

橡胶材料加速老化研究现状及发展趋势

王荣华, 李晖, 孙岩, 刘亚平

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 论述了橡胶材料实验室热空气、臭氧、光老化等几种较为常用的人工加速老化试验研究现状, 综述了热、氧、臭氧、光照等因素造成橡胶材料老化的作用机理及影响, 总结了关于橡胶材料加速老化研究存在的问题和不足, 以及今后研究可能的发展趋势。

关键词: 橡胶; 老化; 热氧; 臭氧; 光照

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.016

中图分类号: TQ 330.1⁺4 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)04-0066-05

Research Status and Development Trend of Accelerated Aging of Rubber Materials

WANG Rong-hua, LI Hui, SUN Yan, LIU Ya-ping

(No. 53 Research Institute of CNGC, Jinan 250031, China)

Abstract: Several artificial accelerated aging tests of rubber material commonly used in laboratory were reviewed, such as hot air, ozone, light aging and so on. Factors causing rubber material aging were reviewed from the aspects of aging mechanism and influence. The problems and shortcomings of rubber material accelerated aging research were summarized as well as possible future research trends.

Key words: rubber material; aging; thermal oxide; ozone; illumination

随着科技水平的不断发展和进步, 作为三大人工合成材料之一的橡胶已广泛应用于航空航天、武器装备、汽车、船舶、精密机械、石油化工、电力电器等领域, 产品如各种油封、隔膜、密封条、垫圈、皮碗、涂层、密封剂等。橡胶材料在实际的存储、使用过程中常会接触到各种环境因素, 如氧气、臭氧、光照, 加之热作用, 常会出现材料结构、组成、性能等随时间

变化的现象, 如分子链断裂、氧化、配合剂析出、力学性能衰减等, 也称为橡胶材料的老化^[1]。

多重环境因子的综合作用导致了橡胶材料的老化, 即使相同环境下, 单一因素的差异也会造成材料老化性能、机理的不同, 甚至出现服役寿命等方面的差别。这为设备的整体维护带来了许多潜在的问题, 因此, 研究橡胶材料的老化行为及机理对于材料

收稿日期: 2013-02-18

基金项目: 国防军工环境试验与观测重点项目(H092012C002; H102011B002)

作者简介: 王荣华(1987—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向为非金属材料的老化与防护。

的防老化、寿命预测^[2]等具有十分重要的意义和价值。目前对橡胶材料在不同环境中老化性能的研究主要是以实验室人工加速老化试验为主。由于目前还无法实现从微观结构层面上对于材料寿命进行研究和评估,且材料的使用环境影响因素更为复杂、多样,橡胶材料的加速老化还处于一个不断认识和研究的过程。

1 橡胶加速老化

1.1 热空气老化

大量的自然环境老化与人工烘箱加速老化试验研究对比发现,在不考虑光照、辐射、雨水等自然环境因素的作用下,人工烘箱加速老化的机理与材料实际自然老化机理最为接近。因此,为实验室模拟橡胶自然环境老化提供了一定的研究基础。国内外对不同种类橡胶材料都开展了大量的热空气加速老化试验,研究了材料老化性能的变化规律及机理^[3]。

不饱和橡胶如天然橡胶^[4]、聚丁二烯橡胶等,在制备、加工过程中分子链可能含有部分双键或弱键,温度升高,降低了氧与双键或弱键间反应的能垒。如高温作用下氧气分子更易于与天然橡胶分子链上残留的不饱和碳碳双键发生反应,生成自由基,随后自由基与分子链上的氢结合反应生成氢过氧化物,氢过氧化物继续分解最终生成小分子可挥发氧化物,同时伴有新自由基的产生^[5]。如此氧化反应不断进行,最终引起橡胶分子主链的断链,材料拉伸强度、硬度等宏观力学性能衰减。由于反应过程中生成了自由基,因此还可能引起橡胶组分中未完全硫化的成分继续交联,使硫化胶的硬度、强度等增大,出现硬化老化。随着老化的不断深入、交联网络的增加,一方面限制了橡胶分子链的运动,另一方面又阻碍了自由基之间的相互反应,致使交联反应速率下降。在热的作用下,橡胶分子链发生断链、降解等反应,生成小分子产物如羧酸、酮、醛和酯等,最终表现为软化老化。镧系配合物原子结构中含有大量的空轨道,能快速捕捉自由基并使其失去活性。有研究发现在天然橡胶中加入适量的这类化合物后,材料的耐热氧老化性能得到了很大提高,防老化效果明显优于常用的4010NA防老剂^[6],这为今后橡胶材

