

适于镀锌钢板激光焊接的 CO₂ 激光切割

崔怀洋^{1,2}, 陈 锐², 左铁钊²

(1. 北京航空航天大学 应用物理系, 北京 100083; 2. 北京工业大学
国家产学研激光中心, 北京 100022)

摘 要: 研究适合于裁焊板生产的板坯切割的技术方案, 重点讨论了 CO₂ 激光切割。采用氮气辅助激光切割, 氧气辅助激光切割, 铣切和普通剪切方法进行了镀锌钢板的切割。研究表明, 氮气辅助 CO₂ 激光切割方正度较好, 切口质量符合裁焊板拼接间隙小于 0.1 mm 的要求。激光切割时, 由于热影响范围小, 镀锌钢板切口边缘镀锌层烧损范围小, 整个切缝无宏观残余形变。氮气辅助 CO₂ 激光切割具有切割速度快, 质量好的优点, 适合于进行裁焊板的板坯切割。

关键词: 裁焊板; 激光切割; 镀锌钢板

中图分类号: TG 665 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)06-107-04



崔怀洋

0 序 言

汽车用裁焊板 (Tailored welded blank) 生产的第一步就是要裁剪不同规格的钢板, 以备拼接和焊接。国外采用坯板精密剪切工艺^[1], 这种准备工艺的切割形状及切割质量优良, 但精剪设备投资昂贵, 国内企业一般很难承受。激光切割可以得到良好的切口形状和质量^[2]。并提高了设备的使用效率, 大大节省了设备投资数额^[3]。文中研究在裁焊板生产中用 CO₂ 激光切割取代精密剪切的可行性。

1 激光切割质量的评价

虽然在高功率 CO₂ 激光切割钢板方面已经积累了相当多的资料, 但是从技术和经济的角度, 对各种切割方法和切割质量进行比较的资料还不是很多^[3]。为了评估裁焊板板坯的 CO₂ 激光切割可行性, 需要三方面的知识: (1) 切割质量的评价标准; (2) 工程设计对切割质量的技术要求; (3) 在相同的质量条件下, 什么切割方法是最经济可靠的。各国的切割质量标准 and 分类不同, 实际上, 目前各国还没有专门针对激光切割的切割质量标准 and 分类。德国制定了热切割加工的质量标准“德国标准 DIN 2310”, 包含了火焰, 等离子体和激光切割的质量分类, 它主要依据切口方正度 (Squareness) 和切口粗

糙度 (Roughness) 来对切割质量进行分类评价。国际标准 ISO 9013 受德国标准 DIN 2310 的影响, 包含了火焰切割的质量分类, 相信对等离子体和激光切割也适用。文中根据德国标准 DIN 2310 和 TRUMPF 公司激光器使用指南^[4], 定义了激光切割质量评价的技术术语。

1.1 糙度

激光切口存在明显的连续排列的刻槽。对于板厚小于 2 mm 的薄板, 连续五个刻槽深度的算术平均值定义为粗糙度 (Roughness)。

1.2 方正度

方正度 (Squareness) 由切口截面上的方正度退缩距离 (量) (Squareness tolerance) u 描述。方正度退缩距离 u 为经过截面上突出点和退缩点的两条垂直试样表面的平行线之间的距离, 如图 1 所示。

1.3 影响区

切割热影响区的含义与焊接热影响区相同。这种热影响区大小可以在显微镜下被确定。

1.4 镀锌层烧损区和重熔区

镀锌层烧损区 (Destroyed zinc range) 由完全烧损区和部分烧损区构成。镀锌层完全烧损区 (Burnt zinc range) 是指锌层完全被蒸发的区域, 部分烧损区是指锌层部分被蒸发的区域。重熔区 (Remelted zinc range) 是指镀锌层被熔化的区域, 它包含部分烧损区。如图 1 所示。它们在显微镜下被测定。

