# 汽车变速箱齿轮 CO<sub>2</sub> 激光焊接热过程的有限元分 析及试验验证

刘奇先

(山西省晋煤集团金鼎煤机矿业有限责任公司煤机技术工艺部,山西晋城 048006)

摘 要:以 20CrMnSi 低合金钢汽车变速箱双联齿轮的 CO<sub>2</sub> 激光焊焊接过程为研究对象,利用 SYSWELD 有限元分 析软件,模拟不同热输入下焊缝及邻缝区域的温度场分布,得出最优工艺参数。分析了最优工艺参数下的热循环曲线并进 行了焊接试验,得到了和模拟结果相近的焊缝横截面轮廓,并分析了热影响区的金相组织,验证了所建模型的可靠性。

关键词:激光焊;双联齿轮;温度场;有限元分析

中图分类号:TG456.7 文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2012)15-0148-03

# Finite Element Analysis and Experimental Verification of Thermal Process in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Automotive Transmission Gears

LIU Qixian

(Ministry of Coal Technology Process, Jinding Coal Mine Machine Mining Industry Co., Ltd of Shanxi Jinmei Group, Jincheng 048006, China)

Abstract: The  $CO_2$  laser welding process for low-alloy steel 20CrMnSi double gear used in automobile transmission was investigated. The distribution of temperature field in the weld seam and its adjacent zone under different heat input was analyzed by finite element software SYSWELD, and the optimum process parameters was obtained. Furthermore, the thermal cycling curve under the optimal parameters was analyzed, as well as the welding experimental was carried out. By the optimum process parameters, the cross-sectional profile of the welds for simulation and experiment were achieved, which are similar. In addition, the microstructure in heat affected zone (HZA) of the weld beam was analyzed, and the reliability of the model was verified.

Key words: laser welding; double gear; temperature field; finite element analysis

汽车复合齿轮的传统加工方法是齿轮组整体加 工,这种方法能够保证齿轮的整体强度和质量,但是 加工难度大,制造成本高<sup>[1]</sup>。激光焊接具有焊接速度 快、变形小、效率高、热损伤小和加工范围灵活多样 等众多优点,在现代加工技术中得到了越来越广泛 的应用<sup>[2]</sup>。将汽车变速箱用复合齿轮分体加工为两 部分,然后采用激光焊接方法将其焊为一体,不仅可 以缩短产品生产周期,提高加工生产率,而且可以降 低制造成本。因此,激光焊接被大量应用于汽车变 速箱用齿轮的大批量生产<sup>[35]</sup>。

目前,除了实验手段,数值模拟方法经常被用于 焊接加工行业,以代替实际探索性工艺试验,寻求最 优工艺参数,这不仅可以节约成本,而且可缩短产品 加工制造周期,具有重要的现实意义<sup>[67]</sup>。因此,近年

收稿日期:2012-02-24

作者简介:刘奇先(1983-),男,山西晋城人,学士,助理工程师,主要研究 方向:机械设计;电话:13403565595; E-mail:liuqixian2006@sina.com 来,数值模拟方法被广泛应用于汽车领域的激光加 工制造,用于探索最优焊接工艺参数及残余应力和 变形的有限元预测。

本文通过 SYSWELD 软件,利用三维圆锥热源 模型对汽车变速箱齿轮激光焊接过程进行模拟,得 出最优工艺参数并进行了实际焊接试验。对最优工 艺参数下的温度场、热循环曲线进行了有限元分析。 研究结果对于优化激光焊接工艺提供了理论依据和 现实指导。

## 1 有限元分析

### 1.1 网格划分

齿轮材料为 20CrMnSi 低合金高强钢。齿轮几 何尺寸如图 1(a)所示,3D 有限元模型如图 1(b)所 示,该模型由 8 节点六面体和 4 节点四面体单元构 成,节点总数为 28188 个,单元总数为 35328 个。

