生产技术 Production Technology ● DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.013

高速列车铝合金齿轮箱微观夹杂物研究

周 斌¹,龚家林¹,秦颐鸣²

(1.中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司,江苏常州213011;2. 吉利百矿集团有限公司,广西百色533000)

摘 要:为提升高速列车齿轮箱的可靠性,采用金相及 EDS 能谱分析研究了高铁齿轮箱材料中的微观夹杂物的形态及成分。结果表明,微观夹杂物主要是富 Fe 相。通过 MAGMAsoft 软件模拟齿轮箱铸造过程发现,快速凝固时,形成的 Fe 相呈鱼骨状,凝固缓慢时,Fe 相呈长针状。试样 P-V 曲线数据表明,裂纹更容易在长针状富铁相试样中扩展,说明危害性更大。设计齿轮箱铸造工艺时,关键区域应尽量采取激冷措施,降低铁元素的危害,提升齿轮箱的安全系数。

关键词:齿轮箱;夹杂物;富铁相;AlSi7Mg

中图分类号:TG146.2;TG245 文献标识码:A 文章编号:1000-8365(2021)06-0496-03

Study on Micro Inclusions in Aluminum Alloy Gearbox for High-speed Train

ZHOU Bin¹, GONG Jialin¹, QIN Yiming²

(1.CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China; 2. Geely Baikuang Group Co., Ltd., Baise 533000, China)

Abstract: In order to improve the reliability of high-speed train gearbox, the morphology and composition of micro-inclusions in the material of high-speed train gearbox were studied by metallography and EDS analysis. The results show that the microcosmic inclusions are mainly Fe-rich phases. Magmasoft software is used to simulate the casting process of gearbox, and it is found that the Fe phase formed is fishbone shape when the solidification is rapid, while the Fe phase is long needle shape when the solidification is slow. The P-V curve data of the samples show that the crack is more likely to propagate in the long acicular iron-rich phase samples, indicating that the damage is greater. When designing the foundry process of the gearbox, drastic cooling measures should be taken in the key areas to reduce the harm of iron and improve the safety factor of the gearbox.

Key words: gearbox; inclusion; iron-rich phase; AlSi7Mg

随着科技技术水平的发展,高速列车关键零部件广泛采用铸造铝合金零件,减轻列车质量,满足 铁路高速化、轻量化的需要。在铸造过程中,铝合金 中的夹杂物影响材料的冶金质量,从而降低材料的 强度、疲劳抗力、可塑性和耐腐蚀性^[1]。齿轮箱是列 车传动系统的重要组成部件,在加速时承受较大的 传动扭矩,一旦失效将直接导致列车发生安全事 故。通过研究齿轮箱材料中夹杂物的形态、成分及 含量,减少夹杂物的危害作用,从而提升高速列车 的可靠性。

1 试验

选用国产"复兴号"高速动车组齿轮箱作为研究 对象,齿轮箱材质为铸造 AlSi7Mg。选取一件合格的 齿轮箱实物取样,采用 iCAP6300 电感耦合等离子

作者简介:周 斌(1979—),江苏丹阳人,教授级高级工程师. 主要从事铝合金材料及铸造工艺方面的工作. Email:011500001255@crrcgc.cc 体发射光谱仪测得其化学成分见表 1。齿轮箱的材 质完全符合相关标准要求,且杂质含量远好于标准 值,材料具备较好的纯净度。

表 1 齿轮箱化学成分表 w(%)Tab.1 Chemical composition of gearbox

				1	8			
	Si	Mg	Fe	Ti	Mn	Cu	Zn	Al
标准	6.5~7.5	0.25~0.45	≤0.19	0.08~0.25	≤0.10	≤0.05	≤0.07	余量
实测	7.23	0.28	0.12	0.13	< 0.01	< 0.01	< 0.01	余量

将上述齿轮箱从不同位置取小试块分析,其中 1# 试样取自车轮轴孔部位,2# 试样取自合箱面部 位。取样方式为线切割,避免试样发热而影响试验结 果。对两组试样分别采用 Observer.A1m 型金相显微 镜观察基体组织,结果见图 1。

在基体组织图中除了有正常的 α-Al 和 Si 相 外,两组试样中均能看到的微观夹杂物,且位于晶间 位置,其中 1#试样中夹杂物形态呈现鱼骨状,2#试 样中的夹杂物形态呈现长针状。为了确定观察到的两 种微观夹杂物成分,通过 EDS 分析,其结果如图 2。

从分析数据可知, 鱼骨状和长针状的夹杂物中除了 Al、Si 元素(合金中主要成分)外,含有大量的

收稿日期:2021-03-29

基金项目: 广西重点研发计划(桂科 AB19185007)



图 2 微观夹杂物 EDS 分析结果

Fig.2 EDS pattern of micro inclusions

Fe。而铝合金齿轮箱在生产过程中,铝液熔炼均经 过严格的除气、除渣工序,排除了外来夹杂物的可 能性,因此两类夹杂物均为富铁相,这是铝合金中 的杂质 Fe 元素在凝固时的不同析出形态。

2 分析讨论

《铸造技术》06/2021

2.1 凝固速率

根据上述分析结果,在同一齿轮箱轴孔部位的 富铁相呈鱼骨状,合箱面部位的富铁相则呈长针 状。说明齿轮箱在铸造过程中,不同位置的变量导 致形成不同形态的富铁相。对该型号齿轮箱采用 MAGMAsoft软件分析其铸造过程,模拟出凝固过 程中各部位的凝固时间,结果如下图 3。



