

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.018

车用聚酰胺材料零件与钢衬套的配合工艺设计

李倩兮¹,朱晨虹²

(1.广东省轻工业技师学院,广州 511434; 2.广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院,广州 511434)

摘要: 玻璃纤维增强聚酰胺复合材料是常用的车用塑料零件材料,该类材料强度和刚度远低于金属类零件,往往需要塑料主体和钢衬套的合理配合才能保证该类零件有效地被安装于对手件上,且不出出现因配合导致的质量问题,这也是塑料零件装配需要面对的常见技术课题。为了探求车用聚酰胺材料零件与钢衬套的配合工艺设计原则,选用三款常见零件,参考汽车类零部件样本量选取准则进行合理的样本量选取和尺寸组合,对样件进行分组拧紧试验分析,基于试验数据总结出四大类不同拧紧特性的扭矩转角曲线,包括软连接、中性连接1、中性连接2、硬连接;分析四种拧紧规律,并结合工程实际案例,总结聚酰胺类塑料件与衬套配合的合理化设计准则,准则包括塑料件配合钢衬套使用的必要性,结合零件拧紧试验确定衬套低于塑料面的下限值,结合密封件的密封性校核确定衬套高于塑料的上限值,并将以上结论用于解决乘用车用执行器螺栓松脱问题及进气歧管密封不良的工程问题,此类质量问题量产0发生率,印证结论的合理性,以形成指导类似问题的工程设计经验。

关键词: 聚酰胺;塑料;衬套;公差;扭矩;密封;拧紧

中图分类号: U465.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0135-12

Design of fitting process between automotive polyamide material parts and steel bushings

LI Qianxi¹, ZHU Chenhong²

(1. Guangdong Technician College of Light Industry, Guangzhou 511434, China;

2. Guangzhou Automobile Group Co., Ltd. Automotive Engineering Institute, Guangzhou 511434, China)

Abstract : Glass fiber reinforced polyamide composite is a commonly used plastic component material for automobiles. Due to its much lower strength and stiffness than metal components, this type of material often requires a reasonable fit between the plastic body and steel bush to ensure that the component is effectively installed on the counterpart without quality problems caused by fit. This is also a common technical issue that plastic component assembly must face. In order to explore the design principles of the matching process between automotive polyamide material parts and steel bushings, three common parts were selected, and reasonable sample size selection and size combination were carried out with reference to the sample size selection criteria for automotive components. The samples were subjected to grouped tightening test analysis, and based on the test data, torque angle curves with four different tightening characteristics were summarized, including soft connection, combination connection 1, combination connection 2, and hard connection. Four tightening rules were analyzed and the rational design criteria for the fit between polyamide plastic parts and bushings based on practical engineering cases was summarized. The criteria includes the necessity of using plastic parts with rigid bushings, determining the lower limit value of the bushing below the plastic surface through part tightening tests, determining the upper limit value of the bushing above the plastic surface through sealing verification of the sealing element, and applying the above conclusions to solve the problems of loosening of actuator bolts and poor sealing of intake manifolds in passenger vehicles. Such quality problems have zero occurrence rate after mass production, confirming the rationality of the conclusions and forming engineering design experience to guide similar problems.

Keywords : polyamide ; plastic ; bush ; tolerance ; torque ; sealing ; tightening

通信作者: 朱晨虹, 硕士, 主要从事汽车动力零部件设计与开发工作

收稿日期: 2025-07-22

引用格式: 李倩兮, 朱晨虹. 车用聚酰胺材料零件与钢衬套的配合工艺设计[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 135-146.

LI Qianxi, ZHU Chenhong. Design of fitting process between automotive polyamide material parts and steel bushings[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 135-146.

我国已成为全球最大的汽车和塑料消费国,产销量均为世界第一^[1]。零件轻量化一直是汽车零部件核心追求目标之一,总体来看降低整车质量有利于提高汽车动力性,减少燃油消耗^[2]。车用塑料品类越来越多,一般具有密度小、耐腐蚀、强度高的特性^[3],对于有保温需求的零件,由于塑料是热的不良导体^[4-5],采用塑料材质有助于保温性能提升,同时有降成本的优势,因而车用零件塑料化越来越普遍,玻璃纤维增强聚酰胺(PA)复合材料就是最常见的一种车用零件复合材料。

由于塑料本身相对于金属材料的刚度和强度都低很多,塑料件的装配往往需要配合设计钢衬套以起到承载拧紧力同时保护塑料本体的作用。塑料与衬套的配合设计是常见的技术课题,不合理的设计会影响拧紧后的耐久性能,包括产生扭矩衰减或者密封不良等影响。了解到多家企业的此类零件均出现过因配合设计不合理,发生零件松脱、零件密封不良等影响性能的实例,而行业内塑料与衬套的配合设计一直未有相关标准进行指导。另外,此类塑料零件因含有玻璃纤维增强剂,纤维的定向排列会显著增强材料的各向异性^[6],纤维方向的材料强度和刚度更高,而纤维的方向与注塑时的熔体流动过程强相关,且做成成品零件不同位置的纤维排列也有差异。正因为塑料的这种各向异性特点,导致在仿真过程中较难准确赋予材料属性,仿真一直不是研究塑料类零件的最佳方式,且对于研究配合公差这类尺寸极小的结构,仿真更不是最高效、准确的研究手段^[7]。

从解决企业频发的塑料件螺栓脱落问题出发,笔者研究玻璃纤维增强PA复合材料零件和钢衬套的配合设计与性能的关系。选用三个典型塑料零件,包含M6和M8两种规格的螺栓,对不同组合的衬套塑料高度差进行合理的样本量选择和零件的制备,进行分组拧紧试验,通过对试验数据进行分析,将试验结果分为四大类,结合工程实际,最终总结塑料件与衬套配合公差的合理化建议,并应用到工程实际问题中,目前产品的批量市场应用可验证结论的合理性,积累类似技术问题工程经验的同时,该方法及思路也可拓展应用于其他类似工程问题中。

1 问题描述

1.1 塑料衬套组合结构说明

严格来说,塑料与衬套的配合按照工艺可分为

冷压工艺和预埋工艺装配,另外还有衬套集成在螺栓上的一体式结构;按照衬套形状可分为直套筒和T型套筒。而成本通常是乘用车领域零部件的核心要素,冷压或者预埋直套筒是乘用车零部件最常用的最经济的结构,也是前述质量问题零件及本研究所用零件用结构,因此本研究对象为PA基体与钢质直套筒的配合结构,典型结构如图1所示。冷压衬套的过程将装配关系属于过盈配合的轴(钢衬套)与孔(塑料基体)在一定压力的作用下装配在一起,装配后能传递一定的扭矩或轴向力。