料的防老化开辟了一个新的研究方向。

某些杂链橡胶如硅橡胶、聚硫橡胶^[7]等或是侧链含有其它原子、基团如氟橡胶、丁腈橡胶、丁苯橡胶^[8]等,这些材料在热空气老化过程中只有当环境温度升高到一定程度时,分子链或基团具有了足够的活性,才能和空气中的氧气发生反应。因此,相对于不饱和橡胶材料,杂链橡胶表现出了更好的耐高温性能。由于杂链橡胶分子链结构比较复杂,其在热空气老化过程中性能变化、机理等也不同于不饱和橡胶。有研究表明缩合型硅橡胶热空气老化过程中主要发生了主链断链,而加成型的硅橡胶则以侧链甲基的氧化分解为主;丁腈橡胶在热空气老化中发生了交联反应,出现了硬化老化^[9],通过选用适当的增塑剂^[10]或者将其与其它材料如乙丙橡胶、尼龙等共混,均能提高丁腈橡胶材料的耐热氧老化性能,赋予材料更好的高温性能;当加速老化温度升高到一定程度后,破坏了氟橡胶中的C—F键,降低了氟原子对橡胶主链的保护,导致橡胶C—C主链的断裂^[11];氯化聚乙烯橡胶在高温热氧环境中,容易发生侧基氯原子的脱除,生成小分子的氯化氢,橡胶分子链发生断裂,引起材料拉伸强度在短时间内迅速下降。当采用甲基丙烯酸镁助交联剂时,基体中形成了离子交联键,材料的热稳定性得到了很大的提高^[12]。丁苯橡胶在实验室热氧老化过程中随老化时间的延长,交联密度呈现增加的趋势,也表现出了硬化老化现象^[13]。

1.2 臭氧老化

臭氧是空气中含量较为稀少的气体之一,分子具有很强的极性。研究表明臭氧分解产生原子态氧需要的最小能量比氧气分解生成原子态氧要小4.5倍。因此,臭氧表现出了很高的活性,很容易和橡胶分子链发生相互作用,引发一系列的物理、化学反应。臭氧对橡胶材料特别是含不饱和双键的橡胶破坏作用很大,会大大缩短材料的服役寿命^[14]。国内外也有学者开展了相关的研究工作,利用臭氧老化试验箱等设备考察了橡胶材料在臭氧环境下的老化行为规律和机理。

橡胶制品在加工成型过程中不可避免会在材料表面或内部存在一定缺陷,如裂纹、空洞等。当材料处于拉伸状态时,臭氧就非常容易从这些缺陷渗透

进入橡胶材料内部。在较低能量作用下,臭氧会和橡胶分子主链或侧链残存的碳-碳双键结合,生成臭氧化物。由于稳定性较差,臭氧化物会在较短的时间内发生重排,生成异臭氧化物,并在热的作用下继续分解产生自由基,引起橡胶分子链的交联,随后在热、应力等的作用下,分子链断裂,宏观上表现为材料出现龟裂、性能下降等臭氧老化现象。

研究发现经臭氧老化后,橡胶材料的断面和表面一样也存在无数的微小裂纹,这说明了在老化过程中橡胶材料从内部到表面都出现了臭氧龟裂。当有外力作用时,这些裂纹便会迅速扩展,引起橡胶材料的破坏失效^[15]。天然橡胶由于含有大量不饱和双键,其耐臭氧老化性能相对其它饱和橡胶材料要差。当在材料配方中加入一定量改性后的纳米蒙脱土或粘土时,由于纳米粒子在橡胶基体内均匀分散,加之其具有特殊的纳米层状结构,既限制了橡胶分子链的运动,又很好地阻隔了臭氧分子及热在橡胶基体内的扩散和传递,提高了天然橡胶材料的耐臭氧老化性能^[16]。

