

重型货车用长寿命 轻量化蠕墨铸铁制动鼓的研究

余豫栋

广西玉柴机器配件制造有限公司 广西玉林 537005

摘要：针对某重型货车主机厂某些制动鼓在西南山区工况中异常失效问题，通过对失效制动鼓的分析找出导致失效原因。从制动鼓零件功能需求出发，提出满足工况的材料性能和结构需求，并提出制动鼓零件结构轻量化的优化方法和试验/验证方法。可使铸件强度和抗热疲劳性等性能得到满足的同时，提高零件轻量化，满足零件的成本控制需求，从而使制动鼓的使用寿命满足西南山区工况的需求。

关键词：灰铸铁；蠕墨铸铁；轻量化；制动鼓

鼓式制动系统因其结构简单、造价便宜和制动功率大等优点，长期以来都是重型货车上使用最广泛的制动系统。随着我国国民经济的高速发展，国内交通运输业面临着持续提高运输效率的挑战。在兼顾制造成本的前提下，市场对商用重型货车平均运营时速、运营里程及运营区域不断提出新的要求。但是，鼓式制动系统存在散热能力较差的缺点，特别是在山区工况下，客户给鼓式制动系统私自加装淋水器，更是加速鼓式制动器中制动鼓零件在“三包”期内提前损坏，给重型货车生产企业造成异常的质量赔付。

某重型货车主机厂装配457驱动桥的灰铸铁材质制动鼓，在西南区域山区工况环境下（客户普遍私装淋水器），“三包”赔付率达40%，主机厂尝试过多种技

术方案都无法解决问题，急需研究产品失效原理，并在不大幅提高车辆制造成本的基础上，找到解决方案。

制动鼓失效原因分析

主机厂目前在457驱动桥上配套使用HT250材质的制动鼓，零件主要工作区域壁厚20mm，质量58.15kg，现行“三包”政策保修6个月。西南山区工况下，客户普遍给制动系统加装淋水器和“刹车王”，制动鼓零件使用中产生制动异响或制动力不足后，车主将车辆开至服务站要求检修，并对检查有故障的制动鼓进行更换。对683个故障制动鼓进行分析，使用寿命均小于4个月，行驶里程0.8万~2.7万km。具体失效原因见表1。

表1 制动鼓失效原因分析

失效原因	开裂	龟裂	合计
数量/件	587	96	683
比例 (%)	85.94	14.06	100

车辆在制动瞬间，工作部位承受压力和摩擦力，零件总体承受拉力。制动时，车辆动能转化成热能，其中90%的热能由制动鼓吸收。重载车辆在山区长时间制动过程中，制动鼓温度可以升至700℃，局部温度可达900℃，达到铸铁的相变温度。同时，客户在刹车同时给制动系统淋水，导致制动鼓内、外表面温差极大，致使制动鼓处于严重的热疲劳状态。铸件材料在不同温度下的膨胀系数有明显差异，制动鼓内外表面温差产生严重的膨胀应力。客户改装刹车气压，也使得制动鼓长期处于高应力状态，以上多重因素叠加，造成制动鼓在三包期内异常故障的情况。

新型蠕墨铸铁制动鼓设计

1.重型货车用制动鼓功能及材质的要求

- 1) 材料要求有良好的摩擦系数及耐磨性能，满足制动系统的制动需求。
- 2) 材料要求有良好导热性能和热疲劳性能，能将制动产生的热量及时传导出去，尽可能减小零件各处温度的差异，并减小热膨胀差。良好的热疲劳性能，才能抑制反复制动时制动鼓反复加热、冷却所带来的热疲劳损伤。
- 3) 制动鼓结构及材料有足够的高温机械强度，承受重型货车刹车时强烈的机械冲击。材料的高温机械强度越好，制动鼓的壁厚可以越薄，越能减少热传导

