激光焊接拨叉失效分析及解决方法

黄虎，唐满荣，何俊谋，陈超超，胡荣春，陈理，吕兵
重庆青山工业有限责任公司　重庆　402761

摘要：近年来，激光焊接技术在新能源汽车领域得到了广泛应用。介绍了一种激光焊接工艺，对常见的激光焊接拨叉的焊接失效问题进行了试验研究和仿真分析，重点分析了激光焊接拨叉疲劳失效的原因，给出了相应的解决方法，为以后类似产品的开发提供一定的借鉴。

关键词：激光焊接；拨叉；疲劳失效；有限元分析

激光技术诞生于20世纪60年代，经过半个多世纪发展，激光技术已经在多个学科领域广泛应用，例如航空航天、核能、船舶、通信及汽车等行业，尤其是在汽车工业中广泛使用。激光焊接技术现已成为汽车工业的标准工艺，是汽车制造过程中的主要焊接方法[1]。

由于激光焊接变形小，因此在汽车变速器中得到了广泛使用，例如齿圈与齿轮的焊接连接、换挡摆杆与换挡轴的焊接连接、拨叉与拨叉轴的焊接连接等。其中，激光焊接拨叉具有质量轻、强度高、制造工艺简单可靠等特点，符合轻量化设计和绿色制造理念。与传统铸钢拨叉和铝合金拨叉相比具有明显优势：与传统铸钢拨叉相比，精冲焊接拨叉重量减轻了50%，既实现轻量化又可节省大量原材料；与铝合金拨叉相比，总成质量相当，而单件成本仅是铝合金产品的50%左右，经济效益显著。

结合公司某产品在同步器寿命试验过程中发现激光焊接拨叉焊缝出现断裂、脱落（见图1）的案例，采用多种激光焊接失效分析方法，分析了焊接失效的原因，并提出了对应的解决措施。

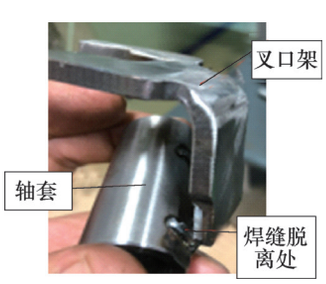


图1　失效拨叉示意

焊接失效分析

1.焊缝外观检测

焊缝外观检测简单有效，可发现焊缝的外观是否完整连续，有无气孔夹渣，可初步判断焊缝失效原因。对此次失效拨叉焊缝外观检测，发现焊缝外观完整连续，无气孔夹渣等焊接缺陷。

2.焊缝剖切检测

焊缝剖切检测是分析焊缝失效原因的必要手段，可发现焊缝内部有无夹杂、气孔之类焊接缺陷。利用剖切检测方法，发现此次分析的激光焊接拨叉焊缝内部无夹杂和气孔等缺陷，如图2所示。

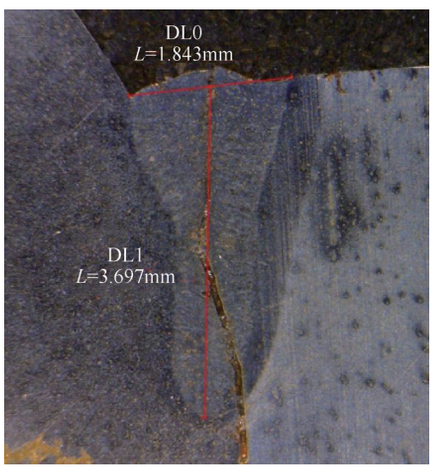


图2　焊缝剖切图

3.焊缝尺寸检测

焊缝尺寸包括焊缝熔深和熔宽。通过焊缝尺寸检测，可发现焊接工艺是否满足零部件的焊接要求，焊缝尺寸达不到图样要求是焊接失效的原因之一。此案例拨叉的焊缝尺寸见表1，满足图样设计要求。

表1　焊缝尺寸　（单位：mm）

项目	设计值	检测值	是否满足设计要求
焊缝深度	≥2.0	3.697	满足
焊缝宽度	≥1.5	1.843	满足
焊缝长度	≥25	27.5	满足

4.金相及硬度检测

金相及硬度检测是对焊缝内部组织的检测，可以判断出焊缝组织的成分。对金相及硬度进行检测，检测数据显示此次故障拨叉的焊缝右侧硬度较高（见表2），检测点如图3所示。金相结果显示焊缝区域存在板条马氏体和少量的针状马氏体组织（见图4），该组织硬度较高、性质较脆，极易导致后期的疲劳裂纹。

表2　硬度检测（维氏硬度）　（单位：HV）

	母材A	A与焊缝界面	焊缝中心	B与焊缝界面	母材B
顶部	173.5	454.4	453	291.3	172
	186.5	504.9	452.7	301.3	154.3
	203.2	405.5	498.3	314.5	161.3
底部	194.2	453.5	581.3	210.5	162

