

某发动机盘轴“扭矩-转角”连接法应用试验

孙贵青, 赵 哲, 杨法立, 李 慧

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 螺栓连接是航空发动机机械连接的主要方式, 传统的扭矩法造成预紧力误差较大, 尚不能满足发动机高精度、高可靠性连接的工艺控制需求。为此, 以某型发动机低压涡轮盘轴的关键连接结构为对象, 将传统的扭矩法和先进的转角法相结合, 在国内发动机装配中首次应用“扭矩控制-转角监测”法, 并设计开发智能拧紧系统, 利用转角法预紧力精度高的特点, 在准确施加扭矩的同时, 监测调整螺母的转动角度, 保证了预紧力的准确控制和连接刚度的均匀一致, 提高了发动机的结构连接质量, 为后续工艺协同发动机设计提供了技术手段, 对发动机装配表现的不一致性问题提供了解决途径。

关键词: 航空发动机; 螺栓连接; “扭矩控制+转角监测”法; 预紧力

Application Experiment of “Torque-Angle” Method for Engine Disk and Shaft Connection

SUN Guiqing, ZHAO Zhe, YANG Fali, LI Hui

(Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

[ABSTRACT] The bolt connection is the main way of mechanical connections for aero-engine. The traditional torque method causes a large pre-tightening error, which reduces the connection quality to some extent. Therefore, the key connection structure of an engine low-pressure turbine disk and shaft is taken as subject, which is combined with the traditional torque method and the advanced angle method. For the first time, in the domestic engine assembly, the “torque control + angle monitoring” method is applied, and the intelligent tightening system is developed. Taking use of high precision of the pre-tightening force by angle method, when the torque is accurately applied, the rotation angle of nut is monitored to adjust to ensuring the precise control and the uniformity of the joint rigidity, and the structural connection quality of the engine is improved, which is going to provide technical means for subsequent process co-design of engine and solutions to engine assembly inconsistencies.

Keywords: Aero-engine; Bolt Connection; “Torque control + angle monitoring” method; Pre-tightening force

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.09.076

对于高涵道比涡扇发动机低涡转子组件, 低压涡轮盘片组件与低涡轴组件间主要采用圆柱面定心、短螺栓连接结构^[1]。盘轴连接处传递的负荷巨大(包括扭矩、转子重量、惯性力及不平衡力引起的弯矩, 机动飞行时的陀螺力矩, 气体轴向力以及转子的不平衡、燃气脉动压力等原因造成的振动负荷)^[2], 且处于高温环境中, 要求具有良好的定心和平衡性、足够的刚度及稳定的连接状态, 因此, 对于螺栓连接的可靠性要求较高, 而预紧力的合理控制是保证可靠性的重要工艺措施。

扭矩法是国内外发动机长期以来应用广泛的预紧力控制方法, 具有操作简单、费用较低等好处, 但预紧力控制误差相对较大(约为 $\pm 25\%$)。而国外有些先进涡扇发动机(如 PW4000、GE90 发动机)低涡盘轴连接

采用螺母转角法(简称转角法或扭矩+转角法), 该方法是先把螺纹副拧紧到预拧紧力矩(也称起始扭矩), 使连接件达到“贴紧”位置, 再转过角度 θ , 误差可控制在 $\pm 15\%$ ^[3]。可进一步改善发动机低涡盘轴连接预紧力的均匀性, 保证连接刚度的一致性和可靠性, 对于控制结构整体模态, 防止转子结构连接失效具有重要作用。在国内, 该工艺控制方法已广泛应用于汽车行业^[4-6], 但尚未引入到航空发动机装配中。

本文针对某型高涵道比涡扇发动机低涡盘轴连接结构, 将传统的扭矩法和先进的转角法相结合, 尝试引入“扭矩控制-转角监测”工艺方法进行应用试验及分析, 该方法提高了连接预紧力的均匀性, 保证连接刚度的一致性, 为转子连接螺栓的结构设计及工艺设计提供

