

发动机高温螺栓紧固可靠性研究

赵振龙^{1,2}, 孙丹^{1,2}, 崔海冰^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:针对高温工作环境下螺栓轴力衰减问题,理论分析螺栓轴力衰减的原因;通过试验研究和分析螺栓工作温度、材料性能变化、高温蠕变、热膨胀等对高温螺栓的轴力衰减规律。研究表明:高温下材料机械性能下降、蠕变增加是导致高温螺栓轴力衰减的主要因素,材料、温度、载荷等影响高温蠕变速率,温度越高、载荷越大,蠕变速率越快,螺栓紧固件材料设计选择、连接结构优化、降低工作温度等可提高高温螺栓的可靠性。

关键词:高温螺栓;高温蠕变;热膨胀

中图分类号:TK406

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0028-07

引用格式:赵振龙,孙丹,崔海冰.发动机高温螺栓紧固可靠性研究[J].内燃机与动力装置,2022,39(2):28-34.

ZHAO Zhenlong, SUN dan, CUI Haibing. Reliability research on engine high temperature bolt fastening[J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(2):28-34.

0 引言

随着发动机功率密度、排气温度、零部件热负荷不断提高,对高温零件的紧固和密封可靠性提出更高的要求^[1]。发动机高温螺栓的工作温度高达 700 ℃,导致排气管出口、增压器废气法兰等部位经常出现螺栓断裂失效和漏气故障^[2-3]。吴卫钰等^[4]通过试验确认排气歧管结构优化和定位孔优化可以减小排气歧管关键部位热变形对紧固螺栓的挤压剪切,从而解决紧固螺栓断裂的问题;王伟^[5]研究分析了螺栓材料耐热性能对紧固可靠性的影响;隋鹏超等^[6]研究分析了螺栓连接结构对螺栓轴力波动的影响。本文中从紧固件工作温度、高温材料性能变化、高温蠕变及热膨胀、螺栓连接结构等多个角度分析高温螺栓轴力衰减规律,针对不同的影响因素提出相应的解决措施,有效提高高温紧固可靠性和密封可靠性。

1 螺栓轴力衰减理论分析

螺栓轴力可由弹性模量、应力、应变的定义推导得到。

弹性模量

$$E = \sigma / \varepsilon,$$

式中: σ 为应力,MPa; ε 为应变。

应力

$$\sigma = F / A,$$

式中: F 为螺栓轴力,kN; A 为螺栓截面积,mm²。

应变

$$\varepsilon = \Delta l / l,$$

收稿日期:2021-06-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000302)

第一作者简介:赵振龙(1990—),男,山东东营人,工程师,主要研究方向为发动机紧固可靠性,E-mail:zhaozl@weichai.com。

式中: l 为螺栓长度,mm; Δ_l 为螺栓伸长量,mm。

由式(1)~(3)可知:

$$F = AE\Delta_l/l。 \quad (4)$$

对于确定的螺栓, A 、 l 不变,由式(4)可知,高温环境下, F 随 E 和 Δ_l 的变化而变化。

金属材料的弹性模量和强度是高温环境下螺栓轴力衰减的主要因素^[7-8]。金属材料的弹性模量和强度随着温度增加而降低,弹性模量降低直接导致轴力下降,材料强度降低导致螺栓最大承载能力减小。螺栓经过淬火或固溶时效等热处理工艺后,其强度发生变化,原材料的标准性能参数并不能完全适用于工程实际应用。因此,有必要对紧固件在不同温度下的强度进行研究。

高温蠕变是导致螺栓轴力衰减的重要因素之一^[9-10]。蠕变是固体材料在应力不变的条件下,应变随时间延长而增加的现象。蠕变多属于塑性变形,不可回弹。零件承受的应力越大,工作温度越高,时间越长,蠕变量越大。高温蠕变产生的塑性变形可导致螺栓轴力松弛衰减。蠕变属于材料的固有属性,主要取决于材料的组成成分,例如材料中镍元素含量较高时,材料表现出来的耐温特性更优。高温蠕变对不同材料成分高温螺栓,轴力衰减的影响不同。

热膨胀也会导致螺栓轴力的变化^[11-12]。热膨胀受材料热膨胀系数、零件长度、工作温度等的影响。以图1所示的排气管螺栓连接结构为例,由于螺栓、套筒和法兰的材料及尺寸不同,3个零件产生的热膨胀存在差异,进而导致螺栓轴力的波动。单纯抑制螺栓的热膨胀不能有效解决轴力衰减问题,需要优化螺栓及被连接件的材料及尺寸配合。

