

汽车制动盘材料检测要点

阮建刚

(上汽大众汽车有限公司, 上海 201805)

摘要: 汽车制动盘在化学成分上具有高碳特点, 在结构上具有盘式特征。本文论述了对制动盘化学成分、硬度、金相组织、楔压强度进行检测时的要点, 避免检测结果出现误差甚至错误, 提高测量精度、避免争议。

关键词: 制动盘; 化学成分; 硬度; 金相组织; 楔压强度

汽车制动盘是车辆制动系统中关键的零部件之一, 汽车在制动过程中, 通过摩擦片与制动盘的干摩擦, 从而达到减速制动的目的。根据制动盘的服役条件, 要求制动盘材料具有良好的导热性、抗咬合的能力、良好的磨擦特性、适宜的强度、适当的耐磨性、耐热性等。与铸钢、球墨铸铁等材料相比, 灰铸铁不仅能较好地满足上述要求, 而且经济实惠。普通轿车制动盘均采用灰铸铁材料, 牌号接近或类似于国标的HT150~HT250, 欧标的EN-GJL-150~EN-GJL-250, 日标的FC150~FC250。汽车制动盘的检测项目较多, 有金属材料、几何尺寸、表面防护等, 此处仅讨论灰铸铁制动盘金属材料的检测。

1 化学成分

化学成分若控制不严, 则零件的质量指标、使用性能不稳定, 甚至会质量不合格而报废。传统的化验方法, 碳元素常用气体容量法, 硫元素常用燃烧碘量法, 锰、铬等元素用分光光度法等。这些方法检测速度慢, 适合于炉后分析, 无法适应现代高速、高质量铸件的生产。目前很多铸造公司用火花放电原子发射光谱法测定制动盘中的各种元素, 因其一次测定的元素多, 速度快, 运行成本低, 故有着广泛的应用。很多制动盘具有高碳的特点, 高碳易引起光谱试样白口化不充分, 进而导致成分检测结果不稳定。为保证试样充分白口化, 光谱试样模具的冷却能力要强, 可选用导热性良好的铜质材料, 铜质材料也不易生锈, 可防止铁液浇入模具内时发生飞溅; 光谱试样不要设计得太厚 ($\Phi 30$ mm, 厚6 mm的薄圆盘试样较合适), 太厚的试样急冷效果差且传递给光谱试样模具的热量多, 模具温度升高后其激冷能力也降低; 多套光谱试样模具轮流使用可降低模具温度, 有利于白口化。另外还要注意零件规范中的硅是指成品铸件的终硅量, 硅量控制时, 光谱试样没有包含的随流孕育增硅量, 检测时应考虑进去。零件对碳当量或共晶度有要求时, 须用碳当量公式 $CE=C\%+(Si\%+P\%)/3$ 或共晶度公式 $Sc=C/(4.3-1/3(Si+P))$ 加以计算对比, 不要因为碳、硅、磷在各自的范围内而忽略了这2个指标的控制。

虽然各公司对制动盘的主要元素都有相应标准, 但有些公司的标准存在不足, 所规定的化学元素范围太宽 (例如 $C\geq 3.7\%$, $Si\geq 1.6\%$, $Cu\leq 0.6\%$, $Cr\leq 0.2\%$ 等), 没有对其他易混入或加入的常见合金元素加以规范, 这都会对制动盘的硬度、机加工性能、使用性能等产生影响。建议各铸造厂根据本厂实际, 制定出合理的厂内控制标准值, 确保铸件质量稳定, 让客户满意。

作者简介:

阮建刚 (1971-), 男, 工程师, 学士, 主要研究方向为汽车金属零件的检测与分析。电话: 13621695516, E-mail: ruanjiangang@126.com

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

11-1441-06

收稿日期:

2023-03-20 收到初稿,

2023-07-04 收到修订稿。

2 硬度

因为灰铸铁基体中存在石墨，石墨硬度很低，相当于基体上分布着很多孔洞，一般用压痕较大的布氏硬度方法检测制动盘硬度，避免用其他硬度换算成布氏硬度，以免引起误差。测试前要养成用硬度标块校验的习惯。工作中曾发现某一国产品牌硬度计标准试块存在明显误差，建议采购进口或多家品牌硬度标块以供对比。

制动盘布氏硬度测定位置有摩擦面、制动面。硬度检测部位应严格按照产品图纸和标准进行，对于没有明确的，供需双方应当协商确定，以免由于测定位置不同、方法不同而造成结果不一致，产生争议。从制动盘的工作条件考虑，测定机加工后的摩擦表面硬度较合理。如果是通风式制动盘，测量点最好选在加强筋上方的摩擦面上（见图1），加强筋为硬度测试加载提供稳定的支撑，易获得准确、稳定的测量值。表面硬度一般是指机加工后的表面硬度而非铸态零件的表面硬度（因为铸件表面冷却较快，铸态零件会比机加工后的表面硬度略高）。也有公司测摩擦面的剖切面硬度，这可能更多地是因为习惯或从控制磨擦面的整个强度角度考虑。若测定剖面硬度（见图2），必须满足GB/T231.1—2018中“任一压痕中心距试样边缘的距离至少为压痕平均直径的2.5倍”的规定，选取直

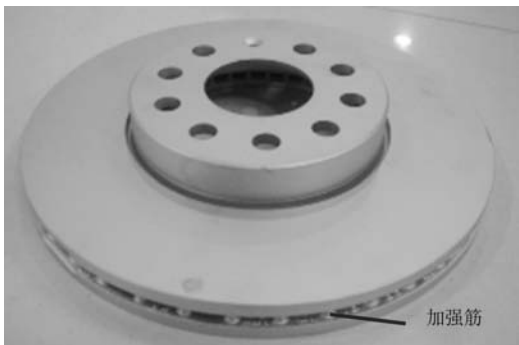


图1 通风型制动盘
Fig. 1 Ventilated brake disk

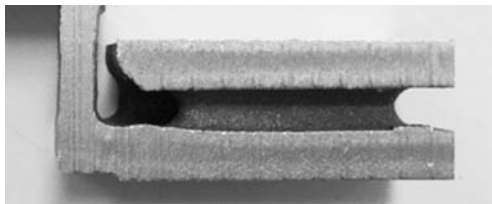


图2 制动盘剖切面
Fig. 2 Section of brake disc

径大小合适的钢球及加载力，防止压痕离边缘距离太少造成硬度值偏低。打硬度的上下两个面应平行（见图3），有助于确保测试精度。对目镜高度可调的布氏硬度机，目镜聚焦位置的准确性及合适的亮度是准确读数的关键。用布氏压痕自动测量仪读数，读数具有高可靠性、高重复性。制动盘上不同区域硬度会有差异，影响这种差异的主要因素是因内浇口开设位置引起铸件不同区域冷速不一，以及浇冒口对不同区域补缩效果、热影响不同而引起。所以测试时应注意硬度变化规律与浇冒口位置的关系，以指导生产控制。

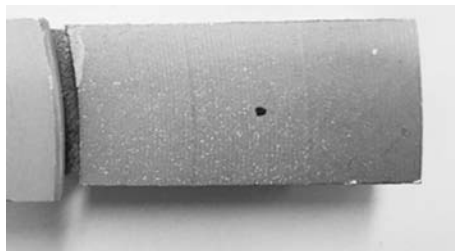


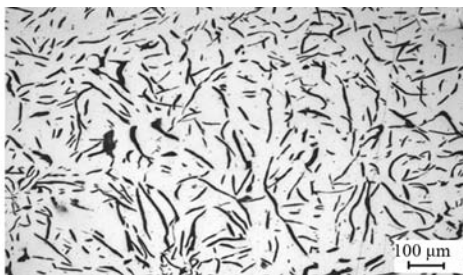
图3 剖切面上、下面
Fig. 3 Upper and lower parts of section