为了便于后续研究,将零件与螺栓头部直接接触的一面定义为B面,将另一面定义为A面,因零件功能差异,有些零件A面设计有面压密封的密封圈,有的仅仅是装配功能无密封结构,而衬套是轴向等径的圆筒结构。

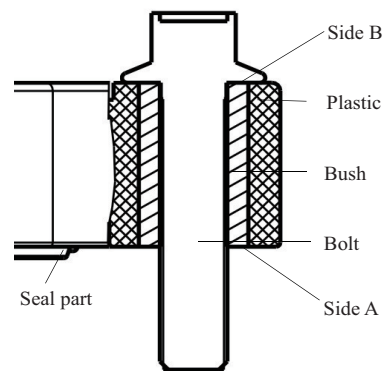


图1 衬套与塑料零件配合结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fitting structure between bush and plastic parts

1.2 问题说明

某车用塑料零件[塑料本体为含30%玻璃纤维的增强PA66(PA66-GF30),衬套为10#钢]在台架耐久试验过程中频繁出现螺栓松脱问题,如图2中的三颗M6螺栓,编号1,2,3代表三颗螺栓的B面,编号4,5,6分别对应编号1,2,3的A面,三个位置相继出现松

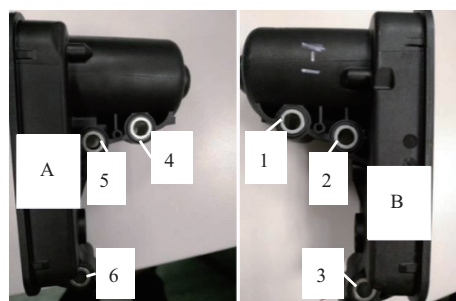


图2 失效零件

Fig. 2 Failed plastic part

脱、无扭矩、扭矩衰减,其失效试验及模式见表1,严重影响量产进度。

针对该零件问题用鱼骨图法进行真因分析^[8],从人机物法环^[9]三个维度拆解,可以排除试验设备及环境问题,如台架振动是否异常,实验环境是否偏离设计目标等;排除部分物料问题,螺栓本身质量问题以及塑料件材料品质问题;排除人工因素,即扭矩拧紧操作规范性等因素。初步锁定三个待确定因素:1)安装扭矩的设计值是否合理;2)塑料法兰和钢衬套的配合尺寸是否设计合理;3)塑料和衬套的配合公差实际值是否超差。

表1 零件失效情况统计

Tab. 1 Statistics of part failure

Test	Test duration/h	Failure mode
Thermal shock test	50	One bolt, fall off
		Two bolts, no torque
Rated power test	150	One bolt, fall off
		One bolt, no torque
		One bolt, torque decay to 2 N·m

已知该零件螺栓安装扭矩设计值为6~8 N·m,实际人工操作扭矩符合该设计要求;该零件塑料和钢套的配合设计理念原为:(与螺栓接触面)衬套低于塑料0~0.2 mm,(另一面)衬套低于塑料0~0.05 mm,螺栓拧紧时先压溃塑料,后和衬套接触施加有效力矩。通过3D扫描抽取3个样件的零件配合尺寸如图3所示,其中负值代表衬套低于塑料的高度差,图3显示存在两个面间隙均超出设计值的情况。

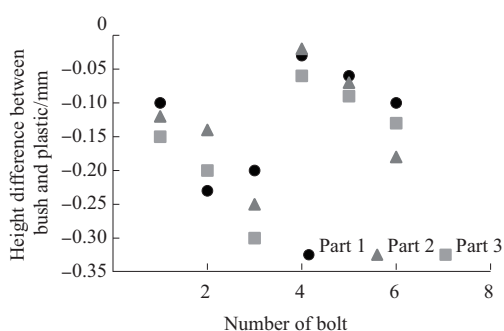


图3 失效零件高度差抽样检测结果

Fig. 3 Sampling test results of height difference of failed parts

前述三个因素是否合理以及如何合理的设计是本研究的重点。由于塑料和衬套的配合公差等级在0.1 mm甚至更微小的尺寸范围内,加上塑料本身材料属性的特殊性,相比于仿真分析,试验分析是高效且较贴近实际的研究方法,因此制定了系列试验分组,分析现象及数据以得出合理的结论。

2 试验介绍

2.1 组合说明

理论上,A面存在低于、平齐、高于塑料三种情况,B面同样存在衬套低于、齐平、高于塑料三种情况,加上无衬套的结构,那么排列组合至少存在10种不同的组合情况,见表2。实际上,再细分,按高或者低的程度不同会有不止10种的组合。

表2 衬套与塑料配合的组合

Tab. 2 Combination of bush and plastic

Side	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	be	be	be	ev	ev	ev	ab	ab	ab	Without bush
B	be	ev	ab	be	ev	ab	be	ev	ab	

Notes: "be" represents "below"; "ab" represents "above"; "ev" represents "even" (The following text is the same).

2.2 试验样件

本研究选用三个具有代表性零件为乘用车动力系统中常见的塑料零件,结构如图4所示。试验共采用3个零件一,每个件有五个M8衬套孔;4个零件二,每个件含两个M8衬套孔;8个零件三,每个件含三个M6衬套孔,零件塑料与衬套的配合结构参照图1。

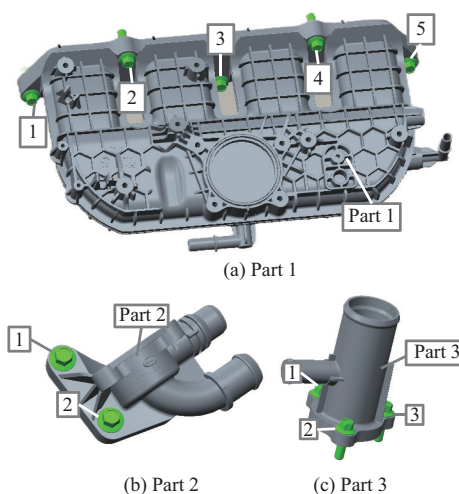


图4 三个零件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three parts

零件材料等信息见表3,其中安装对手件都选用铝合金类刚度和强度远高于塑料,螺栓均为六角法兰面螺栓。

表3 三个零件材料信息

Tab. 3 Material information of three parts

Part	Bolt specification	Bolt grade	Plastic material	Bush material
Part 1	M8×35	8.8	PA6-GF30	No.10 steel
Part 2	M8×30	8.8	PA6-GF30	No.10 steel
Part 3	M6×20	8.8	PA66-GF30	No.10 steel