利用以上定义的术语, 对文中各种切割试样的质量进行了比较。

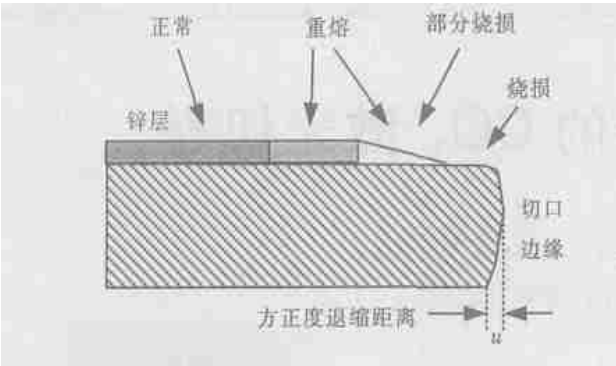


图 1 重熔区示意图
Fig. 1 Illustration of remelted zinc range

2 试验材料与试验设备

试验材料为上海宝钢生产的热镀锌 ST04Z 钢板和热镀锌 IF 钢板，它们的厚度分别为 0.8 mm 和 1.5 mm，镀锌量分别为 140 g/m²和 70 g/m²，化学成分见表 1。

表 1 试验材料的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of tested steels

Steel	C	Si	Mn	P	S
ST04Z	0.08	0.40	0.02	0.03	
IF	0.008	0.03	0.03	0.02	0.015

使用了德国快速轴流 TRUMPF TURBO 6000W CO₂ 激光器，激光束为 TEM₀₁ * 模，进行镀锌钢板的激光切割。

激光切割中使用氮气或氧气辅助，将镀锌板切割成 70 mm×200 mm 和 200 mm×900 mm 的试样，激光切口平整光洁。优选的氮气辅助激光切割工艺参数为：激光功率 2 600 W，频率 10 kHz，切割速度 0.067 m/s，氮气压力 12×10⁵ Pa，喷嘴 Nozzle 1.7 mm，焦点位置在试样表面下 0.4 mm。

为仿真精密剪切的切口，将一部分镀锌钢板试样的激光切口用普通铣床铣切，铣口平整光洁。同时，准备了一些普通剪切的镀锌板坯。

3 试验结果

由于试验采用优化的激光工艺参数，激光切口均不再出现切口粘渣；当切口质量提高到一定的水平后，切口拖拽线距离(熔化痕迹间距)和切口宽度对裁焊板拼接工艺不再有直接影响。因此，以下重点讨论切口质量的粗糙度，方正度，切割热影响区和镀锌层烧损。

采用氮气辅助激光切割，氧气辅助激光切割，铣切和普通剪切，它们的切口方正度差别显著。图 2 为它们的切口横截面特征形貌，它们的切口方正度退缩量如图 3。可见，铣切口方正度最好，因为它是铣刀垂直钢板表面磨削板材的结果。普通剪切切口的方正度最差，由于剪刀从上到下作剪切撕拉，上表面受挤压变形并向下扩展较深，下表面受刮拉变形，结果上下表面形成弧角。氧气辅助激光切割方正度比普通剪切方正度好，但不如氮气辅助激光切割方正度。氮气辅助激光切割方正度退缩量为小于 0.05 mm，符合激光焊接工件拼接间隙小于 0.1 mm 的一般技术要求。