参考。

1 扭矩控制—转角监测法

扭矩法控制预紧力的基本原理主要依据下式：

$$T=KFd \quad (1)$$

式中： T 为拧紧力矩； K 为拧紧扭矩系数； F 为预紧力； d 为螺纹公称直径。

实际中，由式(2)^[14]可知， K 值取决于螺纹副摩擦系数、端面摩擦系数，与表面粗糙度、表面清洁度及润滑条件等直接相关，可以在0.1~0.5，甚至更宽的范围内变化^[13,17]，即

$$k = \frac{1}{2d} \left\{ d_p \frac{\frac{\mu_s}{\cos \alpha'} + \operatorname{tg} \beta}{1 - \frac{\mu_s}{\cos \alpha'} \operatorname{tg} \beta} + d_w \mu_w \right\} \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{2d} \left\{ d_p \frac{\mu_s}{\cos \alpha'} + d_p \operatorname{tg} \beta + d_w \mu_w \right\}$$

式中： d 为螺栓直径； d_p 为螺栓有效直径； μ_s 为螺纹副摩擦系数； α' 为垂直截面内的螺纹牙型半角； β 为螺纹升角； d_w 为端面摩擦圆有效直径； μ_w 为端面摩擦系数。

转角法是基于角位移使螺栓轴向伸长及连接件被压缩而产生预紧力。转角法控制预紧力的基本原理主要依据下式：

$$\theta=360^\circ \times F / (C_L \times P) \quad (3)$$

式中： θ 为螺母转角； F 为预紧力； C_L 为螺栓刚度； P 为螺距。

力矩与预紧力的关系曲线如图1所示，I、II表示两条同规格的螺纹连接件的特性曲线，两者的差别主要由 K 值不同所致。一般情况下，在加载同一扭矩时，由于各个位置连接条件的不同(K 值不同)，预紧力会产生误差 ΔF ，当采用扭矩法在同一外加扭矩 M_1 作用时，会分别产生预紧力 F' 与 F'' ，预紧力误差 $\Delta F=F'-F''$ 。

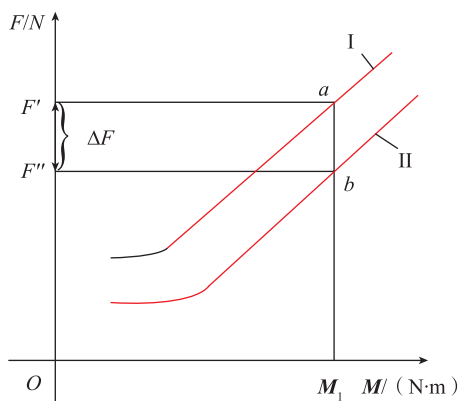


图1 力矩与预紧力的关系

Fig.1 Relationship between moment and pre-tightening force

图2为转角与预紧力的关系图，I、II两条特性曲线含义同图1（考虑表面粗糙度、表面清洁度及润滑条件等 K 值条件）。首先，施加贴紧扭矩 M_0 预拧紧，消除连接中任何间隙、空穴等干扰，此时预紧力误差为 ΔF_0 ，然后均在起始扭矩 M_0 的基础上转 φ 角，与曲线I、II交于 c 、 d ，此时相应的预紧力之差为 ΔF_φ 。由式(2)可知： $\Delta F_\varphi = \Delta F_0$ ，即采用转角法，预紧力误差不会增加。而相应于扭矩 M_1 时产生的预紧力之差为 ΔF_1 ，由于最终力矩 $M_1 >$ 贴紧扭矩 M_0 ，因此 $\Delta F_1 > \Delta F_0$ ，扭矩法预紧力误差明显增大。由上可知，转角法中摩擦系数对预紧力的影响仅局限在起始扭矩拧紧阶段，精度相比扭矩法要高^[18]。