带来的热力梯度，减小材料在不同温度下热膨胀系数差异带来的应力。

2.制动鼓结构及材料分析及选择

(1) 结构选择 重型货车上常用的制动鼓结构有单金属鼓和双金属复合鼓。双金属复合鼓使用钢材等高强度高延伸率材料做外壳，内部使用灰铸铁等材料作为摩擦材料，虽然能解决制动鼓破裂失效的故障，但是在实际使用中，双金属复合鼓存在制动变形大和制动力不足的情况。同时，双金属复合鼓的制造工艺相对复杂，提高制造成本。相对来说，单金属鼓是合适的选择。

(2) 材料选择 根据调查，国内重型货车在鼓式制动器上，普遍使用灰铸铁HT200、HT250材质的单金属鼓；少数主机厂开展过蠕墨铸铁单金属鼓的应用验证，但是没有广泛推广；也有制动鼓生产厂家试验过球墨铸铁制动鼓，但是最终没有取得效果。

从材料性能角度考虑，蠕墨铸铁材料是最适合单金属制动鼓的材料。在车辆连续制动下，制动鼓零件急剧升温，灰铸铁材料的高温力学性能极差（见表2）。蠕墨铸铁摩擦系数优于灰铸铁和球墨铸铁，磨损率略高于球墨铸铁，远优于灰铸铁，蠕墨铸铁的耐磨性是灰铸铁的3倍以上（见表3）。蠕墨铸铁在关键的热疲劳性能上，略优于球墨铸铁，远优于灰铸铁（3倍以上）。蠕墨铸铁导热率略低于灰铸铁，远高于球墨铸铁（见表4），虽然蠕墨铸铁导热率略低于灰铸铁，但是蠕墨铸铁可以根据自身材料强度高的优点，可以减薄零件壁厚，最终蠕墨铸铁制动鼓的散热能力优于灰铸铁制动鼓。

表2 铸铁高温性能

试验温度 /℃	HT200		VG80		VG50		VG30		QT	
	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)
室温32	215	0.6	405	2.0	415	0.9	530	2.0	600	2.0
500	125	2.0	220	4.0	225	5.0	260	8.4	195	
	145	2.0	210	4.6	245	4.0	270	7.6	190	1.2
700	40	5.0	54	13.0	56	16.5	56	25.0	33	5.5
	38	1.0	53	17.0	58	36.0	56	35.0	32	9.0

注：表中所有抗拉强度与伸长率均为最小值。

表3 铸铁的磨损率及摩擦系数

材料	石墨含量 (%)	磨损率/ (mg/min)	摩擦系数
灰铸铁	11.67	1040	0.217
	14.30	1270	0.238
	23.46	1520	0.244
蠕墨铸铁	9.76	84	0.238
	12.59	100	0.245
	17.62	125	0.263
球墨铸铁	8.38	51.6	0.186
	10.13	53.4	0.203
	14.72	65.9	0.216

表4 铸铁在各温度下热导率

石墨形态	CE (%)	热导率/ (W/m·K)				
		100℃	200℃	300℃	400℃	500℃
片状	3.8	50.24	48.99	45.22	41.87	38.50
	4	53.59	50.66	47.31	43.12	38.90
球状	4.2	32.34	34.75	33.08	31.40	29.30
蠕虫状	3.9	38.10	41.00	39.40	37.30	35.20
	4.1	43.54	43.12	40.19	37.70	35.20
	4.2	41.00	43.50	41.00	38.50	36.00

表5 铸铁的磨损率及摩擦系数

材料	牌号或蠕化剂类别	蠕化率 (%)	试样在不同温度下产生首次裂纹的循环次数		
			250~500℃	250~700℃	250~900℃
灰铸铁	HT150			350	
	HT200		7900	340~460	80~180
蠕墨铸铁	MgTi合金	≥80	8000	280~420	
		≥50	19000	900	
	REMgTi合金	≥80		630~920	
		≥50		1300~1660	
	RECa合金	≥80	11250	1200~1600	450~640
		≥50	14500	1250~1900	
	RESiFe合金	≥50		1000	
球墨铸铁	QT700-2		18000	1100~1800	550~640