通常状况下,为了提高橡胶材料的耐臭氧老化性能,主要是从材料结构设计、胶料配方等方面入手,实际生产中主要是以后者为主。一种比较可行的方法是将一些具有抗臭氧效能的弹性体如氯丁橡胶、三元乙丙橡胶等和二烯烃类橡胶共混,降低二烯烃的含量。如聚醋酸乙烯具有饱和的分子链结构,因此具有良好的抗臭氧老化性能。通过与丁苯橡胶的并用,提高了后者的耐臭氧老化性能。同样在氟橡胶中加入一定量丙烯酸酯橡胶后,在降低材料成本的同时,还保持了氟橡胶较好的耐臭氧老化性能,并在一定程度上改善了胶料的加工性能^[17]。另一种较为通用的方法是加入抗臭氧剂,抗臭氧剂在橡胶材料表面的迁移速率直接关系到橡胶制品的耐臭氧老化性能。国外有学者采用微胶囊法对抗臭氧剂进行了包覆,既提高了抗臭氧剂在胶料内的分散均匀性,又改善了其迁移速率,使制品即使在臭氧环境中也保持了良好的性能^[18]。

1.3 光老化

太阳辐射的电磁波是一种包含从X射线到远红外的连续光谱。这些连续的光在传递过程中经地球表面大气层的吸收、散射等作用后,实际到达地面的

光谱波长范围一般为290~3000 nm,其中波长在290~400 nm的紫外区光线辐射能量虽只占太阳总辐射能量的7%~8%,但这部分区域的光线却具有很高的能量,足以破坏高分子材料。如塑料^[19]、橡胶、涂料^[20]等中的某些化学键,包括C—H,C—O,C—C键等。因此,高分子材料在太阳光或强的荧光照射下,也会出现材料结构、外观、宏观性能等的劣化,即出现光老化(也称光氧化)^[21]。和其它类型环境的老化一样,光老化的最终结果也是橡胶材料性能的弱化、服役寿命的衰减等。

光照条件下,橡胶材料主要可能会发生以下两方面的变化,引起材料最终的老化失效。一方面是橡胶内残留的催化剂或合成、加工过程中产生的氢过氧化物、羰基化合物、电荷转移络合物等能吸收太阳光中具有一定波长的光波,如紫外或近紫外区域。一旦吸收光子能量后,某些原子会被激发到电子激发态,而这种状态是不稳定的,会通过各种光物理或光化学过程消耗激发的能量,如荧光、磷光、热辐射等,在此过程中如果有氧的参与会导致橡胶材料的老化。另一方面太阳光谱中的紫外线可以直接将能量传递给化学键中的电子,破坏材料的化学键,引起弱键甚至某些强键的活化、断裂、重组等,造成材料的老化^[22]。

因此,相对于热空气老化,橡胶材料的光老化反应一般表现为链引发速度比较快,且链增长过程的时间较短。然而,就材料老化机理而言,普遍认为光氧老化的机理大体和热氧老化类似^[23],只是材料的老化程度有所差别。如有学者研究发现EPDM在光氧老化中引发交联反应的时间明显短于热氧老化,且材料老化的诱导期很短,在短时间内即出现材料的氧化降解。相同紫外辐射条件下,材料的光老化和热氧老化程度均随时间延长而加剧,SEM显示光氧老化降解程度比热氧老化更为严重^[24]。

1.4 耐液体介质老化

由于具有良好的耐油、耐化学介质腐蚀等性能,丁腈橡胶、氟橡胶等材料广泛应用于各种液体介质环境中,如油料、化学品的密封、管路衬里等。长时间接触介质使用条件下不可避免会出现橡胶材料不同程度的老化,如溶胀、发粘、龟裂等,这极大威胁了装备的正常使用,尤其是高温高压环境下对油料等

的密封。因此,继高温热空气老化、臭氧老化、光老化之后,橡胶材料及制品的耐液体介质环境老化性能也日益成为人们关心的重点。关于不同种类橡胶材料制品在溶液、油料、化学物质等介质环境下的老化性能及机理,国内外也进行了一定的研究^[25-27]。

橡胶材料与溶液、油料等介质环境的相互作用,首先表现为介质在橡胶基体内的渗透扩散。研究发现橡胶材料与介质间的作用遵循相似相溶原理,即具有相同或相似极性的介质(油料等)和橡胶材料之间易发生相互作用。介质分子扩散进入橡胶材料,破坏了材料分子间的作用力,同时伴随着橡胶分子向介质中的运动,出现材料溶胀、体积增大等现象。

其次,橡胶材料在加工过程中常会加入一定量不同类别的补强剂、配合剂等。介质分子在橡胶材料基体内的渗入、扩散一方面降低了小分子和橡胶分子链之间的吸附缠结作用,导致材料微观性能的变化;另一方面又破坏了助剂在材料内的分散化程度,使小分子出现可能的聚集、析出等。这些组分一旦进入介质,会对介质的酸性、燃烧性、润滑性等性能造成一定的影响。国内外对于这方面的研究还相对较少,只是单纯从材料老化性能方面出发,进行研究分析,忽略了橡胶老化对于介质环境的影响,这方面内容也可能成为今后研究的重点。