零件分组信息见表4-表6,表中正值代表衬套高于塑料的高度差,负值代表衬套低于塑料的高度差。

按照工程经验,A面很容易做到0.1 mm以内,甚至平齐,也是行业内共识。因此本次试验样品主要控制B面的高度差为研究变量,从衬套低于塑料

到高于塑料进行不同尺寸的分组。为确保样件按照理论值进行冷压套筒,在样件制作完成后对样件同时进行了尺寸测量,确保基本符合设计预期,可进行验证。试验过程中,每做一个孔位的试验换一个新的螺栓,由于安装对手件多为材料等级高于塑料及螺栓,对手件不做更换。

表4 零件1分组信息

Tab. 4 Grouping information for part 1

No.	Item	Side A					Side B				
		Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
1 [#]	tv/mm	0	0	0	0	0	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.3
	av/mm	0.018 5	-0.008 3	0.071 3	0.007 7	0.025 4	-0.476 3	-0.292	-0.160	0.093 2	0.236 7
2 [#]	tv/mm	0	0	0	0	0	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.3
	av/mm	0.000 3	0.000 5	0.038 2	0.189 5	0.134 6	-0.575 7	-0.271	-0.165	0.202 8	0.106 8
3 [#]	tv/mm	Without bush	0	0	0	0	Without bush	-2	-1	1	2
	av/mm	0	0.143 3	0.145 8	0.003 5	0.004 1	0	-2.103	-1.092	1.003 6	2.073 5

Notes: "tv" represents "target value"; "av" represents "actual value".

表5 零件2分组信息

Tab. 5 Grouping information for part 2

No.	Item	Side A		Side B	
		Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
4 [#]	tv/mm	Without bush	0	Without bush	-0.5
	av/mm	0	0.146 8	0	-0.582 6
5 [#]	tv/mm	0	0	-0.3	-0.2
	av/mm	0.046 7	-0.133 0	-0.2708	-0.315 8
6 [#]	tv/mm	0	0	-0.1	0
	av/mm	-0.041 6	0.044 1	-0.275 9	0.061 5
7 [#]	tv/mm	0	0	0.1	0.3
	av/mm	0.051 8	0.064 5	0.051 8	0.342 2

Notes: "tv" represents "target value"; "av" represents "actual value".

表6 零件3分组信息

Tab. 6 Grouping information for part 3

No.	Item	Side A			Side B		
		Position 1	Position 2	Position 3	Position 1	Position 2	Position 3
8 [#]	tv/mm	Without bush	0	0	Without bush	-0.5	-0.5
	av/mm		-0.012 4	-0.141 4		-0.533 2	-0.479 8
9 [#]	tv/mm	0	0	0	-0.3	-0.3	-0.3
	av/mm	0.001 6	0.010 1	0.008 5	-0.315 2	-0.271	-0.298 5
10 [#]	tv/mm	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.2
	av/mm	-0.013 2	0.005 9	0.000 9	-0.305 3	-0.202 1	-0.160 6
11 [#]	tv/mm	0	0	0	-0.1	-0.1	-0.1
	av/mm	0.011 9	-0.018 8	0.014 8	-0.092 2	-0.072 1	-0.086 9
12 [#]	tv/mm	0	0	0	0	0	0
	av/mm	0.102	0.133 5	-0.001 1	-0.002 8	-0.041 6	0.053 2
13 [#]	tv/mm	0	0	0	0.1	0.1	0.1
	av/mm	-0.006 9	-0.018 5	-0.010 1	0.142 7	0.069 9	0.108 3
14 [#]	tv/mm	0	0	0	0.2	0.2	0.2
	av/mm	-0.031 2	-0.033 5	-0.016 8	0.157 7	0.235 5	0.241 2
15 [#]	tv/mm	0	0	0	0.3	0.3	0.3
	av/mm	-0.010 6	-0.001	-0.014 3	0.322 5	0.310 1	0.344 7

Notes: "tv" represents "target value"; "av" represents "actual value".

以上样本数量的确定参考汽车零部件台架可靠性验证抽样数量^[10],合理的试验样本数量保证在合适的试验时间内取得较为可靠的试验结果。常用试验数量为3,部分极端情况数量为1或2,样本数量总结见表7、表8。表中正值代表衬套高于塑料的高度差,负值代表衬套低于塑料的高度差。

表7 M8样本及数量

Tab. 7 Sample and quantity of M8

Item	Height difference/mm										
	Without bush	-2	-1	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.1	0.3	1	2
Qty	2	1	1	3	3	1	3	3	3	1	1

表8 M6样本及数量

Tab. 8 Sample and quantity of M6

Item	Height difference/mm								
	Without bush	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3
Qty	1	2	3	3	3	3	3	3	3

2.3 试验方法

螺栓拧紧的过程就是螺栓插入被连接件,利用螺母或内螺纹拧紧使螺栓拉伸变形,这种弹性变形产生了轴向的拉力,将被夹零件挤压在一起^[11]。理论上,只要产生了足够的夹紧力,完全可以保证被夹零件在震动、高低温等恶劣环境下安全工作。

拧紧试验^[12]:螺纹紧固拧紧试验是用电机带动拧紧装置(如套筒)拧紧螺纹紧固件,利用力传感器、角度传感器和扭矩传感器测出螺纹紧固件的紧固力、转动角度、扭矩、摩擦系数等信息。试验过程模拟零件实际安装打紧螺栓的过程,为提高试验效率,试验设定初始扭矩(根据经验M8组合为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$,M6组合为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$),设定屈服即停止拧紧,试验过程可以记录扭矩及扳手转角信息。本研究采用Schatz拧紧试验设备,试验方法参照GB/T16823.3-2010^[13]执行,设备如图5所示。

试验会记录扭矩-转角(θ)关系曲线如图6所示,曲线的斜率可以一定程度上反映扭矩的上升速度,



图5 拧紧试验设备

Fig. 5 Experimental equipment of tightening

侧面反应承压材料的刚度趋势。如刚度较低的材料(塑料)扭矩上升速度较慢,反之较快。

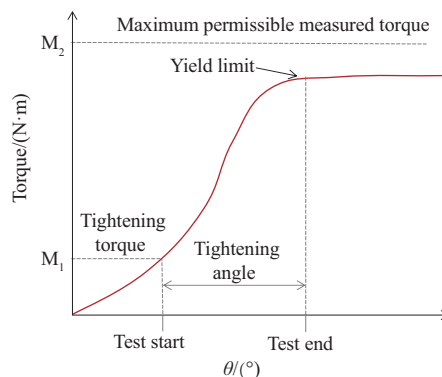


图6 拧紧扭矩-转角关系曲线

Fig. 6 Torque-angle curve of tightening

3 试验结果分析

3.1 结果总览

由于采用了A面高、平、低和B面高、平、低的排列组合,加上无衬套共10种组合,再细分每一面过高、稍高、过低、稍低等会有更多种的排列组合。为方便分析,将拧紧曲线结果归类为以下四类状态,如图7所示。状态一,拧紧过程一直压塑料,拧紧结束后塑料承力,此类配合可称为软连接;状态二,曲线出现拐点,拐点后斜率变大直到屈服,此类配合有衬套但衬套未起到有效作用,拧紧结束后仍为塑料承力,此类配合可称为中性连接1;状态三,曲线出现拐点,拐点后斜率变大直到屈服,且斜率会略大于状态二,此类配合有衬套,在拐点前承力方是塑料,拐点后以及拧紧结束后均为衬套承力,此类配合可称为中性连接2;状态四,曲线无拐点,但斜率一直较大,此类配合从一开始至拧紧结束承力方一直是衬套,此类属于硬连接。