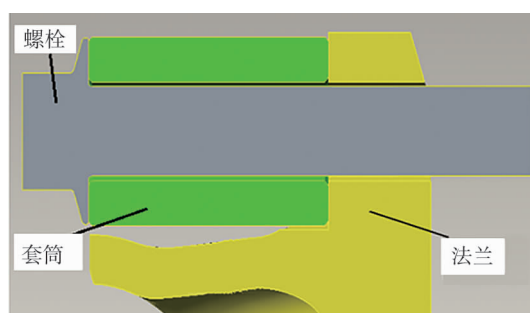


图1 排气管螺栓连接结构

2 高温螺栓轴力衰减研究

根据螺栓轴力衰减的理论分析,本文中从螺栓工作温度探测、材料性能变化、高温蠕变、热膨胀等方面对高温螺栓的轴力衰减规律进行研究和分析。

2.1 高温螺栓工作温度测量

常用的耐热螺栓包括排气管螺栓、增压器螺栓、废气再循环(exhaust gas recirculation,EGR)高温气体管路螺栓等。选取A、B两款发动机,采用热电偶测量主要高温螺栓的温度,测量位置如图2所示。发动机按照外特性曲线运行,转速由怠速开始,以50 r/min为间隔升高到标定转速,每个转速点稳定运行5 min以上,螺栓工作温度稳定后再运行下一工况。

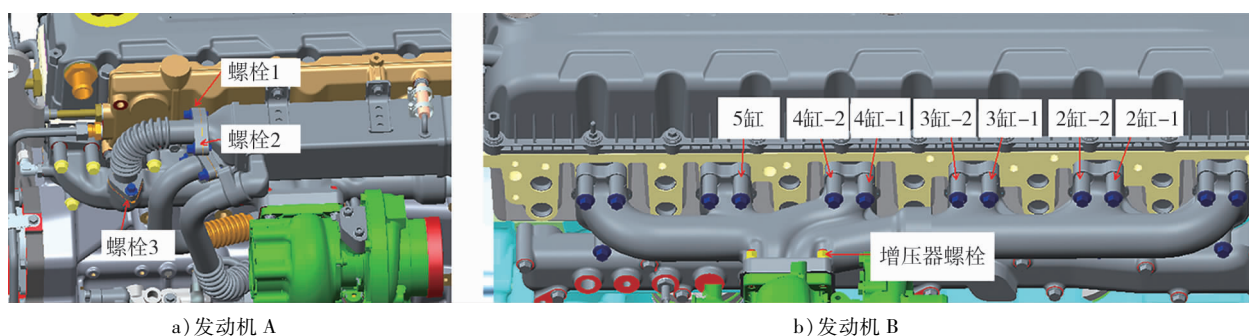


图2 测试高温螺栓位置

发动机A EGR管路固定螺栓、发动机B排气管螺栓和增压器螺栓的温度测试结果如图3、4所示。

由图3、4可知:1)发动机A EGR管路固定管螺栓最高温度与涡轮排温差异较小,主要原因为各缸排

气均汇集到 EGR 管路,导致固定螺栓温度较高;2) 发动机 B 排气管螺栓最高温度为 341 ℃,增压器螺栓最高温度为 514 ℃;由于套筒结构隔热,排气管螺栓温度较低;增压器螺栓安装在增压器废气法兰位置,是各缸排气汇集处,温度较高;3) 排气管螺栓温度较低,一般低于 400 ℃;增压器螺栓和 EGR 管路螺栓温度较高,达到 500~600 ℃,随着排气温度的增加,甚至更高。

