

文章编号: 0258-7025(2007)04-0543-06

旋转气流控制激光切割特种钢薄板

洪 蕾, 米承龙, 柳德金

(上海海事大学机械系, 上海 200135)

摘要 以氧为辅助气体的激光切割工艺切割不锈钢等特种钢板时容易产生挂渣现象, 因此大多采用高压高纯度氮气或惰性气体辅助激光切割不锈钢。在对熔渣形成原因及规律进行实验研究的前提下, 提出了仍以氧辅助切割以降低激光切割功率, 通过在工件底部加设旋风除渣器, 形成旋转气流控制熔渣流向以去除熔渣的方法。实验证明, 当同轴辅助切割气体为氧气, 气体压力降低为 300 kPa, 旋转气流引导装置气体压力为 100 kPa, 激光功率为 500 W, 模式为 TEM₀₁, 焦点位于 0.5 mm 厚硅钢片工件上表面, 切割速度为 3 m/min 时, 可获得光滑的高质量切口。

关键词 激光技术; 激光切割; 旋转气流; 硅钢; 熔渣

中图分类号 TG 485 **文献标识码** A

Laser Cutting Special Steel Sheet Controlled by Rotating Gas Flow

HONG Lei, MI Cheng-long, LIU De-jin

(Mechanical Engineering Department, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract It is easy to produce molten slag by using traditional laser cutting technology in laser cutting some special steel such as stainless steel and so on. The main reason is that oxidizing reaction will take place inevitably by using oxygen as aided gas. So high pressure and high purity N₂ or inert gases are used as aided cutting gas in laser cutting stainless steel. After study of the forming principle and the rule of molten slag, a fine new laser cutting technology by using cyclone slag separator that will form rotating gas flow to control the direction of the flowing slag gas and oxygen as aided gas is presented. The experiments prove that by controlling the technical parameter reasonably, this laser cutting technology is practical and feasible. When the coaxial aided cutting gas is oxygen and the gas pressure is 300 kPa, the cyclone slag separator gas pressure is 100 kPa, the laser is TEM₀₁ and the output power is 500 W, the focal position is on the workpiece, and the cutting speed is 3 m/min, lubricous and dross-free cutting kerfs are obtained.

Key words laser technique; laser cutting; rotating gas flow; silicon steel sheet; molten slag

1 引 言

激光切割具有速度快、切缝窄、热影响区小的优点, 切割过程不需要模具, 降低了产品的成本, 容易与计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)结合, 便于生产过程的控制, 适于加工小批量、多品种、形状复杂的零件和切割特硬特软及脆性材料。激光切割普通碳钢薄板工艺已近成熟, 切口质量可得到较好控制。但是对于含有较高 Si, Cr, Ni 等合金元素的硅钢、不锈钢等特种钢板材, 常规激光切割工艺容易产生挂渣和飞渣现象, 从而影响其工业应用, 因此需要寻找一种较为理想的激光切割工艺, 获

得光滑的高质量切口表面。针对熔渣的形成原因, 本文提出了加设旋风除渣器, 形成旋转气流控制切口断面的除渣方法, 获得了理想的切口质量。

2 旋风除渣器除渣方法

2.1 切割质量实验

实验证明, 相对于中碳钢来说, Si, Cr, Ni 等合金元素的存在对于切割过程是有害的, 将导致切割速度的降低和在底边上容易形成挂渣现象。为探究引起切割速度下降和切割质量降低的原因, 实验主要针对熔渣形成原因进行设计。实验所用工件材料

收稿日期: 2006-10-16; 收到修改稿日期: 2006-12-20

基金项目: 上海市重点学科建设项目(T0601)和上海市教委重点项目(07ZZ101)资助课题。

作者简介: 洪 蕾(1972—), 女, 浙江人, 副教授, 博士, 主要从事激光加工的研究工作。E-mail: leihong@cle.shmtu.edu.cn

