

铝合金蠕变试验方法简述

Introduction to the Method of Creep Testing for Aluminum Alloy

供稿|陈银胜, 何庭宇 / CHEN Yinsheng, HE Tingyu

内
容
导
读

铝合金材料因高温力学和抗蠕变性能不佳,影响了其在高温环境中的使用寿命和性能稳定性。本文简述金属蠕变特性、参照 GB/T 2039—2012 金属材料单轴拉伸蠕变试验方法、GB/T 30552—2014 附录 B 铝合金单线抗压蠕变试验方法对铝合金蠕变性能进行测试,讨论不同环境条件下拉伸应力蠕变和抗压蠕变试验的影响因素,为电线电缆质量检测行业工作者判断铝合金芯挤包绝缘电力电缆蠕变性能是否良好提供了检验方法。

铝合金由于密度低、热导电性好、高比强度、易成型加工等诸多优点,在航空航天、电线电缆、汽车、船舶等行业得到广泛应用^[1-3]。铝合金导体材料在高温、高载环境下容易发生蠕变现象,性能随时间延长而逐渐劣化,可能影响铝合金导体材料工作的稳定性,甚至导致灾难性事故^[4]。例如,铝合金架空输电线在使用过程中,由于蠕变导致晶粒变形、位错滑移和晶格畸变等现象,使得线缆局部电阻增大,进而引发发热软化,严重时甚至出现熔断现象。蠕变引起的微观结构变化使得线缆的性能劣化,影响了其正常运行。因此,为判断铝合金芯挤包绝缘电力电缆的抗蠕变性能是否良好,可以通过铝合金拉伸和抗压蠕变试验进行检验。本文主要介绍了金属蠕变特性、铝合金拉伸应力蠕变试验方法、铝合金单线抗压蠕变试验的方法和意义以及不同环境条件下拉伸应力蠕变和抗压蠕变试验的影响因素。

金属蠕变特性

材料学中的蠕变是指固体材料受恒定应力作用

时,其应变会随着时间延长而增大,属于塑性变形范畴。常规性塑性变形仅在应力超出弹性极限的情况下才出现,而蠕变现象只要满足特定时间内的应力大小,可以在应力低于弹性极限的条件下出现^[4]。此外,温度也是影响蠕变的重要因素之一,当试验温度(T)与金属熔点温度(T_m)之比 >0.3 时,蠕变现象会很明显。陈宇强等^[5]通过对 2024 铝合金进行 100 h 的高温(125~200 °C)蠕变试验,发现蠕变应力随着温度的升高而下降。铝合金在高于 100 °C 的温度下,蠕变现象明显。蠕变现象主要机制是位错滑移与位错攀移。金属高温蠕变曲线通常包含以下 3 个阶段(见图 1):第 I 阶段为蠕变减速阶段,即 AB 段,开始蠕变速率很大,随着时间的延长,蠕变速率 $d\epsilon/dt$ 逐渐减小, B 点 $d\epsilon/dt$ 达到最小值。该阶段中,瞬时应变(ϵ_0)引起的加工硬化使得蠕变阻力增大,蠕变速率减缓,蠕变量随时间变化符合 Andrade 定律;第 II 阶段为稳态蠕变阶段,即 BC 段,此阶段加工硬化和回复软化之间达到了动态平衡,蠕变速率达到最小值,并几乎保持不变,此时 $d\epsilon/dt$ 为常

作者单位:广东产品质量监督检验研究院,广东 广州 510670

数, 蠕变应变与时间之间呈线性关系; 第Ⅲ阶段为蠕变加速阶段, 即 CD 段, 随蠕变过程的进行, $d\varepsilon/dt$ 逐渐增大, 直到 D 点发生断裂。此阶段蠕变速率急剧上升, 主要表现为回复软化, 材料会出现颈缩、空洞和裂纹等缺陷, 最终发生断裂。通过降低温度或应力, 可以延长蠕变的第Ⅰ阶段和第Ⅱ阶段。在较低温度下, 由于不会出现回复软化, 蠕变仅出现在第Ⅰ阶段, 而在高温或高载情况下, 蠕变的减速阶段和稳态蠕变阶段将缩短^[4]。

