针对某款双金属制动盘使用一段里程（时间）后，制动发抖严重故障。通过对制动盘尺寸、成分、光谱、金相、硬度及模拟装车试验等分析，发现故障原因，采取相应改善措施，对改进后样品与 OE 产品，采用 LINK3900 台架进行高负荷、热疲劳及摩擦磨损试验，检测和试验数据达到 OE 水平。

力派尔（珠海）汽车配件有限公司 桂克福

某款双金属制动盘制动发抖与改善分析

2021 年 8 月，跟踪某款双金属制动盘装车试验，制动部件严格按照装车规范操作与安装，安装后各项指标检测正常；初期制动效果良好，未有发抖和振颤现象；行驶到 2000km 左右，制动时有轻微制动抖动，随后越来越明显；行驶到 3200km 时发抖严重，难以操纵车辆，影响制动舒适性和安全性。

制动盘、制动片、卡钳等零部件故障以及安装不规范等，都有可能导致制动发抖，对磨损后的制动盘及其他制动配件，逐一排查、分析。

双金属制动盘：本文讨论的双金属制动盘，是高碳灰铸铁盘体和铝合金盘帽，由不锈钢铆钉连接的复合制动盘，如图 1 所示。

DTV：制动盘摩擦环厚度偏差，分为周向 DTV 和径向 DTV；周向 DTV 是沿圆周的制动盘厚度偏差，对于制动舒适性和抖动影响比较大，一般情况下，未特殊说明指的周向 DTV。

硬度差：制动盘摩擦面硬度最大值与最小值的差值，是评价制动盘硬度均匀性、一致性的一个重要参数。

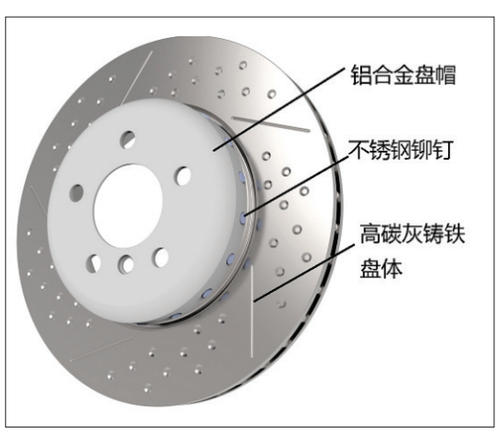

图 1 双金属制动盘示意图

分析过程

本发抖制动盘刚开始使用时正常，随着时间推移、制动盘磨损不断增加，发抖现象也逐渐增强；更换一套新的制动盘，无发抖现象。故分析本车辆制动器、制动系统、对偶件制动片引起抖动可能性低，制动盘引起制动发抖可能性比较大。

从磨损外观、尺寸、材质、材料、金相、动平衡及模拟装车试验等方面分析制动盘。

（1）外观检查和确认

对拆下的已磨损发抖制动盘和对偶件制动片进行外观检查：

1）制动盘、对偶制动片无磕碰、挤压、变形，磨损正常，未有明显的偏磨和磨损异常。

2）双金属制动盘盘体和铝合金盘帽连接，未有松动、缝隙，未有串动。

双金属制动盘及对偶件制动片磨损及使用状态正常，未见异常。

（2）尺寸检查

对发抖制动盘全尺寸检测，不合格项如下：

1）铝合金盘帽安装基准面平面度图样要求内凹 0.05，实测左盘凸 0.0392 mm；右盘凸 0.0459 mm。

2）左盘轴向圆跳动 0.09 mm，右盘全跳动 0.12 mm，超出轴向圆跳动≤ 0.05 mm 要求。

3）左盘 DTV 0.029 mm，右盘 DTV 0.024 mm，超出图纸 DTV ≤ 0.012 mm 要求。

4）DTV 超差位置具有规律性、区域性分布

54-64 质量改善.indd 57 2023/4/8 20:10:39

特点。

（3）动平衡检查

用动平衡机，检测制动盘动平衡，结果正常。

（4）模拟装车试验，评估安装基准面影响

在台架 LINK3900 上安装制动器轮毂，模拟装车试验，用于试验、分析、评估安装基准面内凸 / 内凹的影响性；模拟制动盘均匀安装固定、装车后的制动盘尺寸稳定性；并验证铝合金盘帽，在不同状态下的稳定性，结果见表 1。