选用厚0.5 mm, Si的质量分数为2.7%的硅钢, 元素含量见表1。

表1 硅钢片的化学成分(质量分数)

Table 1 Composition of silicon sheet (weight percent)

Element	Si	C	Mn	S	P
Content /%	2.7	0.04~ 0.55	0.03~ 0.06	0.02~ 0.03	0.03~ 0.04

激光切割设备采用 Trumpf TCL 4030 CO₂ 激光切割机, 激光器输出光束直径为10 mm的 TEM₀₀ 激光束, 输出功率为1800~4000 W可调。采用飞行光路系统, 经计算机数控(CNC)控制焦点, 最大切割速度可达84.836 m/min, 位移精度为0.02 mm。使用焦距为127 mm的聚焦镜, 焦点光斑直径为0.1 mm, 吹气喷嘴直径为2 mm。为确保吹气的稳定性, 高压气体先经一组气体过滤器及调压阀先行降压, 进入吹气喷嘴前再经一由计算机数控程式控制的电控调压阀, 使吹气与激光的输出达到最佳同步。

根据硅钢片特性, 激光切割实验采用高压供气系统, 要求气体喷嘴的压强超过2000 kPa, 气体流量超过50 m³/h(见图1)。经常需要更高的入口压力来达到喷嘴所需要的压强3000 kPa, 以实现切割头的压强1800 kPa。

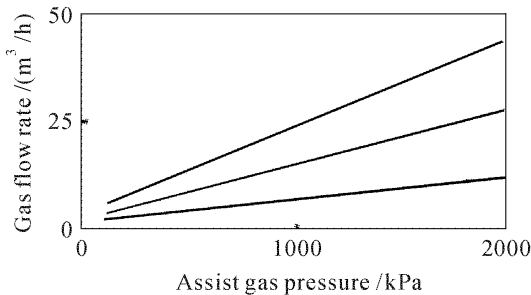


图1 辅助气体压力和气体流量的关系

Fig. 1 Relationship between assist gas pressure and gas flow rate

实验在固定功率为1000 W的条件下, 分别以O₂和高纯N₂作为辅助切割气体, 改变切割速度进行几组切割实验。实验发现, 当采用O₂作为辅助切割气体时, 不管如何改变切割速度, 总是产生极为严重的挂渣和烧边现象; 而当采用高纯N₂作为辅助切割气体时, 随着切割速度降低(从10 m/min到4 m/min), 切口质量逐渐得到改善, 最后得到了光滑无熔渣的高质量切口。

经电子探针检测表明, 熔渣主要成分为SiO₂和铁硅氧化物。实验表明, 以O₂(或压缩空气)为辅助

气体, 初始Fe与O₂相互作用发生的氧化反应为切割提供了大量热源。随着氧化反应, 在切割过程中材料含有的Si元素易与O₂作用生成SiO₂和铁硅氧化物。一方面, 由于氧化硅密度比氧化铁低得多, 因此这些氧化硅在熔融区形成一个表面层, 导致表面张力的减小, 同时影响氧化物的动力学性能。熔融态的SiO₂及铁硅氧化物具有较大的黏滞系数, 形成熔渣且不易被切割气体吹走。另一方面, 这些杂质熔点高于母材铁, 成为妨碍稳定激光切割的重要因素。相关的氧化物熔点及密度, 以及由此估算出的表面张力如表2所示^[1,2]。

表2 硅氧化物熔点及密度

Table 2 Melting point and relative densities of silicon-iron oxides

Oxide	Melting point / °C	Density / (kg/m ³)	Surface tension / (N/m)
FeO	1370	5700	1.36
Fe ₃ O ₄	1565	5240	1.25
Fe ₂ O ₃	1594	5180	1.42
SiO ₂	1700	2500	0.55
FeSiO ₃	1146	3500	0.85
FeSiO ₄	1503	4340	0.80