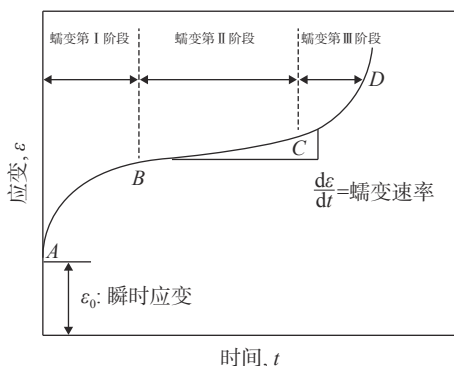


图1 金属高温蠕变曲线

金属材料蠕变性能是否良好可以通过以下几个方面进行评估:

(1) 蠕变曲线: 观察金属材料在不同温度和不同应力条件下的蠕变曲线。良好的蠕变性能表现为蠕变曲线斜率较小, 即蠕变速率较低。

(2) 蠕变阶段: 分析蠕变过程中的减速、稳态和加速阶段。良好的蠕变性能表现为减速阶段较长, 稳态阶段稳定, 加速阶段较短。

(3) 材料性质: 蠕变行为会受到不同材料的组分和微观组织的影响, 比如材料的晶体学结构、缺陷和晶粒间相互作用等因素都会影响蠕变行为^[6-7]。

(4) 蠕变伸长率: 良好的蠕变性能表现为较小的伸长量。

(5) 温度和应力影响: 良好的蠕变性能表现为在较高温度和较大应力条件下, 蠕变速率和伸长率较小。

总体而言, 金属蠕变性能受材料性质(如组分、微观组织)、作用时间、作用温度和施加的结构载荷等因素影响。深入了解这些因素, 对企业在铝合金电线电缆生产过程中, 如何更好地进行材料

设计与应用具有十分重要意义。

铝合金拉伸应力蠕变测试方法

样品制备

本试验制备拉伸试样标准采用国家标准 GB/T 2039—2012《金属材料单轴拉伸应力蠕变试验方法》^[8], 图2为拉伸试验试样的加工形状和尺寸数据。拉伸应力蠕变试样形状呈长条圆柱形, 两端直径稍大部分为试样与蠕变试验机螺旋固定处, 试样中间两处圆环凸起部位分别用于上、下引伸计固定, 中间部分为试样标距段。试样标距段横截面直径为 5 mm, 正负公差 0.03 mm, 试样标距段长度为 25 mm, 正负公差 0.02 mm, 整个试样长约 74 mm。试样需进行表面磨抛处理, 以降低试样的表面缺陷和残余变形, 满足标准要求^[5,7]。

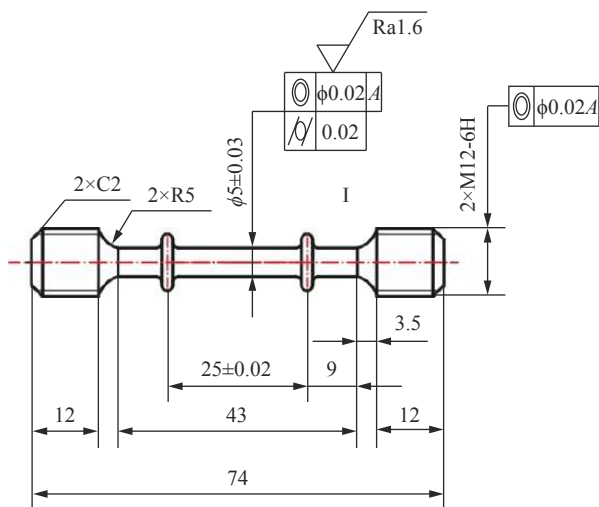


图2 试样形状和尺寸示意图 (单位: mm)

试验方法及实例

拉伸应力蠕变试验主要在中机试验设备有限公司生产的 RDL100 高温电子蠕变松弛试验机上进行。拉伸应变蠕变试验分为 2 步, 一是在正式蠕变试验前进行预加载, 预加载负荷为 0.1 kN; 二是试验机将温度缓慢升至设定温度并保温, 以确保蠕变试验时温度稳定, 保温时间为 60 min。图3是 5083 铝合金在 200 °C 条件下, 应力为 50、70 和 100 MPa 时拉伸蠕变试验的蠕变应变-时间曲线图^[8]。从图中可以看出在试验温度一致的情况下, 对样品施加的

应力越大,试样的蠕变速率越高。对样品施加 50 MPa 的应力时,试样的蠕变速率更能接近金属高温蠕变的第Ⅱ阶段,即稳态阶段。而对样品施加到 100 MPa 的应力时,由于应变变化较大,试样的抗蠕变性能不佳。

