

ZL101 铝合金齿轮箱裂纹分析

张宝尧 周 斌 李德贝 李 伟 李 林
(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司)

摘 要 针对 ZL101 铝合金齿轮箱在服役过程中箱体出现裂纹的问题,采用金相显微镜、扫描电镜和能谱分析等手段进行了分析与研究。结果表明,齿轮箱的开裂具有疲劳开裂特征,疲劳源处存在应力腐蚀裂纹。应力腐蚀开裂的主要原因是齿轮箱工作环境中存在腐蚀性介质,同时变质质量较差,增加了基体材料的应力腐蚀敏感性。针对齿轮箱开裂原因,提供了一些合理的预防措施,如控制齿轮箱工作环境中腐蚀介质的含量,改善箱体的变质质量等。

关键词 齿轮箱;裂纹;应力腐蚀

中图分类号 TG172.9;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Crack Analysis of ZL101 Aluminum Alloy Gearbox

Zhang Baoyao, Zhou Bin, Li Debei, Li Wei, Li Lin

(CRRC Qishuyan Locomotive & Rolling Stock Technology Research Institute)

Abstract: The origination of cracking of a ZL101 aluminum alloy gearbox during service process was investigated by using metallographic microscope, scanning electron microscope, energy spectrum analysis and other instruments. The results indicate that the crack of the ZL101 aluminum alloy gearbox is characterized by fatigue crack-ing, and there are stress corrosion cracks at the fatigue source. The main cause of stress corrosion cracking is the presence of corrosive media elements in the working environment of gearbox. Meanwhile, the modification quality of the gearbox is poor, increasing the stress corrosion sensitivity of the base material. In order to avoid the stress corrosion crack of the gearbox, some reasonable preventive measures were provided, such as controlling the con-tent of corrosive medium in the working environment of gearbox and improving the modification quality of gear-box.

Key Words: Gearbox, Crack, Stress Corrosion

齿轮箱动力传输装置是机械行业设备中的核心部件之一。箱体作为齿轮箱动力传输装置的关键部件,在工作过程中不但要承受周期性的振动载荷,还要面临种种复杂多变的工作环境。齿轮箱箱体如果出现裂纹,将会导致齿轮箱内润滑油泄露和齿轮箱失效,严重的甚至会造成事故。

齿轮箱箱体采用 ZL101 铝合金生产,固溶+人工时效处理。采用砂型低压铸造工艺,铝液变质剂用 Al-Sr 中间合金。箱体加工工艺流程为:下料→熔炼→浇注→热处理→机械加工→油漆→成品。齿轮箱在服役过程中承受振动载荷,内部介质为润滑油。

某型号 ZL101 铝合金齿轮箱在服役 9 年后,在例行检查过程中发现箱体表面有裂纹缺陷,其部位在齿轮箱下箱体拐角处,见图 1。为分析箱体开裂的原因,对

箱体裂纹处宏观形貌进行观察,打断并对断口进行微观形貌和金相组织分析,同时检测基体化学成分,以判定裂纹的形成原因。



图 1 齿轮箱箱体开裂位置

Fig.1 Location of the crack in the ZL101 aluminum alloy gearbox

收稿日期:2021-04-30;修改稿收到日期:2021-06-29
基金项目:广西重点研发计划资助项目(AB19185007)
第一作者简介:张宝尧,男,1996 年出生,助理工程师,江苏常州(213011),E-mail:adioc@foxmail.com
引用格式:张宝尧,周斌,李德贝,等. ZL101 铝合金齿轮箱裂纹分析[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 485-1 488.
ZHANG B Y, ZHOU B, LI D B, et al. Crack analysis of ZL101 aluminum alloy gearbox[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (12):1 485-1 488.

