● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.027

乘用车抗扭拉杆断裂失效分析

胡跃均,陈麒琳,李文炎,张海均
(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院,广东 广州 511400)

摘　要:某乘用车抗扭拉杆由 ADC3 合金压铸成型,售后出现断裂,断裂位置和形式相同。为找出断裂原因,对断裂的抗扭拉杆进行了断口分析、化学成分分析和显微组织分析,随后对同批次的抗扭拉杆进行了力学性能分析检查,结果表明,抗扭拉杆断裂属脆性断裂,裂纹起源于拉杆支架中部应力槽附近,抗扭拉杆成分满足标准要求,显微组织正常。但同批次抗扭拉杆 ADC3 合金真实力学性能低于设计要求,综合分析表明,抗扭拉杆断裂的根本原因是材料真实强度不足,次要原因是内部存在铸造缺陷。综合考虑多方因素后,在不改变抗扭拉杆结构和设计条件下,选用 ZL111 合金重力铸造成型制造抗扭拉杆,制造出的抗扭拉杆满足实际要求,取得了较好的效果。

关键词:抗扭拉杆;应力槽;脆性断裂;铸造缺陷;强度
中图分类号:TG115　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1340-04

Failure Analysis of Passenger Vehicle Torque Reactor

HU Yuejun, CHEN Qilin, LI Wenyan, ZHANG Haijun
(Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Automotive Engineering Institute, Guangzhou 511400, China)

Abstract: Passenger vehicle torque reactor were manufactured by die-casting and ADC3 alloy, fracture occurred after sale in the same position and form. In order to find out the reason of fracture, fracture analysis, chemical composition analysis and microstructure analysis were carried out on the broken torque reactor, and then the mechanical properties of the same batch of torsion bar were analyzed and examined. The results show that the fracture of the torque reactor belongs to brittle fracture, the crack originates near the stress groove in the middle of the tension bracket, the composition of the torque reactor meets the standard requirements, and the microstructure is normal. However, the actual mechanical properties of ADC3 alloy of the same batch of torque reactor are lower than the design requirements. The comprehensive analysis shows that the root cause of the fracture of the torsional tie rod is the lack of real strength of the material and the secondary cause is the internal casting defects. Considering various factors, it is concluded that under the condition of not changing the structure and design of the torque reactor, ZL111 alloy is adopted for forming the torsion bar by recast. The torque reactor meets the actual requirements and achieves good results.

Key words: torque reactor; stress groove; brittle fracture; casting defects; strength

目前家用轿车广泛采用三点式悬置支撑动力总成,其中左右悬置与车身相连,后悬置(通常称抗扭拉杆)与副车架连接,布置于动力总成下方,起到隔离振动传递和限制动力总成位移的[1,2],抗扭拉杆在服役中主要受拉压应力作用。某车型抗扭拉杆骨架采用 JIS H5302-2000 标准[3]中 ADC3 铝合金压铸成型,仿真分析要求该抗扭拉杆骨架材料屈服强度($Rp_{0.2}$)不小于 179 MPa。该车型在售出一段时间内,发生抗扭拉杆断裂事故,且断裂位置大致相同,均发生在抗扭拉杆本体中部应力槽附近,见图 1 所示。为分析抗扭拉杆断裂原因,从断裂抗扭拉杆中选取了其中一件作为分析对象。同时,也选取了同批次未断裂的抗扭拉杆进行了力学性能取样分析。

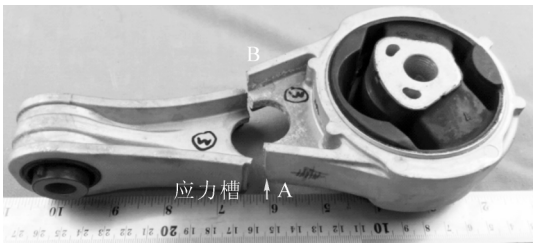

图 1 断裂抗扭拉杆
Fig.1 Fracture of torque reactor

1 试验过程与结果

1.1 断口分析

图 2 所示的断口为图 1 断裂件大端侧宏观断

收稿日期:2018-07-19
基金项目:广东省科技厅战略性新兴产业核心技术改善项目(2011A091102005)
作者简介:胡跃均(1980-),四川泸州人,硕士,工程师.主要从事金属材料失效分析与质量检测工作.
电话:13570439560