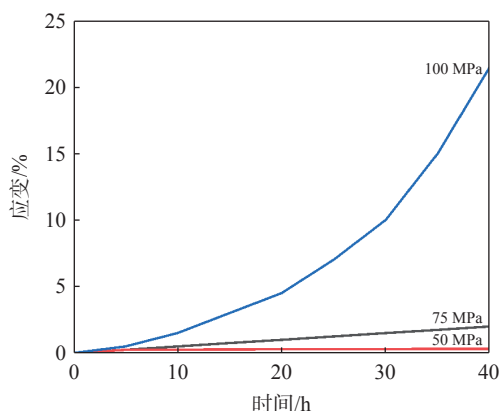


图3 200 °C 5083 铝合金蠕变应变-时间曲线图

铝合金单线抗压蠕变试验

蠕变数据作为材料基因大数据中的一部分,其测试时间长、测试成本高,因此蠕变试验需开发新的测试方法。作为高通量蠕变试验设备开发的方向之一,压缩蠕变试验相较于拉伸蠕变试验具有材料不易断裂、无缩颈现象,试验操作简单和对样品的预处理要求不高等优点,缺点是试验时间长。采用

压缩蠕变试验替代传统的拉伸试验,可以使得蠕变试验的高通量目标容易实现^[8]。

意义

蠕变实验是评估铝合金芯挤包绝缘电力电缆在高温和高载环境下长期稳定性的重要手段之一。通过蠕变试验,可以获得实际工程应用所需的理论依据和数据支持,为评估铝合金材料的蠕变性能提供参考^[9]。在评估铝合金电线电缆的蠕变性能时,可以参照 GB/T 30552—2014 附录 B 中的铝合金单线抗压蠕变试验方法。材料将在高温下受到恒定应力作用长达 100 h,应变会随时间的变化而变化。通过这种试验方法,可以揭示金属材料在不同应力、不同温度 and 不同时间点下的力学性能。试验结束后通过绘制“蠕变应变-时间”曲线可以了解材料在蠕变试验中的变形规律和行为特点,该曲线也是描述蠕变行为最直接的方法,可以为企业生产铝合金电线电缆时提供重要的参考数据^[4]。

方法

样品制备

抗压蠕变试样应与铝合金芯挤包绝缘电力电缆具有相同的化学成分和状态^[10-11],根据标准要求抗压蠕变试验样品长度应取其外径的 2.5~3.5 倍,试验前样品进行严格的表面处理和预处理,须符合水平度、垂直度、粗糙度的精度要求,见图 4。

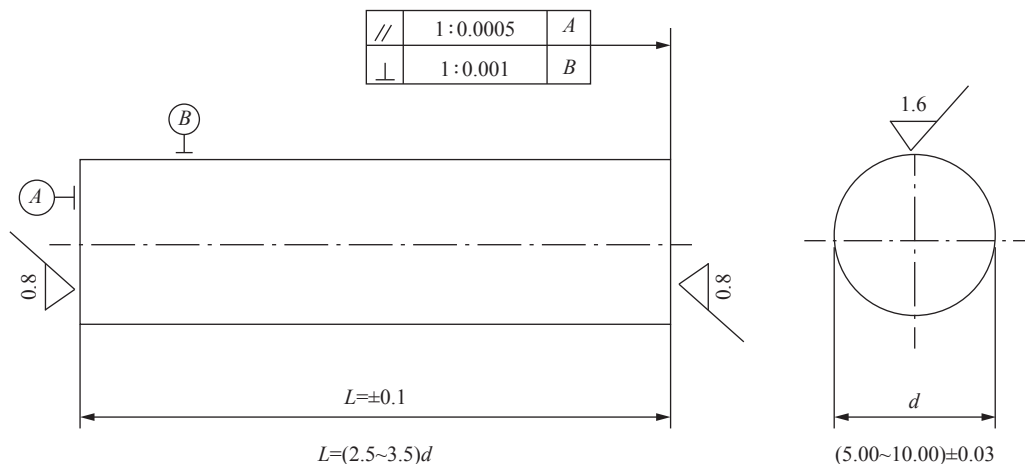


图4 抗压蠕变试样 (A 为水平度, B 为垂直度, 单位: mm)

