される。ポンプモジュールの個数は、必要とされるディスクあたりの出力に応じて調整できる。2番目の方法は、複数のディスクを一行に配置し、かつビーム品質を変えることなく、出力を高める方法である。最大4つのディスクを一行に並べることが可能である。最新の成果では、4つのディスクを装備し、加工点における最大定格出力は10 kWにも達する。これはディスクあたり2.5 kWに相当する。実験に基づいたシミュレーションでは、現状でも1ディスクあたりの最大出力は限界に達していないと推定される。シュトゥットガルト大学の計算によると、ディスクあたり30 kWの出力が可能との結果を得ている。

非常に大きなアパチャーと短いゲイン媒体をもつ薄板

Fig. 1 Pumping of a disk.

ディスクレーザーは、キャビティ内部強度が外部出力強度よりも1桁以上高いため、加工面からの反射光に対して受ける影響が極めて少ない。これによって、アルミニウムや銅などの高反射材料でも、他の固体レーザーやファイバレーザーなどに比べキャビティ内部が被る重度の損傷を回避することができる⁶⁾。また、優れたビーム品質と狭い発振スペクトル幅により、薄板ディスクレーザーの光ファイバケーブルの長さには制約がない。100 m以上の光ファイバケーブルによるレーザー伝播システムを構築することができる。ただし、実際には光ファイバケーブル敷設、および距離延長に対する予備の光ファイバケーブルのコストの問題がある。Fig. 2はディスク上のポンプスポット光を示す。このポンプスポット径 D_p を増減することで、ディスクあたりの出力制御が可能となる。ディスクあたりの出力は、励起出力密度を一定に保ったまま増加することができる。出力 P_i 方根に比例して、 D_p が大きくなることによる($D_p \propto \sqrt{P_i}$)。レーザー(ロッドレーザー、ファイバレーザー)と異なり、最大出力においてもディスクの出力密度に臨界点がなく、ディスクあたり、5 kW以上の出力を問題なく連続的に実現している。

ディスクレーザーの優れた光-光学効率(約65%)は特筆に値する。以上の結果より、ディスクレーザーの有望度は明らかである。4個のディスクを使用すれば、最大出力16 kWの高出力レーザーを実現できる。我々は2009年には、このレーザーを商用化する方針である。

3. 工業分野でのディスクレーザーの用途

現在、工業用ディスクレーザーの出力は数W~10 kWの範囲である。つまり、薄板ディスクレーザーは微細穴あけから厚板金属の溶接までカバーしている。レーザーのビーム品質は用途に応じて変化する。数kWオーダーでは、ロボットガイド式レーザースキャナーを利用したビーム品質8 mm-mradのレーザーが最適である。異なるビーム品質が必要な用途(ハイブリッド溶接等)の場合、大径のコアをもつ光ファイバケーブルを使用するだけで

Fig. 2 A certain laser power can be extracted per unit of area. $\rightarrow P_L \sim D_p^2$

対応できる。薄板ディスクレーザの大きな利点は、光ファイバケーブルによる伝播をプラグ&プレイ方式で行えることである。つまり、レーザ側または加工機側で光軸調整を行わなくとも光ファイバケーブルを交換することができる。これは、小径コアをもつ光ファイバケーブルでも可能である。例えば、1 kWディスクレーザに50 μm コアの光ファイバケーブルを適用できる。閉ループ出力制御によって、常にディスクレーザの出力を一定に保つことができるため、再現性の高い加工結果を期待できる。

3.1 切 断

上述した通り、ディスクレーザのビーム品質は用途に応じて変化する。1 kWのディスクレーザは、薄板の切断および(微細)溶接に使用できる優れたレーザである。2 mm-mradのビーム品質は切断用途に最適である。最大切断速度とビーム品質の関係性を研究した結果、1 kWオーダーでは、ビーム品質が2 mm-mradのときに最大切断速度が得られることが判明した。シングルモードのビーム品質(現場でのプラグ&プレイ方式の光ファイバケーブル交換を行わない)の場合、Fig. 3のように厚さ0.3 mmの切断速度はビーム品質が2 mm-mradの時と同じように変化する。

Fig. 4は1 kWの固体レーザを使用した厚さ3 mmのステンレス切断の結果を示す。ビーム品質が異なる2つの

Fig. 3 Maximum cutting speed related to beam quality and output power.

Fig. 4 Cutting speed of 1 kW solid state lasers (material:301 stainless steel).