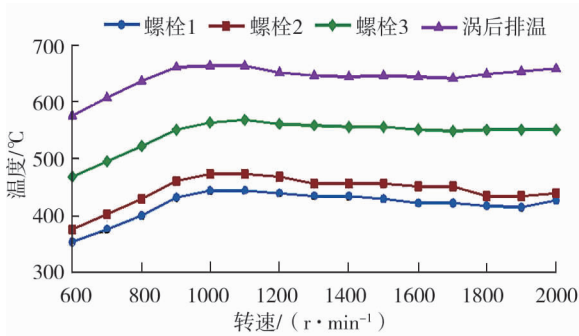


图3 发动机A EGR管路固定螺栓温度测试曲线

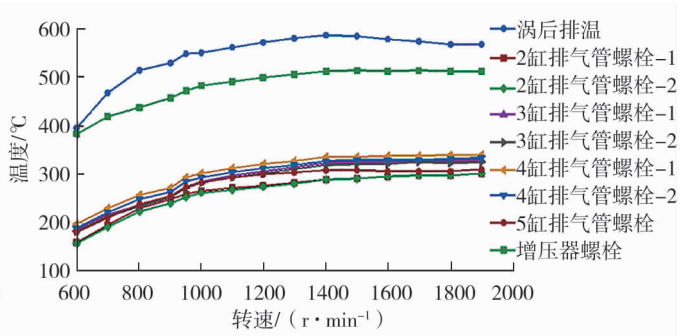
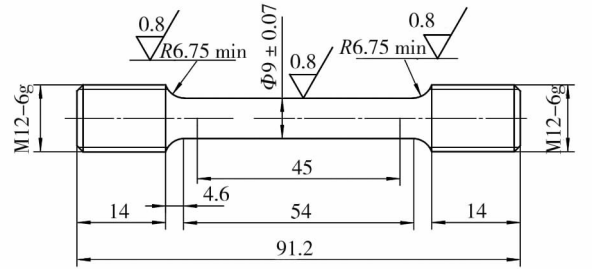


图4 发动机B高温螺栓温度测试曲线

2.2 螺栓材料强度随温度的变化

金属材料的强度和弹性模量随温度增加而降低,弹性模量降低导致轴力下降,强度降低导致螺栓更容易达到屈服状态,可承受载荷能力降低。

根据文献[13]规定的试验方法,采用试棒测试不同材料高温螺栓在不同温度下的强度。本文中选用高温螺栓常用的 25Cr2MoVA、40Cr10Si2Mo、42Cr9Si2、和 06Cr15Ni25Ti2MoALVB 4 种材料加工成试棒,试棒参数如图 5 所示。按照螺栓图纸要求对试棒进行热处理,使之更接近螺栓的真实强度。将试棒夹持在高温拉伸试验机上,先加热 2 h 达到预设温度并保温 0.5 h,然后进行拉伸试验和屈服强度试验。试验完成后,对测得的不同温度下的抗拉和屈服强度进行曲线拟合,形成螺栓材料拉伸强度、屈服强度随温度的变化曲线,如图 6 所示。



注:图中单位为 mm。

图5 材料试棒参数

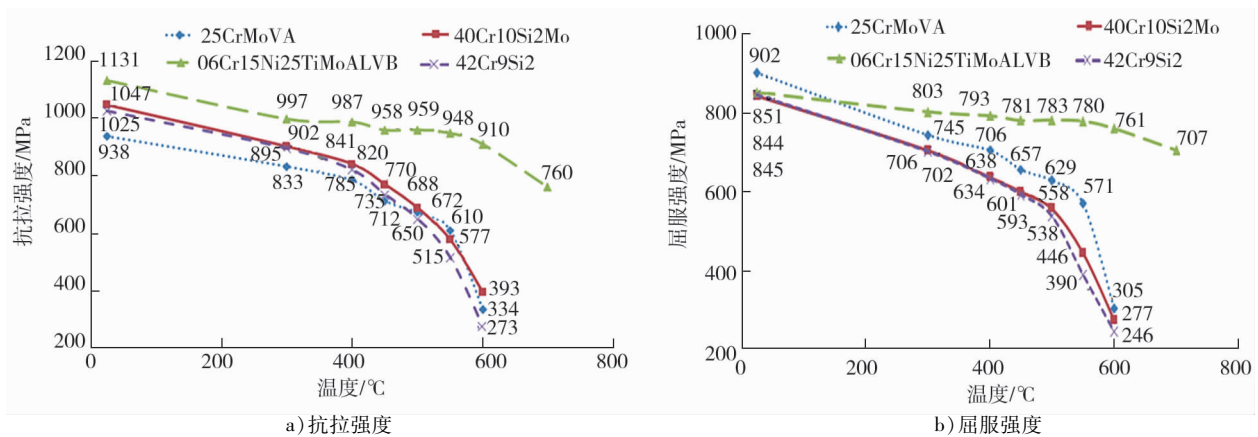
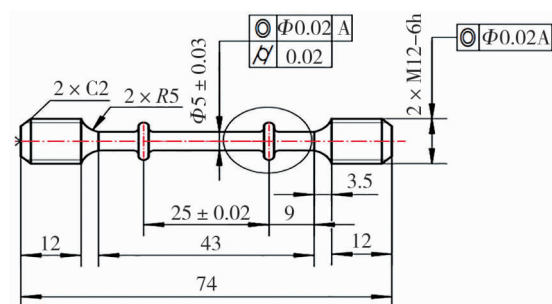