从图 3 看出,1# 轴孔处凝固时间为 58.8S,2#

合箱面的凝固时间为 824.7S,1# 试样位置凝固速 率远远快于 2# 试样位置,说明快速凝固时,铸造 铝合金中形成富铁相呈鱼骨状,而凝固缓慢时呈长 针状。

2.2 裂纹倾向

相关资料表明,在 AlSi7Mg 合金凝固过程中, 铁易以脆性铁相形式析出,而随着含铁量的增加,铁 相也随之长大,甚至贯穿基体枝晶晶胞,起到割裂基 体、提供应力集中源的作用,严重危害铝合金的力学 性能^[2]。合金在受到应力作用时,在裂纹萌生阶段, 小裂纹沿着富铁相呈直线扩展,在以后的疲劳阶段 中,裂纹沿硅颗粒与富铁相优先扩展^[3]。为比较两类 富铁相的危害程度,试验通过 P-V 曲线,反映试样 在应力作用下的开裂敏感性,试验结果如图4。



在图 4 中, Y 轴代表静拉过程中的实时载荷, X

轴代表该过程中的裂纹实时张开位移(COD)。按照标准 GB/T 4161-2007 中规定的方法从 P-V 曲线上作图得出试样 1#和 2#的 FQ 值(裂纹失稳载荷力值)分别为 22.46 kN和 25.00 kN。试验结果说明,1#试样的 FQ 值相对更低,裂纹更容易在长针状富铁相试样中扩展,说明危害性更大。

一般情况下(排除缺陷的影响),细小的裂纹尖 端遇到富铁相(与裂纹扩展方向斜交或正交)时,裂 纹沿富铁相边缘扩展,产生裂纹偏析,从而使裂纹扩 展速度下降。但若长条状的富铁相金属间化合物与 裂纹扩展方向一致,则裂纹扩展速度不会降低^[4]。鱼 骨状枝晶结构较针状更加复杂,裂纹扩展相对较 慢。铁在铝硅合金中以针状相形式存在,该金属间 化合物对合金性能造成严重的损害^[54],因而针状的 富铁相,对基体产生严重的割裂作用,降低材料的 性能。

3 工艺优化

高速列车齿轮箱结构复杂,在设计低压铸造 过程时,需要采用浇冒口和冷铁相结合的措施调 节凝固时温度场,实现铸件顺序凝固方式,从而 减小铸造缺陷,得到组织致密的齿轮箱铸件。而 冷铁激冷措施可以让接触部位迅速凝固,浇冒口 部位则延缓凝固时间。根据研究结果,对于吊挂 座、安全托等受到拉应力的关键区域,不能设置 浇冒口,防止出现长针状铁相。并且应尽量采取 冷铁激冷措施,除了细化晶粒提升性能外,也可 以让富铁相以鱼骨状存在,降低开裂敏感性,提升 产品的安全系数。

(上接第495页)

参考文献:

- [1] 李新亚. 铸造手册. 第5卷,铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版 社,2011.
- [2] 王文清,李魁盛.铸造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 穆彦青,封雪平,鲍飞,等.基于 Magma 的球铁齿轮箱铸造工艺

4 结语

(1)高速列车铝合金齿轮箱材料中微观夹杂物为富铁相,其形态有鱼骨状和长针状两种。

(2)在齿轮箱铸造过程中,快速凝固部位富铁相 呈现鱼骨状析出,而在冷却较慢的部位,出现长针状 富铁相。

(3)P-V曲线表明,长针状富铁相试样的FQ值 相对更低,更容易造成裂纹的扩展,对零件的危害性 更大。

(4)设计齿轮箱铸造工艺时,关键区域不能设置 浇冒口,并应尽量采取激冷措施,降低铁元素的危 害,提升齿轮箱的安全系数。

参考文献:

- [1] 贾银翠. 铝熔体中氢与夹杂物的研究 [D]. 沈阳: 东北大学材料 学,2010:10-13.
- [2] PARK D S, NAM S W. Effects of manganese dispersoid on the mechanical properties in Al-Zn-Mg alloys [J]. J Mater Sci, 1995, 30 (5):1313-1320.
- [3] GALL K, YANG N, H orstemey er M, et al. The inf luence of modified intermetallics and Si part icles on fatig ue crack paths in a cast A356 Al alloy [J]. Fat igue Fract Eng Mater Struct, 2000, 23: 159.
- [4] 范宋杰,何国球,张卫华,等. A356 铸造铝合金疲劳性能影响因 素概述[J]. 材料导报,2007,21(9):59-62.
- [5] HYUN Y K, TEA Y P, SANG W H, et al. Effects of Mn on the crystal structure of α-Al (Mn, Fe) Si particles in A356 alloys [J]. Journal of Crystal Growth, 2006, 291:207-211.
- [6] MURALI S, RAMAN K S, MURTHY K S S. Morphological studies on β-FeSiAl5 phase in Al-7Si-0.3Mg alloy with trace additions of Be,Mn, Cr, and Co [J]. Materials Characterization,1994,33: 99-112.

设计[J]. 铸造技术, 2014, 35(12): 3051-3052.

- [4] 董鹏,朱正锋,封雪平,等.木质素改性呋喃树脂性能研究 [J]. 铸造,2016,65(6):512-515.
- [5] 董鹏,封雪平,刘宇,等.城轨用轴承座铸造工艺优化[J].铸造技 术,2015,36(11):2807-2809.