基于转角法的“扭矩控制—转角监控”连接法是以目标扭矩 M_1 为控制目标，同时监测贴紧扭矩 M_0 到目标扭矩 M_1 过程中螺母转过的角度 φ ，当角度 φ 超出设定范围时，通过重新涂抹润滑剂、更换螺母等措施，来提高预紧力的控制和一致性。

2 试验对象及装置

针对某型高涵道比涡扇发动机低压涡轮轴和低涡轮轴模拟转子的连接螺栓、螺母为试验对象(见图3)，其中，螺栓、螺母共32件，为圆环形均布，设计要求拧紧力矩为71~79N·m。

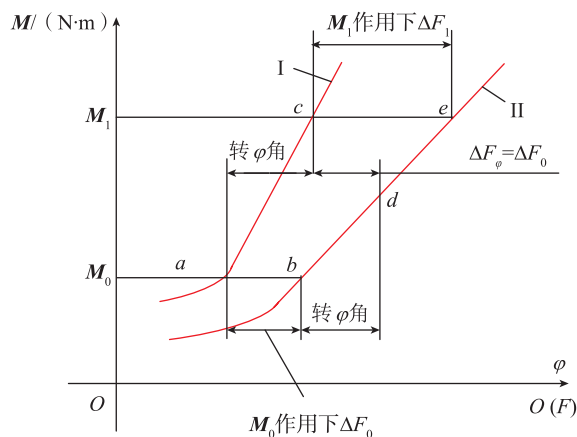


图2 转角与预紧力的关系

Fig.2 Relationship between angle and pre-tightening force

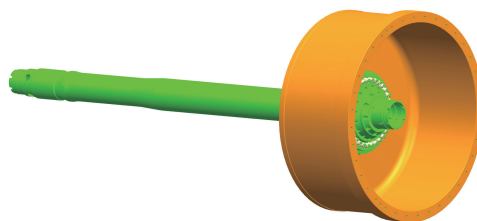


图3 试验对象组成示意图

Fig.3 Schematic of test object

扭矩控制-转角监测法所用的智能拧紧轴和控制器均为ATLAS产品。智能拧紧轴型号为ETX50-90CT,量程为20~90N·m;转速最高为650r/min;力矩输出精度为 $\leq \pm 2.5\%$ 、角度输出精度为 $\leq \pm 1^\circ$ 。控制器型号为PF4000-G图表面型控制器,可直接在面板编程命令输入;具有扭矩控制、角度控制等多种拧紧策略和角度监控、力矩监控等多种防错策略。组成的智能拧紧试验系统如图4所示,其中滑轨、控制手柄、控制面板、辅助装置等便于实施拧紧操作和监控。