1 试验方法与结果

1.1 宏观检测

箱体内部表面覆盖有油污,无法进行观察,从外部对箱体裂纹附近表面进行观察,发现其表面漆面上有隐约线状痕迹。沿线状痕迹区域切取痕迹处试样,见图 2。可以看出,裂纹不明显。

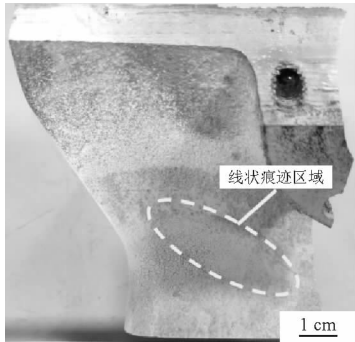


图 2 经过渗透探伤后的宏观形貌

Fig.2 Morphology of the crack after PT

将试样沿线状痕迹分布方向打断,宏观形貌见图 3。可以看出,断口表面上裂纹区域断面平齐,断面平坦,呈放射状条纹形貌,无明显塑性变形,根据条纹方向判断裂纹源为靠近内壁圆角一侧;大部分区域无金属光泽,表面存在红色锈迹和黑色污渍,呈现出老旧裂纹特征;裂纹未完全贯通至外表面,圆角表面存在黑色覆盖物。

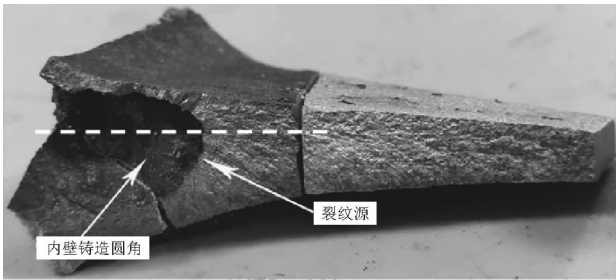


图 3 齿轮箱裂纹的断口形貌

Fig.3 Fracture morphology of the crack in the gearbox

1.2 断口的微观形貌和能谱分析

为进一步确定断面裂纹性质,断面经乙醇超声波清洗后使用扫描电镜观察,见图 4。可以看出,裂纹源处存在多处沿不同断面扩展交汇形成的台阶形貌,内壁铸造圆角表面和裂纹源均存在异常覆盖物,裂纹源微观形貌以准解理断裂为主,裂纹源处未见异常夹渣和明显疏松缺陷,裂纹扩展区微观形貌为准解理,其疲劳辉纹清晰可见。

对断面裂纹源和箱体内壁铸造圆角表面的异常覆盖物进行能谱成分分析,结果显示,除基体元素外,还含有 O、F、P、S 和 Cl 等腐蚀性元素且含量较高;内壁铸造圆角表面与断面裂纹源处的异常覆盖物成分相近,仅元素含量不同,为腐蚀产物。腐蚀产物膜的物理性质对反应物和产物的传质有较大的影响。同时,腐蚀产物膜的致密与否、厚薄、结构和组成等与基体腐蚀的发展密不