1.2 热学分析

热源模型采用 3D 锥体热源模型,其实质是一



Fig.1 Gear size and finite element mesh

系列平面高斯热源沿焊件厚 度方向的叠加,而每个截面 的热流分布半径沿厚度方向 呈线性衰减,而热流密度在 电弧中心线(z 轴)上保持不 变。热源模型如图2 所示。



r<sub>0</sub>为在深度 z 处体热源 的有效作用半径,它的大小 对模拟结果的精度有着直接

图 2 三维维体热源模型 Fig.2 Three-dimensional conical heat source model

的影响,当 $r_0$ 变小时,热量相对集中,焊接熔深变大; 反之亦然。热流分布半径 $r_0$ 沿厚度方向呈现出线性衰 减趋势。锥体热源高度是 $H=z_e=z_i$ ,即为热源作用的有 效深度,焊件上下表面的z坐标分别是 $z_e$ 和 $z_i$ ,焊件 上、下表面热流分布半径分别是 $r_e$ 和 $r_i$ 。锥形热源锥 体内热流分布为:

 $q_{v}(r,z) = \frac{9 \eta Q e^{3}}{\pi(e^{3}-1)} \times \frac{1}{(z_{e}-z_{i})(r_{e}^{2}+r_{e}r_{i}+r_{i}^{2})} \exp(-\frac{3r^{2}}{r_{0}^{2}})$  (1) 式中: $\eta$  为激光的热效率;Q 为激光输出功率。关于 值的确定方法,国内外许多学者从不同角度进行了 研究,不同研究者给出的差别较大,本文焊接的热 效率取值为 0.90<sup>[8]</sup>。本模拟初选热输入功率为 2200、 2400、2600 和 3000 W,焊接速度为 1.2 m/min,离焦 量为 0 mm。

热源在对模型加热过程中的热传导是一个非线性的过程,对于此过程中的瞬态非线性传热分析方程可表述为<sup>18</sup>:

 $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q_l(t \ge 0)(2)$ 式中:T为材料的瞬时温度,  $\mathbb{C}$ ;  $\lambda$ 为材料的热导率, W/ (mm ·  $\mathbb{C}$ );  $q_l$ 为热源单位时间产生的热量, W/mm<sup>3</sup>;  $\rho$ 为材料密度,  $g/mm^3$ ; c为材料的比热容, J/(g· $\mathbb{C}$ )。

热学计算需要用到的材料属性有热导率、密度、 比热容,取值范围为室温到固相线之间,参数值通过 材料计算软件 Jmatpro 计算求得。

1.3 边界条件

模拟时,假设加热区域内部温度一致,没有热的 对流,只考虑热源与周边区域的热传导以及工件与 空气的对流和辐射。工件与空气之间的对流热交换 遵循 Newton 冷却方程:

$$q_{a} = -h_{a}(T_{s} - T_{a}) \tag{3}$$

式中: $q_a$ 为工件与周围空气之间的热交换能量; $h_a$ 为 对流热交换系数; $T_s$ 为工件表面温度; $T_a$ 为工件周围 空气的温度,取为 20 °C。在温度计算中,假设  $h_a$ 为 15×10<sup>-6</sup> W/(mm<sup>2</sup>·°C)。

热辐射散失的热量遵循 Stefan-Boltzman 定理:

 $q_r = -\varepsilon \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$  (4) 式中:  $\varepsilon$  为辐射系数, 取值为 0.8<sup>[9]</sup>;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常量,其值为 5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)。

## 2 计算结果与分析

## 2.1 温度场云图模拟结果分析

图 3 是不同热输入条件下的熔池横截面形貌。 图 3 显示,熔池深度、宽度和最高温度都随激光入射 功率的增加而增加。激光功率为 3000 W 时,熔池最 高温度达到 4566.16 ℃,焊缝深宽比太小,焊缝形状 与 TIG 焊焊缝相似,分析认为此组焊接参数设置不 合理。图 3 (a)~(c) 焊接参数下的熔池温度处于 2071.15~2342.08 ℃之间,熔池形态深宽比较合适, 认为这些参数设置比较合理。经过综合比较,结合参 考文献[10]的试验结果,本文选功率 2400 W、离焦