3.2 软连接

3.2.1 软连接的现象

软连接展示的是塑料孔内未装衬套的结构,表2编号10无衬套结构属于该类。以零件3为代表展示拧紧前后现象如图8所示,其他零件具有相似性。

从样件压前、压后的AB双面形态可以看出,未安装衬套结构的B面(与螺栓直接接触面)出现较大程度的压溃现象,A面平面无明显变化。从扭矩-转角曲线可以看出,曲线无拐点,斜率整体较小;图8所示样件已拉至破坏,曲线出现尾端下降。

软连接的特点为①典型的软连接,塑料无法承受较高的拧紧力矩;②持续加扭会有塑料不同程度

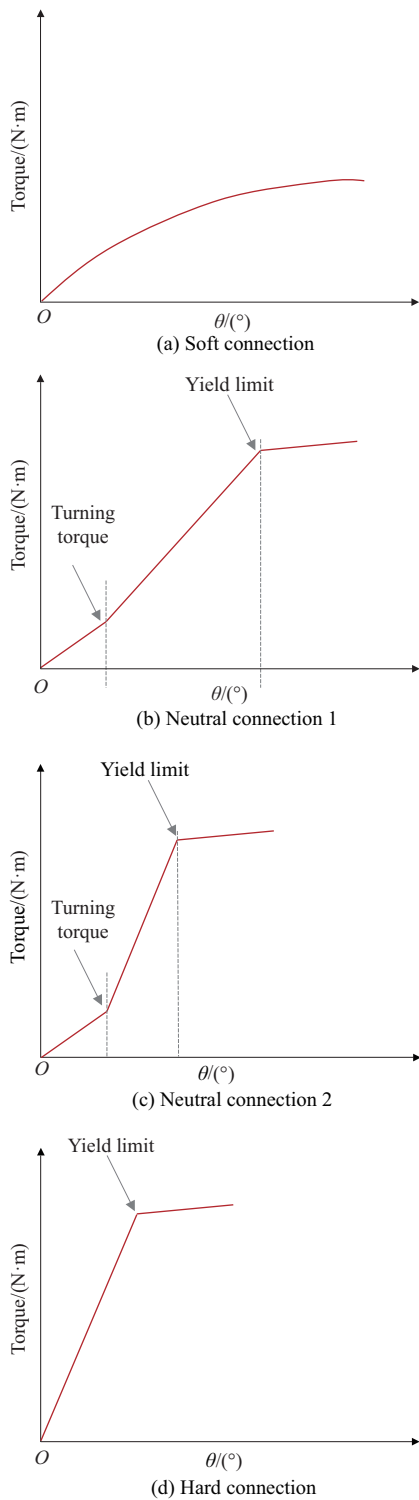


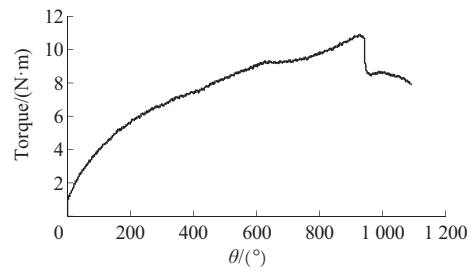
图7 四大类扭矩-转角曲线

Fig. 7 Four types of torque-angle curves

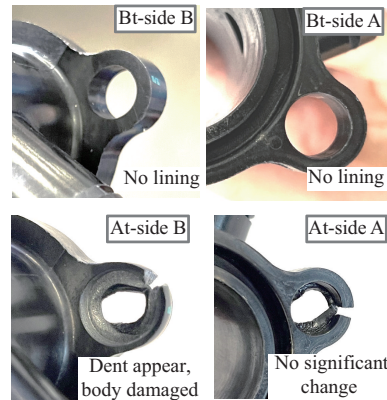
的破坏;③缺点为扭矩衰减风险。

3.2.2 基于软连接现象的启示

从第一类现象及数据分析,塑料难以承接足够的扭力,扭矩到一定大小易出现塑料本体开裂的情况,即使能勉强打紧,承载的塑料部分由于前述



(a) Torque-angle curve (part 3 without bush)



(b) Before and after tightening (part 3 without bush)

“Bt” represent “before tightening”, “At” represent “after tightening”

(the following text is the same)

图8 软连接

Fig. 8 Soft connection

特点易出现扭矩衰减的风险。因此更加说明塑料件的紧固需要配合使用刚度较高的衬套结构。

扭矩与夹紧力的关系一般遵循5-4-1原则,即所施加的扭矩50%需要克服螺栓头或螺母旋转所产生的摩擦力,40%需要克服螺纹副的摩擦力,10%产生夹紧力^[14],扭矩控制的实质是要控制螺栓的轴向夹紧力,适当的轴向夹紧力才能保证螺栓可靠服役^[15]。

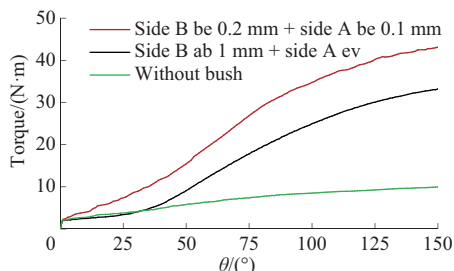
由于塑料承力偏软连接,塑料材料有以下几点特点:①塑料的强度刚度尺寸受温度、湿度影响较大(例如PA6中含有大量的酰胺基团,具有强吸水性,吸水后复合材料力学性能会降低)^[3],这个过程假如发生在零件被安装后,螺栓打紧时承载力的塑料部分会进一步地被压溃产生不可逆的改变;②振动耐久过程中塑料部分受瞬态冲击也会进一步被压溃(塑性变形)^[16];③塑料注塑完成后在库存的时间内会进行内应力的释放最终达到平衡,这个过程会有尺寸的变化,会因模具结构、注塑工艺参数等因素导致应力变形不均匀^[17]。以上塑料材料的特点均会导致螺栓夹紧力降低,扭力衰减等风险,因此建议应尽量将有效扭矩(夹紧力)施加在刚度强度较大