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

口，由图可知，该抗扭拉杆宏观断口平齐，颜色灰暗，无明显的金属光泽，未见明显的塑性变形。在A端断口表面可见明显的放射纹，裂纹起源于应力槽表面（对应于图1中红色箭头附近）。裂纹走向清晰，整体上由A端向B端扩展，最终断裂于B端应力槽附近。该抗扭拉杆宏观断口属脆性断裂[4]。图3~图6为断口各区域形貌，其中，在裂纹源附近发现一铸造冷隔缺陷[5]。微观形貌分析未发现任何疲劳特征，抗扭拉杆微观断裂机制为解理断裂。断口分析表明，抗扭拉杆断裂前受力模式正常，断裂属裂纹起源于应力槽附近的脆性断裂。

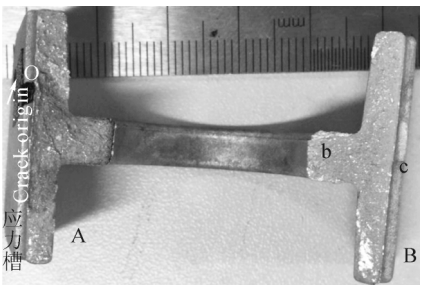

图2 宏观断口
Fig.2 Macro-fracture of sample

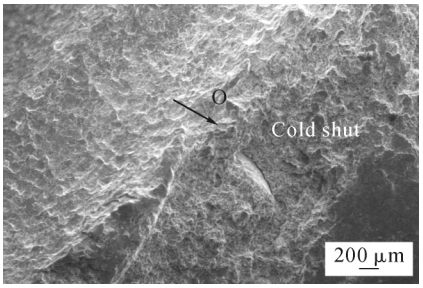

图3 裂纹源附近形貌
Fig.3 Appearance around crack origin

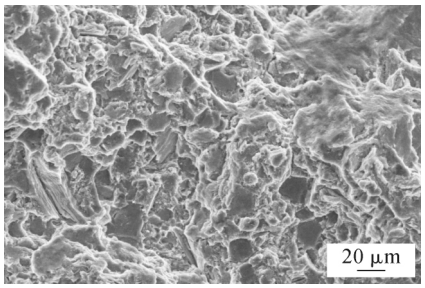

图4 裂纹源附近微观形貌
Fig.4 Appearance around crack origin

1.2 化学成分分析

断裂抗扭拉杆的化学成分采用电感耦合等离子体发射光谱仪ICAP 6000进行分析，分析结果见表1。分析结果显示，抗扭拉杆化学成分满足JIS H5302-2000中ADC3合金的化学成分要求。

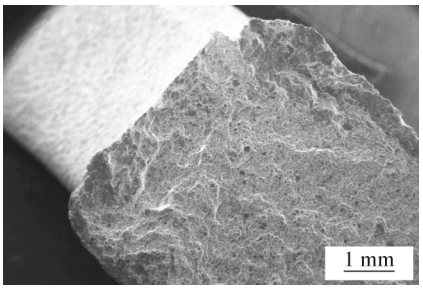

图5 b区域附近形貌
Fig.5 Appearance around area b

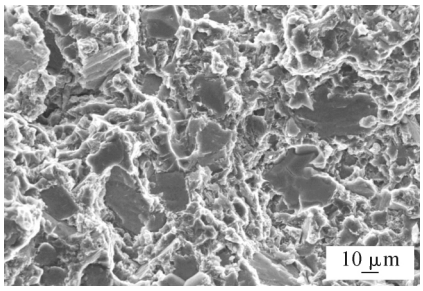

图6 c区域附近形貌
Fig.6 Appearance around area c

1.3 金相检验

在断裂抗扭拉杆上截取金相试样，用徕卡DMI3000M金相显微镜观察显微组织，经检查，抗扭拉杆显微组织为α固溶体+共晶硅+少量初晶硅[6]，此外，还存在少量的Mg_2Si与显微疏松。见图7和图8。显微组织正常，未见明显缺陷。

