

Shuli Gong · Shengyong Pang
Hong Wang · Linjie Zhang

Schweißbad- Dynamik beim Laser- Tiefschweißen



航空工业出版社




Springer Vieweg

Schweißbad-Dynamik beim Laser-Tiefschweißen

Shuili Gong · Shengyong Pang · Hong Wang ·
Linjie Zhang

Schweißbad-Dynamik beim Laser-Tiefschweißen

 航空工业出版社

 Springer Vieweg

Shuili Gong
AVIC Manufacturing
Technology Institute of China
Beijing, China

Shengyong Pang
Huazhong University
of Science and Technology
Wuhan, Hubei, China

Hong Wang
Taiyuan University of Science and
Technology
Taiyuan, Shanxi, China

Linjie Zhang
Xi'an Jiaotong University
Xi'an, Shaanxi, China

ISBN 978-981-97-1342-4 ISBN 978-981-97-1343-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-981-97-1343-1>

Ko-Publikation mit China Aviation Publishing & Media Co., Ltd
Die gedruckte Ausgabe wird nicht vertrieben in China (Festlandchina). Kunden aus China (Festlandchina) können das Buch bei China Aviation Publishing & Media Co., Ltd bestellen.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Dieses Buch ist eine Übersetzung des Originals in Englisch „Weld Pool Dynamics in Deep Penetration Laser Welding“ von Shuili Gong, publiziert durch Springer Nature Singapore Pte Ltd. im Jahr 2021. Die Übersetzung erfolgte mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung). Eine anschließende Überarbeitung im Satzbetrieb erfolgte vor allem in inhaltlicher Hinsicht, so dass sich das Buch stilistisch anders lesen wird als eine herkömmliche Übersetzung. Springer Nature arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Produktion von Büchern und an den damit verbundenen Technologien zur Unterstützung der Autoren.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Die Verlage, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder die Verlage noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Die Verlage bleiben im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Ella Zhang

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Singapore Pte Ltd. und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: 152 Beach Road, #21-01/04 Gateway East, Singapore 189721, Singapore

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

Geleitwort

Mit der kontinuierlichen Verbesserung in Bezug auf Ausgangsleistung, Strahlqualität und Energieeffizienz sind Hochleistungslaser als Licht- und Wärmequellen von Hochenergiestrahlungen weit verbreitet in der Materialverarbeitung eingesetzt worden und bilden einen bedeutenden Teil der speziellen oder nicht-traditionellen Materialverarbeitungstechnologien. Die Lasermaterialverarbeitungstechnologie hat verschiedene Vorteile, einschließlich berührungsloser Verarbeitung, präziser Energiekontrolle, breiter Materialverträglichkeit, größerer Flexibilität, hoher Qualität und Umweltfreundlichkeit. Aus diesem Grund kann diese Technologie nicht nur für effiziente automatische Massenproduktion verwendet werden, sondern auch für eine Vielzahl von Kleinserienverarbeitungen und darüber hinaus für kundenspezifische Produktion. Daher ist die Laserbearbeitung zu einer unverzichtbaren Technologie für die Fertigungsindustrie geworden, um sich zu transformieren und aufzurüsten. Nach jahrelanger F&E ist die Laserbearbeitungstechnologie zu einer der wichtigsten technischen Mittel der Hochenergiestrahlverarbeitung in fünf großen Fertigungsbereichen geworden: Schweißen, Schneiden/Bohren/Markieren, Oberflächentechnik, Mikro-/Nanofertigung und additive Fertigung (3D-Druck).

Das Laserschweißen ist ein Verfahren zum Verbinden ähnlicher und unähnlicher Materialien durch Verschmelzung. Es hat viele Vorteile gegenüber dem traditionellen Lichtbogenschweißen, einschließlich höherer Geschwindigkeit, höherer Energiedichte und Tiefe-zu-Breite-Verhältnis der Schweißverbindungen, kleinerer wärmebeeinflusster Zonen und Verformungen, besserer Qualität und Leistung der Verbindungen, effizienterer Produktion und flexiblerer Steuerung und Bedienung, was enormes Potenzial als fortschrittliche Schweißtechnologie zeigt. Dennoch ist aufgrund der hohen Energiedichte des Laserstrahls der dynamische Zustand des Schmelzbades bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten komplexer. Die Beseitigung von Schweißfehlern, die Stabilität des Schweißprozesses und die Kontrolle der Verformung sind zu Schlüsseltechnologischen Herausforderungen geworden, die verstanden werden müssen. Um eine grundlegende Theorie des Laserschweißens, insbesondere des Schlüssellochschweißens, zu etablieren, ist das Verständnis der Dynamik des Laserschweißbades unerlässlich.

Professor Shuili Gong und sein Forschungsteam beschäftigen sich seit langem mit den Grundlagen des Laser-Schweißens und der Anwendung in der Technik. Sie haben systematisch eingehende Untersuchungen zu den Wechselwirkungsmechanismen zwischen Lasern und Materialien, dem Verhalten der Schweißnaht und dessen Einfluss auf Schweißprozesse durchgeführt und eine Reihe von Theorien zur Unterstützung der Entwicklung von Laser-Schweißtechnologien und Anwendungen aufgestellt. Dieses Buch ist ein Auszug und eine Zusammenfassung der Errungenschaften, die das Team des Autors im Laufe vieler Jahre Forschung erzielt hat, und ist eine Sammlung von theoretischen Erkenntnissen zum Thema Verhalten des Laser-Schlüsselbohr-Schweißbades. Das Forschungsteam von Professor Gong hat verschiedene Theorien zum dynamischen Verhalten des Laser-Schweißbades vorgeschlagen und aufgestellt, die eine theoretische Grundlage für die Aufdeckung von Schweißfehlermechanismen, den Stabilitätsmechanismus des Schweißprozesses und seine Gleichgewichtsbedingungen bieten und die praktischen technischen Anwendungen leiten. Gleichzeitig bilden die Theorien auch die Grundlage für die Forschung und Anwendung anderer Laserprozess-technologien.

Dieses Buch ist eine Monographie über die Grundlagenstudie des Laserschweißens, insbesondere über das Laserschlüsselbohrschweißen, das Laserschweißen mit Drahtfüller, das Laserschweißen von Materialien mit großer Dicke und das Laservakuumschweißen. Es wäre eine wertvolle Referenz für Forscher und Ingenieure. Ich freue mich sehr, dieses Buch den Lesern zu empfehlen.

July 2020

Prof. Lin Li
Fellow of the Royal Academy of Engineering
The University of Manchester
Manchester, UK

Vorwort

Im Jahr 1917 stellte Albert Einstein das Konzept der stimulierten Emission vor und entdeckte den photoelektrischen Effekt, was die theoretische Grundlage für die Erfindung des Lasers legte. Im Mai 1960 schuf Dr. Maiman, ein amerikanischer Physiker, den weltweit ersten Rubinlaser auf der Grundlage der Entwicklung der Quantenelektronik, was den Beginn der Forschung über Laser und deren Anwendung markierte. Anfang der 1960er Jahre begannen Berichte über technische Anwendungen im Zusammenhang mit Laserbohren und -schweißen zu erscheinen. Mit kontinuierlicher Verbesserung der Lasertechnologie und der Qualität des Laserstrahls sowie steigender Ausgangsleistung werden Laser schnell als Licht- und Wärmequellen für Strahlen mit hoher Energiedichte auf Materialverarbeitung angewendet, wodurch ein spezieller Technologiecluster für die Materialverarbeitung von großer Bedeutung entsteht - die Laserverarbeitungstechnologie. Diese Technologie bietet eine Vielzahl von Vorteilen wie berührungslose Verarbeitung, präzise Energiekontrolle, Eignung für eine Vielzahl von Materialien, hohe Flexibilität, hohe Qualität, Ressourcenschonung und Umweltfreundlichkeit. Sie kann nicht nur für effiziente und automatische Massenproduktion eingesetzt werden, sondern auch für die Kleinserienverarbeitung verschiedener Materialien und sogar für die Produktpassung. Dies macht die Laserverarbeitungstechnologie unverzichtbar für die Transformation und Modernisierung der traditionellen Fertigungsindustrie. Nach jahrelanger Entwicklung hat sich die Laserverarbeitungstechnologie zu einer Hochenergiestrahlarbeitungstechnologie entwickelt und ist zu einer der drei wichtigen technischen Mittel in den drei großen Fertigungstechnologien geworden - Schweißen und Entfernen, Oberflächentechnik und additive Fertigung (3D-Druck). Die Laserverarbeitungstechnologie kann in viele Kategorien unterteilt werden, wie Schweißen, Schneiden, Bohren, Rapid Prototyping, Ätzen, Mikro-Nano-Verarbeitung, Oberflächenmodifikation, Sprühen und Dampfabcheidung, und spielt eine wichtige Rolle in vielen Bereichen der Volkswirtschaft und der Verteidigungsentwicklung.