某些极性介质如酸、碱、二甲醚、生物柴油等,常含有极性基团,还可能有一定量的不饱和烃、硫化物等。虽然液体介质中基本不含氧气分子,但在热作用下,这些极性基团或活性物质依然可以和橡胶分子主、侧链发生化学反应,引起橡胶材料的失效破坏等,表现出与热空气老化过程中不同的老化行为及机理^[28]。如酸性介质条件中,三元乙丙橡胶中第三单体上的C=C双键易受攻击而发生降解,同时酸性条件还会促使交联键的水解,引起乙丙橡胶的老化失效^[29];在热空气老化过程则主要发生了自由基链式催化氧化反应,导致橡胶分子主链及交联键的断裂、破坏等,造成材料的老化;天然橡胶在超临界甲苯溶液的老化过程中,生成了许多含有苯环的物质,说明甲苯可能参与了天然橡胶的解聚反应,但材料的老化机理目前还不明确^[30];Chih-Wei Lin等^[31]研究了以氯丁橡胶、液体硅橡胶、氟硅橡胶、乙丙橡胶、氟橡胶5种材料制成的质子交换膜在模拟燃料电池电解液中的耐介质老化行为规律。通过对比分析,相

对于其它4种材料,氟硅橡胶表现最为稳定,说明了氟硅橡胶材料具有较好的耐介质老化性能。

2 存在问题及发展趋势

关于橡胶材料实验室人工加速老化试验及材料的老化行为规律,国内外诸多学者都进行了大量的试验、研究工作,也取得了一定的科研成果和经验。关于橡胶材料在不同环境下的老化行为研究还存在一些不足和问题,亟待改进,主要表现为:

1) 片面强调橡胶材料在老化过程中性能的变化情况,对材料在介质环境尤其是酸碱油等环境中的老化机理和微观结构分析研究较少,未从材料微观结构角度对材料的老化程度、寿命等进行评估;

2) 对诸如宇航、化工行业等特殊使用环境下材料的老化性能研究,报道较少,尚无系统全面的理论,还需要进行相关的工作;

3) 造成橡胶材料老化的各个环境因素间存在相互作用,对这方面的交互作用还有待深入研究,同时关于材料的老化对介质环境的影响还无深入的研究分析。

随着科技水平和技术的不断发展、更新,各个领域对材料尤其是橡胶这类通用材料性能的要求也越来越高,使用环境更加复杂多样。对于橡胶材料的实验室人工加速老化研究也出现了一些新的发展趋势:

1) 多种研究手段联合使用,研究橡胶材料介质环境老化过程中微观结构的变化,实现从分子水平上对材料老化程度的表征,并预测材料老化寿命;

2) 橡胶实验室加速环境老化试验将密切结合材料实际使用工况,最大程度模拟材料服役时的性能变化及材料老化机理;

3) 在明确了橡胶材料老化性能及机理后,重点研究不同因素对材料老化的作用机理,以及多因素间的交互作用,注重橡胶老化对酸、碱、油料等环境的影响研究。

3 结语

国内外通过大量不同类别橡胶材料实验室人工加速老化试验及自然环境试验,对于橡胶材料的老

化行为及机理获得了一些可信的理论。然而,在研究过程中未能从材料微观结构等方面入手,加之目前分析手段的限制,还不能从分子角度实现材料老化机理的分析研究。因此,对于材料老化程度和微观结构变化之间的关系还不明确,同时缺乏材料实验室加速老化和自然老化的对比分析,对于橡胶材料寿命预测的准确度还不能保证。随着计算材料学的兴起,对橡胶材料的老化机理及微观结构研究都提供了一种较为可行的研究方法。通过结合人工加速老化试验和现有的研究手段,在一定程度上对材料服役寿命评估和防老化等都能起到积极的作用,必将成为今后研究的重点。

参考文献:

- [1] PRETSCH T, JAKOB I, MILLER W. Hydrolytic Degradation and Functional Stability of a Segmented Shape Memory Poly (Ester Urethane)[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(1): 61—73.
- [2] 张录平,李晖,庞明磊. 基于统计分析的橡胶材料贮存寿命预测[J]. *橡胶工业*, 2011, 58(5): 310—313.
- [3] 张晓军,常新龙,陈顺祥,等. 氟橡胶密封材料热氧老化试验与寿命评估[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(4): 35—38.
- [4] 李军鸽,张萍,于广水,等. 动态疲劳对未填充天然橡胶硫化胶结构与动态黏弹性的影响[J]. *合成橡胶工业*, 2008, 31(2): 127—129.
- [5] 肖琰,魏伯荣,刘郁杨,等. 热氧老化对天然橡胶硫化胶交联结构及力学性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2008(1): 67—70.
- [6] 谢婵,贾志欣,罗远芳,等. 铜配合物对天然橡胶热氧老化性能的影响[J]. *橡胶科技市场*, 2010(19): 10—12.
- [7] 王磊,张斌,孙明明,等. 聚硫密封胶耐老化性能研究[J]. *化学与黏合*, 2011, 3(4): 14—16.
- [8] 饶秋华,袁慧五,银继伟. 丁苯橡胶热空气老化性能变化之间的相关性[J]. *合成橡胶工业*, 2007, 30(3): 172—174.
- [9] 周吉玉,李贵贤,范宗良. 丁腈橡胶的热老化性能[J]. *石油化工应用*, 2009, 28(2): 82—84.
- [10] 陈振勇,林新花,魏明勇,等. 环保醚酯型增塑剂的用量对丁腈橡胶性能的影响[J]. *合成橡胶工业*, 2010, 33(5): 374—377.
- [11] 张录平,付建农,庞明磊,等. 热氧老化对特种氟橡胶交联结构及力学性能的影响[J]. *弹性体*, 2010, 20(4): 25—30.
- [12] 刘莉,刘晓,陈冬梅,等. 甲基丙烯酸镁助交联氯化聚乙烯橡胶耐老化性能的研究[J]. *橡胶工业*, 2011, 58(3): 160—162.
- [13] CHOI Sung-Seen, KIM Jong-Chul. Lifetime Prediction and Thermal Aging Behaviors of SBR and NBR Composites Using Crosslink Density Changes[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2012, 18(3): 1166—1170.
- [14] 常新龙,姜帆,惠亚军. 导弹橡胶密封件环境失效研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(4): 59—62.
- [15] 那洪东. 预防弹性体制品老化和损坏的措施[J]. *世界橡胶业*, 2009, 36(2): 41—48.
- [16] 刘志坚,王小萍,贾德民. 天然橡胶/蒙脱土/白炭黑纳米复合材料老化性能的研究[J]. *弹性体*, 2009, 19(3): 40—44.
- [17] 刘岚,陈娟娟,王亚明,等. FKM/ACM并用胶的结构及性能研究[J]. *橡胶工业*, 2011, 58(2): 69—74.
- [18] 陈宏. 微胶囊包覆的抗臭氧剂[J]. *橡胶科技市场*, 2008(7): 17—22.
- [19] 李晖,张霞,付建农,等. 尼龙66人工光老化性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2010, 38(12): 65—68.
- [20] 王晶晶,董士刚,叶美琪,等. 环氧涂层室外暴晒和室内加速老化试验相关性研究[J]. *表面技术*, 2006, 35(1): 36—39.
- [21] 易平,何建新,杨秀清,等. 3种高分子材料自然环境多角度暴露对比试验[J]. *表面技术*, 2007, 36(2): 18—20.
- [22] 吴茂英. 聚合物光老化、光稳定机理与光稳定剂[J]. *高分子通报*, 2006(4): 76—82.
- [23] ZHAO Q, LI X, GAO J. Surface Degradation of Ethylene-propylene-diene Monomer (EPDM) Containing 5-ethylidene-2-norbornene (ENB) as Diene in Artificial Weathering Environment[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93(3): 692—699.
- [24] WANG W Z, QU B J. Photo-and Thermo-oxidative Degradation of Photocross-linked Ethylene-propylene-diene Terpolymer[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2003, 81(3): 531—537.
- [25] LI G, TAN J, GONG J. Chemical Aging of the Silicone Rubber in a Simulated and Three Accelerated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Environments[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 217: 175—183.
- [26] CUI T, CHAO Y J, CHEN X M, et al. Effect of Water on Life Prediction of Liquid Silicone Rubber Seals in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(22): 9536—9543.
- [27] 张录平,李晖,庞明磊,等. 特种氟橡胶耐油介质老化性能研究[J]. *世界橡胶工业*, 2011, 38(1): 27—30.