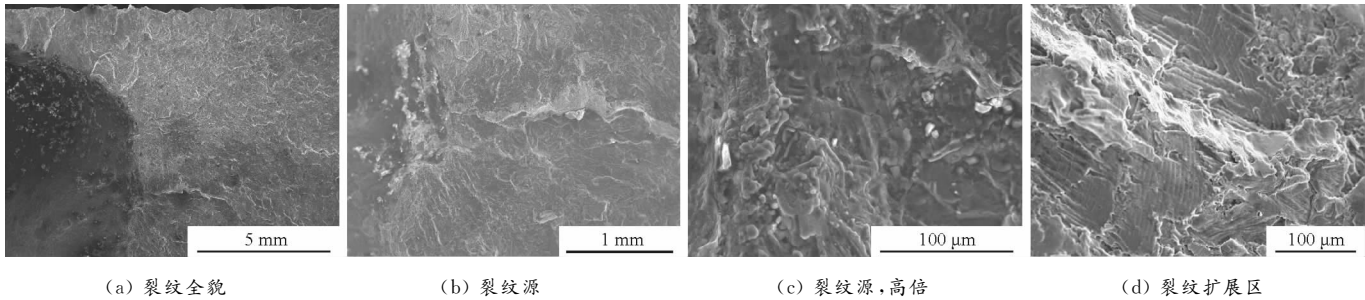


图 4 断口的微观形貌

Fig.4 Micro morphology of the crack

可分^[1,2]。

1.3 化学分析

对齿轮箱进行化学成分测试,见表 1,成分符合 GB/T 1173-2013 标准要求^[3]。

表 1 齿轮箱化学成分

Tab.1 Chemical composition of the gearbox												%
成分	w_B											
	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Mn	Sn	Pb	Ni	Cr	Al
实测	7.0	0.36	0.24	0.14	0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	余量
标准	6.5~	0.25~	≤	≤	≤	≤	≤	≤	≤	—	—	余量
	7.5	0.45	0.50	0.25	0.2	0.3	0.35	0.05	0.05			

1.4 金相分析

沿图 3 虚线处线切割截取裂纹源金相试样,磨抛浸蚀后观察,结果见图 5。从图 5a 可见,裂纹源金相组织为 Al 基体+条状和颗粒状共晶 Si+少量针状 Fe 相+极少量合金相,裂纹源处可见多条细小曲折沿晶界和硅相分布的裂纹,局部呈现蜂窝状分布,未见夹渣和明显疏松缺陷,裂纹源附近可观察到分散分布的尺寸较小的疏松缺陷。在裂纹源附近铸造圆角表面还可以观察到多处呈现蜂窝状沿晶和沿硅相分布的细小裂纹,见图 5b~图 5d。

对裂纹源处沿晶裂纹内进行了能谱检查,结果显示

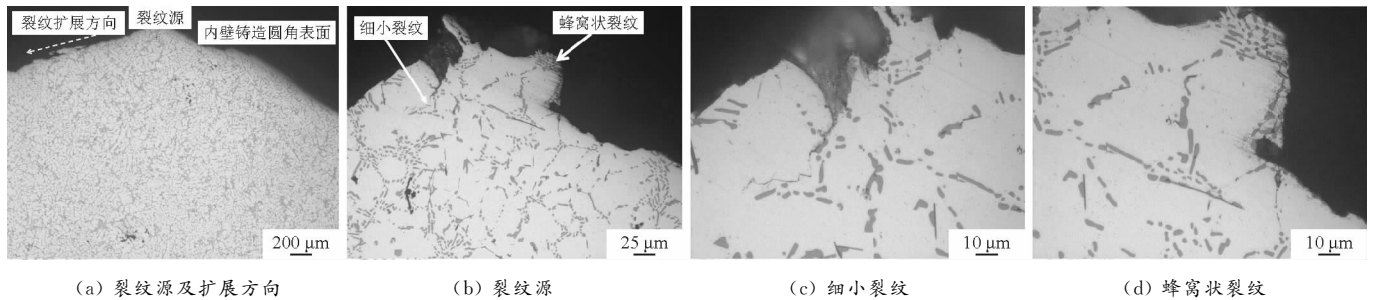


图 5 断口的金相组织

Fig.5 Metallographic structure of the fracture

除基体合金元素外,还存在 O、P、S 和 Cl 腐蚀性介质元素。图 6 为裂纹源附近齿轮箱基体金相组织,为 Al 基体+条状和颗粒状共晶 Si+少量针状 Fe 相+极少量合金。基体中观察到尺寸较小的缩松缺陷。齿轮箱裂纹源附近基体晶粒度为 4.5 级,晶粒略粗大,见图 7。