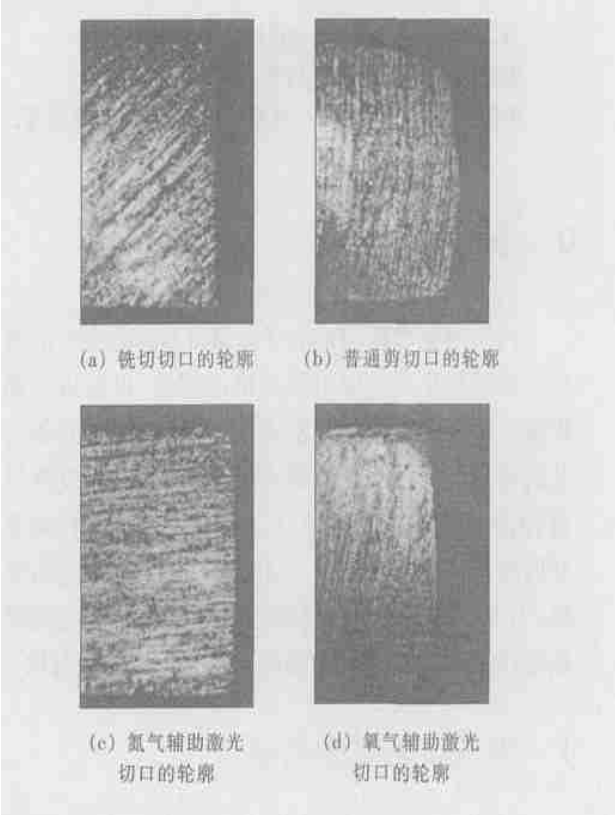


图 2 各种切口的轮廓
Fig. 2 Profiles of cut edges

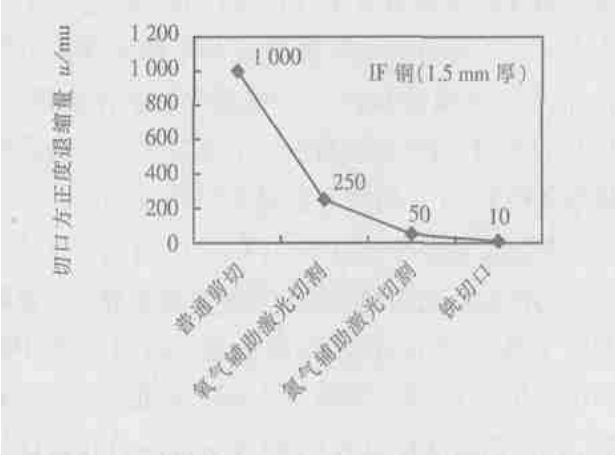


图 3 各种切口方正度的比较
Fig. 3 Comparison of squareness between samples

它们的切口粗糙度差别如图4所示。氮气辅助激光切割粗糙度最小,氧气辅助激光切割粗糙度稍大,铣切和普通剪切粗糙度最大,后者与铣刀和剪刀的精度以及工艺有关。IF钢氮气辅助激光切割和铣切切口正面形貌见图5。

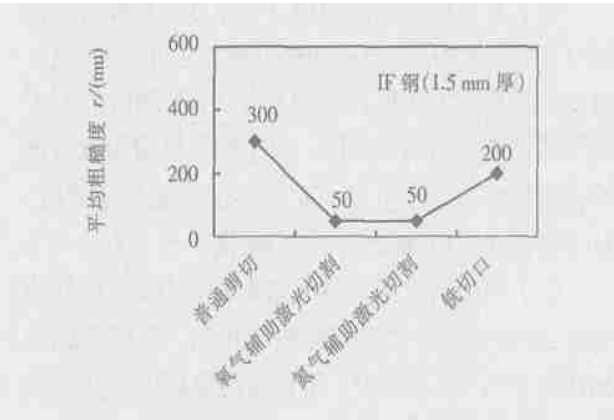


图4 各种切口粗糙度的比较
Fig.4 Comparison of mean roughness between samples

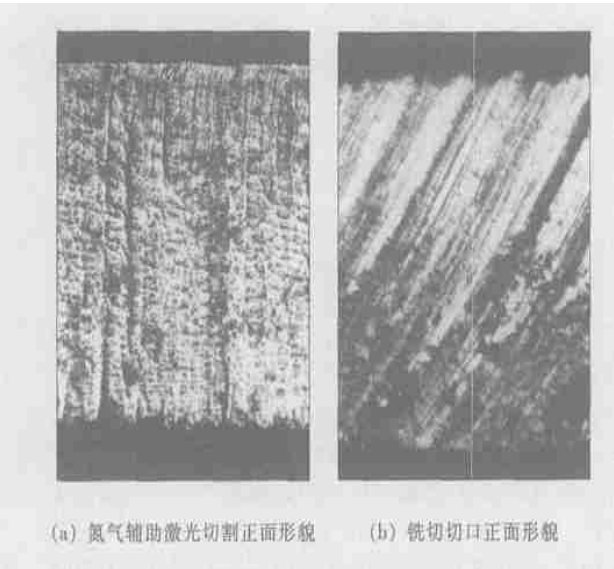


图5 IF钢氮气辅助激光切割和铣切切口正面形貌
Fig.5 Front landscapes of laser cut edge and mill cut edge for IF steel sheet