试样设备与仪器

(1) 试验机应符合 GB/T 16825.2—2005 中 1 级

试验机的要求。为了使试样上产生的弯矩和扭矩最小化,电子蠕变持久试验机应提供轴向试验力。

(2) 在进行试验前, 需要检查试验机的加力杆、夹具、万向节、连接装置, 确保均处在良好的状态。试验机应在远离外界震动和冲击的环境中放置。

(3) 试验力的加载同轴度不应超过 10%。

(4) 蠕变变形测量仪器的分辨力应不大于 0.001 mm, 误差应不大于总蠕变变形量的 $\pm 1.0\%$ 。

(5) 确保高温箱的温度能达到 50~120 °C。

(6) 电子蠕变持久试验机上下压板工作平面应是平行的, 且安装试验区 100 mm 范围的平行度不低于 1:0.002; 压板硬度应不低于 HRC 55^[10-11]。

步骤和方法

(1) 试样应垂直放置在试验机的上下压板之间;

(2) 将样品加热到规定温度 (50~120 °C) 范围内, 试验压应力应为屈服强度的 70%~100%;

(3) 如果试验中装有引伸计, 升温过程中应加载小于 10% 的试验压应力, 以保持试样加载链的同轴度, 并至少保温 30 min, 目的是为了使试样、夹持装置和引伸计三者均达到热平衡的状态;

(4) 当试验力全部施加在试样上时, 开始进行蠕变试验, 并从 t_0 时刻开始记录蠕变变形, 持续 100 h;

(5) 试验过程中应保持载荷恒定, 温度波动偏差不能超过 ± 3 °C;

(6) 在试验的前 20 h 内, 每隔 20 min 记录一次蠕变数据。20 h 过后, 记录如下时间点的蠕变数据, 20.0、22.5、25.5、28.5、32.5、36.5、41.5、47.0、53.0、60.0、68.0、76.5、86.5、100.0 h;

(7) 根据记录的蠕变变形数据, 绘制“蠕变应变-时间”的曲线图, 蠕变应变与时间的双对数坐标轴上, 采集的数据会趋向于一条直线^[10-11]。

注意事项

当发生以下情况之一, 应视为无效试验, 需重新取样进行重复试验: 试样发生明显的塑性变形、端部局部压坏或试验过程中操作不当和设备故障引起的试验结果有误^[11]。

试验实例

以某单位生产的试样 WDZA-YJLHY23 26/35KV 为例, 送检试样铝合金杆直径为 9.6 mm, 按照 GB/T 30552—2014 附录 B 铝合金单线抗压蠕变试验

方法, 试样长度取试样外径的 2.5 倍, 即 24 mm。试样经过表面处理及预处理后开始进行试验, 将试样放置在试验机的上下压板之间, 调整试样使其纵轴线与压板纵轴线重合, 调整压缩夹具接近至上压板, 其次将光栅尺接在导向杆上, 调节好距离, 并拧紧螺丝。试样的压缩屈服强度为 87 MPa, 试验强度取 75 MPa, 将高温箱的温度设置在 90 °C, 试样在升温过程中施加小于 10% 试验压应力 (534 N) 来保持试样加载链的同轴, 当试样加热到规定温度时, 保温 30 min, 进行 100 h 的抗压蠕变试验。试样在高温加载过程中从一开始的变形率 0.71% 上升为 0.86%, 即发生了蠕变行为。图 5 为固定点蠕变应变与时间的曲线图, 依照抗压蠕变试验方法第 6 点中规定的记录蠕变时刻, 在 0.33 h 时试样应变为 0.7854%, 试验进行到 100 h 时, 应变提升为 0.8604%, 随着时间的增加, 蠕变曲线的斜率较小, 即蠕变的速率较低, 试样表现出良好的抗蠕变性能。图 6 为