的金属衬套上;基于尽量不让塑料承力的原则,优选状态三和状态四。

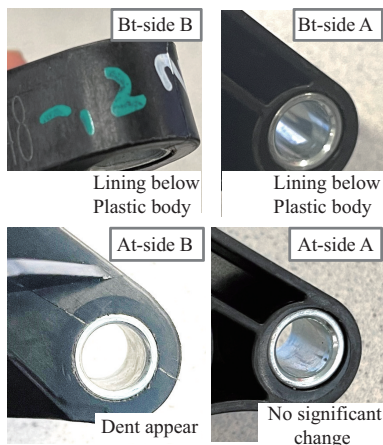
3.3 中性连接1

3.3.1 中性连接1的现象

中性连接1展示的扭矩转角曲线是有明显拐点的,如图9、图10所示,表2编号1,2,3,以及4和7在B面衬套低得过多(拧紧后依然B面未压到衬套)的情况属于该类。以零件2和零件3为代表分别展示M8, M6螺栓拧紧前后形态,如图9、图10所示,其他同类件具有相似性。



(a) Torque-angle curve(part 2 with M8)

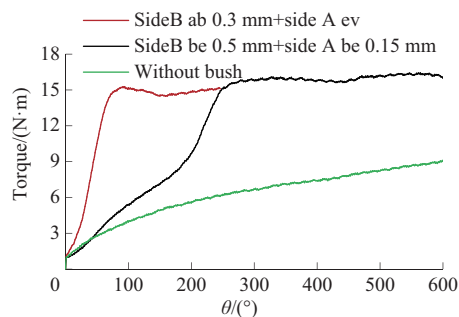


(b) Before and after tightening(part 2 with M8)

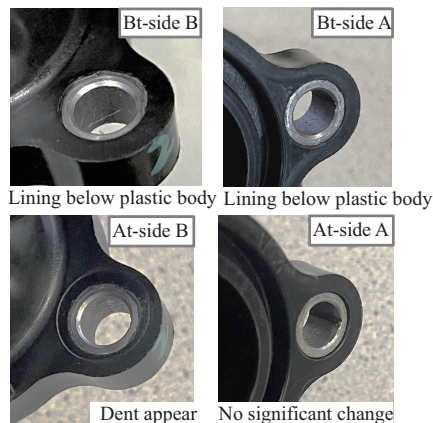
图9 中性连接1(M8)

Fig. 9 Neutral connection I(M8)

拐点前曲线斜率较小,拐点后斜率明显上升直到屈服(见图9和图10中黑色曲线),两组曲线分别和衬套高(状态四)和无衬套(状态一)的实验结果进行了对比,可以看出虽然拐点后斜率增大,但斜率仍略小于斜率最大的线,结合样件的照片,它们共同的特点是B面有明显的塑料压溃痕迹,同时A面的衬套未与塑料平齐(试制偏差因素),此类代表B面衬套低于塑料过多或者A面衬套低于塑料的配合结构。这一类结构在拐点前纯粹由塑料承载螺栓轴力,拐点后,A面或者B面最多其中的一面衬套接触参与承载,而另一面处于悬空状态,此时相当于是塑料和衬套共同承载力,斜率代表的是两者的



(a) Torque-angle curve(part 3 with M6)



(b) Before and after tightening(part 3 with M6)

图10 中性连接1(M6)

Fig. 10 Neutral connection I(M6)

组合刚度,介于纯塑料和纯钢衬套之间。

中性连接1的特点:①可能无拐点,斜率为中间值;②可能有拐点,拐点后斜率为中间值;③存在最终承力仍为塑料的较大可能性,扭矩有衰减风险。

3.3.2 基于中性连接1现象的启示

从第二类现象及数据分析,得到启示1:B面衬套低于塑料的值应有上限(见状态三分析);启示2:A面衬套应在图纸上限制高度差,且此面应尽量不低于塑料。

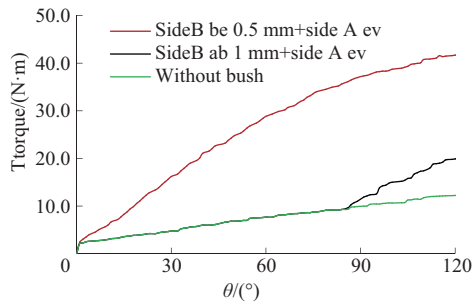
无论是冷插还是预埋的衬套,结合直衬套工艺以及多家供应商实际反馈:A面较易控制接近平的状态。另外,由于双面排列组合太多,确定一面,另一面则较易控制,也是多数供应商的实际做法。目前相关零件少有标注双面公差,但基于A面公差一般较易控制,且较少出现A面衬套低的情况,(厂商默认A面做平,图纸高度差为B面高度差或供应商会内控)因此风险较小,此项为建议项。

3.4 中性连接2

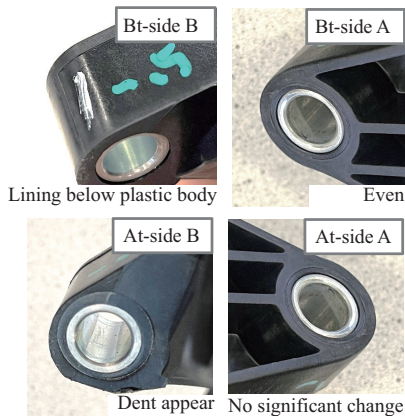
3.4.1 中性连接2的现象

中性连接2展示的扭矩转角曲线是有明显拐点的,表2中编号4和7在衬套低于塑料不多(拧紧后

螺栓压至衬套部分)的情况属于该类。以零件1和零件3为代表分别展示M8, M6拧紧前后形态如图11、图12所示,其他同类件具有相似性。



(a) Torque-angle curve (part 1 with M8)



(b) Before and after tightening (part 1 with M8)

图11 中性连接2(M8)

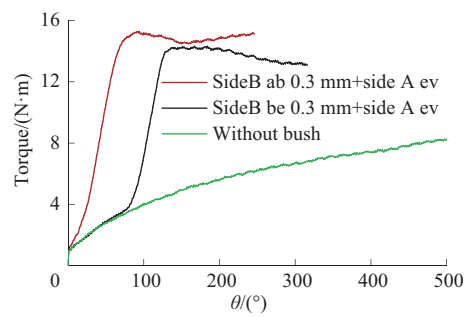
Fig. 11 Neutral connection II(M8)