相反, 以高纯N₂作为辅助切割气体, 在切割过程中可阻隔O₂的作用, 无法生成SiO₂及铁硅氧化物, 并且高压气体极易将熔融态残渣吹走, 因此获得了精细切口。常规激光切割工艺中, 氧化反应是形成熔渣的主要原因。激光切割中通常针对不锈钢等易挂渣材料而采用高压高纯度氮气或惰性气体作为辅助切割气体, 隔绝大气中氧气, 吹走熔渣, 避免发生氧化反应^[3]。但在实际工业应用中, 此方案并不是一个良好的选择。因为高压下气体消耗量极大, 几乎十分钟消耗完一钢瓶40 L气体, 而高纯N₂成本较高, 这样造成生产成本的剧增。此外, 没有氧化反应, 缺乏其放热所提供的大量热源, 导致切割板材所要求激光功率较大, 因此此方案仅仅用来探寻熔渣的形成原因是可行的。针对熔渣的形成原因, 应采取其他工艺手段以防止硅氧化物的生成, 或将生成的硅氧化物尽可能地去掉。

2.2 旋风除渣器除渣方法的设计原理

常规激光切割工艺中, 辅助气体氧气在切割过程中起到了极为重要的作用。氧化反应供给的热量约为激光切割所需总能量的2/3以上^[4], 切割所需激光功率大幅度降低, 这是比较惰性气体或氮气辅

助切割的最大优势。但在特种钢板切割中产生大量具有较大黏滞系数,不易被普通喷嘴辅助切割气体吹除的氧化物杂质。传统喷嘴在较高供气压力下喷射出的气流紊流度大,在气体流场中会产生激波^[5]。如果喷嘴和工件表面之间存在正激波,在喷嘴和工件表面之间的流场中将产生涡流,其旋转方向和切缝中的熔化金属及碎屑排出的方向相反,使得熔化金属及碎屑排出变得困难。同时涡流产生有利于等离子体的形成。等离子体会吸收激光束的能量,从而被切割工件吸收的能量减少,切割效率下降。等离子体的存在使激光束发生散焦,激光束的模式也会发生变化,从而使切割质量变差。因此,在对熔渣形成原理及规律充分研究的情况下,提出了在工件底部加设旋风除渣器,形成旋转气流的除渣方法。其工作原理为:在氧气辅助激光切割过程中,促使氧化反应充分进行,从而释放出大量热量,泡沫性低密度反应生成物在反应热源及激光热源的共同作用下,反应残渣在泡沫性状态下可保持较长的时间,此时通过设置在工件底部的旋风除渣器,形成强烈的旋转气流,利用由此产生的巨大离心力,对物料起到强烈的冲刷作用,消除黏渣现象。此时既可阻碍等离子体的产生,又可将泡沫性残渣快速、干净地清除。其工作原理如图 2 所示。

在上部同轴喷嘴氧气流将泡沫性的残渣吹向底部的过程中,由于旋风除渣器的吸口紧贴在工件底部,生成的残渣在强大的旋转气流作用下无法黏附在切缝周边。同时由于泡沫性残渣中含有氧气等气体,其受气流影响更为显著,这更有利于清除残渣。

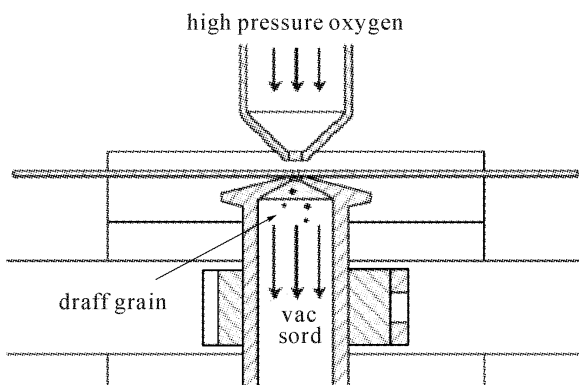


图 2 旋风除渣器工作原理图

Fig. 2 Functional diagram of cyclone slag separator

3 实验方法、结果与讨论

3.1 预备实验

为验证底部加装气体导流装置的可行性,首先

采取了底部预置熔渣喷嘴形成侧吹气流吹除熔渣方案,进行预备实验。此方案基于下述思想:在激光切割中往往存在两个性质截然相反的部分,一部分是有用的零件切口部分材料,另一部分是切下的废料。因此熔渣喷嘴的作用是将所有产生的熔渣吹向废料一侧,如图 3 所示。