图6 螺栓材料抗拉强度、屈服强度随温度变化曲线

由图 6 可知:1) 4 种材料的抗拉和屈服强度均随温度的升高而下降;2) 材料 25Cr2MoVA、40Cr10Si2Mo、42Cr9Si2 的抗拉和屈服强度下降明显,温度高于 550 ℃时,3 种材料的抗拉强度和屈服强度较常温时下降 60% 以上;3) 06Cr15Ni25Ti2MoALVB 性能稳定,温度高于 550 ℃时,抗拉强度和屈服强度下降 20% 左右。材料 06Cr15Ni25Ti2MoALVB 耐高温性能更优,是高温螺栓优选材料。

2.3 螺栓材料高温蠕变性能

根据文献[14]推荐的试验方法对 25Cr2MoVA、40Cr10Si2Mo、06Cr15Ni25Ti2MoALVB 材料进行高温蠕变试验。按照如图 7 所示的高温蠕变试棒图纸制作试验试棒,并按照螺栓技术要求进行热处理。蠕变试棒夹持在高温蠕变试验机上,加热至规定温度(根据 2.1 节测得螺栓实际工作温度,设定 500、600 ℃ 2 种温度边界)并保温 1 h,对试棒加载预设轴力(将高温紧固件的预紧轴力换算成试棒的试验拉伸轴力,设定 2 种载荷,分别为 5、8 kN);试验过程中采用引伸计测试试棒蠕变,测试位置为试棒中间直径为 5 mm、长度为 25 mm 的圆柱段,设备自动生成蠕变随时间变化的曲线;试验总时间为 480 h,期间若试棒断裂,则终止试验。25Cr2MoVA 材料在轴力为 8 kN、温度为 500 ℃ 条件下的蠕变随时间变化曲线、蠕变速率曲线分别如图 8 所示。3 种材料试棒的高温蠕变试验结果如表 1 所示。



注:图中单位为 mm。

图 7 高温蠕变试棒数据

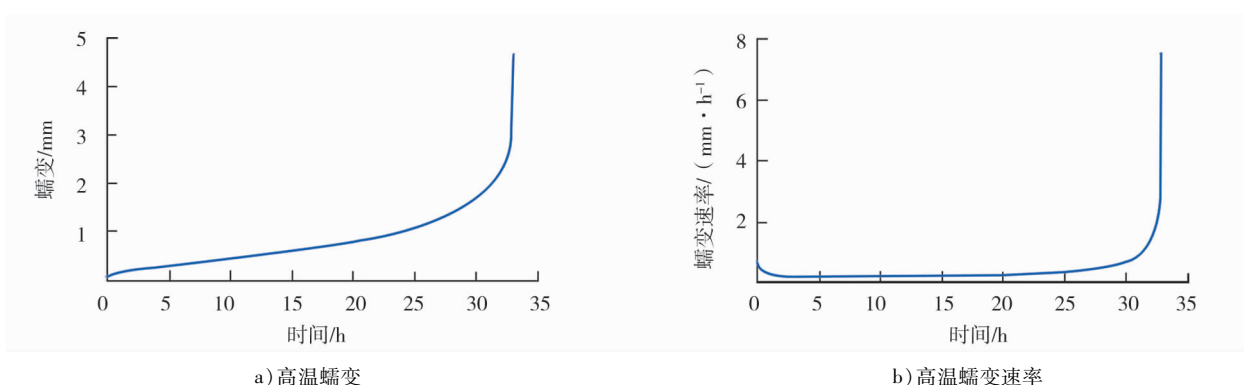


图 8 25Cr2MoVA 材料高温蠕变及蠕变速率曲线

表 1 3 种材料高温蠕变试验结果

材料	轴力/kN	蠕变结果	
		500 ℃	600 ℃
25Cr2MoVA	5	0.324 mm (480 h)	断裂(1.9 h)
	8	断裂(33 h)	断裂(0.06 h)
40Cr10Si2Mo	5	0.071 mm(449 h)	断裂(2.7 h)
	8	断裂(43 h)	断裂(0.05 h)
06Cr15Ni25Ti2MoALVB	5	0	0
	8	0	0.007 mm(477 h)