智能拧紧系统的显示结果及过程参数如图5所示,可显示试验过程螺母施加的扭矩、转角、时间等控制参数,便于操作者对整个螺母拧紧的实时跟踪和全

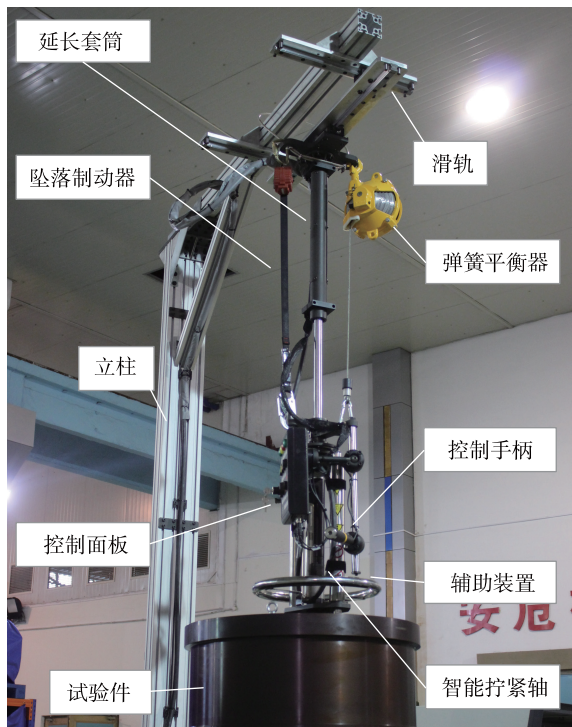


图4 试验装置组成示意图
Fig.4 Schematic of test device

:P1 20NM+45Deg (-)				
Date/Time	Tq	Angle	Tgt id	Job id
0101 02:15:49	62.86	41	228	----
0101 02:13:28	71.37	41	227	----
0101 02:11:06	73.86	41	226	----
0101 02:07:49	77.89	41	225	----
0101 02:05:47	76.31	41	224	----
0101 01:59:48	80.23	44	223	----
0101 01:56:59	79.57	39	222	----

图5 低涡盘轴连接螺母拧紧结果示意图
Fig.5 Tightening result schematic of LPT disk and shaft connection

过程监控。

3 试验结果

在扭矩控制-转角监测法中,首先采用交叉交叉法安装4个螺母,将低涡盘轴试验件固定,待机件恢复室温后,松开4个螺母,并安装其余28个螺栓、螺母,使用智能拧紧系统交叉交叉法拧紧全部螺母,智能拧紧轴转速设定为20r/min,每个螺母的拧紧工艺为先拧紧至贴紧力矩21N·m(通常,转角起始点为最终拧紧扭矩的20%^[19],考虑到智能拧紧轴量程设定为21N·m),并在贴紧力矩基础上开始监测螺母转动角度,拧紧至目标力矩满足71~79N·m,同时要求螺母转角满足 $39^\circ \pm 2^\circ$ 范围,控制策略如图6所示。

梳理低压涡轮盘轴连接的32个螺母拧紧结果,自动拧紧最终力矩可精确控制在78.05~79.19N·m,力矩控制精度为0.24%,实现了力矩的高精度控制。螺母旋转角度测量曲线如图7所示,32个测量数据中,有14个测量位置超出旋转角度要求范围,最大值为 45° ,最小值

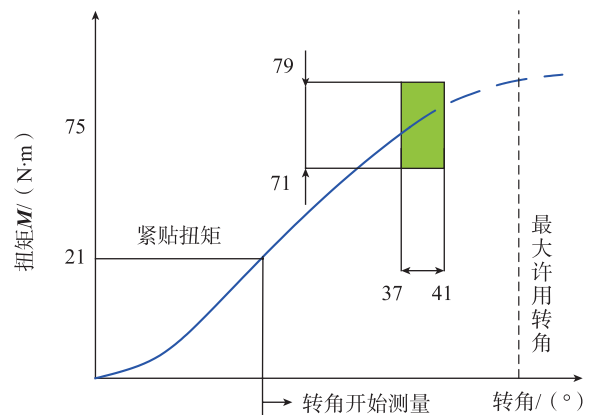


图6 低涡盘轴连接控制策略示意图
Fig.6 Control strategy schematic of LPT disk and shaft connection tightening