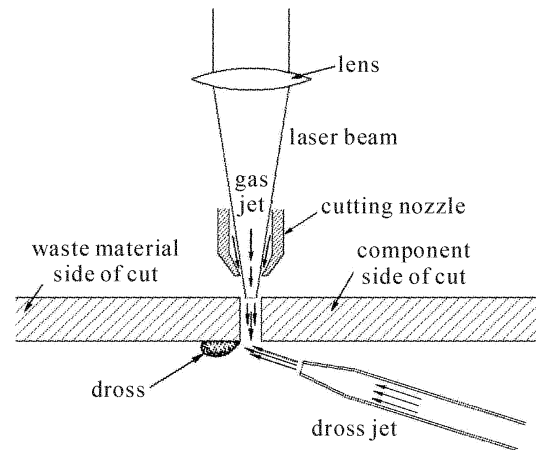


图 3 底吹方案原理图

Fig. 3 Functional diagram of aerate under the workpiece

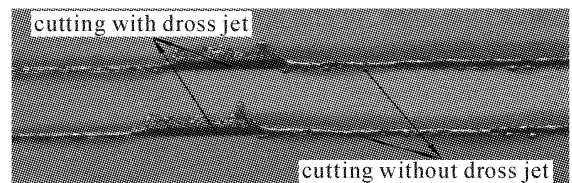


图 4 试件切口照片(5×)

Fig. 4 Photo of the cut (5×)

实验证明,在此装置作用下,氧化反应生成的熔融态氧化物杂质可最大限度地被吹向指定方向。实验中同轴辅助切割气体为氧气,气体压力降低为 300 kPa,熔渣喷嘴气体采用压缩空气,压力为 100 kPa。当激光功率为 500 W,切割速度为 3 m/min 时,熔渣完全吹向了废料部分而获得了光滑的无熔渣的零件部分,如图 4 所示。此时在同样的切割条件下,试件某一段切缝采用熔渣喷嘴而获得了良好的切割效果,没有熔渣喷嘴时的切割效果就很不理想。由此可见,在发生氧化反应生成熔渣的同时,合理控制工件底部气流,可以有效去除熔渣。但是此方案很难将切缝两侧都当产品使用,往往只能使用一侧,而另一侧只能作为废料处理,这将降低材料的利用率和切割效率。

3.2 旋转气流控制切割实验

图 5 所示为采用旋风除渣器的激光切割特种钢薄板装置结构示意图。包括常规激光切割设备和激光喷嘴下方的旋转气流引导装置,旋转气流引导装

置包括顶部设有除渣吸口的中空锥体,中空锥体通过夹持器与激光切割设备激光喷嘴的运动机架连接,以保持激光切割设备激光喷嘴与中空锥体的除渣吸口同轴设置,并在切割过程中保持同步运动,并紧贴待切割的钢薄板底部。中空锥体下部连接两通排灰管,排灰管的另一端连接旋转气流制造器(未示出)。