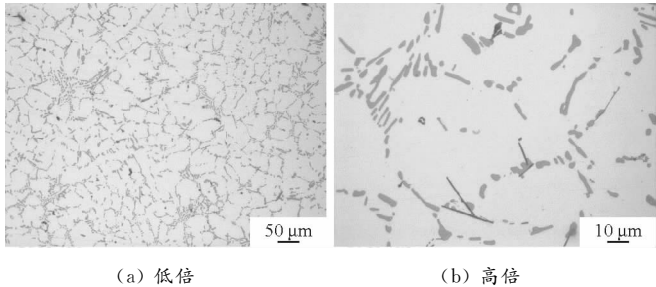


图 6 基体的金相组织

Fig.6 Metallographic structure of the substrate

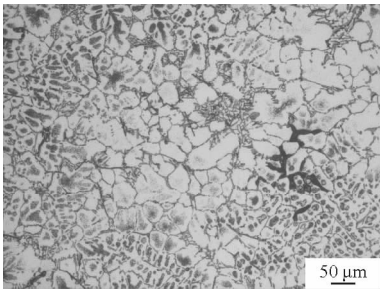


图 7 基体的显微组织

Fig.7 Microstructure of the substrate

2 分析与讨论

通过试验分析可知,齿轮箱箱体裂纹起始于内壁圆角;断口无明显的塑性变形,大部分区域无金属光泽,表面存在红色锈迹和黑色污渍,裂纹源微观形貌以准解理为主。内壁铸造圆角表面和裂纹源均存在异常覆盖物,经能谱分析可知,除基体元素外,O、F、P、S 和 Cl 等腐蚀性元素含量较高,说明异常覆盖物为腐蚀产物,且腐蚀物聚集严重。裂纹扩展区微观形貌为准解理,其疲劳辉纹清晰可见,该齿轮箱箱体具有疲劳开裂特征。综合裂纹宏观和断口形貌特征以及异常覆盖物分析结果可判断,箱体开裂原因为应力腐蚀开裂^[4,5]。

齿轮箱箱体内壁铸造圆角处在服役过程中覆盖了

沉积物,沉积物中含有 S、Cl 等腐蚀性介质元素,为应力腐蚀开裂提供了环境条件。开裂箱体变质效果较差,Si 相和 Fe 相呈长条状,使得箱体表面均匀性较差,应力腐蚀性裂纹容易从 Si 相和基体界面处萌生,增加了基体材料的应力腐蚀敏感性。箱体开裂处在服役过程中承受振动载荷,具备应力腐蚀和后续疲劳扩展的应力条件。综上所述,箱体开裂处位于腐蚀性环境,在振动载荷的作用下,裂纹从长条状 Si 相和基体界面处萌生并不断扩展,最终导致箱体开裂。

3 改进措施

针对导致齿轮箱箱体开裂的原因,提出如下改进措施:①在出现裂纹的拐角处增加冷铁,改善 Si 相分布,同时细化晶粒,进而提高箱体均匀性,降低箱体拐角处的应力腐蚀敏感性;②严格控制齿轮箱工作过程中与腐蚀性介质的接触,同时应在周期性的检修保养过程中对箱体内壁及底部的沉积物进行清理,降低腐蚀性环境对箱体的影响。

4 结 论

(1)通过宏观与微观分析发现,齿轮箱箱体开裂具有疲劳开裂特征,裂纹从箱体内壁向外壁扩展,裂纹源处存在应力腐蚀裂纹,应力腐蚀裂纹尖细,萌生后导致该区域应力集中系数增加,导致其疲劳寿命降低。

(2)造成箱体应力腐蚀开裂的主要原因是箱体材料变质效果较差,使得裂纹容易从 Si 相和基体界面处萌生,增加了基体材料的应力腐蚀敏感性。

(3)齿轮箱内润滑介质中含 F,齿轮及连接部件材料中含少量 P、Cl 等元素,同时在检修过程中可能会接触含有腐蚀性元素的其他介质。箱体在服役过程中,内壁表面形成了含有腐蚀性介质的沉积物,提供了应力腐蚀的环境条件,是引发应力腐蚀开裂的次要原因。

参 考 文 献

[1] LAIR V, ANTONY H, LEGRAND L, et al. Electrochemical reduction of ferric corrosion products and evaluation of galvanic coupling with iron[J]. Corrosion Science, 2006, 48(8): 2 050-2 063.