Im Vergleich zur traditionellen Lichtbogenschweißtechnologie hat die Laserschweißtechnologie, die typisch für die Laserbearbeitungstechnologie ist, eine

Reihe von Vorteilen wie hohe Energiedichte (bis zu 10^{15} W/cm²), hohes Tiefen-Breiten-Verhältnis von Schweißverbindungen, kleine wärmebeeinflusste Zone, geringe Verformung, hohe Qualität und Leistung der Verbindungen, hohe Produktionseffizienz und flexible Steuerung und Bedienung. Die Laserschweißtechnologie hat enormes Potenzial für das Schweißen.

Die Laserschweißtechnologie entwickelt sich parallel zur Weiterentwicklung der Lasertechnologie. Die Laserschweißmethode wechselt von der Wärmeleitungsschweißung zur Tiefpenetrationsschweißung, da die Laserleistung steigt, die Strahlqualität verbessert wird und die theoretische Forschung und Technologie fortgesetzt wird. Die Schweißtechnologie entwickelt sich ständig weiter. Lasernutzschweißen, Laserüberlappungsschweißen, hybrides Laser-Lichtbogenschweißen, Laserschweißen mit Zusatzdrähten, Doppelstrahl-Laserschweißen, Mehrstrahl-Laserschweißen, Doppelstrahl-Laserschweißen mit Zusatzdrähten, Ultrasmallspalt-Laserschweißen, Allposition-Laserschweißen, Langfokus-Dynamik-Laserschweißen und andere Technologien entstehen und entwickeln sich nacheinander. Dementsprechend werden Schweißausrüstung, Schweißsysteme und Prozesserkfassungs- und Steuerungstechnologien verbessert, was eine solide Grundlage für die Anwendung der Laserschweißtechnologie in der Volkswirtschaft und der Verteidigungsentwicklung legt.

Seit die Lasertechnologie beim Schweißen angewendet wird, schreitet die theoretische Forschung des Laserschweißens voran. Systematische Untersuchungen wurden aus verschiedenen Modi des Wechselwirkungsmechanismus von Lasern und Materialien, dem Verhalten des Schweißbades und dessen Einfluss auf den Schweißprozess durchgeführt, was eine solide theoretische Unterstützung für die Entwicklung und Anwendung der Laserschweißtechnologie bietet. Wissenschaftliche und technische Arbeiter haben den Wechselwirkungsmechanismus von Lasern und Materialien sowie den physikalischen Zustandsänderungsprozess von Materialien untersucht und zwei typische Schweißmodi des Laser-Wärmeleitungsschweißens und des Tiefpenetrationsschweißens ermittelt. Sie erkannten, dass die Laserenergiedichte der Schlüsselparameter für die gegenseitige Umwandlung der beiden Schweißmodi ist und fanden heraus, dass das im Tiefpenetrationsschweißen erzeugte Schweißbad durch das dynamische Schlüssellochverhalten gekennzeichnet ist und das thermodynamische Gleichgewicht in den Schlüsselöchern des Schweißbades beim Tiefpenetrationsschweißen eine notwendige Bedingung für die stabile Bildung von Schlüsselöchern ist. Durch Anwendungsforschung und Ingenieurpraxis des Laserschweißens entdeckten Schweißwissenschaftler, dass das Verhalten des Schweißbades beim Tiefpenetrationsschweißen eine wichtige Rolle für die Stabilität des Laserschweißens spielt. Das Studium und die Beherrschung des dynamischen Verhaltens von Schweißbädern beim Laserschweißen wird zur Schlüsselgrundlage für die Optimierung von technischen Parametern und die Stabilitätskontrolle beim Schweißen.

Im Laufe der Jahre haben mit der Unterstützung von Regierungsbehörden und Organisationen das Beijing Aviation Manufacturing and Engineering Institute, die Huazhong University of Science and Technology, die Xi'an Jiaotong University,

das Harbin Institute of Technology, die Dalian University of Technology usw. eine eingehende Forschung zur technologischen Grundlage des Laser-Schweißens durchgeführt und eine kontinuierliche Studie zum Verhalten des Schweißbades beim Laser-Schweißen durchgeführt, systematisch das Verhalten des Schweißbades beim Laser-Schweißen und seinen Einfluss aufgedeckt, theoretische Unterstützung für die praktische Anwendung und Förderung der Laser-Schweißtechnologie bereitgestellt und eine solide Grundlage für die Erstellung dieses Buches gelegt.

Dieses Buch beschreibt systematisch die wichtigsten Forschungsergebnisse zum Verhalten des Schmelzbades beim inländischen Laserschweißen in den letzten Jahren. Es verfeinert und fasst die relevanten Forschungsarbeiten von Institutionen wie dem Nationalen Verteidigungswissenschafts- und Technologie-Schlüssellabor für Hochenergie-Strahlverarbeitungstechnologie im Pekinger Luftfahrtfertigungs- und Ingenieurinstitut, der Huazhong Universität für Wissenschaft und Technologie, der Xi'an Jiaotong Universität und der Taiyuan Universität für Wissenschaft und Technologie zusammen. Die Forschungsarbeit des Autorenteam bietet insbesondere große Unterstützung für dieses Buch.

Dieses Buch besteht aus 9 Kapiteln, die systematisch das Verhalten des Schmelzbades während des Laser-Schweißens und seine Einflussfaktoren beschreiben, einschließlich der experimentellen Forschung, theoretischen Berechnung und Prozesssimulationstechnologie, des physikalischen Zustandswechsels des Schmelzbades und der Auswirkung der technischen Bedingungen auf das Verhalten des Schmelzbades. Die Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet in China spiegeln sich intensiv in den Forschungsergebnissen wider, einige davon präsentieren die neuesten Grenzforschungsarbeiten des Forschungsteams der Autoren, wie das Verhalten des Schmelzbades beim Doppelstrahl-Laserschweißen, das Verhalten des Schmelzbades beim Laserschweißen mit Zusatzdraht und das Verhalten des Schmelzbades beim Laserschweißen von Materialien mit großer Dicke und vollständiger Durchdringung sowie beim Laserschweißen unter Vakuum- und Niedervakuumbedingungen usw. An der Zusammenstellung dieses Buches haben Shuili Gong, Shengyong Pang, Hong Wang und Linjie Zhang teilgenommen, wobei Shuili Gong für den Inhalt des Vorworts und Kap. 1, Shengyong Pang für den Inhalt der Kap. 3–5 und Kap. 7–9, Hong Wang für den Inhalt von Kap. 2, und Linjie Zhang für den Inhalt von Kap. 6 verantwortlich ist. Das gesamte Buch wurde von Shuili Gong überprüft und abgeschlossen. Dieses Buch kann nicht nur als Referenz für Ingenieurtechniker, wissenschaftliche Forscher im Bereich der Laser-Materialbearbeitung, wissenschaftliche Forscher im Bereich der Materialwissenschaften und Lehrer und Studenten an Hochschulen und Universitäten verwendet werden, sondern hat auch einen hohen Referenzwert für Forschungs- und Entwicklungspersonal im Bereich der Laserausrüstung, optische wissenschaftliche Forscher, wissenschaftliche und technische Mitarbeiter in den verwandten Bereichen der Laseranwendungsphysik und Lehrer und Studenten an Hochschulen und Universitäten.

Während der Zusammenstellung dieses Buches erhielten wir große Unterstützung und Hilfe von unserem Forschungsteam. Wir möchten dem Nationalen

Verteidigungswissenschafts- und Technologie-Hauptschlüssellabor für Hochenergie-Strahlverarbeitungstechnologie im Pekinger Luftfahrtfertigungs- und Ingenieurinstitut, der Huazhong-Universität für Wissenschaft und Technologie, der Xi'an Jiaotong-Universität und der Taiyuan-Universität für Wissenschaft und Technologie danken, und insbesondere danken wir Professor Jianxun Zhang von der Xi'an Jiaotong-Universität für seine Anleitung für dieses Buch, Professor Jianzhong Xiao und Professor Jianxin Zhou von der Huazhong-Universität für Wissenschaft und Technologie für ihre starke Unterstützung für dieses Buch, und die Unterstützung und Hilfe unserer Kollegen. Wir möchten den Autoren, die in der Bibliographie dieses Buches aufgeführt sind, für ihre Werke und Aufsätze danken, die einen großen Beitrag zur Zusammenstellung dieses Buches geleistet haben.