量 0 mm 的焊接参数进行热循环分析及焊接试验 2.2 热循环模拟结果分析

为了分析焊缝以及近焊缝区域的热循环特点, 同时考虑到焊接起始点附近处于非稳态和焊接准稳 态热循环特点的不同,在沿焊接方向的三个不同位 置:0°位置(焊接起始点)和0°前方(沿焊缝方向距起 始点距离为1.93 mm)、180°位置分别取四个参考点 进行焊接热循环分析。所取参考点位于垂直于焊缝 的水平线的位置,四个样点距焊缝中线的距离(垂直 焊缝方向)分别为:0、0.96、1.93 和2.89 mm。

0°位置由焊缝向外的节点编号依次表示为0° -A、0°-B、0°-C、0°-D;0°前方位置由焊缝向外的节点 编号依次表示为0°前A、0°前B、0°前C、0°前D; 180°位置由焊缝向外的节点编号依次表示为180° -A、180°-B、180°-C、180°-D。样点位置如图4(a)所 示,对应的热循环曲线分别如4(b)~(d)所示。

图 4(b)显示,开始焊接时,第一个峰值温度 800 ℃,此时温度没有达到熔化温度,这是因为光斑刚刚 打在金属表面的瞬间,输入热量有限,不足以使金属 熔化;随后激光光斑已经移动至下一个点 0°前 A, 由于激光焊线能量小,散热速度快,温度迅速下降, 降至 100 ℃左右时,焊缝周围区域温差变小,散热变 慢,温度曲线趋于平缓;因焊接对象为一回转体,焊 接终了时激光热源再次接近,温度迅速回升,达到第 二个峰值,焊缝表面节点 0°-A 峰值温度达到 2250 ℃,温度下降,焊接过程结束。

图 4(c)显示,在激光热源到达此位置时,焊接线 上的节点最高温度达到 1800 ℃;随后热源远离此位 置,温度迅速下降至 100 ℃左右,趋于平缓,直到焊 接快结束时,热源再次回到起始点,接近此位置,温 度再次回升至 1180 ℃,焊接结束,温度再次迅速下 降至 150 ℃,然后缓慢下降至室温。

由图 4(d)可看出,四个所取参考点的最高温度 值随着距焊缝距离的增加依次降低,分别为:2300、 1700、600 和 350 ℃。从点 A 到点 D 的温度梯度为 (2300-350)℃/2.88818 mm=675.16 ℃/mm,温度梯 度非常大。点 A 和点 B 所经历最高温度都超过了熔 点,故这两点位于焊缝区域;点 C 最高温度为 600



℃,受热影响较小,点D位于未受影响的母材区域。 2.3 焊接试验及比较

由于计算过程中假设熔池表面为平面,为了保证 焊缝对应部分进行比较,实际焊缝截面基体金属上下 表面分别与计算结果的上下表面对齐,见图 5(a)。



图 5(a)为焊缝横截面轮廓模拟结果和试验结果 的比较,图中左半侧是模拟结果,右半侧为试验结 果。测量结果显示,焊缝顶部宽度为 1.72 mm,深度 为 2.30 mm;实测热影响区平均宽度为 0.3 mm。而模 拟所得焊缝顶部宽度为 1.8 mm,深度为 2.23 mm。 计算结果与实际焊缝的形貌基本吻合,这也说明了 本文所采用的三维锥体热源焊接模型是可靠的。

图 5(b)显示,焊缝热影响区组织主要为马氏体, 还有少量的粒状贝氏体,这与低合金钢在激光焊条件 下焊接组织复杂有关。低合金钢的焊缝组织比较复 杂,与其合金元素、焊接方法等密切有关。由于焊接 HAZ 的高温停留时间极短,因此高温作用下的奥氏 体晶粒不会产生粗大化现象,从而得到细小的马氏体 组织,其中还有少量粒状贝氏体,使(下转第 154 页) 的相互叠加,造成局部温度场分布的差异性,这是导 致不同的焊接残余应力和变形的主要原因。另外,双 向异时焊接第一道焊缝热源对第二道焊缝区域母材 具有焊前预热作用,第二道焊缝热源对第一道焊缝 具有焊后热处理作用。这有助于减小焊接结构的变 形,但对残余应力的影响不大。

## 4 结论

(1)相同焊接规范下的Q345D低合金高强钢 T型接头双道MAG焊接,不同的焊接工艺具有不同的残余应力和变形,同向同时焊接具有最大的残余变形(1.20597mm),反向异时焊接具有最大的残余应力(548.553MPa)。