可以看出,图11和图12中的黑色曲线均在拐点前曲线斜率较小,拐点后斜率明显上升直到屈服,两组曲线分别和衬套高(状态四)和无衬套(状态一)的实验结果进行了对比,可以看出在拐点后斜率增大,斜率平行于斜率较大的线,结合样件的照片,他们共同的特点是B面有明显的塑料压溃痕迹,而同时A面的衬套与塑料平齐,典型的代表是B面低的不多且A面衬套不低于塑料的配合结构。这一类结构在拐点前纯粹由塑料承载螺栓轴力,拐点后,由衬套承载,斜率代表反应衬套的刚度。

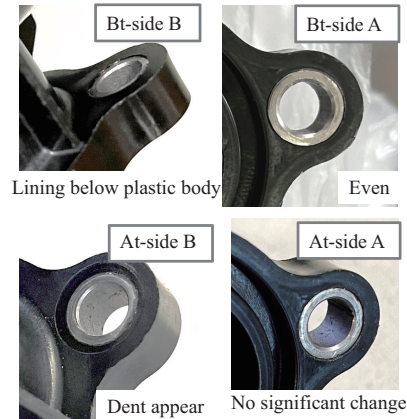
中性连接2的特点:①可承受较高的拧紧力矩(螺栓先坏);②有拐点,先消耗一部分扭矩压平塑料,最终主要衬套承力。优点为安装较紧,零件不会因为塑料和衬套的松动而晃动;缺点为衬套低的下限超差会有扭矩衰减风险。

3.4.2 基于中性连接2现象的启示

从第三类现象及数据分析,得到启示:衬套低于塑料的值应有下限。否则完全压不到衬套,成为



(a) Torque-angle curve (part 3 with M6)



(b) Before and after tightening (part 3 with M6)

图12 中性连接2(M6)

Fig. 12 Neutral connection II(M6)

状态二;或者压到衬套前压平塑料消耗过多扭矩,实际作用在衬套上的有效扭矩过小,耐久后会出现扭矩衰减的情况。为预防扭矩衰减,可以有以下两种方式:①目标扭矩经验估算,为本研究尝试方法,较严格;②耐久试验观察扭矩衰减,时间成本代价较高。

零件拧紧过程的控制方法包括扭矩法、扭矩-转角法、屈服点控制法等。实际应用中车用塑料零件通常用扭矩法控制,扭矩法就是在拧紧时,当达到规定扭矩时拧紧过程即停止^[18]。扭矩控制法是拧紧螺栓头或螺母时控制扭矩值从而获得相应夹紧力的一种拧紧方法,也是应用最广泛的一种拧紧方法^[19]。根据工程经验,通常螺栓拧紧力矩需控制在螺栓屈服极限的50%~85%范围内,如图13所示。低于50%打紧力矩易产生扭矩衰减现象,高于85%打紧扭矩易导致螺栓屈服。

目标扭矩估算如下:假设拐点为有效扭矩的起点(以拐点前的扭矩完全浪费来评估最严格,实际拐点前扭矩不会全部衰减),也就是实际有效扭矩需要减去拐点对应的扭矩,再判断该扭矩是否落在目标扭矩范围内。那么零件配合公差对应扭矩-转角曲线可以求得拐点位置,结合螺栓的屈服极限便可

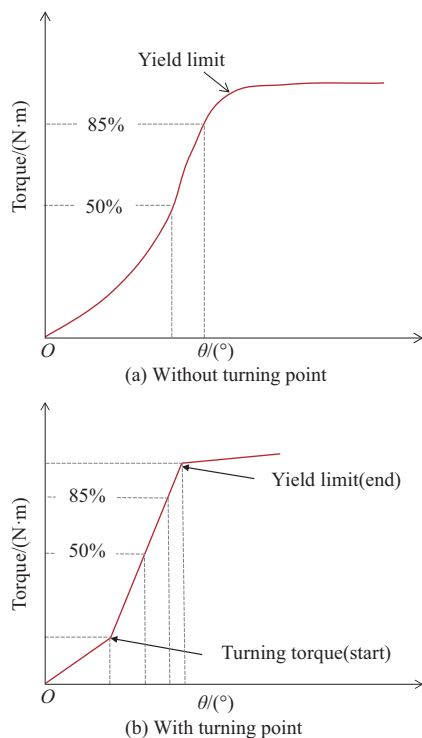


图13 目标扭矩计算示意图

Fig. 13 Diagram of target torque calculation

判断公差设计是否合理。假如设计不合理,改善的方式有增加扭矩或者减小衬套低于塑料的高度差。即使使用不同的扭矩控制方法,该思路依然可用,核心在于将螺栓压紧塑料的部分(即曲线拐点前的部分)扭矩作为无用扭矩进行设计估算。

3.5 硬连接

3.5.1 硬连接的现象

硬连接展示的扭矩转角曲线是无拐点的,表2编号5,6,8,9四种情况属于该类。以零件3为代表展示其拧紧前后形态如图14所示,其他同类件具有相似性。可以看出,相对于状态一的曲线,曲线斜率明显较大,直到屈服,结合样件的照片,他们共同的特点是压紧后B面衬套仍明显凸出,而同时A面无明显变化,典型的代表是如图1所示A和B面都不低于塑料的结构。此类结构在拧紧的全过程都由衬套承载,斜率表征衬套的刚度,其值与状态三相同。

硬连接的特点为可承受较高的拧紧力矩(螺栓先坏);持续加扭零件不会破坏;优点为可防止假力矩;缺点为一旦衬套和塑料间滑移会出现零件松动,影响密封等;衬套和塑料耐久过程中或耐久后会松动,甚至会有滑移,会导致密封面密封圈压缩率降低或者零件塑料部分松、晃动的情況发生。

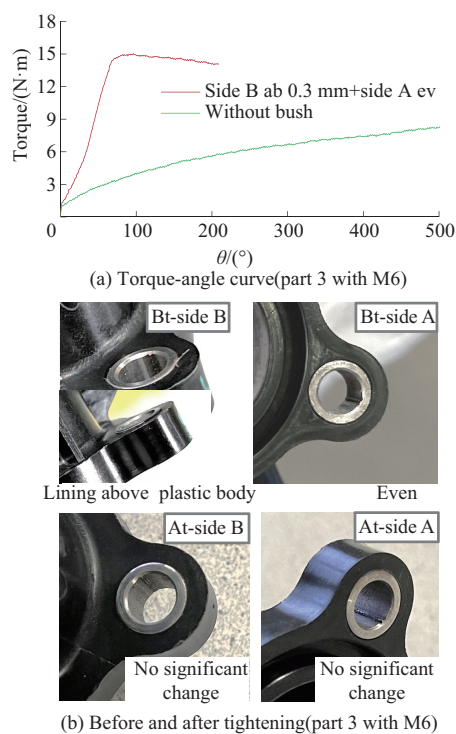


图14 硬连接

Fig. 14 Hard connection

3.5.2 基于硬连接现象的启示

从第四类现象及数据分析,得到启示:①塑料部分晃动,影响和其他对手件配合等、模态降低等,这一类问题一方面可通过设计阶段尺寸链的校核进行初步预判,另一方面可通过试验验证;②密封面密封不良,主要针对面压密封。这一类在设计阶段可以通过设计阶段密封圈压缩率的校核公式进行^[20],即将衬套高处塑料部分的总高度差也考虑进计算公差的一部分。压缩率计算及其范围约束见公式(1)。

$$C_{\min} < \frac{h_{\min} - X}{H} < C_{\max} \quad (1)$$

式中: C_{\min} 为压缩率设计下限; C_{\max} 为压缩率设计上限; h_{\min} 为密封圈的最小露出高度; X 为允许的轴向窜动量; H 为对应的密封圈总高度。根据公式(1)可确认 X 的范围,即衬套允许高出塑料的高度极限。