Wir möchten Professor Lunji Hu und Professor Liliang Chen von der Huazhong University of Science and Technology mit diesem Buch trösten. Ohne ihre Unterstützung und Anleitung über die Jahre hinweg hätten die Autoren dieses Buch möglicherweise nicht fertigstellen können.

Aufgrund des begrenzten Wissens der Autoren ist es unvermeidlich, dass es in dem Buch Mängel und Unzulänglichkeiten gibt. Sie sind herzlich eingeladen, uns zu kritisieren und zu korrigieren.

Peking, China
Juli 2017

Shuili Gong

Einführung

Dieses Buch beschreibt systematisch das Verhalten des Schmelzbades beim Laserschweißen und seine Einflussfaktoren aus den Perspektiven der Prüftechnik, theoretischen Berechnung und Prozesssimulationstechnologie, physikalischen Zustandsveränderungsverhalten von Schmelzbädern und dem Einfluss von technischen Bedingungen auf das Verhalten des Schmelzbades. Das Buch umfasst umfangreiche Forschungsergebnisse, die China auf diesem Gebiet erzielt hat, von denen einige die neuesten Spitzenforschungen darstellen, die vom Forschungsteam der Autoren durchgeführt wurden. Diese neuesten Forschungsbemühungen beziehen sich hauptsächlich auf das Verhalten des Schmelzbades beim Doppelstrahllaserschweißen, Laserschweißen mit Zusatzdrähten, Vollpenetrationslaser-schweißen von sehr dicken Teilen und Laserschweißen unter Vakuum- und Niedervakuumbedingungen.

Dieses Buch kann von Lehrern und Studenten an Universitäten und Hochschulen sowie von Ingenieurtechnikern als Referenz verwendet werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen des Laserschweißens	1
1.1 Wechselwirkung von Lasern und Materialien	1
1.1.1 Laserabsorption durch Materialien und Material- erwärmung	2
1.1.2 Laser-Wärmequellenmodell und Laser-Heizeffekt	5
1.1.3 Materialschmelzen unter Laserwirkung	8
1.1.4 Verdampfung von Materialien unter Laserwirkung	10
1.1.5 Laserinduziertes Plasma und seine Auswirkungen	12
1.2 Prinzipien und Eigenschaften des Laser-Schweißens	13
1.3 Forschung zum Verhalten des Schweißbades beim Laserschweißen	16
2 Modell der quasi-stetigen Schmelzbad-Dynamik und numerische Simulation	21
2.1 Einführung	21
2.2 Grundmodelle des quasi-stationären Laserschweißens	22
2.2.1 Regelungsgleichungen des Flusses und der Wärmeübertragung beim quasi-stationären Laserschweißen	23
2.2.2 3D-Mathematisches Modell des Tiefpenetrations- Laserschweißens unter beweglicher Wärmequelle	25
2.2.3 Wärmequellenmodell in der Tiefpenetrations- Laserschweißen	29
2.3 Umsetzung der numerischen Lösung	30
2.3.1 Aufwind-Schema	30
2.3.2 Versetztes Gitterverfahren	33
2.3.3 Druckkorrekturmethode zur Lösung der Navier- Stokes-Gleichung	36
2.3.4 SIMPLE-Algorithmus	38
2.3.5 Programmierung und Lösung	39

2.4	Physikalische Eigenschaften und Berechnungsparameter	41
2.5	Auswirkung der Schweißgeschwindigkeit auf das Schlüssellochprofil.	43
2.5.1	Temperaturverteilung beim Tiefpenetrations- Laserschweißen von Titanlegierungen.	43
2.5.2	Auswirkung der Schweißgeschwindigkeit auf die Größe des Schlüssellochs.	47
2.5.3	Einfluss der Laserleistung auf die Schlüssellochgröße.	51
2.6	Simulation des Schmelzbad- und Schlüssellochs bei Tiefpenetrations-Laserschweißen	54
2.6.1	Numerische Simulation der Schmelzbadform bei Tiefpenetrations-Laserschweißen	54
2.6.2	Auswirkung der Schweißgeschwindigkeit und der Laserleistung auf die Größe des Schmelzbades.	56
2.7	Numerische Simulation des Flüssigkeitsflusses im Schmelzbad während des Tiefpenetrations-Laserschweißens	57
2.7.1	Eigenschaften des Flüssigkeitsflusses im Schmelzbad . . .	57
2.7.2	Verteilung der Fließgeschwindigkeit im Schweißbad	63
2.7.3	Verifizierung.	64
2.8	Zusammenfassung	68
3	Kopplungsmodell und numerische Berechnungsmethode von Schlüsselloch und Schmelzbad.	71
3.1	Einführung	71
3.2	Regelungsgleichungen des gekoppelten Modells	73
3.2.1	Wärmeübertragungs- und Strömungsgleichungen.	73
3.2.2	Wärmequellenmodell.	74
3.3	Freiflächen-Verfolgungsmethode.	77
3.3.1	Level Set Methode	78
3.3.2	VOF-Methode	79
3.4	Grenzbedingungen des Kopplungsmodells	81
3.4.1	Grundlegende Vereinbarungen	81
3.4.2	Unstetige Randbedingungen bei Gas-Flüssigkeits- Zweiphasenströmung	82
3.4.3	Unstetige Randbedingungen für Oberflächenspannung, therm kapillare Kraft und Rückstoßdruck.	84
3.5	Numerische Methode.	89
3.5.1	Schnelle Lösung der von der Schlüssellochwand absorbierten Laserstrahlenergie	89
3.5.2	Verfolgungsmethode für freie Schlüssellochoberflächen.	97
3.5.3	Lösungen für die Kopplung von freier Oberflächen- strömung und Wärmeübertragung	107
3.5.4	Numerischer Berechnungsprozess.	112
3.6	Zusammenfassung	112

- 4 Simulation des transienten Schlüssellochs und Schmelzbad** 115
 - 4.1 Einführung 115
 - 4.2 Transiente Kopplungsdynamik von Schlüssellochern und Schweißpool. 116
 - 4.2.1 Dynamischer Evolutionsprozess und Eigenschaften von Schlüssellochern 116
 - 4.2.2 Flusseigenschaften des Schmelzbades mit stabilem Schlüsselloch 118
 - 4.2.3 Flusseigenschaften des Schmelzbades mit instabilem Schlüsselloch 119
 - 4.3 Auswirkungen physikalischer Faktoren auf das Kopplungsverhalten 127
 - 4.3.1 Grenzflächenkraft und mehrfache Reflexionen und Absorptionen 127
 - 4.3.2 Thermophysikalische Parameter 140
 - 4.3.3 Schweißprozessparameter 145
 - 4.4 Zusammenfassung 151
- 5 Dynamisches Verhalten von Metall-Dampf/Plasma-Plume im transienten Schlüsselloch** 153
 - 5.1 Einführung 153
 - 5.2 Dynamisches Modell von Metallgas/Plasma in transientem Schlüsselloch 154
 - 5.2.1 Regelungsgleichungen 155
 - 5.2.2 Grenzbedingungen 157
 - 5.3 Dynamik des Metallgases/Plasmas im transienten Schlüsselloch 162
 - 5.3.1 Ungleichmäßige Verteilung und hohe Transient 162
 - 5.3.2 Multidirektionales Fließverhalten im Schlüsselloch 171
 - 5.3.3 Heftige Oszillation und Schwingungsverhalten. 171
 - 5.3.4 Kompressibilität bei lokaler Verdampfung. 173
 - 5.4 Schlussfolgerung 176
- 6 Verhalten von Schlüsselloch und Schmelzbad unter dem Einfluss von seitlich geblasenem Gas** 179
 - 6.1 Einführung 179
 - 6.2 Strömungsfeld des seitlich geblasenen Schutzgases (für Titanlegierung) 181
 - 6.3 Verhalten von Schlüsselloch und Schweißbecken unter dem Einfluss von seitlich geblasenem Gas 184
 - 6.3.1 Verformung der Schweißnahtoberfläche unter dem Einfluss von seitlich geblasenem Gas 184
 - 6.3.2 Verhalten des Schlüssellochs und des Schweißbades unter den kombinierten Auswirkungen von Metalldämpfen und seitlich geblasenem Gas. 188

