

重载车制动鼓标准对比及金相组织差异探讨

谭晓郃¹, 周家福²

(1. 广东富华重工制造有限公司, 广东台山 529262; 2. 玉林市航宇铸造有限公司, 广西玉林 537034)

摘要: 比较国内外重载汽车制动鼓的标准, 总结了制动鼓失效机理。各标准中关于制动鼓金相组织中碳化物加磷共晶数量有差异, 如一厂商制动鼓中碳化物加磷共晶数量比其他标准高很多, 力学性能不但不差却较其他标准要高, 机械加工性无差别, 而且这在多年的市场应用中得到了实际检验。这与一般的认知相左, 故而提出问题, 进行探讨。

关键词: 载重汽车制动鼓标准; 失效机理; 碳化物+磷共晶; 力学性能; 机加工性; 疲劳性试验

制动鼓是鼓式制动器的摩擦偶件, 除应具有作为构件所需要的强度和刚度外, 还应有高而稳定的摩擦系数, 以及适当的耐磨性、耐热性、散热性和热容量等。重载车制动鼓多选用高强度灰铸铁或含Cr等的合金铸铁整体铸造, 这种制动鼓有结构简单、机械加工容易、耐磨、热容量大等优点。重载车制动鼓灰铸铁牌号一般是HT250、HT270、HT300, 我国重载车多用HT250。

制动鼓的铸造方法有树脂砂、V法铸造、铁型覆砂法和消失模铸造法等。制动鼓有整体铸造的和组合式两种。为防止制动鼓工作时受载变形, 常在制动鼓的外圆周部分铸出周向或轴向的加强筋, 这些加强筋用来加强刚度和增加散热(见图1)。可减低摩擦面温度、缩短制动器冷却时间, 使能量容量提高35%~40%。

我国现行灰铸铁重载车制动鼓标准为GB/T9439—2010《灰铸铁件》或生产厂家参考国外标准制定自己的标准, 或近似采用美标ASTM A159-83用于重型载重车。地方标准有DB13/T 2464—2017《汽车制动鼓通用技术要求》, 2019年10月1日实施的国家标准GB/T 37336—2019《汽车制动鼓》。

广东富华重工制造有限公司(以下简称F)配套使用的重型半挂车鼓式制动鼓数量多。在几家公司制动鼓验收检测中发现一个现象, 广西玉林市航宇铸造有限公司(以下简称HY)的制动鼓检测值: 碳化物+磷共晶为6%~12%(面积); 硬度HBW 220~250; 抗拉强度300~360 MPa。其他厂家检测值: 碳化物+磷共晶1%~5%; 硬度HB 190~220; 抗拉强度250~290 MPa。与通常理解的碳化物+磷共晶含量不能超过3%, 或5%的其他厂家标准相左, 力学性能较高, 实际机加工无异样, 在此列出部分制动鼓标准与HY制动鼓实测数据比较, 解释其合理性。

1 制动鼓国标及各企业制动鼓性能比较

表1-3分别列出了制动鼓化学成分标准及HY制动鼓实测值、制动鼓本体取样力学性能标准及HY制动鼓实测值、各制动鼓本体金相组织标准及HY制动鼓实测值。

2 高温相变机理及失效形式

2.1 制动鼓工作温度相变

灰铁制动鼓制动摩擦局部点过热, 最高温度可达850~900 ℃^[1]。工件本身传递热量较快, 运动风冷、雨冷, 甚至车主制作水箱浇水冷却使之产生下列相变:

①780~800 ℃, 共晶碳化物分解为石墨+铁素体; ②780~800 ℃, 珠光体+铁素体转变

作者简介:

谭晓郃(1963-), 男, 工程师, 主要从事金属材料产品检测、热处理工艺、产品失效分析工作。电话: 0750-5966819, E-mail: hexiaotan@126.com

中图分类号: U463.51
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977(2020)01-0078-06

收稿日期:

2019-06-13 收到初稿,
2019-07-17 收到修订稿。

为奥氏体；③800℃以上相变形成奥氏体，奥氏体在快速冷却时转变为内鼓面白亮区（石墨+马氏体+贝氏体）（白亮区是由于马氏体等硬度高，因摩擦而变白亮^[2]）；④500℃左右马氏体高温回火，转变成鼓面黑色区索氏体或屈氏体（黑色区域是由于索氏体或屈氏体硬度较高，摩擦高温使制动片部分熔化或软化附在制动鼓上^[2]）。

2.2 制动鼓失效形式

开裂、龟裂、掉底，磨损过大，非正常磨损五种形式（见图2）。按制动鼓本身强度及受力状态分析如下。

（1）本体铸件存在缺陷，强度差，在运输、加工

过程中，碰撞、跌落等非正常外力造成的开裂。

（2）本体力学性能不合格，在制动中受力掉底和没出现龟裂就形成早期破裂。

（3）本体力学性能合格，制动鼓在工作状态下，在法兰部位因摩擦作用产生扭力，这个力通过轮毂螺栓联接传递到车轮起到刹车制动的的作用。当扭转力超过材料所能承受的强度时，制动鼓便在法兰部位出现裂纹甚至掉底。另外装配不合理，会造成应力集中，应力频繁作用也会造成该部位破裂失效^[1]。

（4）虽本体强度较好，但频繁反复制动时，在切向的摩擦应力及热疲劳应力和相变应力相互作用下，组织相变局部引起强度降低，在制动面出现黑点、白

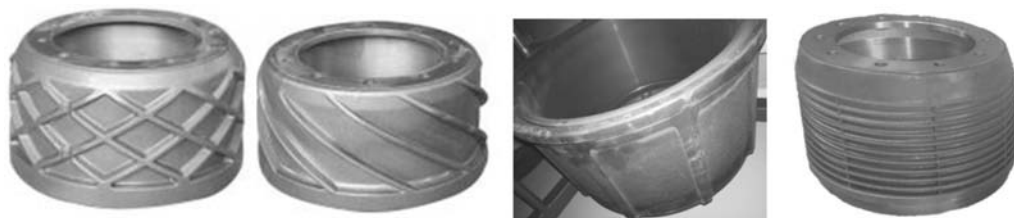


图1 几种形式带加强筋的制动鼓（最右侧为玉林市航宇铸造有限公司专利制动鼓）

Fig. 1 Several forms of brake drums with reinforcement ribs (on the far right is the patented brake drum by Yulin Aerospace Foundry Co., Ltd.)

表1 制动鼓化学成分标准要求及HY制动鼓实测值

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr/ Cu /Mo/Sn	制动鼓标准
HT250		1.75	0.98	0.059	0.050	0.57/0.61/0.01/-	HY制动鼓疲劳零件实测
HT250	3.2~3.5	1.6~2.0	0.6~1.0	<0.1	<0.1	0.3~0.6/0.4~0.8/-/-	HY标准
HT250低合金	≥3.40	1.3~1.9	0.7~1.1	≤0.06	≤0.12	加合金不做量化要求	F标准
HT250	3.0~3.6	1.4~2.0	0.5~0.9	≤0.12	≤0.10		DB13/T2464—2017
HT250	3.10~3.60	1.70~2.50	0.60~0.90	≤0.12	≤0.15		GB/T37336—2019
HT275	3.10~3.60	1.70~2.50	0.60~0.90	≤0.12	≤0.12		GB/T37336—2019
G3500b	≥3.40	1.30~1.80	0.60~0.90	≤0.15	≤0.12	合金元素按要求添加	ASTM A159-83 (2015)
EN-GJL-250	3.4~3.8	1.5~2.1	0.4~0.8	≤0.04	≤0.10	0.15~0.4/0.2~0.3/-/-	QP003-2013E