4 实践应用

4.1 改善增压器执行器螺栓松脱问题

针对本研究开头所提的问题,基于前述对中性连接2现象的启示,改善方案见表9分析结果,原方案6~8 N·m的扭矩值设计不合理,尤其是下限6 N·m存在扭矩衰减的风险;方案二B面衬套低于塑料0.2 mm的

设计值对应的扭矩设计值应为10.5~11.2 N·m,但由于工程中扭矩精度较难控制在如此小的范围内,因此也不可行;另外,问题件的A、B面均存在尺寸超差,B面达到0.25 mm的高度差,A面塑料部分也高出了衬套最大0.15 mm,这两个因素均会导致假力矩的产生。

表9 执行器改善方案对比

Tab. 9 Comparison of improvement schemes for actuators

Item	Old plan	New plan 1	New plan 2
Design torque/(N·m)	6~8	8~11.2	10.5~11.2
Bolt yielding torque/(N·m)		14~15	
Safe torque(50%~80%)/(N·m)		7~11.2	
Torque turning point/(N·m)	0	1	3.5
Maximum acceptable B-side height of bushing is lower than that of the plastic/mm	0	0.1	0.2
Feasibility	No	Yes	No

方案一中综合扭矩范围及公差适配的拐点都较为合理,其中表9内的拐点扭矩值通过图15所示曲线读出,图15是根据零件3(与该问题件材料一致)的系列试验结果总结而来。最终,在工程中将该前述问题零件的B面控制在-0.1 mm以内,A面控制在±0.02 mm,以及同时把扭矩提升至8~11 N·m,再无同类问题再发生,并通过了台架耐久试验及整

表10 进气歧管改善前后对比

Tab. 10 Comparison of AIM before and after improvement

Item	Before improvement	After improvement
Compression ratio requirement		15%~30%
Minimum exposed height of sealing part/mm		1.1
Total height of corresponding sealing ring/mm		6
Maximum allowable displacement value/mm		0.2
Design value of height difference of bushing plastic/mm	0~+0.4 (Maximum displacement 0.4)	±0.1
Rationality	Unreasonable	Reasonable

Notes: A positive height difference indicates that bushing is higher than the plastic part, while a negative value indicates that bushing is lower than the plastic part.

表11 进气歧管改进方案校核扭矩

Tab. 11 Verification torque of intake manifold improvement plan

Item	After improvement
Design torque/(N·m)	20~25
Bolt yielding torque/(N·m)	35
Safe torque(50%~80%)/(N·m)	17.5~29.75
Torque turning point/(N·m)	2.5
Maximum acceptable B-side height of bushing is lower than that of the plastic/mm	0.1
Feasibility	Yes

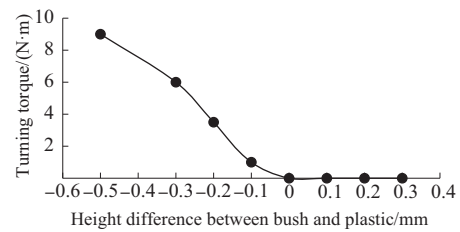


图15 不同M6组合的扭矩拐点

Fig. 15 Torque inflection points of different M6 samples

车耐久试验,且已进行大批量生产。该应用验证了针对第二及第三类现象的启示。因该零件不存在密封及精密配合的课题,因此无须校核衬套高出塑料时的密封问题。

4.2 改善进气歧管密封不良问题

针对某车企发动机进气歧管衬套高于塑料0~0.4 mm,每年售后近千例密封不严的情况进行改善。用针对硬连接现象的启示分析问题,已知歧管密封面的密封圈结构尺寸,可以根据公式(1)推出最大允许的窜动值见表10,从计算结果看原方案存在设计不合理,衬套低于塑料过多的问题。后将衬套改为0~-0.1 mm后,同步校核扭矩也无扭矩衰减风险,见表11,后续批量生产无再发生。其中表10内的拐点扭矩值通过图16所示曲线读出,图16是根据零件1(进气歧管)的系列试验结果总结而来。可以印证本研究关于第四类的启示结论。

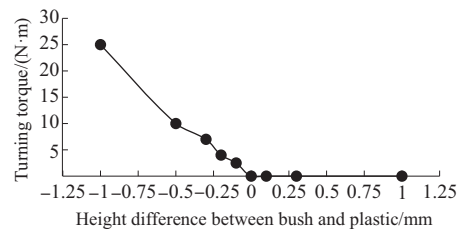


图16 不同M8组合的扭矩拐点

Fig. 16 Torque inflection points of different M8 samples

以上改善均成功应用到类似产品的DFMEA^[21]中以保证工程产品的可靠性设计^[22]。

5 结论

(1)塑料零件配合钢衬套的组合结构,其配合可分为A面(零件安装到对手件的接触面)、B面高(零件与螺栓头部直接接触的面)、平、低,排列等组合,加上无衬套共10多种组合,依据拧紧试验的扭矩转角曲线分析,可以分成软连接(拧紧前拧紧后均为塑料承力)、中性连接1(拧紧前塑料承力,拧紧后塑料和衬套组合承力)、中性连接2(拧紧前塑料承力,拧紧后衬套承力)、硬连接(拧紧前后均为衬套承力)四大类状态;基于拧紧后以刚度较大的衬套为主承力方的原则,工程建议优选中性连接2和硬连接的设计。

(2)塑料零件的安装法兰应配合刚度较大的衬套如钢材衬套,可有效提高法兰受螺栓夹紧力的能力,且可防止扭矩衰减。

(3)塑料零件与安装对手件接触面衬套应不低于塑料且尽量与塑料平齐,防止出现拧紧过程中性连接1的结果,即拧紧后最终承力者仍为塑料,带来扭矩衰减风险。

(4)塑料与螺栓头部接触的面衬套低于塑料应有下限,防止出现拧紧过程中性连接1的结果,即拧紧后最终承力者仍为塑料;或者中性连接2加上扭矩拐点过大,即存在过大无效力矩,均会带来扭矩衰减的风险。