3 金相组织

用金相显微镜检测金属的基体组织及石墨形态，特别要注意抛光技巧，防止石墨拖曳、脱落、或抛光时间不够，影响对石墨大小、形态的准确判断。图4a为抛光时间不够，图4b为同一试样延长抛光时间后的结果。



(a) 抛光时间短



(b) 抛光时间长

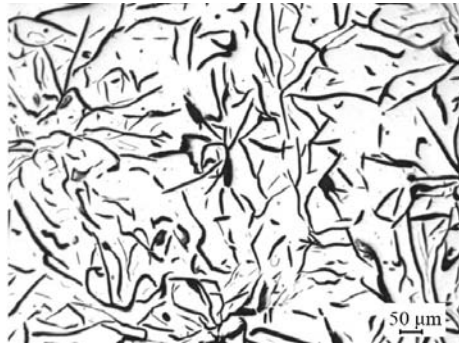
图4 不同抛光时间的石墨
Fig. 4 Graphite with different polishing time

金相组织的检测主要包括石墨形态及珠光体数量，一般放大到100倍即可。对失效零件或组织有异常时，应该放大到更大倍数进行观察、判断。制动盘石墨以A型石墨为主，基体以珠光体为主，不同公司不同零件对所允许的其他石墨形态及铁素体数量、碳化物数量等有着不同的规定，有些公司规定不允许有C形石墨。现对金相组织检测中常见的两个争议点加以讨论。

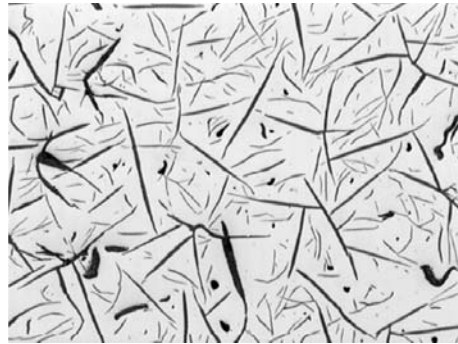
3.1 粗大石墨是否属 C 型石墨

图5a中的粗大石墨，是否属C型石墨。制动盘的碳量较高引起的粗大石墨是否属C型的争论。ISO 945-1 2008中关于C型石墨的描述是“较大的石墨片聚集，周围是较小的、随机定向的石墨片（共晶石墨）”并注

明“过共晶铸铁中存在”，见图5b。GB/T7216—2009《灰铸铁金相检验》中关于C型石墨的描述是“初生的粗大直片石墨”。由此可见，C型石墨的特点为：①在过共晶铁液中形成的初生石墨，而非亚共晶中产生；②粗大直片，而非弯曲状。图5a中虽然个别石墨比较粗大，但不平直，所以是共晶石墨而不是C型石墨。类似于图5a的粗大石墨在高碳制动盘中容易出现，虽然不是C型石墨，但属不理想石墨，所以应加以控制、避免。产生这种粗大石墨的可能原因有：①生铁的遗传性或生铁加入比例太高；②增碳剂溶解性较差、加入量较大、增碳后保温时间太短。为避免供需双方对C型石墨的理解差异，供需双方应作充分沟通，对金相组织的要求最好用金相图片加文字的方式来描述，并可列举合格与不合格的金相照片加以举例说明。



(a) 共晶石墨未腐蚀



(b) C型石墨未腐蚀 (ISO 945-2005)