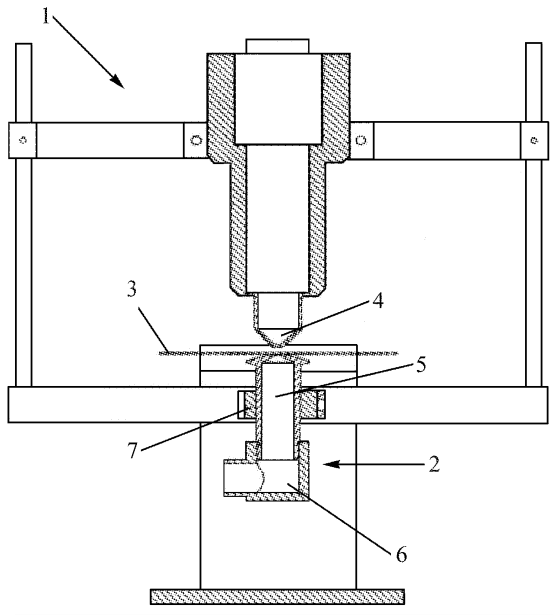


图 5 旋风除渣装置结构示意图

1: 常规激光切割设备; 2: 旋转气流引导装置; 3: 钢薄板;
4: 激光喷嘴; 5: 中空锥体; 6: 排灰管; 7: 夹持器

Fig. 5 Structural representation of the cyclone slag separator

1: general laser cutting apparatus; 2: cyclone type steering flow apparatus; 3: sheet steel; 4: laser cutting nozzle; 5: hollow cone; 6: removing ashes pipe; 7: grip holder

将待切割的钢薄板置于激光切割设备激光喷嘴和旋转气流引导装置之间,运行激光切割设备,当氧气流以 $12\sim 25\text{ m/s}$ 的速度由进气管进入旋转气流引导装置时,气流将由直线运动变为圆周运动。旋转气流的绝大部分沿器壁直圆筒体呈螺旋形向下,朝中空锥体流动,通常称此为外旋气流。含渣气流在旋转过程中产生离心力,将密度大于气体的渣粒甩向器壁。渣粒一旦与器壁接触,便失去惯性力而靠入口速度的动量和向下的重力沿壁面下落,进入排灰管。旋转下降的外旋气流在到达锥体时,因圆锥形的收缩而向除尘器中心靠拢,其切向速度不断提高。当气流到达中空锥体下端某一位置时,即以同样的旋转方向从中空锥体中部,由下而上继续做螺旋形流动,即内旋气流。最后净化气经排气管排出器外,一部分未被捕集的渣粒也由此排出。自进

气管流入的另一小部分气体,则向中空锥体顶盖流动,然后沿排气管外侧向下流动,当到达排气管下端时,即反转向上升的中心气流一同从排气管排出,分散在这一部分上旋气流中的渣粒也随同被带走,因此在除渣器上口也不存在挂渣黏附的问题。

采用底部旋转气流引导装置,激光切割机受计算机数控工作台的控制,激光喷嘴与旋风除渣器的吸口在工作过程中实现了同轴、同步,激光切割与残渣的吸附不受激光切割路径的影响,从而此技术具有通用性。图 6(a)为加装有底部旋转气流引导装置的切割装置照片,图 6(b)为工作中的切割装置。

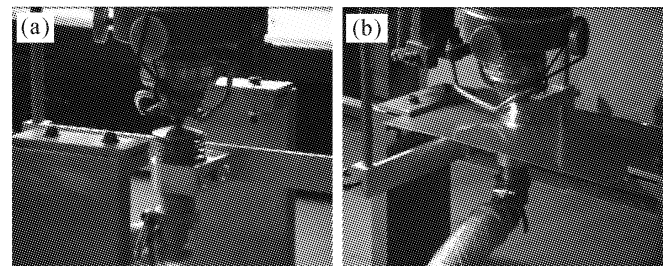


图 6 切割装置照片(a)和工作中的切割装置(b)

Fig. 6 Photo of the cutting set (a) and cutting set in working (b)