6.4	Einflüsse von seitlich eingeblasenem Gas auf die Stabilität des Schlüssellochs und des Schmelzbads.	193
6.5	Schlussfolgerungen	195
7	Schlüsselloch- und Schmelzbad-Dynamik beim Dual-Beam-Laserschweißen.	199
7.1	Einführung	199
7.2	Transientes Kopplungsmodell von Schlüsselloch und Schweißbecken beim Doppelstrahl-Schweißen.	200
7.2.1	Kontrollgleichung des transienten Kopplungsmodells . . .	200
7.2.2	Grenzbedingungen des transienten Kopplungsmodells . . .	204
7.3	Kopplungsverhalten von Schlüsselloch und Schweißbad bei Dual-Beam-Schweißen	205
7.3.1	Entwicklungsverhalten des dynamischen Schlüssellochs beim Schweißen.	205
7.3.2	Fließverhalten des beweglichen Schweißbades beim Schweißen	210
7.4	Mechanismus und Einflussfaktoren der Stabilität des Doppelstrahl-Schweißens	211
7.4.1	Stabilitätsmechanismus des Doppelstrahlschweißens . . .	211
7.4.2	Einfluss der Prozessparameter auf die Stabilität des Doppelstrahlschweißens.	212
7.5	Zusammenfassung	218
8	Schlüsselloch- und Schmelzbad-Dynamik beim Laserschweißen mit Zusatzdrähten.	221
8.1	Einführung	221
8.2	Mehrphasiges Transientes Kopplungsmodell beim Laserschweißen mit Zusatzdrähten	222
8.2.1	Mathematisches Modell des Drahtschmelzens	222
8.2.2	Transientes Kopplungsmodell von Schlüsselloch und Schweißbad	224
8.2.3	Grenzbedingungen	225
8.3	Schlüsselloch- und Schweißpooledynamik beim Schweißen mit Fülldrähten.	226
8.3.1	Verhaltensweisen von transienten Schlüssellochern und Schweißpools unter freien Übergangsbedingungen	226
8.3.2	Einflüsse der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf transiente Schlüsselloch- und Schweißbadverhalten im freien Übergang	230
8.3.3	Einflüsse des Drahtdurchmessers auf das transiente Schlüsselloch- und Schmelzbadverhalten im freien Übergang	232

8.3.4	Transientes Schlüsselloch- und Schmelzbadverhalten unter Kontaktübergangsbedingungen.	234
8.3.5	Einflüsse der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf das transiente Schlüsselloch- und Schmelzbadverhalten im Kontaktübergang.	238
8.3.6	Einflüsse des Drahtdurchmessers auf das transiente Schlüsselloch- und Schmelzbadverhalten im Kontaktübergang.	239
8.3.7	Vergleich des transienten Schlüsselloch- und Schmelzbadverhaltens im freien Übergang mit denen im Kontaktübergang.	241
8.4	Instabilität von Schlüsselloch und Schmelzbad beim Schweißen mit Zusatzdrähten	243
8.4.1	Schweißbad-Dynamik beim Einzelstrahl-Laserschweißen und Laserschweißen mit Zusatzdrähten.	243
8.4.2	Schweißbad-Dynamik beim Schweißen mit Zusatzdrähten unter verschiedenen Drahtvorschubgeschwindigkeiten	245
8.4.3	Mechanismus der Instabilität von Schlüssellochern beim Schweißen mit Zusatzdrähten.	246
8.5	Dynamisches Verdünnungsverhalten von beweglichen Schweißbädern beim Schweißen mit Zusatzdrähten	248
8.5.1	Modell der Verdünnung in Schweißbädern	248
8.5.2	Dynamisches Verdünnungsverhalten in quasi-stationären Schweißbädern.	250
8.5.3	Dynamisches Verdünnungsverhalten in transienten Schweißbecken.	264
8.6	Zusammenfassung	272
9	Dynamisches Verhalten von Schlüsselloch und Schmelzbad beim Vakuum-Laserschweißen	275
9.1	Einführung	275
9.2	Transientes Kopplungsmodell von Schlüsselloch und Schweißpool im Vakuum	276
9.2.1	Regelungsgleichungen beim Vakuum-Laserschweißen	277
9.2.2	Grenzbedingungen beim Vakuum-Laserschweißen.	278
9.3	Verhalten von Schlüsselloch und Schmelzbad beim Vakuum-Laserschweißen.	280
9.3.1	Dynamische Schlüsselloch-Evolutionen	280
9.3.2	Bewegungsmuster von Schweißbadströmungen	284
9.4	Zunahme der Eindringtiefe beim Laserschweißen unter Vakuum- und Niedrigvakuumbedingungen.	287

9.4.1	Mechanismus für die Zunahme der Eindringtiefe bei Abnahme des Umgebungsdrucks.	287
9.4.2	Endliche Zunahme der Eindringtiefe.	292
9.5	Zusammenfassung	295
Literatur	297

Kapitel 1

Grundlagen des Laserschweißens



Zusammenfassung Dieses Kapitel führt in die Grundlagen des Laser-Schweißprozesses ein. Die Prinzipien der Laser-Material-Interaktionen, die Eigenschaften und Theorien des Laser-Schweißens und die Forschungskonturen der Schweißbad-dynamik des Laser-Schweißprozesses werden vorgestellt.

1.1 Wechselwirkung von Lasern und Materialien

Der Wechselwirkungsprozess zwischen Laser und Material ist kompliziert und umfasst mehrere Disziplinen wie Laserphysik, Wärmeübertragung, Plasmaphysik, nichtlineare Optik, Thermodynamik, Gasdynamik, Strömungsmechanik, Werkstoffmechanik und Festkörperphysik. Das Laserschweißen, das eine der Hauptanwendungen der Laserverarbeitungstechnologie ist, nutzt ebenfalls das durch die Wechselwirkung zwischen Laser und Material erzeugte physikalische Phänomene, und diese physikalischen Phänomene können auf den thermischen und mechanischen Effekt des verarbeiteten Materials zurückgeführt werden. Der Hauptforschungsinhalt und die Richtung umfassen die Reflexion, Absorption und Energieumwandlung des Lasers durch das Material und die Erwärmung, Schmelzen, Thermokompressionsschockwelle, Dampfausstoß, Plasmaexpansion und Schockwelle des Materials durch den Laser. Dennoch liegt der Schwerpunkt der Laserschweißforschung auf der Absorption des Lasers durch das geschweißte Material und den thermophysikalischen und mechanischen Effekten des Materials selbst (wie Erwärmung, Schmelzen, Verdampfung und Plasmaeffekt). Die Hauptphysikalischen Phänomene sind in Abb. 1.1 dargestellt.

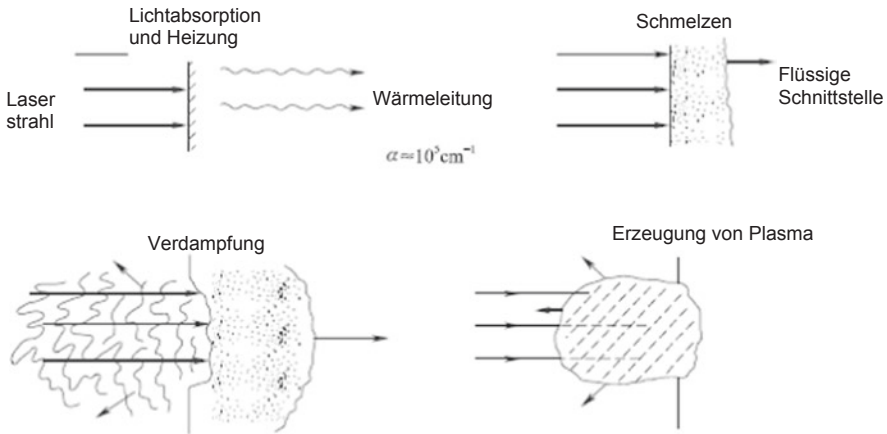


Abb. 1.1 Physikalischer Effekt auf der Materialoberfläche unter der Laserwirkung

1.1.1 Laserabsorption durch Materialien und Materialerwärmung

Die regelmäßige Bewegung der gedämpften Schwingung der geladenen Teilchen im Atom wird durch die klassische Mechanik beschrieben; das heißt, die geladenen Teilchen werden als Oszillatoren betrachtet, die der klassischen Mechanik folgen. Die Oszillatoren schwingen gebunden nahe einer bestimmten Gleichgewichtsposition durch die elastische Rückstellkraft, die direkt proportional zur Verschiebung ist. Im Falle einer Abweichung von der ausgeglichenen Position wird auf die Oszillatoren eine Rückstellkraft ausgeübt. Im Hinblick auf Metall sind Oszillatoren im metallischen Material hauptsächlich freie Elektronen. Die Absorption im Metall wird hauptsächlich durch die Schwingung freier Elektronen abgeschlossen, die sich unter der Wirkung des elektrischen Feldes frei bewegen können, ohne die Wirkung der Rückstellkraft. Die natürliche Schwingungsfrequenz der Oszillatoren ist $\omega_0=0$, und die Beziehung zwischen Brechungsindex n , Extinktionskoeffizient κ , und Dämpfungsfaktor γ , Plasmafrequenz ω_p ist wie folgt:

$$n = \left\{ \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \gamma^2 \omega}\right)^2} + \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)}{2} \right\}^{1/2} \quad (1.1)$$

$$\kappa = \left\{ \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \gamma^2 \omega}\right)^2} - \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}\right)}{2} \right\}^{1/2} \quad (1.2)$$

wo

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m\epsilon_0}} \gamma = \frac{e^2 \omega_0^2}{6\pi \epsilon_0 c^3 m}$$