低密度 Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr 钼合金的热变形行为及组织

赵红运¹ 朱宝辉^{1,2} 刘彦昌^{1,2} 曹艳飞³ 胡革全² 韩伟松² 唐寿全²

(1.西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司稀有金属特种材料国家重点实验室; 2.宁夏中色金航钛业有限公司;
3.中国科学院金属研究所,沈阳材料科学国家研究中心)

摘 要 采用 Gleeble-3800 型热模拟试验机在变形温度为 900~1 100 ℃、应变速率为 0.01~10 s⁻¹ 条件下对 Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr 合金进行了等温热压缩试验,对其高温塑性变形行为及微观组织演变规律进行了研究。结果表明,合金的流变曲线在低应变速率和较高变形温度时呈现出以动态再结晶为主的特征,在较高应变速率和较低热变形温度时呈现出以动态回复为主的特征。流变应力随着变形温度的升高或应变速率的降低呈下降趋势,高温塑性变形行为可以用双曲正弦函数的本构方程来表征,其平均变形激活能为 412.37 kJ/mol。此外,变形条件对合金的显微组织影响比较显著。在相同温度下,随着应变速率降低,动态再结晶区域随之增大;当应变速率一定时,随着温度升高,由动态回复向动态再结晶转变。

关键词 钼合金;热变形;本构方程;显微组织

中图分类号 TG146.2 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.008 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Thermal Deformation Behavior and Microstructure of the Low-density Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr Alloy

Zhao Hongyun¹, Zhu Baohui^{1,2}, Liu Yanchang^{1,2}, Cao Yanfei³, Hu Gequan²,
Han Weisong², Tang Shouquan²

(1.State Key Laboratory of Special Rare Metal Materials, Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd.; 2.Ningxia Horizontal Titanium Industry Co., Ltd.; 3.Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The thermal deformation behavior and microstructure evolution of the low-density Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr alloy were investigated in detail by the isothermal hot compression test with the deformation temperature of 900~1 100 ℃ and strain rate of 0.01~10 s⁻¹ on Gleeble-3800 thermal simulation machine. The results indicate that the flow curves of the alloy are characterized by dynamic recrystallization at low strain rate and high deformation temperature, and dynamic recovery at high strain rate and low deformation temperature, respectively. The flow stress is decreased with the increase of deformation temperature or the decrease of strain rate. The deformation behavior at high temperature can be expressed by the hyperbolic sine function constitutive equation, where the average deformation activation energy is 412.37 kJ/mol. In addition, the significant effect of deformation conditions on the microstructure can also be observed. When the temperature is constant, the dynamic recrystallization region becomes larger with the decrease of strain rate, and when the strain rate is constant, the dynamic recovery is gradually transferred into the dynamic recrystallization as the temperature increases.

Key Words: Niobium Alloy, Thermal Deformation, Constitutive Equation, Microstructure

收稿日期:2021-08-19;修改稿收到日期:2021-10-21
基金项目:稀有金属特种材料国家重点实验室开放课题资助项目(SKL2017K002,SKL2017K003);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划资助项目(XAB2017AW10);国家科技重大专项基金资助项目(2017-Ⅷ-0008-0101);工业强基工程资助项目(TC190A4DA/35)
第一作者简介:赵红运,男,1973 年出生,高级工程师,宁夏石嘴山(753000),E-mail:zhaohongyun@otic.com.cn
通信作者:曹艳飞,男,1988 年出生,副研究员,沈阳(110016),E-mail:yfcao10s@imr.ac.cn
引用格式:赵红运,朱宝辉,刘彦昌,等. 低密度 Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr 钼合金的热变形行为及组织[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 488-1 493.
ZHAO H Y, ZHU B H, LIU Y C, et al. Thermal deformation behavior and microstructure of the low-density Nb-Ti-Al-Mo-W-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 488-1 493.

[2] 李涛,董超芳,李晓刚,等. 环境因素对铝合金大气腐蚀的影响及其动态变化规律研究[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(4): 215-219.

[3] 全国铸造标准化技术委员会.GB/T 1173-2013 铸造铝合金[S].北京:中国标准出版社, 2013.

[4] 赵志农. 腐蚀失效分析案例[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.

[5] 大崎修平. 铝合金的应力腐蚀开裂[J]. 杨湘生 译. 铝加工技术, 1997(4):45-55.

(编辑:栗万仲)