由图 8 及表 1 可知:1)轴力越大,相同时间内蠕变越大,蠕变速率越快;2)温度越高,相同时间内蠕变越大,蠕变速率越快;3)结合图 6 可知,由于强度下降以及高温蠕变大等原因,25Cr2MoVA 和 40Cr10Si2Mo 材料在 600 ℃ 时无法使用;4)06Cr15Ni25Ti2MoALVB 材料高温蠕变特性表现良好,在大轴力(8 kN)及高温(600 ℃)条件下蠕变很小。

25Cr2MoVA 和 40Cr10Si2Mo 材料在相同温度和相同轴力条件下,高温蠕变差异较小,其高温蠕变速率对比如图 9 所示。由图 9 可知:材料 25Cr2MoVA 和 40Cr10Si2Mo 的高温蠕变速率基本一致,但 40Cr10Si2Mo 蠕变速率更稳定,波动更小。

2.4 热膨胀对紧固轴力衰减的影响

采用有限元仿真方法分析零部件热膨胀差异对螺栓轴力衰减的影响。

排气管螺栓的传热途径如图 10 所示,排气管螺栓及套筒温度梯度分布如图 11 所示。由图 10、11 可知,排气管螺栓的传热途径为:排气管—套筒—螺栓头部—螺栓杆身—螺栓尾部,螺栓尾部拧入缸盖的螺纹附近有水腔,流动的冷却液带走部分热量,因此螺栓尾部温度较低。

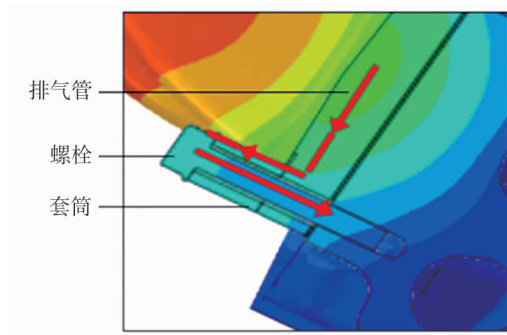


图 10 螺栓传热途径

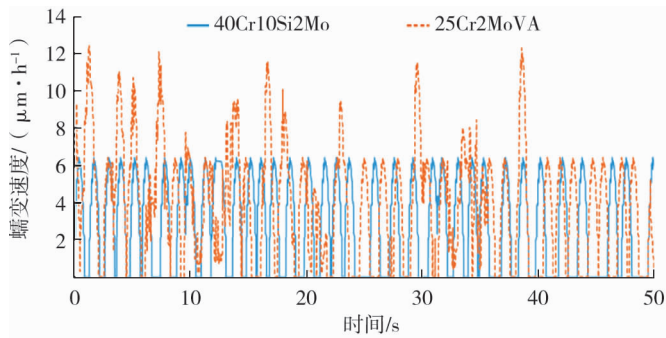


图 9 材料 25Cr2MoVA 和 40Cr10Si2Mo 高温蠕变速率对比

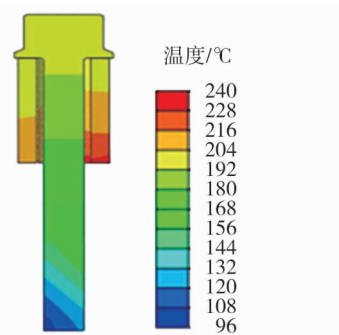


图 11 排气管螺栓及套筒温度梯度

材料 25Cr2MoVA、40Cr10Si2Mo、06Cr15Ni25Ti2MoALVB 在工作温度为 600 °C 范围内的热膨胀系数分别为 $14.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、 $12.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 、 $18.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

以发动机 B 排气管螺栓连接结构为例,计算分析热膨胀和蠕变对螺栓轴力的影响^[15-16]。热膨胀、高温蠕变塑性变形对轴力衰减的影响曲线如图 12 所示,图中 1#~6# 分别表示排气管上 2~4 缸的高温螺栓。

由图 12 可知:发动机运行至额定工况时,热膨胀导致各螺栓的轴力微增,原因为排气管螺栓连接结构各零件的热膨胀量差异,螺栓伸长量较其他零件热膨胀伸长量更大,进而带来轴力的增加(假定螺栓及套筒的弹性模量变化相同);受到蠕变塑性变形的影响,各螺栓轴力均略微下降。