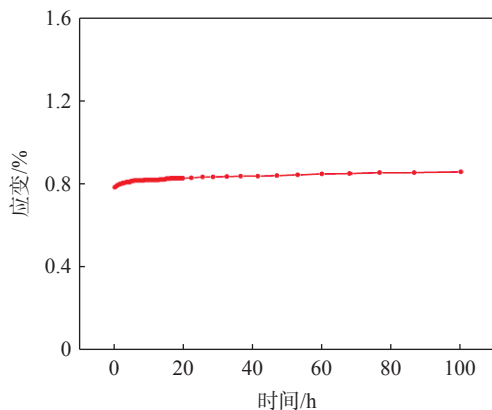


图 5 固定点蠕变应变-时间曲线

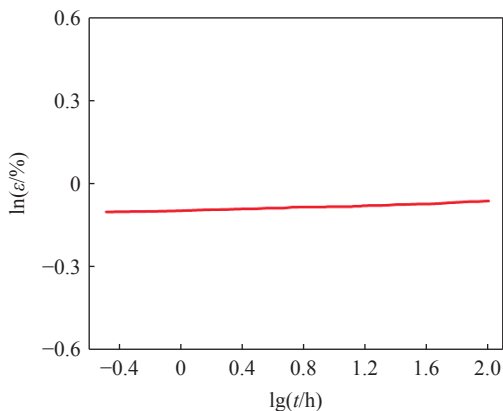


图 6 蠕变应变-时间双对数曲线

试样经 100 h 的抗压蠕变试验时蠕变应变与时间的双对数曲线, 此时双对数曲线近似于一条直线。

环境条件对试验的影响

蠕变是指材料在受到拉伸或压缩作用下发生的变形现象, 需要考虑不同环境条件下的影响。以下不同环境条件对拉伸应力蠕变和抗压蠕变试验的影响:

(1) 温度

高温环境: 在高温下, 材料的分子活动增强, 通常会导致拉、压蠕变速率增加, 材料的拉、压蠕变性能通常会下降。

低温环境: 在低温下, 材料的分子活动减弱, 拉、压蠕变速率通常减慢, 但某些材料在极低温下可能会出现脆性断裂的情况。

(2) 湿度:

高湿环境: 湿度高的环境可能会加速材料的蠕变速率, 尤其是对于一些金属材料和聚合物材料而言。

低湿环境: 较低的湿度可能会减缓材料的蠕变速率, 但仍需注意可能出现的其他环境因素对材料的影响。

(3) 环境气氛:

氧气含量: 氧气含量高的环境可能会加速一些金属材料的氧化蠕变, 增加材料的蠕变速率。

化学物质: 某些化学物质可能会对材料的蠕变性能产生影响, 导致蠕变速率的增加或减慢。

结束语

(1) 在实际应用中需要考虑不同环境条件、应力、时间、材料组分和微观组织等因素对铝合金材料蠕变性能的影响, 确保铝合金材料在工程应用中的安全可靠。

(2) 相较于拉伸应力蠕变试验, 单线抗压蠕变试验因其制备试样 (尤其是对于复杂形状的工件)

的预处理更为简便且成本较低, 避免了拉伸应力蠕变试验的技术挑战, 因此单线抗压蠕变试验在某些情况下成为更优选择。铝合金拉伸应力蠕变试验方法和单线抗压蠕变试验方法为电线电缆产品质量检验从业者提供了可行的检测思路, 帮助检验从业者和企业了解铝合金导体材料在蠕变试验条件下的状态和性能。

参考文献

- [1] 岳嵩, 邓显波, 张嘉艺, 等. 低温下 Sc 微合金化对 8xxx 系铝合金导线蠕变性能的影响. 材料热处理学报, 2017, 38(9): 36
- [2] 黄洁, 倪诚蔚, 普康晶, 等. 全球交通用铝合金技术发展态势研究——基于 CiteSpace 知识图谱分析. 金属世界, 2024(1): 8
- [3] 刘志扬. 2024 铝合金黑色微弧氧化膜制备与性能研究. 金属世界, 2023(5): 36
- [4] 孙茗, 庄景巍, 邓海亮, 等. 高温抗蠕变铝合金及铝基复合材料研究进展. 材料导报, 2021, 35(11): 11138
- [5] 陈宇强, 易丹青, 潘素平, 等. 温度对 2024 铝合金蠕变行为的影响. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 632
- [6] 李鑫. 铝合金在拉伸/压缩应力下的蠕变行为研究 [学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
- [7] 江超, 赵凯. 温度对 7A60 铝合金材料的寿命影响的研究. 核标准计量与质量, 2010(1): 48
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. GB/T 2039—2012 金属材料单轴拉伸蠕变试验方法. 北京: 中国标准出版社, 2012
- [9] 吴振江. 铝合金导体应用发展历程及现状. 有色金属材料与工程, 2018, 39(4): 42
- [10] 庄景巍, 黎强, 邓海亮, 等. 一种金属材料单轴抗蠕变试验试样、夹具及方法: 中国专利, 109030196A, 2018-12-18
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 30552—2014 电缆导体用铝合金线, 北京: 中国标准出版社, 2014

作者简介: 陈银胜 (1995—), 男, 广东省汕尾市人, 主要研究方向: 电线电缆产品质量, 通信地址: 广东省广州市黄埔区科学大道 10 号; E-mail: 18898602235@163.com。

何庭宇 (1998—), 男, 湖北省黄冈市人, 检验员, 主要研究方向: 电线电缆产品质量, 通信地址: 广东省广州市黄埔区科学大道 10 号; E-mail: 490694241@qq.com。