注：制动鼓成品碳含量非熔炼检测而检不准，不列出。

表2 制动鼓本体取样力学性能标准要求及HY制动鼓实测值

牌号	抗拉强度/MPa	本体硬度	弯曲载荷/扰度或其他	制动鼓标准
HT250	299	HBW 229		HY制动鼓疲劳零件实测值
HT250	290-380	200~255		HY标准
HT250	≥241	HBW 197~255		F标准
HT250	≥225	HBW 180~240		DB13/T2464—2017汽车制动鼓通用技术要求
HT250	≥225	HBW 180~255 (±25)		GB/T37336—2019 汽车制动鼓
HT275	≥250	HBW 200~275 (±25)		
G3500b	≥245	HBS 207~255	≥10 690 N/6.1 mm	ASTM A159-83汽车用灰铸铁件
EN-GJL-2503	≥240	HB 190~247	弹性模量103~118 kN/mm ² 仅供参考	QP003-2013E灰铸铁制动鼓

点及龟裂，最终裂纹延伸破裂。图2e制动鼓内摩擦面纵向轴向裂纹（在于其强度低于制动片施加的外在总应力^[2]）及龟裂（与热疲劳相关），周向摩擦台阶沟痕（硬度低或蹄铁坚硬，非正常磨损）；图2f内鼓面小龟裂磨损及大块黑色斑点，即失效初期状态。

（5）中国式的制动鼓失效模式：多为超载加高速行驶频繁紧急刹车，摩擦高温相变，以及制动浇水冷却发生淬火、回火组织转变，在抗弯应力、热应力、抗机械制动力作用下，而非非常的开裂失效。

3 金相组织对力学性能和加工性的影响

3.1 制动鼓中的碳化物、磷共晶数量与机加工性

3.1.1 碳化物

碳在铸件中主要以石墨和碳化物（碳化物通常指金属或非金属与碳组成的二元化合物，分子式是 M_xC_x ，常见的碳化物最多的是 $Cr_{xx}C_x$ 系列）两种形式存在。碳化物硬度大于HV 900（ M_3C ，HV 1 000~1 230； M_7C_3 ，HV 1 300~1 800， $M_{23}C_6$ ，HV 1 140）。

表3 制动鼓本体金相组织标准要求及HY制动鼓实测值

Table 3 Metallographic structure requirements of brake drum test specimen cut from casting and measured value of HY brake drum

评定标准	石墨分布形状（级）	石墨长度	珠光体数量	铁素体、碳化物、磷共晶等数量	制动鼓标准
	A型≥95%，少量B	3级	片状>98%	碳化物1%+磷共晶数量共10%	HY制动鼓疲劳件实测值
	A片状≥80% B型，D型，E型等分布不大于20%	3-5级	片状P≥95% 片状P≥95%	5%≤碳化物+磷共晶数量≤15%	HY标准
GB/T7216—2009 灰铸铁金相检验	A片状≥80% B型，D型，E型等分布不大于20%	3-5级	细片状P≥95% 片状P≥95% 薄片状P≥95%	铁素体+碳化物+磷共晶≤5%，不允许存在三元磷共晶和网状碳化物	F标准
	A型≥90%	3-5级	细片状P≥95%	碳化物1-2级（1%~3%），磷共晶1-2级（1%~2%）	DB13/T2464—2017
	A+B型≥85%（其中B型≤10%）D+E型≤5%	3-6级		F数量<5%，碳化物+磷共晶<3%，不允许有网状磷共晶	GB/T37336—2019
ASTM A247—17	石墨形态VII，A型分布	3-5级		F或碳化物≤5%	ASTM A159—83 G3500b
ASTM E 247:2006	石墨形态VII，A型分布	2-5级		游离铁素体+碳化物≤5%	欧洲VALX公QP003—2013E