模拟装车方法、试验、对比分析步骤：

1）自由状态下，用轴向圆跳动检具检测盘轴向圆跳动。

2）在汽车制动器轮毂上安装制动盘，分别采用 3 N·m 和 6 N·m，仅安装固定螺钉，评估仅固定螺钉时，制动盘的轴向圆跳动及变化影响。

3）在上述 6 N·m 螺钉紧固基础上，分别采用 30 mm、60 mm、100 mm 及 140 N·m 力矩，均匀安装轮胎紧固螺栓。评估不同螺栓紧固力矩下，制动盘轴向圆跳动稳定性及变化。

4）逐渐松开螺栓，螺栓紧固力矩减小到 30 N·m 和完全松开轮胎螺栓的 0 N·m 状态。

5）将螺栓再次均匀紧固到 140 N·m，根据 R90 标准的制动盘热疲劳和高负荷程序，在台架上分别试验 5 个循环，15 s 内完成检测高温状态下的制动盘轴向圆跳动数据，用于评估试验制动盘经过高温、高负载后的状态稳定性（评估高温状态盘的稳定性，故只进行几个循环的高负荷、热疲劳试验）。根据表 1 可以得出以下结论：

1）双金属制动盘安装基准面内凸时，利用轴向圆跳动检具自由状态测量盘轴向圆跳动数据偏大；紧固螺栓（实际车辆安装固定）时，盘全跳动数据稳定且合格；安装基准面内凹，在轴向圆跳动检测检具上自由轴向圆状态轴向圆跳动数据相对稳定。

2）仅安装紧固螺钉，盘紧固不平衡，测量数据偏大，测量数据失稳。

3）均匀紧固轮胎螺栓力矩 ≥ 30 N·m 时，螺栓紧固力可将基准面内凸 / 内凹影响消除，制动盘轴向圆跳动稳定合格，故实际装车时内凸 / 内凹不会影响。

综上分析，制动盘装车时，均匀的螺栓紧固力，可以有效消除安装基准面的微量内凸 / 内凹影响，不是导致制动盘发抖的主要原因。

（5）材质分析

C-S 和光谱分析，发抖的制动盘合金元素符合标准。

（6）金相分析

对发抖制动盘金相显微分析，珠光体结构和比例、石墨大小与形态、铁素体和碳化物比例等，符合标准。

（7）硬度测试

发抖制动盘和 OE 盘硬度对比见图 2 和表 2。

1）发抖制动盘硬度整体较 OE 偏低，也小于标准要求 HB160 ~ 200。

2）根据图 2，发抖制动盘硬度严重不均匀，硬度差大，硬度大小沿圆周成规律性，区域性的分布明显。

分析与改进

（1）分析

表 1 模拟不同状态制动盘轴向圆跳动

试验步骤	测试状态	测试环境	加载力矩 / N·m	轴向圆跳动 / mm			轴向圆跳动 /mm			轴向圆跳动 / mm		
				外圈	中间	内圈	外圈	中间	内圈	外圈	中间	内圈
				OE—新盘 安装面内凹：0.0278			发抖件 R（已磨损） 安装面内凸：0.0459			发抖件 L 已磨损） 安装面内凸：0.0392		
1	工装测量	环境温度 18 ~ 20℃	0	0.02	0.02	0.01	0.09	0.09	0.08	0.12	0.10	0.10
2	轮毂安装测试 固定紧固螺钉		3	0.03	0.01	0.01	0.35	0.19	0.14	0.10	0.08	0.05
			6	0.03	0.02	0.01	0.37	0.22	0.15	0.10	0.05	0.04
3	轮毂安装测试 逐渐加大轮胎螺栓紧固力矩		30	0.02	0.03	0.01	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03
			60	0.02	0.02	0.01	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
			100	0.02	0.02	0.01	0.05	0.05	0.04	0.02	0.04	0.04
			140	0.02	0.02	0.01	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.03
4	逐渐减螺栓紧固力矩		30	0.02	0.03	0.01	0.06	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03
			0	0.04	0.03	0.02	0.28	0.21	0.15	0.09	0.04	0.05
5	台架试验后 测试	高负荷	140	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
		热疲劳	140	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05