Die Plasmafrequenz ω_p ist der Stärkeparameter, der die relative Stärke der Oszillatoren bestimmt; der Dämpfungsfaktor γ ist der Parameter der Bandbreite. Wie wir aus den Gl. (1.1) und (1.2) sehen können, wenn die Laserfrequenz weit weniger als die Plasmafrequenz ist, steigen n und k schnell an, der größte Teil des Lasers wird reflektiert und sehr wenig wird absorbiert; wenn die Laserfrequenz nahe an der Plasmafrequenz liegt, zeigt n den lokalen Minimalwert und der k -Wert nimmt monoton ab. Daher kann der Laser gut absorbiert werden, wenn die Laserfrequenz nahe der Plasmafrequenz liegt; wenn die Laserfrequenz weiter steigt und weit mehr als die Plasmafrequenz beträgt, nähert sich n schnell 1 und k wird schnell 0, in diesem Fall ist das Metall transparent. Die Plasmafrequenz des metallischen Materials liegt zwischen ultraviolettem und nah-infrarotem Band, daher ist der Laser vom nah-infraroten, sichtbaren bis zum ultravioletten Band relativ günstig für die Metallverarbeitung; der Ferninfrarot-Laser wird fast vollständig vom Metall reflektiert. Für das Infrarotlicht mit niedriger Photonenergie wirkt die Lichtfrequenz-Elektromagnetische Welle nur auf die freien Elektronen im Metall, während für das sichtbare Licht oder UV-Licht mit hoher Photonenergie die optische Frequenz-Elektromagnetische Welle auch auf die gebundenen Elektronen im Metall wirken kann, da die Eigenfrequenz der gebundenen Elektronen im Metall im sichtbaren oder UV-Licht-Frequenzband liegt. Unter der Wirkung der gebundenen Elektronen reduziert sich die Reflektionskapazität des Metalls, die Übertragungskapazität erhöht sich und die Laserabsorptionskapazität erhöht sich, was auf bestimmte nichtmetallische optische Eigenschaften hinweist.

Aufgrund der Wechselwirkung zwischen dem Laser und den Elektronen, Ionen, Gittervibrationen, Verunreinigungen und Defekten im Material kann der Laser vom Material absorbiert werden. Daher sind die optischen Eigenschaften des Materials eng mit der Laserabsorption verbunden.

Die Übertragung der Laserwirkung im Material kann durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden. Wenn die elektrische Feldintensität des Lasers im Material in die Maxwell'schen Gleichungen eingesetzt wird, kann die Beziehung zwischen dem komplexen Brechungsindex $\hat{n}(\hat{n} = n - ik)$ und der physikalischen Konstante des Materials, die die Eigenschaften der elektromagnetischen Wellenausbreitung widerspiegeln kann, ermittelt werden.

$$n^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega} \right)^2} + \epsilon \right] \quad (1.3)$$

$$\kappa^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega} \right)^2} - \epsilon \right] \quad (1.4)$$

wo:

- ω Frequenz;
- ε Dielektrizitätskonstante;
- μ Magnetische Leitfähigkeit;
- σ Elektrische Leitfähigkeit;
- n Brechungsindex;
- κ Extinktionskoeffizient, der die Dämpfungseigenschaft der elektromagnetischen Wellenamplitude widerspiegelt.

Die Gl. (1.3) und (1.4) zeigen, dass der Brechungsindex und der Extinktionskoeffizient des Materials eng mit der Permeabilität, der Dielektrizitätskonstante, der elektrischen Leitfähigkeit und der Laserfrequenz zusammenhängen.

Für isotrope homogene Substanzen verringert sich nach dem Lambert-Beer-Bouguer-Gesetz die Laserintensität I exponentiell mit der Übertragungsentfernung z im Material, $I_z = I_0 \exp(-\alpha_0 z)$, wobei α_0 der Absorptionskoeffizient ist. Die Beziehung zwischen dem Absorptionskoeffizienten und der Laserfrequenz und dem Extinktionskoeffizienten ist wie folgt:

$$\alpha_0 = \frac{2\omega\kappa}{c} = \frac{4\pi\kappa}{n\lambda} \quad (1.5)$$

wo,

- c Lasergeschwindigkeit im Vakuum;
- λ Laserwellenlänge im Vakuum;
- $1/\alpha_0$ Lichtabsorptionslänge, definiert als die Lichtstrahlausbreitungsstrecke, wenn die Lichtstrahlintensität auf 1/e (37 %) des Ursprungswertes reduziert wird, da die Photonenergie absorbiert wird.

Die Eigenschaft des Absorptionskoeffizienten in Bezug auf die Laserwellenlänge wird als selektive Absorption bezeichnet, während die Absorption, bei der der Absorptionskoeffizient nicht mit der Laserwellenlänge variiert, als allgemeine Absorption bezeichnet wird. Normalerweise hat der Absorptionskoeffizient nichts mit der Laserintensität zu tun.

Die Absorption des Lasers im Material hängt von der Permeabilität, der Dielektrizitätskonstante, der elektrischen Leitfähigkeit und der Laserfrequenz ab. Während der Laserbearbeitung, sobald die Laserfrequenz festgelegt ist, ist der Absorptionskoeffizient nur mit dem Extinktionskoeffizienten korreliert. Daher kann die Analyse der Absorption des Lasers im Material in eine Analyse des Extinktionskoeffizienten und der physikalischen Eigenschaften des Materials umgewandelt werden. Je höher die Dielektrizitätskonstante des Materials ist, desto geringer wird die elektrische Leitfähigkeit sein, desto höher wird der Brechungsindex sein und desto geringer wird der Extinktionskoeffizient sein, so dass der Absorptionskoeffizient geringer sein wird; je höher die Permeabilität des Materials ist, desto höher wird die elektrische Leitfähigkeit sein, und desto geringer wird die Dielektrizitätskonstante sein, so dass der Absorptionskoeffizient des Materials höher sein wird. Darüber hinaus ist die Laserabsorption auch mit der Mikrostruktur und dem Oberflächenzustand des Materials korreliert.

1.1.2 Laser-Wärmequellenmodell und Laser-Heizeffekt

Wenn die Substanz den Laser absorbiert, erscheint zuerst überschüssige Energie in einigen Massenpunkten (kinetische Energie des freien Elektrons, Anregungsenergie des gebundenen Elektrons oder überschüssiges Phonon), anstatt die Wärme. Diese ursprünglich geordneten angeregten Energien können in zwei Schritten in Wärmeenergie umgewandelt werden: Schritt I ist die stochastische Bewegung der angeregten Partikel in Raum und Zeit. Dieser Prozess wird während der Partikelkollisionszeit (Impulsrelaxationszeit) abgeschlossen, die ein sehr kurzer Moment ist; Schritt II ist die gleichmäßige Verteilung der Energie zwischen jedem Massenpunkt. Dieser Prozess beinhaltet eine Menge von Kollisionen und Zwischenzuständen, insbesondere bei nichtmetallischen Materialien. Schließlich wird eine bestimmte Form der Energieverteilung im Material entstehen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Heizprozess des Materials unter der Laserwirkung extrem kurz ist.

Um die thermische Wirkung aufgrund der Wechselwirkung zwischen Laser und Material zu untersuchen, wird allgemein angenommen, dass eine Wärmequelle mit derselben Laserenergieverteilung wie die absorbierte Laserenergieverteilung auf die Materialoberfläche wirkt, und unter dieser Voraussetzung wird das Temperaturfeldmodell erstellt, um den Heiz- und Kühlprozess während der Laserbearbeitung zu analysieren. Die Wärmeübertragungsphase von der Oberflächenmaterial in die Matrix folgt hauptsächlich dem Fourier-Gesetz der Wärmeleitung. Das Wärmequellenmodell des Lasers variiert mit verschiedenen Materialien. Bei metallischem Material ist die Laserabsorptionslänge sehr begrenzt. Die Laserabsorption erfolgt innerhalb von 1–5 μm der Materialoberfläche. Das Wärmequellenmodell kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$Q_{V(x,y,z,t)} = AI_0(x, y, t)\delta(z) \quad (1.6)$$

wo:

- A Absorptivität des Lasers durch das Material;
- $I_0(x, y, t)$ Verteilung der Laserintensität auf der Materialoberfläche;
- $\delta(z)$ Dirac-Funktion

Die Laserintensität $I_0(x, y, \text{ und } t)$ wird normalerweise als Produkt der räumlichen Verteilung $I_0(x, y)$ und der dimensionslosen Zeitwellenform $B(t)$ dargestellt. Typische Wellenformen $B(t)$ umfassen Stufenwelle, Rechteckwelle, Dreieckswelle, Trapezwelle und Gaußsche Wellenform, usw.