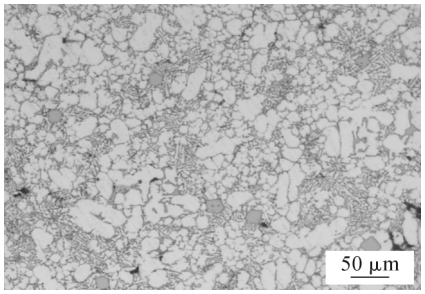

图7 抗扭拉杆显微组织
Fig.7 Micro-structure of the sample

1.4 力学性能检测

取同批次抗扭拉杆若干，在抗扭拉杆上截取小尺寸拉伸试样，获取材料的抗拉强度与屈服强度，部分结果见表2所示。拉伸实验结果表明，从抗扭拉杆实体取样获取的强度远低于标准[3]要求。

表1 断裂抗扭拉杆成分分析结果 w(%)
Tab.1 Chemical composition of fracture of torque reactor

项目	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Ni	Sn	Mn	Al
抗扭拉杆	0.45	9.8	0.48	0.36	1.0	0.32	0.02	0.18	余量
JIS H5302-2000	≤0.6	9.0-10.0	0.4-0.6	≤0.5	≤1.3	≤0.5	≤0.1	≤0.3	余量

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

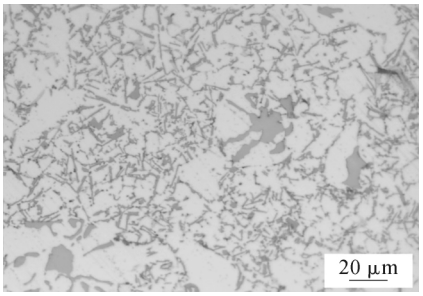

图 8 抗扭拉杆显微组织
Fig.8 Micro-structure of the sample

表 2 力学性能测试结果
Tab.2 Results of mechanical properties

项目	厚度 /mm	宽度 /mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa
试样 1	2.52	5.99	135	181
试样 2	2.52	6.01	137	188
试样 3	2.53	5.98	131	183
试样 4	2.51	6.00	132	161
试样 5	2.49	6.00	141	165
试样 6	2.50	6.02	132	173
JIS H5302-2000			≥179（σ<35）	≥279（σ<48）

注：σ 为标准偏差。

2 分析与讨论

综上所述，抗扭拉杆化学成分满足标准要求，显微组织上无明显缺陷，从拉杆本体取样的试样强度指标远低于标准要求，而断口分析显示，裂纹源附近又发现了冷隔缺陷，究竟是强度不满足设计要求导致的断裂，还是内部铸造冷隔缺陷导致的断裂，必须要作进一步分析，找出导致断裂的根本原因。

2.1 铝合金抗扭拉杆设计

近年来，随着汽车轻量化设计理念的深入推进，越来越多的零部件制造实现了以轻金属材料替代传统的钢铁材料[7,8]。抗扭拉杆也是如此，目前主流品牌车企大都以铝制抗扭拉杆替代传统的钢制抗扭拉杆，铝制抗扭拉杆以压铸成型居多。断裂抗扭拉杆选取 ADC3 合金以压铸成型制造骨架，并参照 ASTM B 85 材料强度以拉伸试样铸型中浇铸的试棒所测得的强度为设计依据，实际测试了多批次试棒，每批试棒所测得的性能指标均满足设计要求，部分铸造试棒取样测得的强度指标见表 3。

表3 试棒力学性能测试结果
Tab.3 Mechanical properties of test bar

项目	厚度 /mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa	A(%)
试样 1	10.01	199	321	3.1
试样 2	10.00	203	316	3.0
试样 3	10.02	205	314	3.8

根据强度分析，在极限工况下，抗扭拉杆中部应力槽附近应力 $\sigma_{max}\approx163$ MPa，强度分析结果见图 9 所示。根据铸造试棒测试结果，材料的强度指标完全满足设计要求，且还有较大的安全余量。