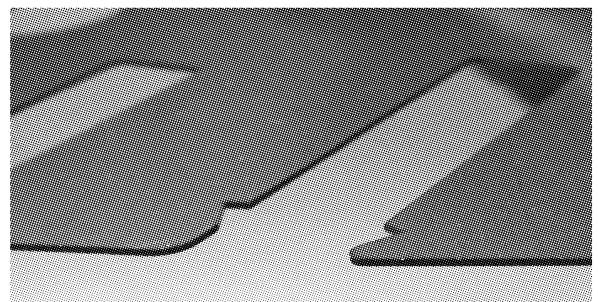


图 7 使用旋风除渣器获得的切口质量

Fig. 7 Cut by using cyclone slag separator

实验中同轴辅助切割气体为氧气,气体压力降低为 300 kPa ,熔渣喷嘴气体采用压缩空气,压力为 100 kPa 。当激光功率为 500 W ,模式为 TEM_{01} ,焦点位于工件上表面,切割速度为 3 m/min 时,获得了光滑的高质量切口,如图 7 所示。

3.3 氧化反应速度对切口质量的影响

常规激光切割工艺中,氧化反应速度的快慢决定了切口表面质量的高低。合适的氧化速度提供恰当的热量,切口断面光洁度提高,切口条纹变浅变细,熔渣减少;氧化反应速度过快,产生热量增多,从而使材料表面温度急剧升高,造成切缝处大范围熔化,使熔渣增多,切口断面粗糙;氧化反应速度过低,产生的热量不足以有效传递到切口底部,使切口底

部平均切割温度过低, 要么切不透, 要么形成大量熔渣无法去除^[6,7]。采用旋转气流控制切割工艺同样发生氧化反应, 实验发现, 切口质量同样遵循这一规律。氧化反应速度由切割速度、氧压、氧气纯度等决定。

3.3.1 影响切口宽度的因素

在激光功率及焦距直径一定的条件下, 切割速度对切口宽度的影响较大。其关系如图 8 所示。

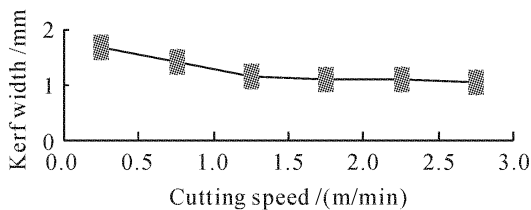


图 8 切割速度与上表面切口宽度之间的关系

Fig. 8 Relationship between kerf width and cutting speed of the top surface

由图 8 可见, 切割速度的提高, 不仅提高了切割效率, 而且能细化切缝, 降低切口粗糙度, 明显改善切口质量, 因此在激光功率一定时, 应采取措施尽可能获得高的切割速度, 所述激光切割设备的切割速度大于 3 m/min。

此外, 焦点位置对切口宽度也有影响。实验表明, 对于 0.5 mm 的薄板, 激光切割过程中焦点置于表面为佳。

3.3.2 影响切口粗糙度的因素

切割速度过低时, 切口波浪形比较严重; 切割速度太高时, 无法切透板材。由于底部气流导向装置的作用, 切割速度可以大幅度提高并仍然能有效清除熔渣。

在不同的激光功率及不同的厚度下, 氧气压力均有一最佳值, 可以获得最大的切割速度。压力过高时, 气流过强形成过强的冷却作用, 切割速度反而下降, 如图 9 所示。因此所述激光切割设备的同轴辅助氧气的气体压力为 150~300 kPa。

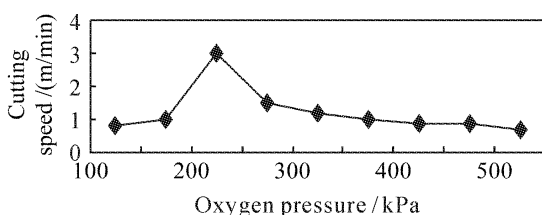


图 9 氧气压力与切割速度的关系

Fig. 9 Relationship between oxygen pressure and cutting speed

3.3.3 氧气纯度的影响

氧气的纯度对激光切割有很大的影响, 含杂质多的氧气不能提供足够的能量到切口底部形成高流动性的熔化物, 因而降低了切割质量和切割速度。实验证明, 采用纯氧获取的切割效果比采用压缩空气的要好。