（a）掉底/掉顶/脱底，法兰盘圆角周向开裂或脱落



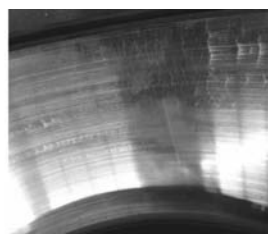
（b）法兰盘与圆鼓面交界处开裂



（c）鼓面纵向开裂及掉底



（d）为上述综合



（e）内鼓面纵向轴向裂纹及龟裂



（f）内鼓面小龟裂磨损黑块斑点

图2 F公司制动鼓失效的几种状态

Fig. 2 Several cases of brake drum failure in F company

灰铸铁中碳化物的形式：①自由或称为游离渗碳体 Fe_3C （硬度HB 800）是指游离于珠光体（共析组织）或莱氏体（共晶组织）等机械混合物（组织）之外的而作为一种独立相存在的渗碳体，如先共析渗碳体、初生渗碳体等。②二次碳化物是指从奥氏体中析出的碳化物，一般是长条状、沿晶界分布的。

3.1.2 磷共晶

磷共晶体一般都分布在晶粒边界上，有孤岛状、均匀分布、断续和连续网状分布等。磷共晶本身硬而脆。在铸铁组织中呈孤立、细小、均匀分布时，可以提高铸铁件的耐磨性。反之，若以粗大连续网状分布时，将降低铸件的强度，增加铸件的脆性。磷共晶硬度为HV 500~700（二元磷共晶为HV 400，三元磷共晶为HV 600）。500倍以上观察各类磷共晶体：①二元磷共晶为 Fe_3P （显微硬度HV0.021 300~1 480）+A组成^[3]，室温下磷化铁基体上均匀分布有白色的点状铁素体或黑色的珠光体粒子；②三元磷共晶（也称为斯氏体Steadite），为 Fe_2P （显微硬度HV0.02 800~1 030）+ Fe_3C +A组成^[3]，室温下磷化铁基体上除了分布有点状铁素体外还有白色的细条状碳化物；③二元磷共晶复合物：二元磷共晶中出现条状碳化物，微观上将共晶体一分为二；④三元磷共晶复合物：三元磷共晶中出现条状碳化物，微观上将共晶体一分为二。

3.1.3 加工性能

一般认为，当铸铁中含3%~5%的游离碳化物时，尽管硬度增加不明显，但其力学性能却明显下降，加工性能也急剧恶化，因而需控制游离碳化物数量3%。实际机加工中，微小的、分布在晶界处的硬质点，微小的碳化物、磷共晶以及硫化锰、磷化钛、氮化钛颗粒硬度都很高，刀具切削时，因为不是强行从硬质点过去的，所以这些微小硬质点从材料的基体上剥落下来的阻力并不很大，反而有利。犹如犁地沙粒被翻出来，沙粒不会造成阻力，与大石头挡住不一样。刀具

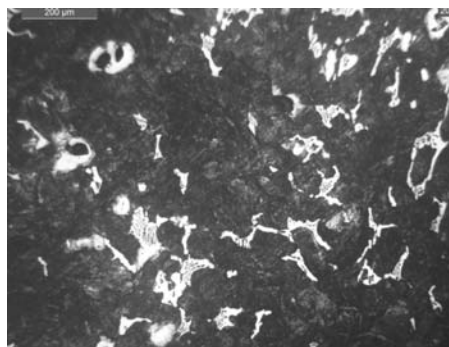
的磨损，主要是断屑不好，温度升高引起的。国外铸件切削性好，但晶间碳化物数量反而多于国产铸件，减少微小碳化物硬质点，不是改善断屑性而是提高韧性^[4]。切削性改善以改善石墨形态为主，随流孕育很重要，要适当增加微小硬质点的数量，对断屑有益。磷共晶与碳化物所起作用应不同，增加某一数量时可能有益机加工。

灰铁组织的均匀性、成分、碳化物量及分布、合金元素含量、时效处理都对机加工性有影响，关键是石墨起切断作用^[4]和对刀具润滑减磨，灰铸铁具有较低的缺口敏感性，因而有良好的切削加工性。

