

基于危险性分析的危险化学品储存禁忌策略

刘桂玲, 余伟宏, 秦言杰, 曹先艳

引用本文:

刘桂玲, 余伟宏, 秦言杰, 等. 基于危险性分析的危险化学品储存禁忌策略[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(4): 318-323.

LIU Guiling, SHE Weihong, QIN Yanjie, et al. Study on Storage Taboo Strategy of Hazardous Chemicals Based on Hazard Analysis[J].

Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(4): 318-323.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

单台100%容量汽泵运行的经济性与安全性

Economic Efficiency and Safety of the Single 100% Capacity Steam Pump

上海电力大学学报. 2016, 32(z1): 205-208 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2016.\(z1\).054](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2016.(z1).054)

化工园区危险废物回转窑焚烧系统概述

Review of Process Design of Rotary Kiln Incineration in Chemical Industry Park

上海电力大学学报. 2018, 34(3): 283-286 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2018.03.016>

基于物联网技术的电厂现场安全综合管理系统研究

Research on Power Plant Site Safety Integrated Management System Based on Internet of Things Technology

上海电力大学学报. 2019, 35(5): 498-502 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.05.016>

基于PATRAN的起重机卷筒联轴器轴扭矩分析

Analysis of Torque of Shaft Coupler of Cranes Based on PATRAN

上海电力大学学报. 2015, 31(6): 556-559,564 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2015.06.012>

考虑居民用户特征的居民小区配变容量优化研究

Optimization of Distribution Capacity of Residential Quarters Based on Characteristics of Residents

上海电力大学学报. 2019, 35(1): 59-62,95 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.01.011>

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2021.04.002

基于危险性分析的危险化学品储存禁忌策略

刘桂玲, 余伟宏, 秦言杰, 曹先艳

(上海市安全生产科学研究所, 上海 200233)

摘要:针对目前危险化学品的配存禁忌关系判定问题,分析了现行的储存禁忌配存相关的 4 个标准,开展了基于危险性分析的危险化学品储存禁忌关系研究。建立的危险化学品配存禁忌规则,有助于危险化学品国际通用 CAS 编号、UN 编号及全球化学品统一分类和标签制度(GHS)分类建立对应关系。最后,针对危险化学品配存禁忌关系判定与已有标准禁忌配存要求不一致的问题,提出了建立以危险特征为主危险性类别的禁忌关系判别方法,为危险化学品储存及流通过程提供更加完善的配存禁忌依据。

关键词:危险化学品; 储存; 配存禁忌; 危险性分类

中图分类号: X931

文献标志码: A

文章编号: 2096-8299(2021)04-0318-06

Study on Storage Taboo Strategy of Hazardous Chemicals Based on Hazard Analysis

LIU Guiling, SHE Weihong, QIN Yanjie, CAO Xianyan

(Shanghai Institute of Work Safety Science, Shanghai 200233, China)

Abstract: In view of the new problems in the determination of the storage taboo relationship of hazardous chemicals, this paper analyzes the current four standards related to the storage taboo relationship, and carries out the research on the storage taboo relationship of hazardous chemicals based on the hazard analysis. The established taboo rules for the storage of hazardous chemicals are helpful to establish corresponding relationship between CAS number, UN number and GHS classification of hazardous chemicals. At the same time, on the problem that the determination of the taboo relationship of hazardous chemicals is inconsistent with the existing standards, this paper proposes to establish a method to distinguish the taboo relationship of hazardous chemicals based on the main risk category, so as to provide a more better basis for the storage and circulation of hazardous chemicals.

Key words: hazardous chemicals; storage; taboo of distribution and storage; hazard classification

随着我国化工产业的发展,危险化学品的生产、使用和存储量迅猛增加。仓储作为危险化学品流通的一个重要环节,其精准管理水平直接决定危险化学品的安全状况^[1-3]。

危险化学品的种类繁多,且特性和功能迥异,其仓储过程处于复杂的物流系统之中,不仅具有与普通仓储过程相同的人流、物流、资金流、信息流的交汇,而且还具有一些特殊的仓储特征^[4-7]。

收稿日期: 2020-09-24

通信作者简介: 刘桂玲(1970—),女,博士,高级工程师。主要研究方向为危险化学品安全工程、城市安全风险综合评估、安全发展规划等。E-mail: liuguilingmail@163.com。