54-64 质量改善.indd 58 2023/4/8 20:10:39

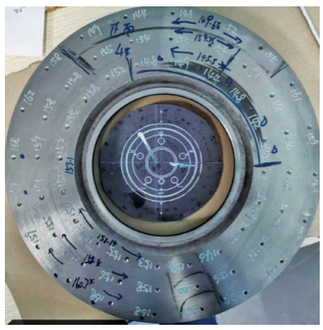

图 2 硬度测试 a 发抖制动盘 L 硬度

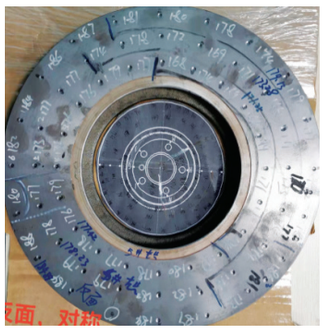

图 2b 发抖制动盘 R 硬度

表 2 硬度数据及对比

产品		硬度（HB160~200）			
		MAX	MIN	avg	硬度差≤ HB20
OE	正面	180	168	175	12
	反面	177	163	172.5	14
发抖件 L	正面	176	148	161.2	28
	反面	168	142	155.1	26
发抖件 R	正面	189	166	177.9	23
	反面	181	161	172.2	20

根据图 2 发抖的 R 和 L 制动盘磨损后 DTV 分布和硬度分布规律相似且一致，都是区域性的规律性变化，推理如下：

盘硬度具有区域性不均匀分布，盘硬度低的区域磨损快，硬度高的区域磨损慢，经过时间磨损，磨损差异越来越明显，导致制动盘不同区域 DTV 逐渐变大。DTV 变大后，制动时制动力矩差 BTV 变大，引起制动抖动。

为改善、减少、杜绝制动盘抖动，需提高制动盘硬度均匀性、一致性，减小硬度差；同时发抖制动盘的硬度整体偏低，会导致制动盘磨损提前化，适当提升制动盘整体硬度也是改善的一个目的。

（2）硬度和硬度差分析改善

通过对铸造模具结构、浇铸温度、铸造孕育剂成分和孕育剂比例、铁液各合金元素比例与 OE 对比分析，分析导致制动盘硬度偏低、硬度差大的原因。

1）模具结构分析与改进。原铸造模具浇道短、铁液在制动盘圆周方向滞留时间差异大，浇口处铁液保持时间长、冷却慢，远离浇口的相对位置，铁液保持时间短，铁液冷却快，制动盘圆周方向温度场温度梯度大，冷却速度不均匀，导致硬度明显差异。

将铸造模具浇道沿圆周优化分布并延长；提高盘圆周铁液温度分布均匀性、降低温度梯度、提高制动盘毛坯冷却一致性，提升产品硬度一致性和均匀性，减小硬度差。改善模具结构见图 3.

2）铸造温度分析与改进。本双金属制动盘体是含碳量 3.6%~3.9% 的高碳灰铸铁，比 HT250 碳元素 3.2%~3.6% 高。根据铁碳相图分析，高碳盘合金高铁液凝固曲线右移，浇注温度应该比 HT250 约低 50℃左右。

图 3 铸造模具改进

3）孕育分析与改进。孕育对于产品晶体成核、晶粒大小与生长走势、石墨大小与生长方向等都有明显影响，充分的孕育，保证晶粒细化和均匀晶粒、合适石墨形态、石墨大小及优越力学特性。

本制动盘的盘体采用日本东久自动浇注线生产，采用硅钡高效孕育剂，两次孕育；一次孕育是在包内孕育，孕育剂比例 0.25%；二次随流孕育，孕育剂比例 0.1%。

由于高碳盘碳含量高、石墨生长快，如果孕育剂成核数量少，晶粒和石墨会变得粗大，结合同行业经验和多次试验，将一次孕育剂比例提高到 0.30%~0.35%。

4）合金比例分析与改进。合金元素及比例，不仅对于石墨化影响，还对铸铁工艺性、机械强度和硬度都有明显影响，结合 OE 产品合金元素含量及同行业经验，将 Cr、Cu、Mo 等元素含量适当提高，适当提高整体硬度、提高硬度均匀性、减小硬度差。