制动鼓新国标中规定碳化物+磷共晶数量要小于3%，与F公司标准中铁素体+碳化物+磷共晶数量小于5%有较小差异，与HY标准碳化物+磷共晶数量在5%~15%有较大差异。HY制动鼓疲劳件试验后，检测试样的碳化物+磷共晶数量（图3a）为10%（碳化物1%较少，主要是磷共晶多），显然偏高，其他批次检测值也多在6%~12%左右。与其他公司碳化物+磷共晶未超标的制动鼓比较，使用相同车刀，在机加工时未出现打刀或加工难现象，粗糙度等方面未见有特殊的异样。由于铸铁机加工还没有统一的标准评定方法，在此实际加工比较便捷直观。

3.2 制动鼓中的碳化物、磷共晶数量与力学性能

采用高碳当量，可在灰铸铁的显微组织中形成大量的石墨，使其具备较好的热传导性和减震性，却难以获得高的强度，其抗拉强度小于200 MPa，容易使微小裂纹扩散，抗热疲劳能力差。制动鼓的抗拉强度和硬度应保证在合理的范围（文献[5]表明，较合适的制动鼓铸件其抗拉强度为250~300 MPa，布氏硬度为HB 190~210），硬度低不耐磨，适当增加灰铸铁中珠光体含量，形成碳化物以提高灰铸铁的力学性能，使其抗拉强度达到300 MPa或以上，以增强对裂纹的抗力及提



(a) 近摩擦面（碳化物1%）+二元磷共晶合计数量10%



(b) 二元磷共晶

图3 HY制动鼓中碳化物和磷共晶照片

Fig. 3 Microstructure showing carbide and phosphorus eutectic in HY Brake Drum

高耐磨性。

在灰铸铁中加入合金元素是为提高铸件强度，细化石墨和共晶团；增加机体中珠光体含量，并使珠光体片间距细化，提高渗碳体的热稳定性，形成碳化物或含有合金元素的磷共晶等硬化相。各元素相互作用，以及碳化物增加，机理复杂。因此，多采用适当增加合金元素（如铬或铜）进行低合金化。合金元素过多，会使石墨细小体积分数减少，对制动鼓寿命不利。细化珠光体数量提高强度，而加入贵重金属镍、钼，增加成本，较少采用。

一般认为，碳化物+磷共晶数量多，会割裂基体（网状会割裂），降低强度，但增加硬度，其实割裂基体的是片状石墨，碳化物包括磷共晶较多，呈孤立、细小、均匀分布时，也就是珠光体基体上硬质点增加了，其基体硬度有一定增加。抗拉强度的提高是由于珠光体基体硬质点使得珠光体（非细化珠光体作用只是表现在韧性上）变形滑移错位断裂阻力增加。磷共晶数量10%（面积百分数）以下对性能没有影响，10%以上时会形成类似蜘蛛网状，对晶体形成切割作用，使其抗拉强度下降，而硬度会提高。

HY制动鼓，采用铬、铜低合金化，消失模铸造，一般其硬度为HBW 220~250，抗拉强度为300~360 MPa，磷共晶起了一定正向作用。较之国标（尤其是抗拉强度）处于较高水准，相当于HT300强度或更高。

理论上是1%的磷含量，在二元系铁合金中能生成10%磷共晶，实际统计分析中磷含量和磷共晶面积百分比是1:20的关系^[6]。按0.06%磷含量，计算其平均为1.2%磷共晶。可是一般常识认为含磷量小于0.06%，其磷共晶数量一般不超过4%。HY制动鼓标准中磷含量小于0.1%，实际控制在≤0.06%。本例疲劳试验件磷含量检测为0.059%，但实测图片显示磷共晶数量9%。其中一个原因在于取样为内近摩擦面位置磷共晶较多，而壁体中间位置磷共晶数量为4%~6%。平均有所降低，