(2)相同的外部拘束度条件下,双向同时焊接热 源能量的相互叠加,造成局部温度场分布的差异性, 这是导致不同的焊接残余应力和变形的主要原因。

(3) 双向异时焊接第一道焊缝热源对第二道焊 缝区域母材具有焊前预热作用,第二道焊缝热源对 第一道焊缝具有焊后热处理作用。这有助于减小焊 接结构的变形,但对残余应力的影响不大。

#### 参考文献:

[1] 赵海燕, 鹿安理, 史清宇. 焊接结构 CAE 中数值模拟技术的

(上接第150页)得其组织强度较高,还具有较好的韧性,故对焊接接头不利影响很小。

### 3 结论

(1) 焊接起始点附近存在双峰值温度,峰值温度时间差近似为一个热循环周期,峰值温度随着离焊缝中心线距离的增加依次降低,峰值温度分别为:
800 和 2250 ℃、500 和 1650 ℃、250 和 550 ℃、150 和 300 ℃。

(2) 焊缝区域温度梯度大,焊接起始点处所经历的最高温度为 2250 ℃,最低温度为室温,平均温度梯度为(2250-300)℃/2.88818 mm=675.17℃/mm。

(3) 激光焊接 20CrMnSi 汽车双联齿轮,热影 响区组织主要为马氏体和少量的粒状贝氏体。

#### 参考文献:

周运义,胡昌奎,陈培锋. 汽车变速箱双联齿轮的激光焊接[J].
 激光技术,2004,28(4):445-448.

实现[J]. 中国机械工程, 2000,11(7):732-734.

- [2] Roper J R, Burley Terry. Finite element modeling of complex welded structures[J]. Welding Journal, 2005, December:42-45.
- [3] Tsai C L, Han M S, Jung G H. Investigating the bifurcation phenomenon in plate welding[J]. Welding Journal, 2006, July: 151-162.
- [4] 雷卡林(H.H.Рыкалин), 徐碧宇等译. 焊接热过程计算[M]. 北 京:中国工业出版社, 1958.
- [5] 汪苏,张瑛莉,蔡玲玲,等. 航空发动机加力燃烧室扩散器外 壁环缝焊接模拟[J]. 热加工工艺, 2006,35(23):82-84.
- [6] 陈楚. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海:上海交通大学出版 社, 1985.
- [7] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出 版社, 1990.
- [8] Kiyoshima S. Quick Welder User's Manual[M]. Research Center of Computational Mechanics Inc., Tokyo, 2005.23.
- [9] Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment [J]. Comput Mater Sci, 2009,46:987-989.
- [10] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海:上海交通大学 出版社, 2003.
- [11] 董湘怀. 材料加工理论与数值模拟 [M]. 北京: 高等教育出版 社, 2005.
- [12] 孔祥谦. 有限单元法在焊接中的应用(第三版)[M]. 北京: 科学 出版社, 1998. **国**
- [2] 赵鹏,田伟.激光技术在汽车零部件制造中的应用与实现[J]. 现代零部件,2006,(3):72-74.
- [3] 阎启. 汽车用激光拼焊技术及市场发展现状 [J]. 新技术新工 艺,2006,(2):14-15.
- [4] 苏宝蓉,姚建华. 齿激光焊接技术与应用[J]. 电力机车技术, 2002,25(4):20-21.
- [5] 李章,徐炜. 激光焊接技术在汽车制造中的应用[J]. 汽车工 艺与材料,2005,(6):56-58.
- [6] 汪苏,张瑛莉,蔡玲玲,等. 航空发动机加力燃烧室扩散器外壁 环缝焊接模拟[J]. 热加工工艺,2006,35(23):82-84.
- [7] 陈楚. 数值分析在焊接中的应用[M]. 上海:上海交通大学出 版社, 1985.
- [8] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学 出版社, 1990.
- [9] Kiyoshima S, Deng D, Ogawa K, et al. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Comput Mater Sci, 2009,46:987.
- [10] 李小平,汤漾平,冯清秀. 汽车变速箱齿轮与齿圈激光焊接工 艺研究[J]. 汽车技术,2000,(4),22-24. II