3.4 问题与讨论

当采用 CO₂ 激光氧气辅助切割时, 氧化反应在切口边缘产生的氧化层降低了切口薄层的抗腐蚀能力。当这样的切割件切口未经任何处理就焊接在一起后, 焊缝疏松且存在黏结瑕疵, 严重影响焊接质量。可采用层叠切割(在待切特种钢板材上再覆盖一块碳钢板)技术, 解决切口边缘氧化问题^[3,8,9]。

采用旋转气流控制切割特种钢薄板具有显著效果, 对于普通碳钢板, 当板厚增加时, 挂渣现象变得严重起来, 大量熔化材料必须被喷射出来, 因此此工艺方法也适用于切割厚的普通碳钢。

4 结 论

以氧为辅助气体的常规激光切割工艺切割不锈钢等特种钢板容易产生挂渣现象, 而采用高压高纯度氮气或惰性气体辅助激光切割不锈钢, 容易造成加工成本增加。在对熔渣形成原理及规律充分研究的前提下, 提出了仍以氧辅助切割以降低激光切割功率, 通过加设旋风除渣器, 形成旋转气流的除渣方法。实验证明, 合理控制工艺参数, 在大幅度降低切割功率的同时, 形成的旋风气流可以有效地去除熔渣, 获得光滑切口。此工艺方法对于生产实践具有较好应用前景, 并开拓了激光切割工艺的新思路。

参 考 文 献

- 1 John Powell. CO₂ Laser Cutting [M]. London: Springer-Verlag, 1993. 77~79
- 2 Zhang Xiangwu, L. Quitino, C. Allum *et al.*. A simple approach to estimate surface tension of liquid metal [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1996, **20**(4):424~428
张祥武, L. 昆提诺, C. 艾伦 等. 估算液体金属表面张力的简易方法[J]. 北方交通大学学报, 1996, **20**(4):424~428
- 3 Yan Cuo, Li Lijun, Li Juan *et al.*. Review of surface quality study on laser sheets cutting [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3):270~274
鄢 铨, 李力钧, 李 娟 等. 激光切割板材表面质量研究综述[J]. 激光技术, 2005, **29**(3):270~274
- 4 Chen Kexin, Mei Yanbiao, Liao Jianhong *et al.*. Laser cutting of aluminium plate used for dashboard [J]. *Applied Laser*, 1998, **18**(1):33~34
陈可心, 梅宴标, 廖健宏 等. 仪表铝面板的激光切割[J]. 应用激光, 1998, **18**(1):33~34
- 5 Liu Jianhua, Chen Yijian, Duan Jun *et al.*. Design of supersonic

- nozzles for laser cutting [J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(1):46~50
- 刘建华,陈一坚,段 军等. 激光切割超音速喷嘴设计[J]. 激光技术, 2000, **24**(1):46~50
- 6 Xie Xiaozhu, Li Lijun, Zhang Yi *et al.*. Newly developed technique of laser cutting thick metal plates [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3):251~254
- 谢小柱,李力钧,张 屹等. 激光切割金属厚板新技术[J]. 激光技术, 2005, **29**(3):251~254
- 7 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. On-line method for evaluation of laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1580~1584
- 张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光切割质量的在线评价方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(11):1580~1584
- 8 Wei Xueqin, Zheng Qiguang, Wang Honghai *et al.*. Effects of laser beam fluctuation on thermal interaction between laser and material [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2):206~210
- 魏学勤,郑启光,汪洪海等. 激光输出不稳定性对激光与物质热作用的影响[J]. 光学学报, 1999, **19**(2):206~210
- 9 Jianhua Yao, Zhimin Fang, Wei Zhang *et al.*. Study of technique and performance of laser beam welding for W18Cr4V and 65Mn [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):39~42

• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。

联系人:郑京华

地址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮编:100081

手机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com