可能还有磷的强烈正偏析作用或其他的原因使磷共晶数量较常规偏高。

4 HY制动鼓疲劳测试

制动鼓H32-3602S16，采用HY公司专利制造，按轻量化要求为减重版，相比较非专利型号产品减重10 kg。在美制LINK 1[#]制动器惯性试验台上，按FMVSS121—2006《空气制动系统》性能试验开始前和完成后，分别测量了制动鼓的形变；根据SAE J2686标准进行制动鼓疲劳测试（额定轴荷/试验轴载：13.018 32 t/13.075 t；要求惯量/试验惯量：1814.65 kg·m²/1822.55 kg·m²，滚动半径0.528 m），进行至A部分第33次循环60 mph制动时，制动鼓疲劳测试及破裂失效见图4。

参考上述制动鼓失效机理，此制动鼓失效属于在切向的摩擦应力及热疲劳应力和相变应力相互作用下，组织相变局部引起强度降低，在制动面出现龟裂，最终裂纹延伸成纵向破裂。

虽然HY制动鼓按美国SAE J2686标准试验疲劳未达50次大循环，但F公司在此之前尚没有采用13 t力做过此类试验（为引进HY制动鼓专利结构而单独试验一例，2017年4月疲劳测试）。只能对出口美国制动鼓（9 t，10.5 t等，磷共晶未超F标准，做过正常结构以及其他加强筋或复合结构产品的试验，其大循环均未超过20次）进行间接比较，有显著进步。HY制动鼓8条环形加强筋起到增强刚度及增大散热面积，这种专利结构起很大作用。但其制动鼓本体强度高，表面磷共晶数量多，耐摩擦性好，壁体中部相对较少，对韧性有益。

HY制动鼓已供东风柳州汽车厂等用户十多年，并未有机加工不良现象，安装使用反馈良好，市场用户认可。但与一般常识相左的现象，尝试解释，希望有关专家参与讨论。



(a) 台架试验

(b) 纵向开裂

图4 HY公司制动鼓疲劳测试及失效照片

Fig. 4 Fatigue test and failure photograph of brake drum produced by HY Company

5 结语

文章总结了制动鼓失效现象和机理,对比了国内外载重汽车制动鼓标准,除制动鼓金相组织中碳化物+磷共晶数量标准差异较大外,其他各标准值范围没有疑义。HY制动鼓碳化物+磷共晶数量标准5%~15%,超过其他标准,但其力学性能较高,机加工性能也未变差。

参考文献:

- [1] 赵永启,赵远明.汽车制动鼓失效原因分析及防治措施[J].现代铸铁增刊(汽车铸造业),2011(2):66.
- [2] 苏勇,叶天汉,陈明庆,等.汽车制动鼓的失效分析[J].铸造技术,2004(5):350-352.
- [3] 刘森.铸铁磷共晶中的 Fe_2P [J].金属学报,1981(1):108-109.
- [4] 马伟.浅谈灰铸铁切削性能及其影响刀具寿命的若干因素[J].内燃机与动力装置,2010(4):65-68.
- [5] 陈翌庆,苏勇,黄斌,等.提高汽车鼓动耐磨性的研究[J].热加工工艺,2000(3):28-29.
- [6] 李德珊.铸铁中的磷与磷共晶含量的分析[J].铸造,1991(7):11-14.

Standard Comparison and Metallographic Structure Difference of Brake Drum for Heavy Haul Vehicles

TAN Xiao-he¹, ZHOU Jia-fu²

(1. Guangdong Fuwa Heavy Industry Manufacturing Co., Ltd., Taishan 529262, Guangdong, China; 2. Yulin Hangyu Foundry Co., Ltd., Yulin 537034, Guangxi, China)

Abstract:

Some standards of brake drum for heavy-duty vehicles at home and abroad were compared, and the failure mechanism of brake drum is summarized. The number of carbide and phosphorus eutectic in the metallographic structure of brake drum is different in each standard. For example, the number of carbide and phosphorus eutectic in brake drum produced by one manufacturer is much higher than that of other standards, the mechanical properties are not bad but higher than those of other standards, and there is no difference in the machinability, which has been verified in many years of market applications. This is contrary to the general cognition. Therefore, these questions are raised in the article to discuss.

Key words:

standard for brake drum of truck; failure mechanism; carbide and phosphorus eutectic; mechanical properties; machinability; fatigue test