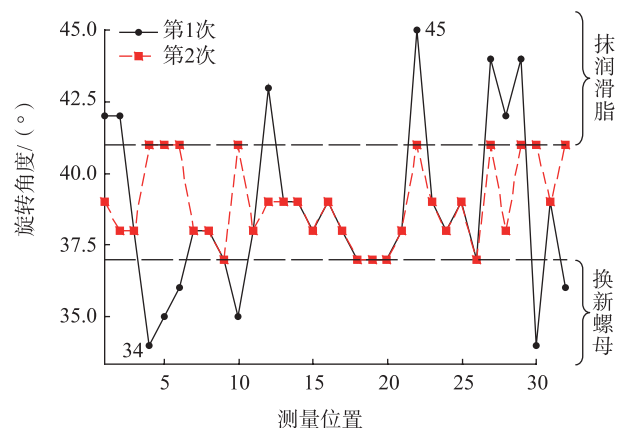


图7 螺母旋转角度测量曲线
Fig.7 Measuring curve of nut rotation angle

为 34° 。

分析试验结果,当扭矩合格时,螺母旋转角度存在较大分散度,最大差值达到 11° ,采取抹润滑脂或换新螺母措施后,分散度降低到 4° ,并且将螺母旋转角度调整到了要求范围内,有效降低了预紧力分散度,提高了预紧力一致性和连接可靠性。

K 值(表面清洁度、表面粗糙度状况)对螺母旋转角度的影响较大。当将螺母涂抹润滑脂,重新拧紧后,初次拧紧后造成的表面镀银层损坏、磨屑及固体润滑脂等共同作用会导致 K 值变大,旋转角度变小;当采用螺母新件,表面镀银层未被损坏,表面清洁度、表面粗糙度状况较好, K 值将变小,旋转角度变大。

4 结论

针对发动机低压涡轮盘轴连接螺栓,引入了“扭矩控制-转角监测”连接法,试验结果表明,可有效降低螺栓预紧力分散度,提高发动机连接可靠性。

试验引入先进的智能拧紧系统,为后续工艺协同发动机设计提供了技术手段,对发动机装配表现不一致性问题提供了解决途径。

受制于试验条件限制,对于螺栓轴向预紧力与实施的“扭矩控制-转角监测”连接法间的量化影响关系未能给出,对于表面粗糙度、表面清洁度及润滑条件的影响机理及量值尚不清楚,后续将考虑利用超声波测量装置等先进手段进行深入研究,制定出完全满足设计期望的预紧力控制数值及工艺方法。

参考文献

[1] 洪杰,马艳红,张大义.航空燃气涡轮发动机总体结构设计及动力学分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.

HONG Jie, MA Yanhong, ZHANG Dayi. Aero gas turbine engine structure design and dynamic analysis[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012.

[2] 高希光,宋迎东,朱如鹏.航空发动机低压涡轮转子连接螺栓预紧力分析[J].机械科学与技术,2011,30(4):543-547.

GAO Xiguang, SONG Yingdong, ZHU Rupeng. A method for calculating the preload of connecting bolts in aero-engine rotors[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(4): 543-547.

[3] 机械设计手册联合编写组.机械设计手册(第2卷)[M].北京:化学工业出版社,2016.

Editorial Board Machine Design Manual. Mechanical design manual (Second Volume)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[4] 石泉,陈鸿.关于目标扭矩+转角监控拧紧策略的应用[J].轻型汽车技术,2012(9):12-20.

SHI Quan, CHEN Hong. Application of tightening strategy for target torque+angle monitoring[J]. Light Vehicles, 2012(9):12-20.

[5] 钟海金,吴南.YC6A柴油气缸盖螺栓拧紧力矩工艺研究[J].内燃机,2006(4):31-33.

ZHONG Haijin, WU Nan. Technical research of tightening torque to cylinder-head bolt of model YC6A diesel engine[J]. Internal Combustion Engines, 2006(4): 31-33.

[6] 郑黎明.发动机连杆的螺栓装配设备与工艺[J].机械工程师,2014(6):64-65.

ZHENG Liming. Equipment and process of the bolts assembling for engine connecting rod[J]. Mechanical Engineer, 2014(6): 64-65.

[7] 刘晓石.发动机连杆螺栓拧紧工艺的试验研究[J].机械制造与自动化,2012,41(5):81-83.

LIU Xiaoshi. Experiment research on bolt tightening process for engine connecting rod[J]. Machine Building & Automation, 2012, 41(5): 81-83.

[8] 朱正德,梁宝钢.发动机螺栓联接装配质量控制[J].现代零部件,2008(4):82-85.