基金项目: 上海市科学技术委员会基金(19DZ1202000)。

这些特征使得其仓储作业更加复杂。因此,在日常的销售、储存、运输等过程中,若将性质抵触的危险化学品一同存放,一旦发生泄漏极易引发安全事故^[8-14];若将应急处置(如消防灭火)方法冲突的化学品一同存放,则可能在事故救援时发生二次灾害,扩大事故后果,从而严重危害人们的身体健康和财产安全,破坏生态环境。根据中国化学品安全网和中国化学品安全协会官网公布的数据显示,2013—2019年我国发生危险化学品事故共5 513起,造成8 152人伤亡。其中:2015年天津港爆炸因禁忌危险化学品混放引起的二次灾害事故,使我国一次性伤亡人数达到峰值;2019年发生危险化学品事故共30起,造成894人伤亡。

目前最新版的《危险化学品目录》(2015版)所纳入的危险化学品共有2 828个条目,与旧版《危险化学品名录》(2002版)相比,危险化学品的分类体系已改变,大量原本未列入危险化学品管理范畴的化学品被列入了危险化学品范围,由此导致危险化学品仓储需求大量增加。因此,危险化学品的危险性分类及其对应的储存要求成为很多物流及贸易型企业的关注点之一,也对危险化学品配存禁忌识别提出了新的要求^[15]。由于危险化学品涉及配存禁忌方面的法律、法规、标准众多,法律、法规、标准又存在不协调、不统一的问题,给禁忌识别带来了较大的困难,所以有必要通过建立某种联系,在危险化学品储存场所建立统一且易于识别的危险化学品配存禁忌规则很有必要。

1 现行储存标准禁忌配存问题分析

在现行的国家标准中,有4个标准对危险化学品的配存禁忌作出了规定,包括GB 17914—2013《易燃易爆性商品储存养护技术条件》、GB 17915—2013《腐蚀性商品储存养护技术条件》、GB 17916—2013《毒害性商品储存养护技术条件》、GB 15603—1995《常用化学危险品贮存通则》等。现行储存标准所描述的分类方法是按照GB 6944—2012《危险货物分类和品名编号》进行分类的,与《危险化学品目录》(2015版)按照全球化学品统一分类和标签制度(Globally Harmonized System of classification and labelling of chemicals, GHS)分类方法有较大不同,无法形成对应关系。

涉及危险化学品配存具体规定的主要是两个禁忌配存表格:GB 15603—1995《常用化学危险品贮存通则》附录A“常用危险化学品储存禁忌

物配存表”;GB 17914, GB 17915, GB 17916系列标准的附录A表A.1“危险化学品商品混存性能互抵表”。这是目前现行的法规和标准中对化学品禁忌配存最为具体的指导,在一定程度上解决了各类危险化学品储存过程中的禁忌物配存关系的判定问题,但使用这两个表格作为禁忌判断的依据存在一些障碍,主要如下:

(1) 两个表格的危险性分类相互之间不完全一致;

(2) 两个表格的危险性分类的部分找不到现行标准规范依据,比如自燃物品分为一级和二级,如何区分找不到相应标准规范,在GB 17914, GB 17915, GB 17916储存养护技术条件系列标准的引用文件中也未予以说明;

(3) 两个表格的禁配关系不一致,比如在GB 15603—1995《常用化学危险品贮存通则》附表的禁配关系中,酸性腐蚀品是可以和易燃液体配存的(部分需要隔离2 m),但在GB 17914, GB 17915, GB 17916系列标准附表的禁配关系中,仅有机酸可以配存,无机酸均不能混存;

(4) 两个表格中的分类与国际通用的物质CAS编号、UN编号(联合国危险货物编号)未建立对应关系,与国际现行的GHS分类^[16]未建立对应关系。

2 危险化学品配存禁忌关系分析

不同规则 and 标准对危险化学品存储有不同的要求^[17-21],在确保安全的前提下,互为禁忌的危险化学品不能同库储存。两种或两种以上的危险化学品储存在一起若发生反应,则会导致重大事故的发生。因此,在危险化学品储存过程中,必须掌握它们之间的禁忌关系。