从表5可知，当蠕墨铸铁蠕化率 $\geq 50\%$ 的耐热疲劳性能明显优于蠕化率 $\geq 80\%$ 。适中的蠕化率也利于产品批产时的质量控制。

制动鼓结构设计及分析计算

1.结构设计

选用RuT450材质（蠕化率50%）对原制动鼓产品结构进行轻量化设计，各部分壁厚优化数据见表6，优化部位如图1所示。

表6 制动鼓的结构优化减重

材料	抗拉强度/MPa	提升率 (%)			
HT250	250				
RuT450	450	80			
序号	部位	原尺寸/mm	优化后尺寸/mm	减重率 (%)	备注
1	加强带宽度	45	33	-27%	
2	加强带厚度	30	18	-40%	
3	主要工作区域厚度	20	13	-35%	加强筋加强
4	法兰厚度	16	13	-19%	
5	重量	58.15	40.62	-30%	

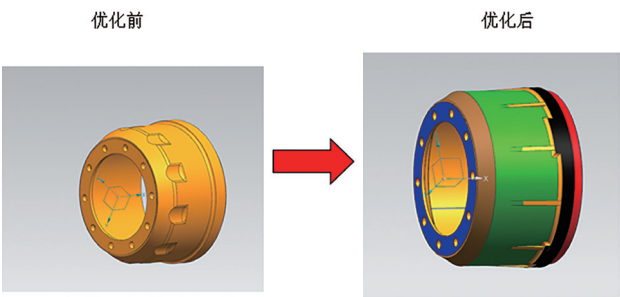


图1 制动鼓优化减重示意

2.CAE分析计算

根据制动鼓仅考虑力、综合工况、刚度工况进行建模，从计算结果看（见表7），材料和结构改进后的RuT450制动鼓先对比原来HT250制动鼓，质量减轻14.2kg，轻量化率提升24.27%。综合工况下安全系数从1.3提升至1.6，提高23.08%，刚度位移基本保持不变。

表7 制动鼓有限元分析及减重结果

工况			仅考虑力	综合工况	刚度工况
HT250	强度	应力/MPa	114.7	197	
		抗拉强度/MPa	250	250	
		安全系数	2.2	1.3	
	刚度	位移/mm			0.97
		质量/kg	58.5		
RuT450	强度	应力/MPa	163.7	279.7	
		抗拉强度/MPa	450	450	
		安全系数	2.7	1.6	
	刚度	位移/mm			0.95
		质量/kg	44.3		

蠕墨铸铁制动鼓制造

改进型制动鼓产品使用铁型覆砂工艺进行铸坯。铁型覆砂工艺可以改善铸件浇筑时的冷却条件，使铸件材料更致密，减少疏松等缺陷产生。铁水采用电路单炉熔炼，原铁水C含量3.85%~4.1%，Si含量2.3%~2.7%，S含量<0.02%，Cu含量0.3%~0.5%，Mn含量0.3%~0.5%，Cr含量<0.1%，P含量<0.05%，Sn含量0.02%~0.035%。蠕化处理采用常用的冲入法，采用进口蠕化剂和国产稀土蠕化剂混合装包蠕化，蠕化剂加入量根据铁水S含量在0.25%~0.4%进行调整，蠕化处理温度在1490~1530℃。从蠕化开始到浇注结束控制在8min完成，每包铁水浇注6箱，浇注结束后15~25min开箱。对产品本体样件解剖和加工验证，内部超声波检验，均未发现明显铸造缺陷。多件毛坯本体及试块进行检验，材料力学性能及金相满足设计要求（见表8）。

表8 制动鼓本体、试验性能检验结果

试样编号	硬度/HBW	蠕化率（%）	珠光体（%）	抗拉强度/MPa	延伸率（%）	屈服强度/MPa	备注
1	244	55	85	615	1.6	395	本体
2	229	55	80	645	1.8	390	本体
3	244	65	85	550	1.5	385	本体
4	244	60	85	540	1.4	395	本体
5	242	55	85	580	2	385	本体
6	240	60	85	580	2	395	试块
7	239	60	85	615	2	400	试块
8	240	65	85	580	2	395	试块