ZHU Zhengde, LIANG Baogang. Assembling quality control of the engine bolt connection[J]. Modern Components, 2008(4): 82-85.

[9] 戴力.汽车生产的拧紧工艺研究[J].汽车零部件,2017(7):57-63.

DAI Li. Technics of torque fastening in automobile production[J]. Automobile Parts, 2017(7): 57-63.

[10] 冉冬立,樊嘉天,董效彬,等.柴油机高强度螺栓拧紧工艺的试验校正[J].现代车用动力,2013(2):41-44.

RAN Dongli, FAN Jiatian, DONG Xiaobin, et al. Experimental emendation on tightening techniques of diesel engine high strength bolts[J]. Modern Vehicle Power, 2013(2): 41-44.

[11] 王海渊,孙希波,邵立新,等.浅析“扭矩+转角”紧固法在连杆螺栓紧固过程中的应用[J].内燃机,2013(2):100-102.

WANG Haiyuan, SUN Xibo, SHAO Lixin, et al. Application of “torque and angle” in tightening bolt of connecting-rod[J]. Internal Combustion Engines, 2013(2): 100-102.

[12] 耿亮,杨建坤,窦树霞,等.基于转角法预紧的连杆螺栓预紧力测试装置及方法的研究[J].机械工程师,2014(2):100-102.

GENG Liang, YANG Jiankun, DOU Shuxia, et al. Research on test device and method of pretightening force of connecting rod bolt based on angle method pretightening[J]. Mechanical Engineer, 2014(2): 100-102.

[13] 林湖,朱正德,陈强努.基于螺栓装配技术中扭矩法与扭矩/转角法比较与应用研究[J].轻型汽车技术,2003(13):14-17.

LIN Hu, ZHU Zhengde, CHEN Qiangnu. Comparison and application of torque method and torque/angle method based on bolt assembly technology[J]. Light Vehicles, 2003(13): 14-17.

[14] 黄伟,陈家权.力矩法、转角法上紧螺栓力矩可靠性分析[J].装备制造技术,2005(4):6-8.

HUANG Wei, CHEN Jiaquan. Reliability analysis of tightening bolts with moment method and rotation angle method[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2005(4): 6-8.

[15] 殷平玲,王军,甄宪磊.某乘用车后桥扭转梁支撑座安装螺栓拧紧工艺分析[J].汽车工艺与材料,2017(1):52-56.

(下转第93页)

monitoring in milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 57(2): 142-150.

[4] WANG M, WANG J. CHMM for tool condition monitoring and remaining useful life prediction[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(5): 463-471.

[5] 王潇屹, 张晓辉. 新型涂层刀具干式铣削加工 SKD11 切削性能研究[J]. 工具技术, 2009, 43(2): 8-11.

WANG Xiaoyi, ZHANG Xiaohui. Study on cutting performance of new coated tools for dry milling of SKD11[J]. Tool Technology, 2009, 43(2): 8-11.

[6] 龙震海, 王西彬, 刘志兵. 高速铣削难加工材料时硬质合金前刀面磨损机理及切削性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 83-87.

LONG Zhenhai, WANG Xibin, LIU Zhibing. Research on wear modes and mechanism of carbide tools in highspeed milling of difficult-to-cut materials[J]. Tribology, 2005, 25(1): 83-87.

[7] 王灼建, 贺辛亥, 董红坤. 铝合金薄壁零件铣削力模型的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(3): 154-157.

WANG Zhuojian, HE Xinhai, DONG hongkun. Research on model of milling force of thin walled parts with aluminum[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(3): 154-157.

[8] 刘均, 曾桂林, 邹益胜. 瞬时铣削力数学模型及验证[J]. 机械设计与制造, 2016(11): 1-4.

LIU Jun, ZENG Guilin, ZOU Yisheng. Instantaneous milling force mathematical model and experimental verification[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2016(11): 1-4.