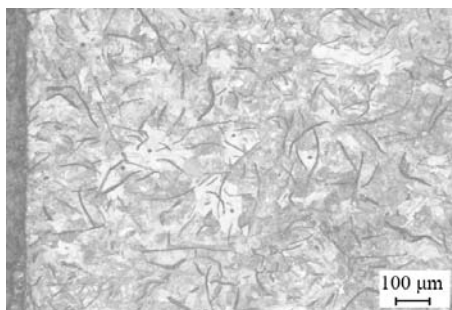
图5 粗大石墨与C型石墨

Fig. 5 Coarse graphite and C-type graphite

3.2 是珠光体还是铁素体

图6a中浅灰色区域是珠光体还是铁素体。珠光体数量的判断均在放大100倍条件下进行，经4%硝酸酒精腐蚀后得到图6a，为更仔细地观察浅灰区，对浅灰区放大到500倍（图6b），可在图上清晰地分辨出浅灰色区域内也呈片状组织，是典型的珠光体组织。再用

显微硬度计测定浅灰色区与黑区的硬度，硬度分别为（HV 0.05）306，274，浅灰色区的硬度比黑区珠光体略高，都在文献[1]介绍的细片珠光体（HV 300~350）及粗片珠光体（HV 250~300）硬度范围内。所以浅灰色区是珠光体而不是铁素体。



(a) 4%硝酸酒精腐蚀



(b) 浅灰色区放大

图6 4%硝酸酒精腐蚀后的珠光体

Fig. 6 Pearlite corroded by 4% nitrate alcohol

4 楔压强度

铸造行业中，常把灰铸件的抗拉强度作为材料力学性能的重要指标。对于一些非重要零件，或零件本身较小无法在本体上取样时，常用铸造试块（单铸试块、并排试块和附铸试块）加工成抗拉强度试样（图7a），再测试强度。虽然铸造试块与零件的化学成分相同，冷却条件相似，但受铸铁“断面敏感性”的影响，铸造试块与零件本体试棒在性能上还会有差异，所以铸造试块无法真实地反映零件的实际强度。制动盘属薄壁件，圆形的抗拉强度试样的制备较困难、费时，用来源于制动盘本体取样的楔压试块（见图7b）的楔压强度来评价制动盘的力学性能，可消除这种差异，具有重要意义。楔压试块在制动盘本体上易获取、加工，灰铸铁的楔压强度与抗拉强度之间存在显著的线性关系。常用楔压强度与抗拉强度的换算关系公式为：

$$R_m = 1.86 \times R_k - 64 \quad (1)$$

式中： R_m 为抗拉强度； R_k 为楔压强度；试样厚6 mm。GB/T 38440—2019《铸铁楔压强度试验方法》附录A中还列出了楔压强度与抗拉强度换算的其他关系公式。要准确测得楔压强度，楔压试块的尺寸精度、压刀的材料及尺寸都是关键。楔压试块宽、厚、长尺寸分别为（20 mm ± 0.1 mm）、（6 mm ± 0.1 mm）、 $L \geq 20$ mm（ L 根据每个公司使用的夹具而定），试样表面粗糙度 $Ra \leq 1.6$ 。上、下压刀刀刃圆角为0.15~0.20 mm，刀具两相邻面的夹角为 $90^\circ \pm 30'$ ，刀具材料为合金工具钢，热处理后的硬度需达到HV 740 ± 40（HRC 62 ± 2）。长期使用刀具磨损后刃圆角变大，会导致测试值偏大。楔压强度的测定是在楔压装置上通过上、下压刀加载力而截断楔压试块（见图8），楔压力与截断面积的比值即为楔压强度，楔压强度的单位与抗拉强度相同，均为MPa。进一步比较发现，用于计算楔压强度的截断面积约=20 × 6=120 mm²，用于计算抗拉强度的拉断面积约（以平行段直径 $\Phi 5$ 为例）=3.14 × 2.5 × 2.5 ≈ 20 mm²，楔压强度的截断面积是圆形试棒的6倍，所以楔压强度更能代表整个制动盘的强度性能，其测试数值波动比较小，楔压强度的测试更具意义。同时，应注意到GB/T 38440—2019，8.1条款中，最大断裂力 F_m 的单位应为牛（N），不是标准中所述千牛（kN）。