蠕墨铸铁制动鼓验证

1.台架试验

邀请第三方检测单位，参照《QC/T 239—2015商用车行车制动器技术要求及台架试验方法》及《QC/T 316—2017汽车行车制动器疲劳强度台架试验方法》标准，对优化后的蠕墨铸铁制动鼓进行刚性、制动性、磨损及疲劳试验，结果满足国家标准要求。

2.场地试验

联合重型货车主机厂，参照《GB12676—2014商用

车辆和挂车制动系统技术要求及试验方法》，对原车配套的灰铸铁制动鼓及优化后蠕墨铸铁制动鼓进行场地试验，结果满足标准要求。其中制动总效果由原来的78.5%提升至89.3%（提高13.77%），提升明显，在侧滑性能与制动稳定性方面也有改善。

3.小批投放市场验证

完成台架及差点试验后，在西南山区小批投放市场80件轻量化蠕墨铸铁制动鼓零件，并在6个月后进行回访，收集到63件产品的有效售后信息（见表9）。63件产品中，最长行驶里程8.8万km，最短行驶里程5.7万

km，无一开裂失效。

表9 制动鼓售后里程统计

行驶里程/ 万km	≤5	5~6	6~7	7~8	8~9	≥9	合计
数量/件	0	8	31	17	7	0	63
占比 (%)	0	12.70	49.21	26.98	11.11	0	100%

对行驶里程超过8万km的7件制动鼓进行拆检，7件制动鼓摩擦面均产生明显的龟裂，并有4件制动鼓，因制动蹄和刹车片的原因，产生长度不等异常磨损痕。将龟裂纹最深的1件制动鼓返厂进行解剖检测（见图2），龟裂纹深度约0.6mm，异常磨损痕迹深度1.2mm。

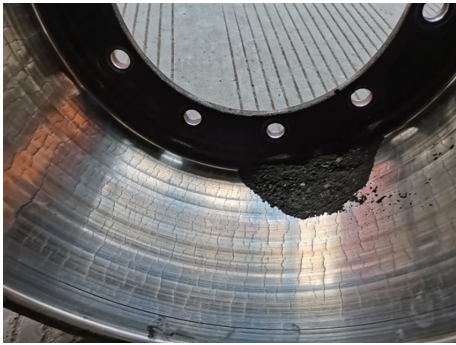


图2 售后制动鼓磨损照片（≥8万km）

结语

检查结果证明，重型货车用鼓式制动器在山区烦

繁制动，并使用淋水器的工况下产生足以引起铸铁相变的高温，而蠕墨铸铁制动鼓凭借自身优良的抗热疲劳性能和导热性能，能有效延缓裂纹产生及裂纹产生后的扩展，有效解决了重型货车用制动鼓在西南山区三包故障率异常问题。选择合理的蠕化率，既能满足耐磨性要求，又能利于铸件批量生产的质量控制和成本控制。同时，零件结构采取轻量化设计，既能实现整车减重，又能有效控制蠕墨铸铁总体制造成本，达到主机厂与客户的双赢。

参考文献：

[1] 张惟德，万仁芳，张忠仇，等.蠕墨铸铁在中国的研究、生产和应用[J].现代铸铁，1995（4）：30-33.
[2] 赵新武，杨救.50%~30%中低蠕化率铸铁的性能及应用[J].现代铸铁，2012（1）：19-24.
[3] 王有清，胡飞，施华武，等.蠕墨铸铁在气缸体铸件上的应用与发展[J].现代铸铁，2010（6）：23-26.
[4] 孙小撈，贾利晓，温广宇，等.石墨形态对铸铁热疲劳性能的影响[J].开发研究，2006，25（4）：13-15.
[5] 赵永启，赵远明.汽车制动鼓失效原因分析及防止措施[J].现代铸铁，2011（2）：65-70.
[6] 马讯，朱前进.蹄鼓式制动器瞬态温度场的仿真分析[J].机械设计与制造，2008（6）：71-73. **AUTO1950**

