平板车制动系统凸轮轴断裂分析及工艺改进

郑州宇通重工有限公司生产技术处 （河南 450051） 张慎超

【摘要】 通过对焊接后的凸轮轴在校直时产生断裂的原因进行分析，改进了凸轮轴的焊接和热处理工艺，并根据热处理状态对焊后的凸轮轴进行了抗扭试验对比，证明了工艺改进后的凸轮轴能够满足其使用性能的要求。

在我公司生产平板车的双管路气压制动系统中，制动是通过双膜片制动室驱动凸轮轴转动，凸轮轴的凸轮使制动蹄张开而完成的。凸轮轴作为制动系统中的关键零件，要承受一定的扭矩，驱动制动蹄制动要求凸轮轴具有良好的力学性能。但由于凸轮轴较长，受锻压设备、铣床刀盘及工作台面间垂直距离的限制，所以工艺上采用焊接结构，把凸轮轴分为两个零件——凸轮短轴和接长轴焊接而成。在生产中，焊接凸轮轴在校直时从焊缝熔合线处发生了断裂，为此我们对焊接凸轮轴断裂产生的原因进行分析，制定了改进凸轮轴的工艺，并对改进工艺后的凸轮轴进行了性能试验对比。

一、凸轮轴断裂原因分析

1. 凸轮轴结构

凸轮轴结构如图 1 所示，凸轮短轴和接长轴的材质均为 45 钢，在调质状态下进行焊接，焊接坡口为 Y 形，要求填满，采用 E5016 焊条进行焊接。

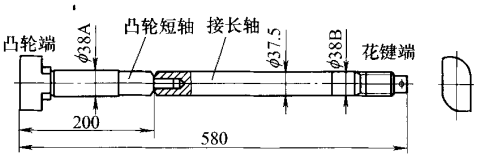

图 1 凸轮轴

2. 凸轮轴断口分析

凸轮轴断口位于焊缝熔合线处，为一次性脆性断口，断口形状如图 2 所示。我们通过对断轴进行检验，了解以下情况：

（1）断轴基体表面硬度为 49HRC。

（2）断轴焊缝处表面硬度为 20～28HRC。

（3）断轴焊缝处断面硬度为 187HBW（18HRC）。

（4）断轴焊缝金相组织为“针状铁素体＋珠光体”，呈魏氏组织分布。

图 2 断口形状

3. 凸轮轴断裂原因分析

（1）45 钢碳当量为 0.71%，焊接性较差，易产生硬脆的马氏体组织，淬硬倾向大。焊接时没采取焊前预热和焊后缓冷，冷却速度较快，焊缝金属的组织中有明显针状铁素体，呈魏氏组织分布，导致焊缝金属尽管硬度很低，但焊缝脆性明显增大。

（2）从凸轮轴断口看，根部未焊透，造成应力集中。Y 形坡口钝边尺寸较大，且坡口形状不合适。

（3）施焊时第一层焊接电流过大，母材熔化到第一层焊缝金属中的比例过高。

（4）为达到凸轮及花键的强度要求，焊后进行整体淬火、回火导致的硬度偏高（49HRC），也是凸轮轴断裂的主要原因。

二、凸轮轴工艺改进

根据凸轮轴断裂原因分析，并经过多次试验，我们对凸轮轴的焊接工艺和热处理工艺进行了改进。改进后的工艺如下：

万方数据

1. 焊接工艺

(1) 焊条　选用低氢型 E5016 焊条，焊条严格按焊条说明书规定的温度进行烘干。

(2) 坡口形式　采用 U 形坡口，焊前对坡口及钝边清理，不得有锈蚀、油污、水分及氧化皮等。

(3) 预热　焊前采用火焰预热，预热温度 200℃左右，以降低整个焊接区域的冷却速度，改善接头性能，减少焊后残余应力。

(4) 焊接参数　为防止应力集中，采用多层焊。多层焊的热影响区较窄，后道焊对前道焊有回火作用，接头的显微组织较细。同时由于母材熔化到第一层焊缝金属中的比例最高达 30%左右，所以在保证焊透的情况下，第一层焊接时应尽量采用小电流、慢焊接速度即小的焊接热输入，焊接时保证层间温度在 200℃左右。主要焊接参数见表 1。

表 1　焊接参数

焊接层数	焊条型号	焊条规格 d/mm	焊接电流 I/A
第一层	E5016	3.2	170～180
第二层	E5016	4.0	180～190

(5) 焊接过程中注意事项　在焊接过程中保证填满弧坑和良好的焊接成形，因为热裂纹易出现在未填满的弧坑处，尤其在多层焊时第一层的弧坑中及焊缝凹陷部位，且第一层务必焊透。

(6) 焊后热处理　焊后经 600～650℃、保温 2.5h 的回火处理，以消除焊接内应力，减少焊接接头的熔合区和热影响区产生淬火组织，提高焊缝的塑性和韧性。

(7) 焊缝检验　焊后进行表面检查及探伤检验，焊缝不得有裂纹、未熔合、气孔及夹渣等缺陷，焊缝强度不低于母材表面。

2. 热处理工艺

(1) 凸轮短轴和接长轴焊前需进行调质处理。

(2) 凸轮轴焊后进行局部热处理，凸轮部分及 ϕ38A 外圆处高频淬火，淬火硬度为 50～55HRC；花键及 ϕ38B 外圆长 140mm 范围内盐浴淬火，硬度为 33～40HRC。

三、凸轮轴抗扭试验对比分析

1. 凸轮轴扭矩计算

凸轮轴需承受一定的扭矩，根据设计要求，制动气室内径为 146mm，工作气压为 0.7MPa，刹车调整臂长度为 160mm，则得出：

制动气室力 $F = 7 \times 9.8 \times 14.6^2 \times \pi/4\text{N} = 11478.9\text{N}$

制动力矩 $M = 11478.9 \times 0.16\text{N}\cdot\text{m} = 1836.6\text{N}\cdot\text{m}$