(5)衬套与塑料的总高度差应有上限,防止零件使用过程中出现塑料变形,与衬套相对松动而影响密封、零件松动等风险。

(6)由于塑料和衬套的配合问题与塑料本身材料、衬套材料、塑料部分结构尺寸、塑料与衬套的过盈方式等多因素相关,本研究仅提供及论证一种有效的研究此类问题的思路和方法,具体零件、具体问题需具体分析。

参考文献

- [1] 周文. 我国汽车塑料产业发展机遇挑战和战略对策[J]. 塑料工业, 2020, 48(3):15-19.
ZHOU Wen. Challenges and strategies on Chinese automotive plastics industry development[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(3): 15-19.
- [2] WANG X J, SUN W, CHEN J F, et al. Microstructures and properties of 6016 aluminum alloy with gradient composition[J]. Rare Metals, 2021, 40(8):2 154-2 159.
- [3] 黄增斌, 罗伟权, 丛杰, 等. 玻璃纤维/尼龙6复合材料吸湿特性及其界面性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(10):106-112.
HAUNG Zengbin, LUO Weiquan, CONG Jie, et al. Moisture absorption characteristics and interface properties of glass fiber/nylon 6 composite[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(10): 106-112.
- [4] 邹文奇, 温变英. 填充型导热塑料导热性能影响因素探析[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(7):178-183.
ZOU Wenqi, WEN Bianying. Influence factors of the thermal conductivity for filled thermal conductive plastic composite[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(7):178-183.
- [5] 李占超, 王克俭. 高导热塑料的研究与应用进展[J]. 塑料包装, 2021, 31(2):37-40, 26.
LI Zhanchao, WANG Kejian. Research and application progress of high thermal conductivity plastics[J]. Plastics Packaging, 2021, 31(2):37-40, 26.
- [6] 苏似鑫, 马航飞, 吴启升, 等. 不同形态玻璃纤维对尼龙66结构与性能影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11):119-125.
SU Sixin, MA Hangfei, WU Qisheng, et al. Structure and properties of polyamide 66 effected by different glass fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11):119-125.
- [7] 丁智平, 黄达勇, 荣继刚, 等. 长玻纤增强复合材料注塑成型构件强度分析[J]. 材料工程, 2018, 46(4):111-119.
DING Zhiping, HUANG Dayong, RONG Jigang, et al. Strength analysis of long glass fiber reinforced composite injection molding components[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(4): 111-119.
- [8] 高祖成, 周喆, 陆向科, 等. 鱼骨图在解决产品开发问题中的应用[J]. 内燃机与配件, 2021(14):206-207.
GAO Zucheng, ZHOU Zhe, LU Xiangke, et al. Application of fish-bone diagram in solving product development problems[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2021(14):206-207.
- [9] 刘杰, 王闰臣. 人机料法环测在质量管理方面的应用[J]. 大众标准化, 2022(3):10-12.
LIU Jie, WANG Guichen. Application of man-machine material method in environmental measurement in quality management[J]. Popular Standardization, 2022(3):10-12.
- [10] 王祥林, 任治华, 赵贝贝, 等. 汽车零部件台架可靠性试验样本数量研究[J]. 北京汽车, 2022(5):9-12.
WANG Xianglin, REN Zhihua, ZHAO Beibei, et al. Study on the number of samples for reliability tests of auto parts bench[J]. Beijing Automotive Engineering, 2022(5):9-12.
- [11] 蔡跃波, 安鲁陵, 王楚凡, 等. 螺栓拧紧过程中工况对复合材料连接结构夹紧力的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(2):812-822.
CAI Yuebo, AN Luling, WANG Chufan, et al. Effect of operating conditions on the clamping force of composite material structure during bolt tightening process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2):812-822.
- [12] 杨琪. 螺纹紧固件的拧紧试验[J]. 轻型汽车技术, 2003(9):14-17.
YANG Qi. Tightening test of threaded fasteners[J]. Light Vehicles, 2003(9):14-17.
- [13] 陈福森, 马贝方. 拧紧曲线在螺纹连接质量分析中的应用研究[J]. 汽车零部件制造技术, 2021(9):9-11.
CHEN Fusen, MA Beifang. Application of tightening curve in

- quality of threaded joint[J]. *Automotive Parts Manufacturing Technology*, 2021(9):9-11.
- [14] PAN Q X, PAN R P, SHAO C, et al. Research review of principles and methods for ultrasonic measurement of axial stress in bolts[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 33. DOI:10.1186/s10033-020-0431-x.
- [15] 李柏乐,张志存,陈荣. 螺纹拧紧技术研究与应用[J]. *装备制造技术*, 2020(10):167-169.
LI Baile, ZHANG Zhicun, CHEN Rong. Research and application of thread tightening technology[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020(10):167-169.
- [16] 刘检华,巩浩,丁晓宇. 振动条件下楔形垫圈的防松性能研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(5):38-44, 70.
LIU Jianhua, GONG Hao, DING Xiaoyu. Anti-loosening performance of wedge washers under vibration[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(5):38-44, 70.
- [17] 王权,张建鹏,王信玮,等. 基于复合形法的薄壁注塑件变形预补偿研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(11):3 692-3 703.
WANG Quan, ZHANG Jianpeng, WANG Xinwei, et al. Deformation pre-compensation of injection molded thin-walled parts based on complex method[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(11):3 692-3 703.
- [18] 刘建文. 螺纹联接及拧紧技术[J]. *汽车工艺与材料*, 1999(7):5-7.
LIU Jianwen. Threaded connection and tightening technology[J]. *Automobile Technology & Material*, 1999(7):5-7.
- [19] 杨泽迎,金伟,赵旭东,等. 基于扭矩控制法的螺栓连接可靠性探索[J]. *装备机械*, 2016(2):26-29.
YANG Zeying, JIN Wei, ZHAO Xudong, et al. Exploration of bolting reliability based on torque control method[J]. *The Magazine on Equipment Machinery*, 2016(2):26-29.
- [20] 张成富. O形密封圈的压缩率计算方法及实例验证[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(19):175-180.
ZHANG Chengfu. Calculation method and example verification of compression ratio of O-ring seal[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018, 38(19):175-180.
- [21] 邵天飙. 简介质量工具在汽车设计开发中的运用[J]. *时代汽车*, 2021(20):106-107.
SHAO Tianbiao. Introduction to the use of quality tools in automobile design and development[J]. *Auto Time*, 2021(20):106-107.
- [22] ZIO E, FAN M F, ZENG Z G, et al. Application of reliability technologies in civil aviation: Lessons learnt and perspectives[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(1):143-158.