图 9 抗扭拉杆强度分析
Fig.9 Strength analysis of the torque restrictor

2.2 抗扭拉杆压铸件的实体强度

而另一方面，从表 2 实测结果可知，在抗扭拉杆实体取样获得的强度指标远低于表 3 所列，实体取样测得的屈服强度甚至远低于 σ_{max}。这是因为通过在拉伸试样铸型中浇铸试棒，几乎可以获得“完美状态”的拉伸试棒，该试棒的内部质量好，测试时获得的强度指标也就高；而零件在实际压铸成型时，易发生空气卷入而导致铸造缺陷，或由于设备及工艺等因素，很容易在零件内部产生铸造缺陷如疏松、缩孔残余、冷隔等[9]，其真实性能会低于单独浇铸的试棒。因此，从拉伸试样铸型中浇铸拉伸试棒测得的强度指标，并不能代表一般压铸件零件的性能。这也就解释了表 2 与表 3 性能数据差距的根本原因。如果误用数据，会造成尴尬结果。

2.3 抗扭拉杆断裂原因

综上分析不难发现，抗扭拉杆断裂的根本原因在于 ADC3 合金压铸后，材料真实强度远低于设计要求的 163 MPa，裂纹源附近的冷隔缺陷是造成抗扭拉杆断裂的次要原因，应力槽附近有无铸造缺陷，对抗扭拉杆断裂不起决定作用，这从售后市场车断裂的其它抗扭拉杆得到证明，即在应力槽附近断裂的抗扭拉杆，其裂纹源附近区域未发现铸造缺陷。

2.4 设计更改与验证

由于结构已无法改变，提高抗扭拉杆使用寿命可以从两方面考虑：一是优化选材，选取综合性能更优的材料；二是改变制造工艺，使制造工艺与材料特性匹配，避免产生更多的内部缺陷。在综合考虑多方面因素后，最后选取 ZL111 以重力铸造的方式制造抗扭拉杆。铸造成型后在抗扭拉杆实体取样，测试了多批次试样，获取的性能数据均满足设计要求，表 4 所列数据为某一次试验结果的部分数据。经台架验

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4 力学性能测试结果

Tab.4 Mechanical properties of test results

项目	厚度 /mm	宽度 /mm	$R_{p0.2}$/MPa	R_m/MPa
试样 1	2.50	5.90	273	330
试样 2	2.50	5.88	245	276
试样 3	2.49	5.88	250	296
试样 4	2.48	5.88	248	309

证和市场检验，更改材料和铸造工艺后，未发生抗扭拉杆断裂事故。

3 结论

抗扭拉杆断裂的根本原因是设计上存在不足，材料压铸后真实强度不满足设计要求所致。裂纹源附近的冷隔缺陷是造成抗扭拉杆断裂的次要原因，应力槽附近有无铸造缺陷，对抗扭拉杆断裂不起决定作用。在综合考虑多方因素后，对抗扭拉杆设计作了一些优化，选用 ZL111 合金以重力铸造方式制造抗扭拉杆，经台架和市场验证结果表明，优化设计后的抗扭拉杆满足要求。

参考文献：

[1] 杨峰，杨莹，樊逸斌. 抗扭拉杆对整车性能影响的分析与应用[J]. 上海汽车，2010(10):27-30.

[2] 曾肇豪，李玉发，樊帆，等. 抗扭拉杆、抗扭拉杆安装结构及车辆[P]. 中国专利：CN 203995632 U, 2014.12.10.

[3] JIS G3502-2004 铝合金压铸件[S]. 日本：日本标准协会，2000.

[4] 束德林. 金属力学性能 [M]. 第 2 版. 北京：机械工业出版社，1999:26-30.

[5] ASM Handbook Committee. Metals Handbook [M]VOLUME 11 Failure analysis and prevention 2002 edition. United States of America: ASM International,2003:262-281.

[6] 上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]上海：上海科学技术文献出版社，1987:739-771.

[7] 张勇. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用 [J]. 内燃机与配件，2017(14):38-39.

[8] 廖君. 车用铝合金轻量化材料 [J]. 汽车工艺与材料，2008(2) 8-10.

[9] 赵爱萍，田蓉. 压铸铝合金制件质量控制[J]. 西南林学院学报，2006(4)80-82.

2020年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼301室

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net