取制动力矩设计值 $M = 1840\text{N}\cdot\text{m}$。

2. 凸轮轴抗扭试验对比分析

为了检验工艺改进后的凸轮轴能否满足使用性能要求，我们分两种情况进行试验对比：一种为凸轮轴调质状态焊接后直接上试验机，试样的编号为左和右；另一种为凸轮轴焊后局部热处理后上试验机，即凸轮部分及 ϕ38A 处高频淬火，淬火硬度为 50～55HRC，花键及 ϕ38B 段长 140mm 范围内盐浴淬火，硬度为 33～40HRC，试样的编号为 2 和 6。试验结果如图 3、图 4 所示。

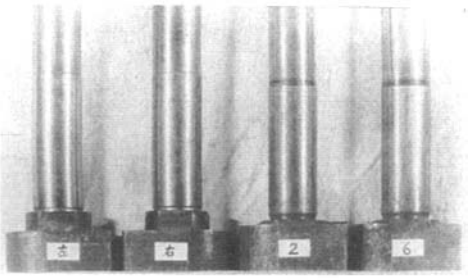

图 3　凸轮端照片

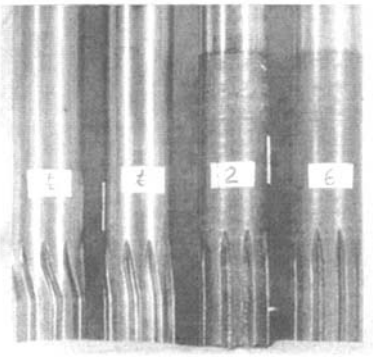

图 4　花键端照片

凸轮轴调质状态焊接后直接上试验机的试验情况如表 2 所示（试样编号为左和右）。从表 2 中可以看出：试样左和试样右的试验情况相同，当扭矩从 2050N·m 开始，扭力增加幅度与前面相当，但转角增加较多，说明从此时起试样已开始发生永久变形，焊接处无异常。试验后观看试样，发现调质端花键已被扭曲变形，凸轮端有变形。

万方数据

表 2

试样编号左					试样编号右				
n	转角记录值 α_n	实际转角(°)$(\alpha_{n+1}-\alpha_n)/16$	扭力值 F/kN	实际扭矩值/N·m $F_n\times1000\times0.5$	n	转角记录值 α_n	实际转角(°)$(\alpha_{n+1}-\alpha_n)/16$	扭力值 F/kN	实际扭矩值/N·m $F_n\times1000\times0.5$
1	1624	—	—	—	1	1624	—	—	—
2	1627	0.1875	0.6	300	2	1627	0.1875	0.6	300
3	1629	0.1250	1.4	700	3	1629	0.1250	1.4	700
4	1632	0.1875	2.2	1100	4	1632	0.1875	2.2	1100
5	1634	0.1250	2.8	1400	5	1634	0.1250	2.8	1400
6	1636	0.1250	3.5	1750	6	1636	0.1250	3.5	1750
7	1638	0.1250	4.1	2050	7	1638	0.1250	4.1	2050
8	1641	0.1875	4.5	2250	8	1641	0.1875	4.5	2250
9	1645	0.2500	5.0	2500	9	1645	0.2500	5.0	2500
10	1650	0.3125	5.5	2750	10	1650	0.3125	5.5	2750
11	1655	0.3125	6.0	3000	11	1655	0.3125	6.0	3000
12	1663	0.5000	6.5	3250	12	1663	0.5000	6.5	3250

凸轮轴焊后局部热处理后上试验机的情况如表3所示（试样编号为2和6）。从表3中可以看出，2号试样的扭矩达2050N·m以后，6号试样的扭矩达2100N·m以后，再继续加载，扭力值几乎很少变化，而转角记录值却在继续增加，这说明凸轮轴中间调质段已发生永久变形，焊接处无异常。

试验后观看试样，花键端没有变形，凸轮端也没有变形，满足了凸轮轴工作需求。

表 3

试样编号2					试样编号6				
n	转角记录值 α_n	实际转角(°)$(\alpha_{n+1}-\alpha_n)/16$	扭力值 F/kN	实际扭矩值/N·m $F_n\times1000\times0.5$	n	转角记录值 α_n	实际转角(°)$(\alpha_{n+1}-\alpha_n)/16$	扭力值 F/kN	实际扭矩值/N·m $F_n\times1000\times0.5$
1	1710	—	—	—	1	1679	—	—	—
2	1713	0.1875	0.8	400	2	1683	0.2500	0.8	400
3	1716	0.1875	1.8	900	3	1685	0.1250	1.6	800
4	1718	0.1250	2.6	1100	4	1689	0.2500	2.6	1300
5	1720	0.1250	3.5	1400	5	1691	0.1250	3.5	1750
6	1723	0.1875	4.1	2050	6	1693	0.1250	4.2	2100
7	1725	0.1250	4.1	2050	7	1696	0.1875	4.6	2300
8	1730	0.3125	4.1	2050	8	1701	0.3125	4.6	2300
9	1741	0.6875	4.3	2150	9	1705	0.6875	4.8	2400
10	1769	1.7500	5.0	2500	10	1722	1.3125	5.0	2500

四、结语

通过对焊后凸轮轴断裂原因进行分析，改进了凸轮轴的焊接工艺和热处理工艺，并根据焊后凸轮轴的热处理状态进行了抗扭试验的对比分析。工艺改进后焊接凸轮轴满足了使用性能要求，解决了凸轮轴焊接后产生断裂的问题。热

(20070717)

万方数据