Während des Lasererhitzungsprozesses variieren die thermophysikalischen Parameter des Materials (Absorptionskoeffizient, spezifische Wärme, thermische Diffusivität und Wärmeleitfähigkeitskoeffizient) mit der Temperatur, jedoch ändern sich für die meisten Materialien die Wärmephysikalischen Parameter bei Temperaturänderungen relativ wenig, nahezu gleich einer Konstanten, oder die Temperatur im Prozess kann als Durchschnittswert betrachtet werden. In der folgenden Diskussion

wird angenommen, dass die thermophysikalischen Parameter des Materials unabhängig von der Temperatur sind.

Wenn der Laserstrahl mit Gaußscher Verteilung relativ zur Materialoberfläche stillsteht, ist die maximale Werteverteilung des Temperaturfeldes auf der halbunendlichen Materialoberfläche wie folgt:

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{4\alpha\tau}{r^2}} \quad (1.7)$$

wo:

A Laserabsorptivität;

P Laserleistung;

r Äquivalenter Radius des Laserstrahls;

k Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Materials;

α Thermischer Diffusionskoeffizient des Materials.

Die Erwärmung des Materials durch den Laser hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. der Laserleistungsdichte, dem äquivalenten Radius des Laserstrahls und der Erwärmungszeit des Materials durch den Laser. Der äquivalente Radius wird allgemein als der Abstand vom Zentrum des Laserstrahls zur Position definiert, wenn die Lichtintensität auf $1/e$ der zentralen Lichtstärke abfällt. Für den Gaußschen Strahl ist der äquivalente Radius $\omega/\sqrt{2}$ (ω ist die Spotgröße des Gaußschen Strahls). Wenn die Zeitcharakteristikkonstante $\tau_0 = r^2/4\alpha$ eingeführt wird, kann Gl. (1.7) umgeschrieben werden als:

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \quad (1.8)$$

Wenn die Laser-Material-Aktionszeit τ weit weniger als die Zeitcharakteristikkonstante τ_0 ist; das heißt, die Laserbestrahlungszeit ist sehr kurz, dann

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}}$$

Gl. (1.8) kann vereinfacht werden zu:

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \quad (1.9)$$

Wenn die Laser-Material-Aktionszeit τ weit mehr als die Zeitcharakteristikkonstante τ_0 ist, ist die Laserbestrahlungszeit relativ lang und das Temperaturfeld nähert sich dem stationären Zustand, also,

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \frac{\pi}{2}$$

Gl. (1.8) kann vereinfacht werden zu:

$$\Delta T = \frac{AP}{2k\pi^{1/2}r} \quad (1.10)$$

Wenn die Laser-Material-Aktionszeit τ nahe an der zeitlichen charakteristischen Konstante τ_0 liegt (allgemein $0,1 \tau_0 \leq \tau \leq 3\tau_0$), dann

$$\arctan \sqrt{\frac{\tau}{\tau_0}} \approx \frac{\tau}{4} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{3/8}$$

Gl. (1.8) kann vereinfacht werden zu:

$$\Delta T = \frac{AP}{4k\pi^{1/2}r} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{3/8} \quad (1.11)$$

Die Erwärmung des Materials durch den Laser wird hauptsächlich in der Laserwärmebehandlungstechnik angewendet. Üblicherweise wird unter der Wärmebehandlungsbedingung der Laserstrahl in Form von Scannen auf die Materialoberfläche aufgebracht, und der Laserstrahl in diesem Fall wird als bewegende Wärmequelle betrachtet. Das Temperaturfeld, das die bewegende Wärmequelle erzeugt, ist der quasi-stationäre Zustand, äquivalent zum statischen Temperaturfeld, das im Material mit der Laserscangeschwindigkeit v zieht, in welchem Fall es notwendig ist, eine äquivalente Laseraktionszeit $\tau^* = Cr/v$ zu definieren. Um die Temperaturänderung der bewegenden Laserfläche mit der Temperatur der statischen Laserfläche annähernd zu beschreiben, kann die Konstante C angemessen angepasst werden, normalerweise gleich 1,25.

Wenn die äquivalente Laseraktionszeit $\tau^* = 1,25r/v$ in Gl. (1.7) eingesetzt wird, kann die maximale Temperatur im Zentrum des Lichtflecks ermittelt werden.

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{5\alpha}{vr}} \quad (1.12)$$

Die charakteristische Geschwindigkeit $v_0 = 5\alpha/r$ wird eingeführt. Allgemein ist bei der tatsächlichen Laserwärmebehandlung die Laserscangeschwindigkeit nahe v_0 , in welchem Fall Gl. (1.12) umgeschrieben werden kann als:

$$\Delta T = \frac{AP}{k\pi^{3/2}r} \arctan \sqrt{\frac{v_0}{v}} \quad (1.13)$$

Wie aus Gl. (1.13) zu sehen ist, ist die Temperatur der Materialoberfläche direkt proportional zur Quadratwurzel der Heizzeit. Bei gegebener Energie des

Laserheizpuls erhöht sich die Pulsdauer (d. h. die Heizzeit) definitiv, wenn die Leistungsdichte zunimmt, und die Temperatur auf der Materialoberfläche steigt; das heißt, der Laserpuls mit hoher Spitzenleistung und kurzer Dauer kann die Materialoberfläche effektiver erhitzen.

1.1.3 Materialschmelzen unter Laserwirkung

Physikalische Probleme, die enger mit der Laserbearbeitung zusammenhängen, sind das Schmelzen und Verdampfen des Materials durch den Laser. Wenn die Temperatur der durch den Laser erhitzten Materialoberfläche bis zur Schmelztemperatur und Verdampfungstemperatur ansteigt, ist Gl. (1.7) nicht mehr gültig. Das Material muss während des Schmelzens und Verdampfens latente Wärme aufnehmen. Nach dem Schmelzen und Verdampfen ändert sich die Wärmeleitfähigkeit des Materials stark und die Wärmeleitung wird sehr komplex.

Wenn der Laser mit einer bestimmten Stärke auf die Materialoberfläche trifft und die Materialoberflächentemperatur bis zum Schmelzpunkt T_m ansteigt, wird die Isothermenstufe (vor der Schmelzwelle $T=T_m$) mit einer bestimmten Geschwindigkeit in das Material übertragen, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Laserleistungsdichte und den thermodynamischen Parametern des Materials in festen und flüssigen Phasen abhängt. Das Schmelzen ohne Verdampfung wird normalerweise als flaches Schmelzen definiert. Im Falle von flachem Schmelzen ist der Lichtfleck größer als der Schweißpool im Durchmesser, und der Effekt der transversalen Wärmediffusion kann vernachlässigt werden. Die maximale Tiefe in der flachen Schmelzzone kann dargestellt werden als:

$$Z \frac{1,2k}{AP} v \left(\frac{T_v}{T_m} - 1 \right)_{m,\max} \quad (1.14)$$

wo

T_m Schmelztemperatur des Materials;

T_v Verdampfungstemperatur des Materials.

In Bezug auf die Materialeigenschaften gilt: Je größer das Verhältnis des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten k des Materials zu T_v/T_m ist, desto größer wird die Schmelztiefe Z_{\max} sein. Für die Lasercharakteristiken, um die Schmelztiefe zu verbessern, sollte die relativ niedrige Laserleistungsdichte verwendet werden, da sie relativ lange Zeit benötigt, um die Materialoberfläche auf T_v zu erhitzen. Daher sollte bei gegebenem Laserpuls die Laserleistungsdichte so eingestellt werden, dass die Materialoberfläche gerade die Verdampfungstemperatur am Ende des Laserpulses erreicht, um die maximale Schmelztiefe zu erzielen. Unter normalen Umständen beträgt die maximale Tiefe des reinen Schmelzens des Materials unter Laserbestrahlung etwa einige Mikrometer bis einige hundert Mikrometer.