首先,考虑为各种危险化学品建立危险特性数据库,对该化学品的危险特性进行表述,以此作为配存禁忌的识别依据。建立多个危险特性标签,如“易燃液体”“氧化剂”“腐蚀品”等,根据化学品的性质进行标记。根据法律法规和技术标准的要求,结合化学品的理化性质,建立各种危险特性标签的禁忌判断规则,如“易燃液体与氧化剂不允许配存”等。在进行配存前,确定该化学品的危险特性,并与仓库内已存放的危险化学品的标签进行比对,通过禁忌规则判断是否允许入库配存。同时,根据不同危险化学品储存对库房硬件条件的要求,为库房建立安全标签库,如火灾危险性分类、可以存放的危险化学品种类等。

目前《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》正在修订中,并将替代原有《常用化学危险品贮存通则》及《储存养护技术条件》系列标准。可利用《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》附表的禁忌物配存关系,采用 GB 6944《危险货物分类和品名编号》的危险性分类形式,确定统一且易于识别的配存关系。采用 GB 6944《危险货物分类和品名编号》分类的优点在于:各种分类均有明确的定义,可以通过实验方法得到某种物质具体的类别属性;同一种物质可以具有多种危险特性类别;只要确定了一种危险化学品的危险特性分类,就可以通过《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》附表的禁忌物配存关系,与其他化学品之间比对是否存在配存禁忌关系(具有多种危险性类别的可以进行多次比对)。

因此,本文以《危险化学品目录》(2015 版)为范围,以 GHS 分类方法为危险性分类依据,以《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》附表的配存禁忌表为识别依据,制定危险化学品配存禁忌规则。但该标准尚未正式发布,不能排除正式发布版本对该内容进行修改的可能性,因而本研究将根据该标准的修订发布情况,及时作出相应的调整。

3 危险性分类识别规则

考虑到《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》所附的配存禁忌表采用的危险化学品危险性分类与 GB 6944《危险货物分类和品名编号》

危险性分类的不同,不可以直接匹配;而 GB 12268《危险货物品名表》中列出了各化学品按照 GB 6944 进行分类的结果,因此建立《危险化学品目录》(2015 版)与 GB 12268《危险货物品名表》中各物质的对应关系,即可确定各危险化学品与配存表匹配的危险性分类。

(1) 确定各危险化学品的 UN 编号。根据某种危险化学品的品名、别名、英文名和 CAS 编号信息以及“危险化学品分类信息表”中的分类,确定该物质在 GB 12268—2012《危险货物品名表》中的 UN 编号。

(2) 确定危险特性。根据 UN 编号,确定该物质的危险性类别,包括“类别或项别”“次要危险性”。一种物质在《危险货物品名表》最多具有 3 种危险特性,比如“不对称二甲肼”的类别或项别是 6.1,次要危险性是 3 和 8,即该物质同时属于毒性物质、易燃液体和腐蚀性物质。

(3) 按类划分的物质。在确定 UN 编号的过程中,部分物质有自己专属的编号,如甲苯,其 UN 编号为 1294,是唯一的。但有些物质没有专属唯一的编号,如“醋酸三丁基锡”,其 UN 编号为 3146,即“固态有机锡化合物,未另作规定的”,此编号的危险品均属于 6.1 毒害品。因此,此类物质并不能通过识别其 UN 编号确定其具体品种,但可以确定其危险性类别,可以直接用于禁忌物的匹配辨识。

其具体流程如图 1 所示。

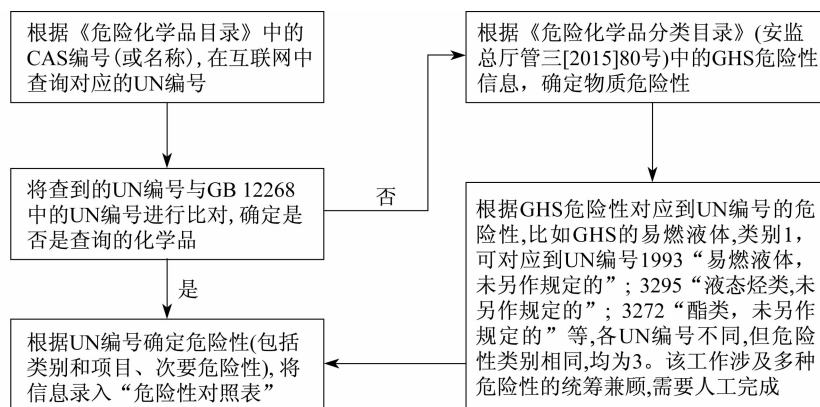


图1 危险性分类识别流程

在危险化学品危险特性分类确定过程中,还有一些关键点和难点需要说明,具体如下。

(1) 个别危险化学品的 UN 编号和危险特性的确定需要一定的经验。比如在《危险化学品目录》中序号 1631 的“铅汞齐”,未列出 CAS 编号,在 GB 12268《危险货物品名表》中直接查询名称也没