(a) 抗拉强度用圆形试样

(b) 楔压试块

图7 抗拉强度用圆形试样及楔压试块

Fig. 7 Round specimen for tensile strength and wedge compression test block

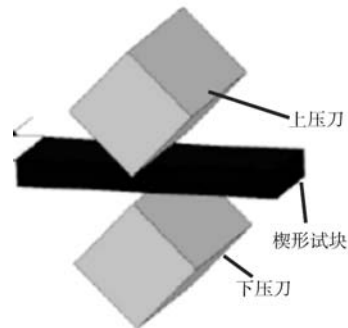


图8 楔压示意图

Fig. 8 Schematic diagram of wedge pressure

实际上不同公司由于制动盘所用的原材料、生产工艺等并不相同，所以楔压强度与抗拉强度之间的线性关系会有些差异，可通过一系列试验数据，除掉一些奇异点，用EXCEL线性回归法来求出。若楔压强度与抗拉强度数值之间的离散度较大，可能的原因有两类：第一类是把不同冶炼条件（如不同配料方案，不同合金元素加入量，不同孕育剂种类及加入量等）的数据汇集在一起拟合了；第二类是因为生产过程中某些参数（铁液温度波动、开箱温度等）波动。从提高精度方面考虑，可在相同的冶炼条件下拟合计算出关系式，不同的关系式在相应的冶金条件下应用。

需要说明，楔压强度与抗拉强度的关系式只适用于未装车使用过的制动盘，不适用于装车使用后的制动盘。现取未装车使用过的制动盘（图1）、热疲劳试验后的制动盘（图9）各1只，用楔压强度换算得到的理论抗拉强度与圆形试样实测强度之差见表1、表2，表中理论强度由式（1）得出。



图9 热疲劳试验后的制动盘

Fig. 9 The disk after thermal fatigue testing

对比表1、表2中最后一列数据，表2中理论抗拉强度与实测强度之间的差值明显比表1中的数值大得多。也就是说，对于热疲劳试验后的制动盘，用楔压强度换算式（1）得到的理论强度比实测强度要高很多。所以，热疲劳试验后制动盘的楔压强度并不能代表真实

表1 未装车使用过的制动盘楔压强度
Table 1 Wedge pressure strength of brake disc used before loading

编号	实测楔压强度/MPa	用楔压强度换算得到的理论抗拉强度/MPa	Φ5圆形试样实测强度/MPa	差值(理论抗拉强度-实测强度)/MPa
1 [#]	138	193	185	8
2 [#]	150	215	195	20
3 [#]	145	206	190	16
4 [#]	145	206	188	18

表2 热疲劳试验后的制动盘楔压强度
Table 2 Wedge compression strength of brake disc after thermal fatigue test

编号	实测楔压强度/MPa	用楔压强度换算得到的理论抗拉强度/MPa	Φ5圆形试样实测强度/MPa	差值(理论抗拉强度-实测强度)/MPa
1 [#]	178	267	174	93
2 [#]	177	265	172	93
3 [#]	172	256	199	57

的材料抗拉强度。

在检测制动盘楔压强度过程中,曾发现某供应商楔压强度测定值总是高于笔者测定值。为找到原因,与某供应商作了对比试验。在同一个制动盘加工出12个楔压试样,某供应商做6个,大众实验室做6个,楔压强度值结果见表3。

表3 楔压强度对比
Table 3 Wedge compression strength comparison

试样编号	大众公司楔压强度/MPa	某供应商楔压强度(用低硬度楔块刀)/MPa	差值/MPa
1 [#]	151	157	6
2 [#]	152	154	2
3 [#]	160	169	9
4 [#]	138	153	15
5 [#]	146	163	17
6 [#]	142	160	18
平均值	148	159	11

表3可见,某供应商的楔压强度平均值高了11 MPa。考虑到楔压强度与楔块刀材料硬度及楔块刀刃圆角半径关系密切,对其进行了测试。某供应商楔块刀刃圆角半径为R0.186 mm(见图10),符合标准^[2]规定的0.15~0.2 mm。楔块刀材料硬度为HRC 45,低于标准规定的HRC 60~64。