Was das flache Schmelzen entspricht, ist das tiefe Schmelzen, das definiert ist als Situation, in der die Schmelztiefe nicht kleiner als der Radius des Lichtflecks ist. Bei tiefem Schmelzen tritt nur ein Gleichgewichtsverdampfen an der Gas-Flüssigkeits-Phasenoberfläche auf, der Dampf ist für den Laser transparent. Der Schwellenwert der Laserleistungsdichte, der ein tiefes Schmelzen des Materials unter kontinuierlicher Gausstrahl-Bestrahlung verursacht, beträgt etwa:

$$I_{md} = 2kT_m / (\sqrt{\pi} \alpha A) \quad (1.15)$$

Während des tiefen Schmelzens ist der Durchmesser des Schmelzbades größer als der des Lichtflecks. Ein stabiler Verdampfungsblock mit einem Durchmesser, der kleiner als der des Lichtflecks ist, erscheint in der Mitte des Schmelzbades. Der Dampf im Block hat eine niedrige Dichte, ist im Grunde transparent für den Laser, so dass der Laser direkt eintreten und auf die Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche am Boden des Blocks strahlen und dann absorbiert werden kann. Die absorbierte Laserenergie wird für die Wärmeabfuhr der Seitenwand und die Verdampfung am Boden verwendet. Angenommen, der Radius sowohl des Laserflecks als auch des Verdampfungsblocks ist R_s , kann die Tiefe des tiefen Schmelzens ausgedrückt werden als:

$$Z_v = \frac{R_s^2 A I_0}{k_q T_v} \left[1 - \exp\left(-\frac{k_q T_v}{R_s^2 L_v \rho_q} t\right) \right] \quad (1.16)$$

Beim tiefen Schmelzen darf das Längen-Durchmesser-Verhältnis des Verdampfungsblocks Z_v/R_s nicht zu groß sein (allgemein $0,5 \leq Z_v/R_s \leq 40$), oder es kann zu instabilen Bewegungen von Dampf und Lösung kommen.

Wenn die Laserintensität relativ hoch ist, wird die Verdampfung an der Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche im Block verstärkt und der Dampfdruck steigt. Der Dampfdruck und die Dampfreaktion können die Spannung auf der Lösungsoberfläche und den statischen Druck der Lösung überwinden, was zum Auftreten von Schlüsselöchern und zur Übertragung von Flüssigkeitsmasse führt. Das Schlüsselloch ist wie ein schwarzer Körper, der die Absorption der Strahlungsenergie begünstigt, was den „Wandfokussierungseffekt“ anzeigt. Da der Laserstrahl nach der Fokussierung kein paralleler Strahl ist, wird er einen bestimmten Einfallswinkel mit der Schlüsselochwand bilden. Nach der Bestrahlung auf die Schlüsselochwand erreicht der Laserstrahl nach mehrfacher Reflexion den Boden des Schlüsselochs und wird schließlich vollständig absorbiert.

Der Hochdruckdampf im Schlüsselloch drückt das Schmelzgut dazu, entlang des Randes des Schmelzbades oder der Wand des Dampfbrunnens herauszuspritzen, was zu einer Flüssigkeitsmassenübertragung führt. Eine solche Flüssigkeitsmassenübertragung wird die Effizienz einiger Laserbearbeitungsverfahren, wie Laserbohren oder Laserschneiden, erheblich verbessern. Der Quetscheffekt des Materialdampfes ist eine wichtige Ursache für die Flüssigkeitsmassenübertragung. Angenommen, der Dampf entsteht durch Gleichgewichtsverdampfung am Gas-Flüssigkeits-Abschnitt, ignoriert das Momentum und die Energie des Dampfes und berücksichtigt nur den Dampfdruck P_v , wenn der Dampf die nichtviskose

inkompressible Lösungsschicht einer bestimmten Dicke drückt, wird die Arbeit des Dampfes vollständig in die kinetische Energie der Lösung umgewandelt, und die Masse des flüssigen Materials, die von einer Einheitsfläche des Laserstrahlflecks innerhalb einer Einheitszeit bei einem Umgebungsdruck von P_0 übertragen wird, ist die Flüssigkeitsmassenübertragungsrates \dot{m}_q der Flüssigkeitsmasse, die ist

$$\dot{m}_q = \left[\frac{2\lambda_q}{R_s} \ln \left(\frac{T_v}{T_m} \right) \right]^{1/2} \rho_q^{3/4} [2(P_v - P_0)]^{1/4} \quad (1.17)$$

1.1.4 Verdampfung von Materialien unter Laserwirkung

Es kann aus dem Schmelzen von Material unter Laserwirkung gesehen werden, dass der Schmelzprozess normalerweise von der Verdampfung des Materials begleitet wird. Der Verdampfungsmechanismus hängt eng mit der Laserleistungsdichte zusammen.

Die Zeit vom Beginn der Laserbestrahlung bis zur Erreichung der Verdampfungstemperatur T_v auf der Materialoberfläche wird als Verdampfungsstartzeit t_v bezeichnet, die geschätzt werden kann als

$$t_v = \frac{\pi}{4\alpha} \left(\frac{kT_v}{AI_0} \right)^2 \quad (1.18)$$

Für das Metall mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur, wenn AI_0 ist $10^4 \sim 10^6$ W/cm², ist t_v etwa einige Millisekunden bis Mikrosekunden; für das Metall mit einer hohen Verdampfungstemperatur, wenn AI_0 ist $10^5 \sim 10^7$ W/cm², ist t_v etwa einige Millisekunden bis mehrere hundert Nanosekunden; Wenn t_v viel kleiner als die Breite des Laserpulses ist, wird angenommen, dass die Verdampfung der Materialoberfläche sofort beginnt, sobald der Laser bestrahlt.

Wenn die Laserleistungsdichte nicht sehr hoch ist, ist die Verdampfung des Materials nicht drastisch, der gesättigte Dampfdruck ist mit dem Umgebungsdruck ausgeglichen, und die Geschwindigkeitsverteilung der Dampfpartikel ist isotrop, in der Maxwell-Verteilung des Translationsgleichgewichts. Zahlreiche Laser-Gleichgewichtsverdampfungsmodelle wurden von Wissenschaftlern auf der ganzen Welt aufgestellt. Derzeit hat das theoretische Modell der Laser-Verdampfung nur qualitative Bedeutung, und das quantitative Verständnis beruht hauptsächlich auf Experimenten. In allen mit Laser-Gleichgewichtsverdampfungsmodellen erhaltenen Verdampfungsdruckformeln wird angenommen, dass der Dampfdruck proportional zur Laserleistungsdichte ist.

Wenn die Laserleistungsdichte hoch ist, erhöht sich die Materialverdampfungsrate und der Dampfdruck steigt. Wenn es deutlich höher als der Umgebungsdruck ist, nimmt die Anzahl der Partikel im Dampf, die zur Lösung zurückkehren, ab, und die Geschwindigkeitsverteilung weicht von der ausgeglichenen Maxwell-Verteilung ab. Die Dampfpartikel, die die Flüssigkeitsoberfläche verlassen, müssen

eine Strecke zurücklegen und miteinander kollidieren, um ein Translationsgleichgewicht wiederherzustellen. Die dünne Schicht über der Flüssigkeitsoberfläche, in der der Dampf vom Nichtgleichgewichtszustand in den Gleichgewichtszustand übergeht, wird als Knudsen-Schicht bezeichnet. Im Extremfall starker Verdampfung fließt der Dampf auf der Außenfläche der Knudsen-Schicht mit Schallgeschwindigkeit, und der nach außen fließende Dampf ist deutlich kälter und dünner als der gesättigte Dampf auf der Oberfläche der Lösung.

Unter kontinuierlicher Laserbestrahlung steigt die Geschwindigkeit der Verdampfungsfront (nämlich die Rückzugs-Geschwindigkeit) schnell von null auf einen annähernd konstanten Wert, und die Verdampfung tritt in einen stabilen Zustand ein. Die Einrichtungszeit t_{sv} eines stabilen Zustands hängt mit der stabilen Rückzugs-Geschwindigkeit U_v zusammen. Normalerweise ist t_{sv} Dutzende Male größer als t_v . Zum Beispiel, wenn AI_0 ist 10^7 W/cm², beträgt die Rückzugs-Geschwindigkeit von Aluminium etwa 2,34 m/s, und die entsprechende Geschwindigkeit $t_{sv} \approx 15$ μ s, während t_v weniger als 0,3 μ s beträgt.

Aufgrund der Wirkung des Dampfdrucks sollte t_v in Gl. (1.18) größer sein als die normale Verdampfungstemperatur unter Standard-Atmosphärendruck. Wenn die Laserleistungsdichte zwischen 10^6 und 10^7 W/cm² liegt, ist die Temperatur der Verdampfungsfront des Metalls etwas größer als die normale Verdampfungstemperatur. Wenn die Laserleistungsdichte zwischen 10^6 und 10^{10} W/cm² liegt, ist die Temperatur der ehemaligen Verdampfungsfront mehrere Male bis Dutzende Male die der letzteren. Da T_v mit der Laserleistungsdichte zunimmt, führt es dazu, dass die Rückzugs-Geschwindigkeit U_v im Bereich über 10^8 W/cm² mit der Zunahme der Laserleistungsdichte abnimmt, und der Rückgang ist im Bereich über 10^0 W/cm² offensichtlich.