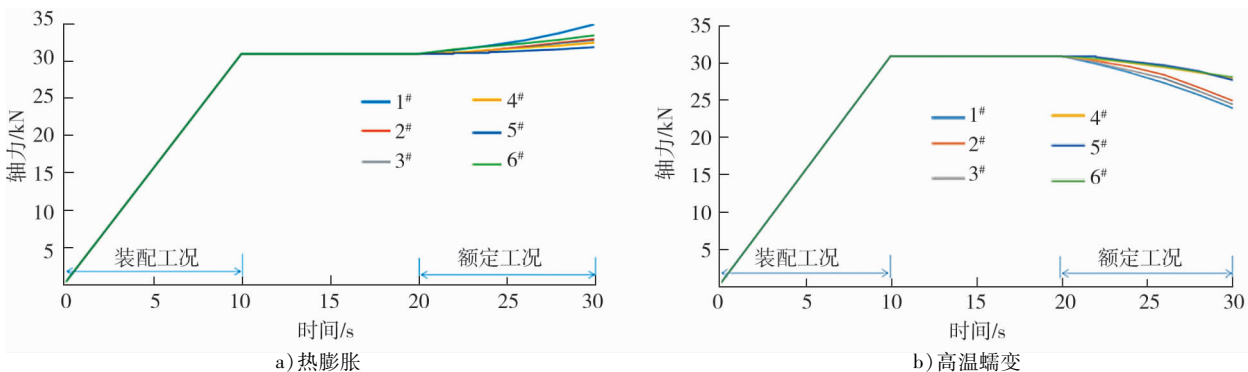


图 12 热膨胀和高温蠕变对轴力的影响

在发动机台架耐久试验中,工作温度达到 600 °C 时,采用 40Cr10Si2Mo 材料制造的螺栓短时间内即出现螺栓松弛和断裂故障,更换为 06Cr15Ni25Ti2MoALVB 螺栓之后未出现同样的故障。与 40Cr10Si2Mo 材料相比,06Cr15Ni25Ti2MoALVB 材料高温下的热膨胀系数更大,但其对螺栓轴力的影响较小,主要原因为 06Cr15Ni25Ti2MoALVB 材料具有稳定的蠕变特性和强度保持能力,各零件热膨胀差异对轴力衰减的影响较小。

2.5 紧固结构对轴力衰减的影响

套筒隔热可降低螺栓工作温度。无套筒的排气管螺栓连接结构如图13所示,该结构的排气管上设计有高法兰结构,经测试,螺栓头部温度为540℃,螺纹位置温度为238℃。具有套筒的螺栓连接结构如图14所示,螺栓头部温度降低到454℃。

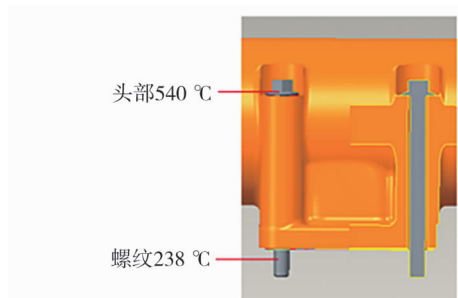


图13 高法兰结构螺栓温度测试结果

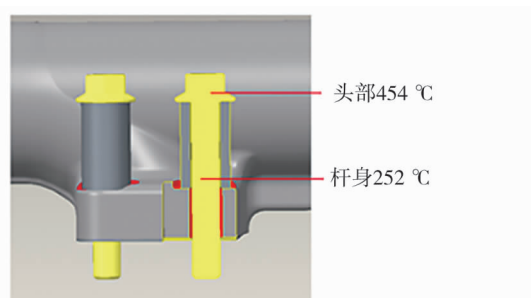


图14 套筒结构螺栓温度测试结果

由图13、14可知,套筒可明显降低螺栓工作温度,降低螺栓轴力的衰减。

2.6 其他耐高温紧固件材料

除以上4种耐温材料,行业内常用的还有SNB16、A286、SUH660等。SNB16材料的耐温性能与40Cr10Si2Mo相近,A286、SUH660材料的,耐温性能与06Cr15Ni25Ti2MoALVB相近。为适应更高温度的需求,高镍合金Inconel718、80A也逐渐应用于发动机高温紧固件。