对该硬度低的楔块刀的化学成分及金相作了检测,显示该楔块刀的材料为热作模具钢。GB/T 1299—2000《合金工具钢》标准中有“5.4.3热作模具钢不检验试样

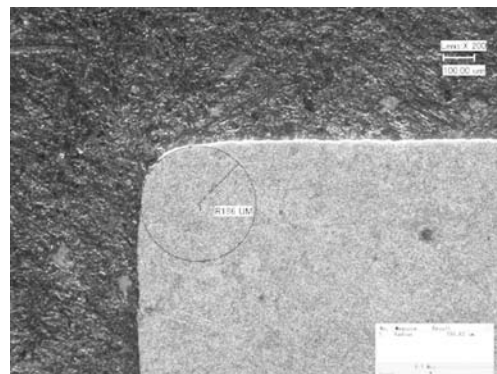


图10 楔块刀刃圆角(体式显微镜)
Fig. 10 Rounded edge of wedge (stereomicroscope)

淬火硬度”的描述,该标准中“表3”对热作模具钢的硬度也未作规定,热作模具钢侧重于高温保持其硬度的能力(钢的红硬性),可见标准中对材料的淬火硬度没有控制,不宜用于楔块刀材料。

重新选用合金工具钢中的冷作模具钢制作楔块刀,热处理后硬度实测为HRC 62,用同一制动盘做楔压强度对比,结果见表4。

表4可知,两者数值接近。可见,楔压刀硬度偏低是造成楔压强度偏高的原因,追根溯源是因为该供应商在采购楔压刀时,没有对材料硬度进行验收。

GB/T 38440—2019《铸钢楔压强度试验方法》指明该方法适用于灰铸铁材料以及牌号为RuT400~RuT500的蠕墨铸铁材料的楔压强度试验,德国楔压强度相关标准《VDG P 340—2009》中还提到了楔压试验后,楔压刀刃在试块上的压痕不应超过0.5 mm,作为是否适用楔压试验的参考值。

表4 更换楔块刀后的楔压强度对比
Table 4 Wedge compression strength comparison after replacing wedge cutter

试样 编号	大众公司 楔压强度/MPa	某供应商楔压强度 (用低硬度楔块刀)/MPa
1 [#]	150	147
2 [#]	149	144
3 [#]	146	146
4 [#]	150	149
5 [#]	153	154
6 [#]	148	149
7 [#]	147	147
8 [#]	152	150
平均值	149	148

5 结论

(1) 材料检测员是零件质量好坏的“判官”，试验结果决定了零件是合格还是不合格，必须保证检测结果的准确性。检测前要仔细阅读相关图纸、材料标准、测试标准，理解公式适用的范围，熟悉检测设备。

(2) 对于使用过、反复受热冷却后的制动盘，不能使用楔压强换算成理论抗拉强度的公式。建议在相关标准（例如：GB/T 9439—2023《灰铸铁件》，GB/T 38440—2019《铸铁楔压强度试验方法》等）楔压强度与抗拉强度换算公式位置处加入该说明。

(3) 在检测过程中，要多思考、多总结，发现问题要找出原因，不断提高检测技能，确保试验数据的可靠性、准确性、权威性。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 第1卷 铸铁 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
[2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 铸铁楔压强度试验方法: GB/T 38440—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

Testing Key Points of Automotive Brake Disc Material

RUAN Jian-gang

(SAIC Volkswagen Automotive Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

Abstract:

The automotive brake disc has high carbon characteristics in chemical composition and the brake disc has disc characteristics in structure. we discuss the brake's testing methods, such as chemical composition, hardness, microstructure, wedge compressive strength. It can avoid errors or even wrongs in the test results, improve the measurement accuracy and avoid disputes.

Key words:

brake disk; chemical composition; hardness; microstructure; wedge compressive strength