Die gasförmige Massenübertragungsrate \dot{m}_v hängt von der Rückzugs-Geschwindigkeit, $\dot{m}_v = \rho U_v$, und die gesamte gasförmige Übertragungsmasse ist $\rho \int_{t_v}^t U_v dt$. Wenn die Laserleistungsdichte niedrig ist, hat die durch thermische Diffusion verlorene Wärme einen offensichtlichen Einfluss auf U_v , und die Rate der gasförmigen Massenübertragung ist ebenfalls niedrig. Die berechneten Werte der Rückzugs-Geschwindigkeit und der gasförmigen Massenübertragungsrate unterscheiden sich normalerweise deutlich von den experimentellen Ergebnissen, was durch zwei Gründe verursacht wird. Zum einen liegt es daran, dass die Reflexionsfähigkeit, Absorptionsfähigkeit und thermophysikalischen Eigenschaften alle temperaturabhängig sind und die tatsächliche Laserwellenform hoch unregelmäßig ist. Zum anderen liegt es daran, dass die Massenübertragung tatsächlich ein umfassendes Ergebnis verschiedener Mechanismen ist, bei denen der Hauptteil der übertragenen Masse aus den durch den Dampfdruck verspritzten Tröpfchen besteht.

1.1.5 Laserinduziertes Plasma und seine Auswirkungen

Wenn ein Laser auf die Oberfläche des Materials wirkt, wird Dampf erzeugt. Der Dampf absorbiert weiterhin Laserenergie, was zu einer Erhöhung der Temperatur führt und schließlich ein Hochtemperatur- und Hochdichteplasma bildet. Ein Plasma ist eine Masse, die aus großen Mengen geladener Teilchen (Elektronen und Ionen), Atomen und Molekülen besteht, die insgesamt elektrisch neutral ist. Es gibt drei Hauptmechanismen zur Plasmagenerierung durch Hochleistungsdichtelaser: Photoionisation, thermoelektrische Ionisation und Stoßionisation. Photoionisation bezieht sich auf das Phänomen, dass, wenn Elektronen in Atomen von einem Laser bestrahlt werden und ausreichend Photonenergie absorbieren, Ionisation aufgrund des photoelektrischen Effekts oder des Mehrphotoneneffekts auftritt. Photoionisation ist hauptsächlich anwendbar auf den Generierungsprozess von anfänglichen Ladungsträgern in einem relativ kalten Medium, während das Laserplasma in einem vollständig ionisierten Zustand ist, und daher ist Photoionisation nicht der Hauptmechanismus für seine Bildung. Thermoelektrische Ionisation bezieht sich darauf, dass, wenn die Temperatur des Dampfes unter Laserwirkung hoch genug ist, die Atome mit hohen thermischen Geschwindigkeiten bei hoher Temperatur miteinander kollidieren, ihre Elektronen erregen und die Energie einiger der Elektronen das Ionisationspotential übersteigt, was zur Ionisation der Atome führt. Stoßionisation bezieht sich darauf, dass geladene Teilchen im Dampf unter der Wirkung des elektrischen Feldes beschleunigen und mit neutralen Atomen kollidieren, was zu einem Energieaustausch führt, der den Elektronen im Atom ausreichend Energie verleiht, um zu ionisieren.

Der Ionisationsgrad von Dampf im thermodynamischen Gleichgewichtszustand wird vollständig durch die Dichte und Temperatur des Dampfes bestimmt. In einem teilweise ionisierten Gas wird die Energie des einfallenden Lasers durch den bindungsfreien Mechanismus von thermisch angeregten Atomen und durch die inverse Bremsstrahlung von Partikeln absorbiert. Dampf absorbiert Laserenergie und erhitzt sich, was zu einer weiteren Erhöhung des Ionisationsgrades und des Absorptionskoeffizienten führt. Diese Art von positivem Feedback trägt zur Bildung von Plasma im Dampf bei.

Das Plasma absorbiert die Energie des in ihm propagierenden Laserstrahls durch verschiedene Mechanismen, was seine Temperatur und Ionisationsgrad erhöht. Die inverse Bremsstrahlungsabsorption ist der Hauptmechanismus der Plasmaabsorption von Laserenergie. Inverse Bremsstrahlungsabsorption bezieht sich darauf, dass die Elektronen in einem Laserelektrischen Feld angeregt werden, um mit hoher Frequenz zu schwingen, und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit mit Partikeln kollidieren, um Energie auf schwerere Partikel (Ionen und Atome) zu übertragen, wodurch das Plasma erhitzt wird.

Der Dampf eines metallischen Materials ist ein einatomiges Gas, das eine sehr hohe Verdampfungstemperatur T_v aber ein sehr niedriges Ionisationspotential hat, so dass die Verdampfungsrate des Materials nicht hoch ist. Wenn der Dampfdruck nur leicht höher als der Umgebungsdruck ist, gibt es auch eine große Anzahl

freier Elektronen im schwach ionisierten Dampf, die zu einer effektiven inversen Bremsstrahlungsabsorption des Lasers führen können. Mit anderen Worten, freie Elektronen in einem ionischen Coulomb-Feld absorbieren Laserenergie und beschleunigen oder ändern die Bewegungsrichtung, wodurch die Laserenergie auf Ionen übertragen und der Dampf erhitzt wird.

Wenn die Lichtintensität hoch ist und die Energieabsorptionsrate des Dampfes seine verschiedenen Verluste übersteigt, ionisiert der Dampf und die Anzahl der freien Elektronen steigt exponentiell mit der Zeit an, wodurch der Dampf vollständig ionisiert und für den Laser undurchsichtig wird. Da die Größe des Plasmas durch Energieabsorption zunimmt, verringert sich die Leistungsdichte des Lasers, der die Oberfläche des Materials erreicht, und daher schwächt sich der Verdampfungseffekt ab, was zu einem Rückgang der Dichte und Temperatur des Plasmas sowie seiner Absorptivität führt; umgekehrt, wenn die Absorptivität abnimmt, erhöht sich die Leistungsdichte des Lasers, der die Oberfläche des Materials erreicht, und daher wird der Verdampfungseffekt verstärkt, was zu einer Erhöhung der Dichte und Temperatur des Plasmas sowie seiner Absorptivität führt.

Die Absorption des Lasers durch das Plasma verhindert, dass der Laser die Oberfläche des Materials erreicht, und unterbricht die Energiekopplung zwischen dem Laser und dem Material. Dieser Effekt wird als Plasmaschirmung bezeichnet. Das Verhältnis der vom Plasma absorbierten Energie zur Energie des einfallenden Lasers wird als Plasmaschirmungskoeffizient bezeichnet. Der Plasmaschirmungskoeffizient hängt von der Laserwellenlänge ab. Der Plasmaschirmungseffekt eines Langwellenlasers ist stärker als der eines Kurzwellenlasers und tritt früher auf. In der Laserschweißtechnologie beeinflussen die Absorption und Streuung des Plasmas die Übertragungseffizienz des Lasers und reduzieren die Laserenergie, die das Werkstück erreicht. Gleichzeitig erweitert der negative Linseneffekt (Brechung) des Plasmas den Wirkungsbereich der Laserenergie auf das Werkstück, wodurch die Schweißqualität reduziert wird.

1.2 Prinzipien und Eigenschaften des Laser-Schweißens

Das Laserschweißen ist ein spezielles Schmelzschweißverfahren, bei dem ein fokussierter Laserstrahl mit hoher Energiedichte (10^6 – 10^{12} W/cm²) als Wärmequelle verwendet wird, um das Werkstück zu erhitzen und zu schmelzen. Es handelt sich um ein Schmelzschweißen, das auf dem oben genannten photothermischen Effekt der Wechselwirkung zwischen dem Laser und dem Material basiert. Voraussetzung dafür ist, dass der Laser vom Material absorbiert und in die für das Schweißen erforderliche thermische Energie umgewandelt wird. Im Allgemeinen variieren die physikalischen Phänomene, die sich aus der Laserwirkung auf die Materialoberfläche ergeben, einschließlich der Erhöhung der Oberflächentemperatur, des Schmelzens, der Verdampfung, der Bildung von Schlüssellöchern und der Erzeugung von laserinduziertem Plasma (siehe Abb. 1.2).