3 高温螺栓连接可靠性设计

3.1 螺栓材料选择

根据螺栓工作温度选择合适的材料。产品设计阶段应通过仿真计算分析螺栓的工作极限温度,结合材料强度随温度变化特性以及高温蠕变特性,低500℃选取成本较低的25Cr2MoVA或40Cr10Si2Mo,高于500℃选用耐温性能更优的06Cr15Ni25Ti2MoALVB(最高温度不超过650℃)。

3.2 螺栓连接结构选择

为降低螺栓工作温度,可选择有套筒的螺栓连接结构。套筒连接结构还可增长螺栓的夹持长度,对于螺栓连接防松和疲劳寿命也有利,一般推荐夹紧长度大于 $(3\sim5)d$, d 为螺栓公称直径;考虑到热膨胀影响,套筒材料热膨胀系数尽量与螺栓保持相近或一致。

4 结论

分析螺栓轴力衰减的原因,并对高温条件下材料强度、蠕变、热膨胀等因素对螺栓轴力衰减的影响规律进行了研究。

1)造成高温紧固件轴力衰减的因素有高温下材料机械性能下降、蠕变增加。

2)影响高温蠕变速率的因素有材料、温度、载荷,温度越高、载荷越大,蠕变速率越快。

3)为提高高温连接可靠性,首先评估螺栓工作温度,根据温度选取螺栓合适耐温材料;同时设计合理的连接结构可达到降低工作温度,进而减小对轴力衰减的影响。

参考文献:

- [1]梁善飞,张沛毅,吴卫钰.发动机排气歧管螺栓断裂仿真分析及试验研究[J].内燃机与动力装置,2017,34(3):41-43.
- [2]沈轶,陆晓峰.高温法兰连接系统的失效分析[J].润滑与密封,2006,176(4):164-166.
- [3]林同平.前排气管与发动机排气歧管联接螺母松脱问题分析及改进[J].机电技术,2003(2):29-32.

- [4] 吴卫钰,梁善飞,王勇,等. 某涡轮增压发动机排气歧管紧固螺栓断裂的原因分析[J]. 内燃机,2017(2):42-44.
- [5] 王伟. 发动机排气歧管区域螺栓应用合理性讨论[J]. 内燃机,2017(5):50-53.
- [6] 隋鹏超,栗明,王德成. 排气歧管不同紧固密封方式对密封性影响分析[J]. 内燃机与动力装置,2017,34(6):30-32.
- [7] 刘春延. 材料力学性能[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [8] British Standards Institution. Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties; BS EN 10269[S]. London, UK: BSI, 2013.
- [9] 唐锦茹,彭震中,梁立德. 高温螺栓松弛的剩余应力计算[J]. 水利电力机械,1994(4):11-13.
- [10] 张维维. 电站高温螺栓松弛力学行为的研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [11] 曹文霞,范习民. 发动机关键部件金属材料随温度变化性能测试[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(3):51-55.
- [12] 陈玮,范习民. 发动机金属材料随温度变化的性能研究[J]. 内燃机,2021(4):10-15.
- [13] 中国钢铁工业协会. 金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试验方法:GB/T 228.2—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [14] 中国钢铁工业协会. 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法:GB/T 2039—2012[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [15] 范习民,钱德猛,李龙超. 某柴油机排气歧管螺栓松动分析与优化设计[J]. 机械工程师,2014(9):131-133.
- [16] 叶志伟,路明. 排气歧管螺栓预紧力衰减研究[J]. 内燃机与动力装置,2015,32(1):46-48.

Reliability research on engine high temperature bolt fastening

ZHAO Zhenlong^{1,2}, SUN Dan^{1,2}, CUI Haibing^{1,2}

1. State Key Laboratory of Internal Combustion Engine Reliability, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: Aiming at the problem of axial force attenuation under the working condition of high-temperature bolts, the axial force attenuation law of high-temperature bolts is studied and analyzed from the aspects of bolt working temperature detection, material property change, high-temperature creep, thermal expansion and so on. The results show that the decrease of mechanical properties, high temperature creep and thermal expansion are the main factors leading to the attenuation of axial force of high temperature fasteners. The factors affecting the high temperature creep rate are material, temperature and load. The higher the temperature and load, the faster the creep rate. High temperature fastening connection design must be carried out from the aspects of fastener material design and selection, connection structure optimization and working temperature reduction, so as to improve the reliability of high temperature bolts.

Keywords: high temperature bolt; high temperature creep; thermal expansion

(责任编辑:郎伟锋)