铣切和普通剪切对镀锌层的破坏可以忽略。采用氮气辅助激光切割或氧气辅助激光切割对镀锌层有烧损破坏作用。在激光切口边沿顺序存在完全烧损区(Burnt zinc range)，部分烧损区和锌重熔区，烧损范围(Destroyed zinc range)指完全烧损区加部分烧损区。切口上下表面烧损的情况也不相同。采用氮气辅助激光切割和氧气辅助激光切割的烧损情况如图6所示。可见，氮气辅助激光切割对镀锌层的烧损较小；氧气辅助激光切割时氧参与化学反应并放热，因而对镀锌层的烧损较大。

激光切割的钢板用于对接激光焊接时，镀锌层

会遭到进一步的烧损^[9]。如果激光焊接光斑聚焦在工件表面上的直径为 D ，钢板焊接时允许的对接间隙是 s ，在 $(D-s)/2$ 这个范围内镀锌层烧损对激光焊接没有影响。假设激光焊接光斑聚焦在工件表面上的直径为 $D=0.6\text{ mm}$ ，钢板焊接时允许的对接间隙是 $s=0.1\text{ mm}$ ，则允许激光切割时镀锌层烧损的范围是 0.25 mm 。可见，激光切割时镀锌层烧损允许范围是很大的。从图6知道，氮气辅助激光切割的钢板镀锌层烧损满足激光焊接拼接的要求。

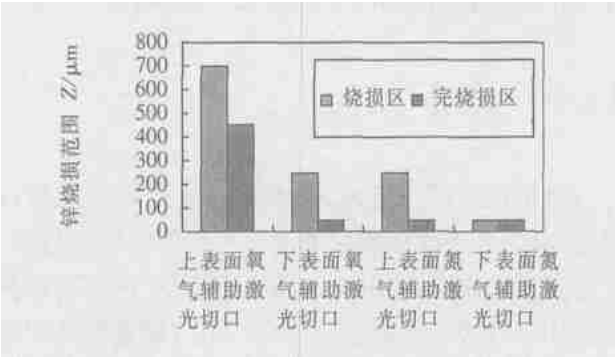


图6 镀锌层烧损范围
Fig.6 Ranges of burnt zinc layer and destroyed zinc layer

铣切和普通剪切的切口没有热影响区，但在切口边缘有向下挤压变形的晶粒。图7为IF镀锌钢板氮气辅助激光切割切口金相显微组织，其热影响区小于 0.1 mm 。ST06Z钢板氮气辅助激光切割切口金相显微组织，其热影响区也约为 0.1 mm 。氧气辅助激光切割切口热影响区约为 0.2 mm 。

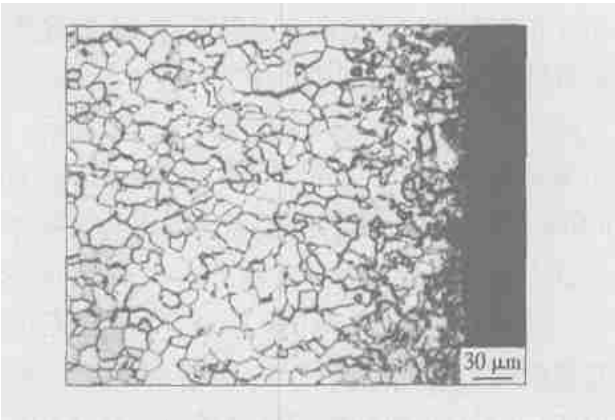


图7 氮气辅助激光切口的金相显微组织
Fig.7 Microscopic structure of laser cut edge with nitrogen jet

考虑到激光切割的钢板用于拼接激光焊接时，激光焊接光斑聚焦在工件表面上的直径约为 $D=0.6\text{ mm}$ ，钢板焊接时允许的对接间隙是 $s=0.1\text{ mm}$ ，则激光切割切口热影响区落入激光深熔区。因此，