试验改进效果验证

（1）硬度及硬度差验证

根据上面分析，修改铸造模具，适当提高合金比例、孕育剂含量及降低浇注温度，试生产 3 个型号制动盘，每型号各 30~40 件，测试每个型号的制动盘硬度及硬度差，详见表 3。

改进后的盘体装配成品，用制动台架 LINK3900，根据 R90

54-64 质量改善.indd 59 2023/4/8 20:10:39

和 SAE J2707-2005 程序进行高负荷、热疲劳，摩擦磨损试验对比，结果见表 4。

改进后制动盘磨损均匀，摩擦表面平整，DTV 没有超差，试验过程中也未发现摩擦噪声、制动盘抖动等现象，证实改进试验有效。

结束语

通过分析、试验验证：

1）铝合金帽安装基准面的内凸不是导致制动盘抖动的主要原因。

2）导致制动盘抖动的直接原因是磨损后 DTV 严重超差。

3）硬度差具有规律性，严重不均匀，导致磨损后 DTV 严重不均匀分布。

4）铸造模具浇道结构不合理，导致制动盘冷却不均匀，温度梯度大，硬度差大。

5）充分的孕育、适当合金成分及比例，对于细化晶粒、减少石墨粗大、提高片状珠光体比例、减少碳化物比例、提高强度、提高硬度及减少硬度差有重要作用。AI

表 3 改进前后产品硬度及硬度差对比

产品		硬度（HB160~200）			
		MAX	MIN	avg	硬度差≤ HB20
OE	正面	180	168	175	12
	反面	177	163	172.5	14
发抖件 L	正面	176	148	161.2	28
	反面	168	142	155.1	26
发抖件 R	正面	189	166	177.9	23
	反面	181	161	172.2	20
试验产品 A	正面	180	170	174.1	10
	反面	183	170	174.6	13
试验产品 B	正面	183	171	178.3	12
	反面	183	173	178.1	10
试验产品 C	正面	180	170	175.04	10
	反面	186	171	178.1	15

表 4 改进产品与 OE 台架试验前后 DTV 对比

试验项目	产品	DTV ≤ 0.012mm		
		实验前	试验后	DTV 变化
高负荷	OE-1	0.009	0.008	-0.001
	试验产品 -1	0.008	0.007	-0.001
热疲劳	OE-2	0.008	0.011	0.003
	试验产品 -2	0.007	0.008	0.001
磨损试验	OE-3	0.008	0.011	0.003
	试验产品 -3	0.007	0.010	0.003

（上接第 56 页）

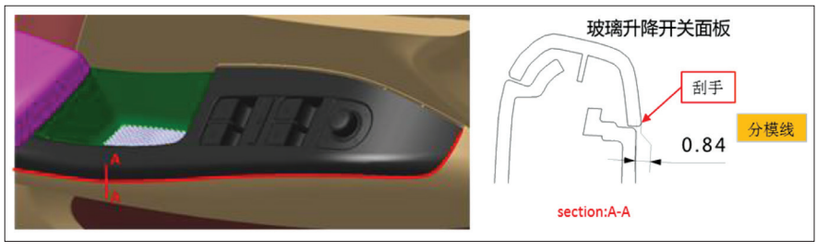

图 7 零件结构配合不良

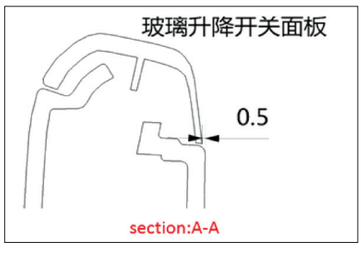

图 8 零件结构优化

图 9 零件分件优化

索能够改善消费者体验的质量激励因素。感知质量从根本上来讲是从消费者层面出发，以客户需求为导向，创新优化产品。汽车前期设计过程中，通过 DTS 设计、DTS 审核工作保证数据质量，控制车身精度，保证美学功能，提升客户感知质量。AI

54-64 质量改善.indd 60 2023/4/8 20:10:40