有结果,只能依靠“危险化学品分类信息表”中给出的 GHS 分类“急性毒性-经口,类别 2^{*};急性毒性-经皮,类别 1;急性毒性-吸入,类别 2^{*};特异性靶器官毒性-反复接触,类别 2^{*};危害水生环境-急性危害,类别 1;危害水生环境-长期危害,类别 1”。根据物理特性判定其具有毒害性,归类为 UN 编号

3288,即“无机毒性固体,未另作规定的”,确定其危险特性类别是6.1 毒害品。

(2) 不同企业生产的同一种危险化学品的 UN 编号可能不同。比如“丙烯酸丙酯”,其 UN 编号一般企业会选用 1993,即“易燃液体,未另作规定的”;但更确切的应该是 3272,即“酯类,未另作规定的”。但是以上两种 UN 编号所代表的危险特性相同,均为 3 类。

(3) “危险化学品分类信息表”中的是物质 GHS 分类,与 UN 分类并非完美对应。比如当某一物质具有 GHS 分类的“皮肤腐蚀/刺激,类别 1”时,不能完全对应确定其属于《危险货物分类和品名编号》中的第 8 类腐蚀性物质,因为两者的定义不完全相同。

(4) 部分危险化学品仅有慢性健康危害或环境危害的,其危险性可能无法归类分入 GB 6944 的第 1~8 类。这种情况下有两种分类结果:一是分入第 9 类“杂项”;二是不属于危险货物。但不管是哪一种分类结果,配存表都没有给出明确的配存规则,需要进一步讨论研究。

(5) 《危险化学品储存通则(内部征求意见稿)》的附录 A 配存禁忌表中部分内容有注解,但该版本未公布注解具体内容,可能会影响具体的配存规则。

(6) 在危险化学品危险性分类不确定的情况下可以进行专业诊断,尤其是针对无明确对应 UN 编号的危险化学品分类情况。

4 危险化学品储存禁忌识别归类

根据上述禁忌识别基本流程,本文建立了《危险化学品目录》(2015 版)与 GB 12268《危险货物品名表》的对应关系,编制了《危险化学品危险性识别对照表》。该表以《危险化学品目录》(2015 版)为基础,为目录中的每一条化学品信息添加 UN 编号、类别和项别、次要危险性的内容;并对《危险化学品目录》(2015 版)中所有危险化学品进行了对照归类,汇总成为《危险化学品危险性识别对照表》。考虑到篇幅问题,在此仅列举了《危险化学品危险性识别对照表》部分信息,具体如表 1 所示。

表 1 危险化学品危险性识别对照表(局部)

品名	别名	英文名	CAS 编号	危险性类别	UN 编号	危险货物类别和项别	危险货物次要危险性	包装类别	火灾危险性
阿片	鸦片	opium	8008-60-4	特异性靶器官毒性-反复接触,类别 2	2811	6.1	/	I/II/III	丙 ₂
氨	液氨;氨气	ammonia; liquid ammonia	7664-41-7	易燃气体,类别 2;加压气体;急性毒性-吸入,类别 3*;皮肤腐蚀/刺激,类别 1B;严重眼损伤/眼刺激,类别 1;危害水生环境-急性危害,类别 1;严重眼损伤/眼刺激,类别 1;皮肤致敏物,类别 1;危害水生环境-长期危害,类别 3;急性毒性-经皮,类别 1;急性毒性-吸入,类别 3*	1005	2.3	2.1	/	乙 ₂
2-氨基苯酚	邻氨基苯酚	2-aminophenol; o-aminophenol	95-55-6	生殖细胞致突变性,类别 2	2512	6.1	/	III	丙 ₂
3-氨基苯酚	间氨基苯酚	3-aminophenol; m-aminophenol	591-27-5	危害水生环境-急性危害,类别 2;危害水生环境-长期危害,类别 2	2512	6.1	/	III	丙 ₂
4-氨基苯酚	对氨基苯酚	4-aminophenol; p-aminophenol	123-30-8	生殖细胞致突变性,类别 2;危害水生环境-急性危害,类别 1;危害水生环境-长期危害,类别 1	2512	6.1	/	III	丙 ₂
1-氨基丙烷	正丙胺	1-aminopropane; n-propylamine	107-10-8	易燃液体,类别 2	1277	3	8	II	甲 ₁