[9] 李英松, 王敏杰, 魏兆成. 基于傅立叶级数的球头刀铣削力模型[J]. 工具技术, 2010, 44(5): 49-55.

LI Yingsong, WANG Minjie, WEI Zhaocheng. Milling force model for ballend mill based on fourier series[J]. Tool Technology, 2010, 44(5): 49-55.

[10] 李丹, 孙会来, 赵方方. 7075 航空铝合金铣削力模型试验[J]. 工具技术, 2017, 51(5): 85-87.

LI Dan, SUN Huilai, ZHAO Fangfang. Experiment of milling force model of 7075 aviation aluminum alloy based on orthogonal test[J]. Tool Technology, 2017, 51(5): 85-87.

[11] 杨振朝, 林允博. 基于 Box-Behnken 设计的高速铣削 TC11 钛合金切削力预测模型研究[J]. 航空精密制造技术, 2018, 55(4): 20-25.

YANG Zhenzhao, LIN Yunbo. Cutting force prediction models based on Box-Behnken design in highspeed milling of titanium alloy TC11[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018, 55(4): 20-25.

[12] 赵显日. 刀具磨损对微铣削力变化影响的理论与试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(7): 19-22.

ZHAO Xianri. Study on the variation of micro milling forces and specific cutting forces with tool wear[J]. Combined Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2015(7): 19-22.

[13] 姜振喜, 孙杰, 李国超, 等. TC4 铣削加工的刀具磨损与切削力和振动关系研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(1): 144-150.

JIANG Zhenxi, SUN Jie, LI Guochao, et al. Investigation on the relationship among tool wear, cutting force and vibration in milling of TC4[J]. Journal of China Ordnance, 2015, 36(1): 144-150.

[14] TEITENBERG T M, BAYOUMI A E, YUSCESAN G. Tool wear modeling through an analytic mechanistic model of milling processes[J]. Journal of Wear, 1992, 154(2): 287-304.

[15] LAPSLEY J T, GRASSI R C, THOMSEN E G. Correlation of plastic deformation during metal cutting with tensile properties of the work material[J]. Journal of Society Mechine, 1950, 72(3): 979-986.

[16] USUI E, SHIRAKASHI T, KITAGAWA T. Analytical prediction of cutting tool wear[J]. Journal of Wear, 1984, 100(1-3): 129-151.

通讯作者: 严复钢, 高级工程师, 主要研究方向为重型铣削, E-mail: yfg2988@163.com.

(责编 古京)

(上接第79页)

YIN Pingling, WANG Jun, ZHEN Xianlei. Analysis of bolt tightening process for supporting seat of torsion beam of rear axle of passenger car[J]. Automobile Technology & Material, 2017(1): 52-56.

[16] 陈平, 陈伟平, 谭志强, 等. 新车型开发中螺纹紧固件拧紧扭矩的开发[J]. 汽车工程师, 2016(8): 28-32.

CHEN Ping, CHEN Weiping, TAN Zhiqiang, et al. Development of tightening torque of thread fasteners in the process of new vehicle development[J]. Auto Engineer, 2016(8): 28-32.

[17] 董达善, 陈佳亮, 刘海洋, 等. 高强度螺栓扭矩系数研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 182-186.

DONG Dashan, CHEN Jialiang, LIU Haiyang, et al. Research on torque coefficient of high-strength bolt[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(16): 182-186.

[18] 李至广. 钛合金螺纹连接结构预紧力、应力、可靠性分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.

LI Zhiguang. Analysis of preload, stress, reliability of titanium screw joint structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004.

[19] 宋荣生. 螺纹联接轴向预紧力的控制方法及其特点[J]. 天津理工学院学报, 2000(4): 39-41.

SONG Rongsheng. Control methods and specialty about assembly force of bolt connection[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2000(4): 39-41.

通讯作者: 孙贵青, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航空发动机装配工艺, E-mail: joy19800103@163.com.

(责编 古京)