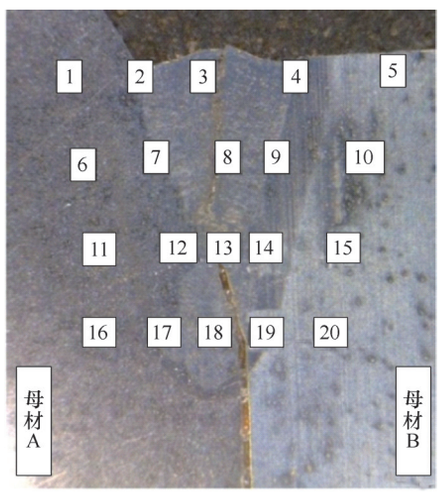


图3　硬度及金相检测点

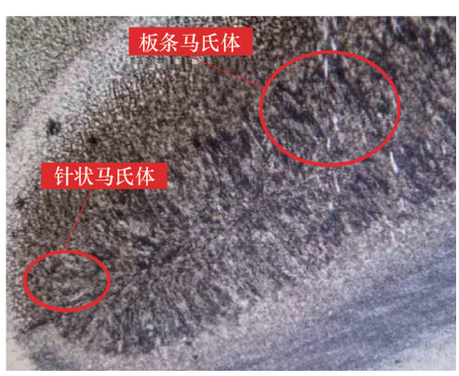


图4　焊缝金相组织

5.焊缝强度分析

对拨叉进行受力分析（见图5），根据《机械设计》中的焊缝强度计算方法[3]，叉口架处焊缝的切应力τ计算如下：

$$\tau=6F_1L_1/(0.7ah^2) \quad (1)$$

式中 F_1——叉口架所受的力，单位为N；

L_1——F_1作用点到焊缝的垂直距离，单位为mm；

a——焊缝宽度，单位为mm；

h——焊缝长度，单位为mm。

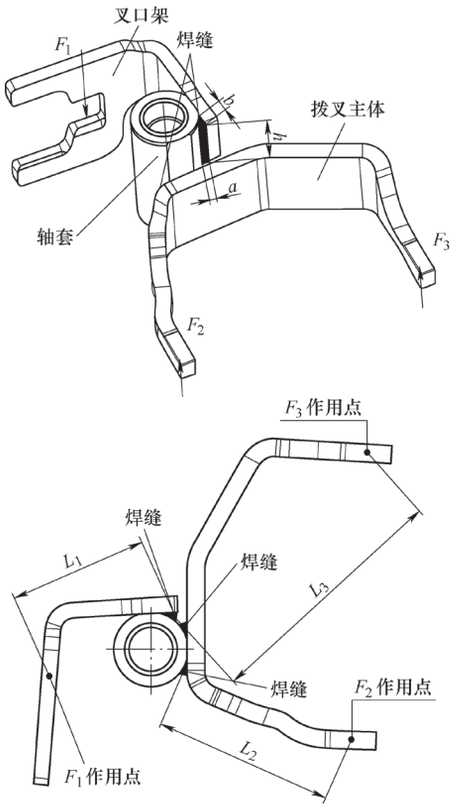


图5　拨叉受力示意

式（1）为便于计算已经过了简化，实际情况L_1不是一个定值，不同的焊缝位置L_1值有稍微的差异，因此其计算结果与实际情况差异较大。目前焊缝强度计算普遍使用ANSYS、MSC等有限元软件进行仿真分析，有限元仿真（FEA）是分析焊缝强度的一种有效、准确且快捷方法。通过对焊接拨叉进行有限元分析（边界条件设置见图6），焊接拨叉的计算最大应力值为2292N/mm^2，位于零件焊缝起始点，与失效零件开裂位置吻合，如图7所示。有限元分析结果表明最大应力超过了焊缝位置的实际抗拉强度（硬度检测：焊缝位置的硬度为291.3～504HV，换算可得抗拉强度为1000～1681N/mm^2）。

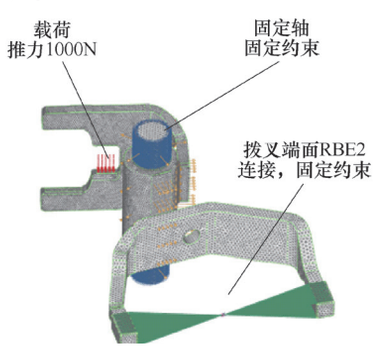


图6　边界条件设置

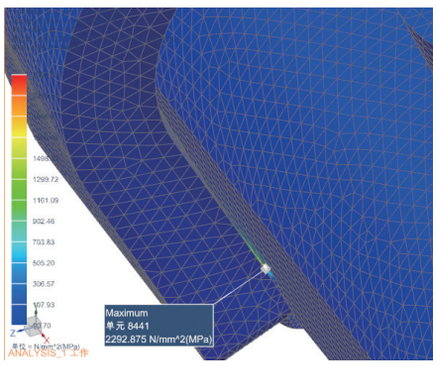


图7　应力分析

对故障件焊缝的检测结果显示，焊缝区域存在板条状马氏体和少量针状马氏体组织，该组织容易导致焊缝疲劳失效；拨叉总成焊接结构CAE分析结果显示，焊缝末端的最大应力值为2292N/mm^2，超过抗拉强度（1027～1681N/mm^2）。在焊缝最薄弱处存在明显的应力集中现象，而故障拨叉的开裂失效部位也与分析结果相符。据此分析出激光焊接拨叉失效原因是：零件材质选取不当，导致焊缝产生缺陷组织，加上焊接结构设计上的缺陷，导致拨叉焊缝最大应力值超过材料抗拉强度。