(下转第101页)

损检查发现多处裂纹,且裂纹主要集中在焊缝和转角处,裂纹长度最短为3 mm,最长为8 mm,裂纹深度在2~4 mm之间。在出现裂纹的摇臂位置有较严重腐蚀锈迹,如图6所示。



图6 收放摇臂出现裂纹位置

Fig. 6 Position of retractor rocker arm crack

1.5.2 原因分析

该起落架收放摇臂为焊接件由材料为30CrMnSiNi2A钢的两个锻件焊接而成。与起落架收放系统大、小两个液压收放作动筒相连接。在飞机滑跑和起落架收放过程中承受弯矩、扭矩和拉力。经分析认为,产生裂纹的可能原因如下:1)零件转角处过渡半径较小(R10),易产生较大的应力集中^[6];2)30CrMnSiNi2A钢在多次收放载荷作用下对应力集中有很高的敏感性,易产生疲劳裂纹;3)由于焊缝经常处于海水环境中,有较严重腐蚀锈迹,且局部锈蚀程度不一致,引起局部应力变化,这种应力变化直接导致焊缝抗剪能力与抗拉能力达不到设计要求,在多次收放载荷作用下,焊缝薄弱环节产生裂纹;4)焊缝本身有气泡、夹渣和微小的龟裂等缺陷,导致焊缝强度下降。综上分析,在各种可能因素的共同作用下导致多处裂纹产生。

2 结论

通过对飞机起落架几种典型故障进行分析表

明,设计、生产和使用维护中即使是微小的疏漏也可能导致严重的后果。因此,在设计、生产和使用维护中应注意以下几点。

1) 确保设计质量。为了避免应力集中和开裂,零件截面改变处应平滑均匀过渡,零件转角处应选用足够大的圆角半径;运动部件的接触表面应降低表面粗糙度,保证运动的顺畅;合理布置焊缝位置、坡口形状以及焊缝表面形态,避免力的传递不合理,存在严重应力集中,或者产生附加弯矩等。

2) 确保工艺质量。在焊接生产过程中应预防和避免产生裂纹、未焊透、咬边、气孔和夹渣等缺陷,要保证设计图样所要求达到的焊缝等级。

3) 确保装配质量。在收放作动筒等运动部件装配过程中,要保证活塞杆与外筒之间的配合精度,确保收放作动筒运动的顺畅和其对油液的密封。

4) 防止腐蚀侵蚀。由于水上飞机起落架结构经常受海洋大气和海水的侵蚀,故飞机每次飞行结束后上岸后都应用清水对起落架结构进行彻底清洗,同时要及时更换和补充运动部件接触部位的润滑脂。

参考文献:

- [1] 王志瑾,姚卫星. 飞机结构设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007:172—173.
 - [2] 高泽迥. 飞机设计手册 14分册——起飞着陆系统设计[K]. 北京:航空工业出版社,2002:19—37.
 - [3] 刘锐琛,苏开鑫. 飞机起落架强度设计指南[M]. 成都:四川科学技术出版社,1989:81—91.
 - [4] 张蕾,纪敦,陈群志,等. 腐蚀条件下起落架机轮半轴疲劳寿命研究[J]. 装备环境工程,2006,3(3):89—91.
 - [5] 何永乐,毕燕洪. 飞机刹车盘异常磨损原因分析[J]. 飞行事故和失效分析,2011,85(3):10—11.
 - [6] 诺曼·斯·柯里. 飞机起落架设计原理和实践[M]. 北京:航空工业出版社,1990:192—202.
 - [30] 刘银秀,邹霞,潘志彦,等. 废轮胎和天然橡胶在超临界甲苯中的解聚研究[J]. 燃料化学学报,2007,35(6):732—736.
 - [31] LIN C W, CHIEN C H, TAN J, et al. Chemical Degradation of Five Elastomeric Seal Materials in a Simulated and an Accelerated PEM Fuel Cell Environment[J]. Journal of Power Sources,2011,196(4):1955—1966.
- (上接第70页)
- [28] 李跟宝,周龙保,柳泉冰,等. 二甲醚发动机中燃料与橡胶密封件的相容性研究[J]. 西安交通大学学报,2009,39(3):317—320.
 - [29] MITRA S, GHANBARI-Siahkali A, KINGSHOTT P, et al. Surface Characterisation of Ethylene-propylene-diene Rubber upon Exposure to Aqueous Acidic Solution[J]. Applied Surface Science,2006,252(18):6280—6288.