レーザ(シングルモードと2 mm-mrad)は同じ切断速度であることが示されている。

3.2 溶 接

レーザ溶接は2つのタイプに分類される。

- a) リモート溶接(長い焦点距離/スキャナ光学系)
- b) 従来の溶接(短い焦点距離/固定された光学系)

数年間、CO₂レーザを利用した溶接の開発を進めてきたが、このリモート溶接法は、レーザ出力を増加してもビーム品質が優れているため可能だった。例えば、ガウスシアンモードでも6 kWのレーザ出力が可能である。ディスクレーザの優れたビーム品質とプログラマブル加工ヘッド(PFO)の組み合わせにより、YAGレーザのリモート溶接が広く使用されるようになった。自動車産業で多様な用途に利用されるなど、工業分野で700以上のシステムが既に稼働している。

リモート溶接の主な用途は、塗装前の車体とシートの製造である。リモート溶接の利点は、極めて高い加工能力(高い「ビームオン」時間)である。1秒間に3~4箇所を溶接できる。狭い範囲に多くの溶接箇所があるパーツは特にリモート溶接に適している。車体の組立には、溶け込みとサイクルタイムの条件に応じて、4~6 kWのレーザ出力が必要である。

ダイムラー・クライスラー社とアウディ社では、製造ラインに多数のディスクレーザを使用し、ドア、パネル、他の車体部分を溶接している。この実績から、ディスクレーザが、過酷でダウンタイムが許されないシフト交代制の製造現場に適していることは証明された。この時の、ディスクレーザの標準アップタイム率は99%以上である。

レーザ励起源だけでなく、スキャナ光学系も高い加工特性を得るために重要である。2007年初頭、新型のプログラマブル加工ヘッド(PFO 3D)を発表した。これは、X-Yスキャナと高性能なZ軸方向の集光点スキャナを装備した溶接用加工ヘッドである。レンズの独立駆動によってZ軸の高い応答性を実現した。このドライブは磨耗がなく、kHzオーダーで動作する。Fig. 5は新型スキャナヘッドの原理を示す。

Fig. 5 Principle of the new programmable focusing optics PFO-3D.

Fig. 6は代表的な厚板金属の溶接例を示す。出力8 kWのレーザーによって溶け込み深さ6 mmのアスペクト比の高いシームを実現した。出力8 kWのレーザーを使用した他の用途には、重工機械、電車、自動車、パイプラインの製造などが挙げられる。これらの用途では最近ではハイブリッド溶接が多用されている。

4. 最近の傾向

工業用ディスクレーザーはビーム品質、最小パルス幅、最大パルスエネルギー、ディスクあたりの出力が限界に達していないことから、薄板ディスクレーザーの開発にますます拍車がかかりそうである。また、市場からの2つの要求がこの研究開発を促進するものと思われる。まず、kWあたりの価格低減に対する顧客の要望が大きい。数kWオーダーのレーザーは市場競争が激しく、この領域ではディスクレーザーがそのモジュール構造の簡便さにより市場をリードしている。ディスクあたりの出力増加によってイニシャルコストを低減することができる。今後2年間で、ディスクあたりの出力を増加することにより、同一出力を得るためのレーザー部品点数を大幅に減らすことができる。これによってコストパフォーマンスが急上し、kWあたりの必要床面積が飛躍的に減少できる。また、Fig. 7のように4個のディスクを一列に配置した最大出力16 kWのレーザーを実現できる。

このレーザーでは、2番目の要求である高出力化を満足する。特に重工機械の製造では、8 kW以上の出力が必要なハイブリッド溶接(レーザとミグ/ティグ溶接の組合せ)が採用されるようになった。この出力レベルでは固体レーザーだけを、光ファイバケーブルによってレーザーをフレキシブルに伝播できる。また、kWあたりの価格低下の可能性も出てきた。2005年に販売された4 kWディスクレーザーに比較すると、2007年ではkWあたりのコストが50 %低下した。2009年までに、2005年と比較したkWあたりのライン投資コストを最大60 %低減する予定である。また、ディスクレーザーのランニングコストが大幅に低下すると思われる。電力消費効率(レーザー装置へ供給された電力に対する加工点の最大定格出力の比率)は27 %以上あり、エネルギーおよび設備投資のコストの低減に寄与する。ダイオードのコストについても大幅に下げることができる。これは4 kWレーザーで実証済みである。2005年に16個のポンプモジュールを装備したレーザー発振器を商用化した。現在では、同じ出力を得るのに8個のポンプモジュールで済む。各ポンプモジュールの出力は

Fig. 6 6 mm deep penetration welding in stainless steel using the TruDisk8002. The excellent beam quality of the laser results in the high aspect ratio of the seam. The weld speed is 6 m/min.

Fig. 7 The output power of a disk laser depends on the pumping power per diode bar and the number of disks. In 2008/2009 TRUMPF has scheduled a 16 kW disk laser with a number of four coupled disks.

飛躍的に上昇しているにも関わらず、コストは抑えられている。同じ出力あたりのダイオードのコストは約40 %以上低下した。現在、より高出力のダイオードの開発が進められており、さらにコスト低減は加速するものと考えられる。

参考文献

- 1) A. Giesen: Trumpf Laser Schramberg **26** (2006).
- 2) P. Loosen: Application properties of high brightness lasers, Workshop: Advanced Solid State Lasers: Status, Prospects and Applications, Laser 2007, Munich.
- 3) R. Bernhardt and H. Schubert: 8th European Conference and Exhibition, European Automotive Laser Application.
- 4) R. Brockmann and K. Mann: Laser Technik Journal, Heft **2** (2007).
- 5) D. Havrilla: Proc. Advanced Laser Application Conference (2006).
- 6) P. Herwig: Photonik **5** (2007).