解决措施

根据上述分析得出的结论，针对性地提出了解决焊接失效问题的措施：

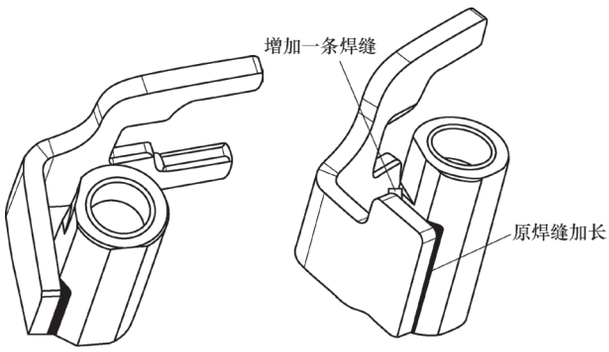
1）拨叉零部件材料优化。由于含碳量较高的钢材焊缝易产生板条状马氏体，因此将轴套材料由35钢变为20钢（含碳量较低），叉口架由35钢变更为30CrMo。

2）焊缝设计优化。调整焊缝参数，使焊缝宽度大于6mm，原焊缝长度增加8mm并增加一道焊缝（见图8），降低焊缝最大应力。

对更改材料和焊缝参数后的拨叉进行有限元分析，发现焊缝最大应力已降为683.85 N/mm^2，满足设计要求，如图9所示。对改后的焊接拨叉进行台架试验，未再次发现焊接失效问题。

结语

对某激光焊接拨叉的焊缝失效问题进行了试验与



a）原设计　　b）改进后

图8　焊缝改进

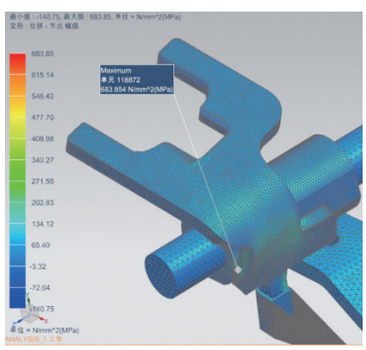


图9　应力分析

仿真研究，据此提出了解决焊缝失效问题的技术方案，并最终获得了优化的结构设计方案和焊接参数方案，结论如下：

1）激光焊接拨叉强度的有限元分析结果与实际情况基本吻合，可见有限元分析可预测设计是否存在失效风险。

2）拨叉零件材料选择不当会导致焊接处疲劳失效。

3）焊接熔深、长度不足会导致焊接强度不足，从而导致零件失效。

4）通过合理选材，优化焊缝数量、焊接熔深及焊接长度，可解决拨叉焊缝失效问题。

参考文献：

[1]李亚江，李嘉宁.激光焊接/切割/熔覆技术[M]. 北京：化学工业出版社，2015.

[2]葛宜银.激光焊接技术在汽车工业中的应用及发展前景[J]. 汽车工艺与材料，2009（11）：2.

[3]濮良贵，纪名刚.机械设计[M].北京：高等教育出版社，2006.

（上接第49页）

图9　校验条形码

码头，读码头100%识别产品的条形码，并将识别的信息存储在测试台里，并将该逻辑与测试台的测试逻辑绑定，只有正确识别的条形码信息的产品，设备才自动进行下一个工序，否则设备报警无法动作。从防法生和防流出端都做检测，确保的流到客户端的产品条形码都可以100%识别。

结语

结合条形码的编码规则、字符结构以及条形码的生成方式，从条形码的识别原理入手，介绍了影响条形码识别的常见因素，根据生产大批量实际生产效果，总结出比较有效的条形码质量控制措施。

1）条形码的尺寸需要满足相应码制的规则要求，一般条形码要求前后空白区长度>10倍最小模块长度；条形码的条和空的分辨率与打印机的精度和最小模块宽度选择有关，精度越高的打印机，单位面积内打印的点数越多，条和空分辨越明显。

2）条形码解码的原理是光的反射原理，对条形码的光学特性要求比较多，常见的光学特性要求：符号反差，最小边缘反差，调制比和缺陷度。

3）条形码打印对条形码背景色和条的颜色匹配有一定的要求，一般要求背景色和条的颜色基色反射率差异＞50%，文章给出了调选背景色的建议表。

4）条形码打印由于该工艺的特殊性，存在漏空和污点，但需要控制其大小，在一定的范围内，设备可以自动剔除噪声点，不影响条形码的解码。

5）生产中设备和参数以及条形码纸要相匹配，为了确保设备和参数与原材料匹配，可以选用最复杂的码作为校验条形码，打印前进行匹配性验证。

参考文献：

[1] 杨义.条形码印刷及其印刷质量标准[J].印刷科普知识, 1994（4）：5-7.

[2]刘湛.关于条形码识别系统中光电信息技术的应用探讨[J].工业，2019，21（11）：275.