激光切割热影响区对拼接激光焊接不会产生影响。氧气辅助激光切割切口有氧化皮,若用于拼接焊接,则对焊接不利,因此拼接焊接使用的板坯宜使用氮气辅助激光切割。

切缝长度方向上的准直度由激光加工机的数控机床的精度决定。试验采用的数控机床其加工精度 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。激光切割速度快,激光切割头与试件不接触,辅助气体直吹切口,因此热影响范围小,整个切缝长度方向上无宏观残余形变。例如,切割 $200\text{ mm}\times 900\text{ mm}$ 的薄板试样,没有观测到宏观残余形变,并用于 CO_2 激光拼焊(使用装夹具)试验。

4 讨 论

分析以上试验结果,氮气辅助激光切割在切口热影响区,和表面粗糙度方面具有最好的切割质量。其方正度仅次于铣切口,比氧气辅助激光切割和普通剪切好许多。因此,综合来看,氮气辅助激光切割质量最好。对于裁焊板拼接而言,氮气辅助激光切割切口质量符合拼接间隙小于 0.1 mm 的要求。对于喷嘴 $\text{nozzle}=1.7\text{ mm}$,采用氮气辅助激光切割时氮气压力为 $12\times 10^5\text{ Pa}$,流量约为 $20\text{ m}^3/\text{h}^{[4]}$,而采用氧气辅助激光切割时氧气压力为 $2\times 10^5\text{ Pa}$,流量约 $5\text{ m}^3/\text{h}^{[4]}$,显然氮气辅助激光切割气体消耗量较大。

氧气辅助激光切割质量仅次于氮气辅助激光切割。对于裁焊板拼接而言,氧气辅助激光切割切口质量也符合拼接间隙小于 0.1 mm 的要求。

英国 EU194 项目对几种切割方法切割质量进行了比较^[3]。 Nd:YAG 激光器功率为 250 W ,它在切口方正度,热影响区和表面粗糙度方面具有最好的切割质量,但其切割速度较慢。氧气辅助激光切割质量也较好,与 Nd:YAG 激光切割质量相近。对于薄板,精密等离子体切割(HD plasma cutting/high definition plasma cutting)对激光切割构成较强的竞争,对于厚板的切割,精密等离子体切割具有优势。

试验结果与英国 EU194 项目中 CO_2 激光切割具有相近的切割质量,所有切割质量符合德国 DIN2310 切割质量一类标准。综合比较各种切割方法的设备效率,速度和质量,可以看出, CO_2 激光切

割具有切割速度快,质量好的优点,它适合于进行裁焊板的板坯切割。

5 结 论

(1) 各种切割方法的切口方正度差别显著。铣切口方正度最好,普通剪切切口的方正度最差,氧气辅助激光切割方正度比普通剪切方正度好,但不如氮气辅助激光切割方正度。 CO_2 激光切割切口质量符合拼接间隙小于 0.1 mm 的要求。激光切割时,镀锌钢板切口边缘镀锌层烧损范围小于 0.1 mm 。

(2) CO_2 激光切割具有切割速度快,质量好的优点,适合于进行裁焊板的板坯切割。氮气辅助激光切割在切口热影响区,和表面粗糙度方面具有较好的综合切割质量。

致 谢:

在该项目的研究过程中,得到国家产学研激光技术中心施定远教授、王智勇博士、陈涛博士的帮助,作者对他们表示感谢。

参考文献:

- [1] Munbo-Caristan J C, Lobring V, Prange W, *et al.* Taibred welded blanks: a new alternative in automobile body design [M]. The Industrial Laser Annual Handbook, Tulsa USA, PennWell Books, 1992.
- [2] Gropp A, Hutfless J, Schubenth S, *et al.* Laser beam cutting[J]. Optical and Quantun Electronics, 1995, 27; 1157—1171.
- [3] Hilton P A. EU194 in the united kingdom[J]. Optical and Quantun Electronics, 1995, 27; 1127—1147.
- [4] TRUMPF Company, Lasers and Laser cutting[M]. TRUMPF Company, Germany, 1994.
- [5] Peces P, Henrique M, Miranda R M, *et al.* Laser welding of low-thickness zinc-coated and uncoated carbon steel sheets [J]. Optical and Quantun Electronics, 1995, 27; 1193—1201.

作者简介: 崔怀洋,男,1963 年出生,博士后,副教授。研究激光焊接与激光切割,在国内外已发表论文 20 篇。

Email: hycui@buaa.edu.cn