根据上述分析,可以总结出图 2 所示的禁忌关系。

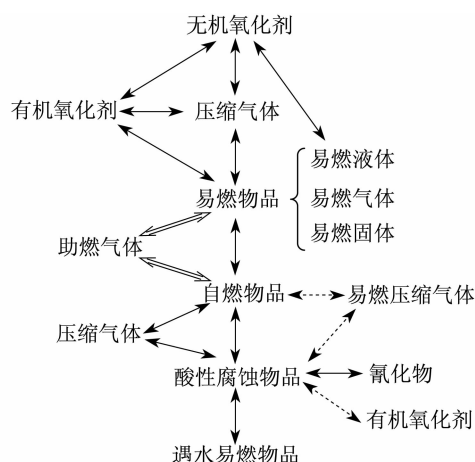


图 2 危险化学品禁忌关系图(双箭头表示互为禁忌关系)

对于未列入《危险化学品目录》(2015 版)且物理危险性尚未确定的化学品,含有一种及以上列入《危险化学品目录》(2015 版)的组分但整体物理危险性尚未确定的化学品应进行物理危险性鉴定与分类,这类化学品的配存禁忌关系经鉴定危险性类别属于图 2 其中一类的,按照图 2 的禁忌关系配存。

有些化学品对储存场所有特殊的要求,如高毒物品存放场所要求设置相应的有毒气体检测报警装置(针对该化学品专用),某些对温度敏感的化学品(如某些有机过氧化物)要求有温度控制措施等。由于这些要求较为独特且难以归类,对这些化学品应考虑设置“特殊储存要求”危险性标签。允许存放危险化学品类别的安全条件标签在设置时也必须考虑该类别化学品对库房的要求,至少应包括库房火灾危险分类、耐火等级、库房面积、防爆电气设备、防止液体流散措施、泄漏物检测报警装置、耐腐蚀措施、剧毒品技防措施、冲淋洗眼设备等。

5 结 论

(1) 本文解决了各类危险化学品储存过程中的禁忌物配存关系的判定问题及已有标准禁配关系不一致问题。

(2) 通过建立配存禁忌规则,使国际通用的物质 CAS 编号、UN 编号及国际现行的全球化学品统一分类和标签制度分类建立对应关系,从而

确定与配存禁忌表匹配的危险化学品危险性分类。

(3) 对《危险化学品目录》(2015 版)中所有危险化学品与 GB 12268《危险货物名称表》进行了对照归类。每一条化学品信息添加 UN 编号、类别和项别、次要危险性的内容,汇总成为《危险化学品危险性识别对照表》,并总结出危险化学品之间的禁忌关系。

(4) 建立不同特性危险化学品对储存配存条件要求的规则,如易燃液体必须存放至与其危险性相适应的储存场所,在进行配存前应将危险化学品的危险性标签与储存场所的安全标签进行比对,在满足安全条件和配存禁忌的前提下,可以提升危险化学品仓储物流的有序周转及精准管理水平。

参考文献:

- [1] 吕卓. 危险化学品仓储经营企业的安全现状及对策研究[J]. 当代化工研究, 2018(8): 112-113.
- [2] 史先召, 马臣信, 周宁, 等. 危险化学品仓储安全管理现状及对策[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(7): 55-57.
- [3] 王超凡. 危险化学品仓储设施的安全防火技术[J]. 当代化工研究, 2019(3): 94-95.
- [4] 刘平平. 化工企业危险化学品的仓储管理分析[J]. 化工管理, 2019(3): 5-6.
- [5] 王怡雅. 危险化学品仓储管理研究[J]. 经贸实践, 2018(13): 241-242.
- [6] 蔡依平, 陈梦婷. 进口跨境电子商务物流模式选择研究[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(增刊 1): 21-24.
- [7] 黄冰冰. 危险化学品仓储的消防安全管理研究[J]. 佳木斯职业学院学报, 2019(4): 250-251.
- [8] 黄中立. 危险化学品仓储存在的问题和安全对策[J]. 化工管理, 2017(33): 133.
- [9] 范祥, 叶春明, 全伟亮. 新形势下我国危化品仓储安全问题研究[J]. 物流科技, 2016(10): 148-151.
- [10] 张莲芳. 国外危险化学品储存事故案例分析及危害防治[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 152-154.
- [11] 张鹤达, 刘伟. 危险化学品事故成因研究[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(11): 10-12.
- [12] 王久平. 港口爆炸、祸起硝酸铵、监管失责——从贝鲁特爆炸看危化行业治理[J]. 中国应急管理, 2020(9): 6-9.
- [13] 李健, 白晓昀. 2011—2013 年我国危险化学品事故统计分析及其对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 142-147.
- [14] 朱志萍, 丁欣荣. 当前危化品安全事故防控困境及对策研究——基于 2013—2018 年部分危化品安全事故的统计分析[J]. 上海城市管理, 2020(1): 53-61.
- [15] 张正华, 武邦涛. 危险化学品禁忌智能识别和决策支持系统研究[J]. 上海管理科学, 2009, 31(1): 82-86.

- [16] 蔡妙玲,张志斌.论 GHS 化学品分类标准及对我国化工行业的启示[J].广州化工,2016,44(15):256-259.
- [17] 当小红.新形势下危化品物流该何去何从[J].物流技术,2015(12):31-36.
- [18] 周枫钧,周枫力.天津滨海新区爆炸事故对危化品安全管理的启示[J].山东工业技术,2016(9):67-69.
- [19] 王昭宏,李博.化工园区危险废物回转窑焚烧系统概述

[J].上海电力学院学报,2018,34(3):283-286.

- [20] 彭清松,赵乐顺,方琴,等.国外危险品物流的转型分析与借鉴[J].物流工程与管理,2020(3):20-21.
- [21] 张蕊,李荷花.我国化工物流研究综述与展望[J].物流技术,2019(7):14-19.

(责任编辑 胡小萍)

(上接第 317 页)

少传感器对流场的干扰,能更细致地观察场内情况。但该方法布置复杂,且粒子直径会影响流场测量的精度并扰乱原有的流场。

本文通过自主研发的全截面动态风量自动标定装置精确测量某点风速,通过 orange 绘制三维立体图清楚观察风洞内的流场分布。相比传统测速方式,PIV 能实现瞬时速度场的测量,分析粒子的流动及成像,从微观上解决了实际问题并使其可视化,但安装较为繁琐。

参考文献:

- [1] 战培国,曾慧,钟萍,等.2017 年国外风洞试验发展动态综述[J].飞航导弹,2018(8):16-20.
- [2] 恽起麟.风洞实验[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [3] 陆科,王振,李涛.低速回流式风洞性能提升方法研究[J].工业计量,2015,25(4):26-28.
- [4] 战培国.国外新概念风洞与某些试验技术发展概述[C]//中国空气动力学学会低跨超声速专业委员会.全国低跨超声速空气动力学文集(第二卷).北京:中国空气动力学学会低跨超声速专业委员会,2003:273-282.
- [5] 遥路,李华,刘沛清.实验用低速直流风洞的设计与研究[J].科教导刊(上旬刊),2015(2):133-136.
- [6] ROBERT P J, HAHNE D E, COCKRELL C E, et al. Low

speed wind tunnel tests of two waverider configuration models[R].AIAA-1995-6093,1995.

- [7] AHMED H H. Converting a low speed wind tunnel into a flow visualization tunnel using smoke wire technique and laser beam[C]//Science and Engineering Institute (SCIEI). Rome, Italia, 2015:28-32.
- [8] BUROV V V, VOLOBUEV V S, GLAZKOV S A, et al. Measuring and computational system of TsAGI T-128 transonic wind tunnel[J]. Automation and Remote Control, 2011,72(3):634-635.
- [9] 郝忠祥,解亚君,郭琦等.NF-3 风洞设计特点[J].气动实验与测量控制,1996(4):40-49.
- [10] 胡丹梅,孙凯,张志超.回流式低速风洞流场品质的测试及分析[J].上海电力学院学报,2016,32(3):211-215.
- [11] 国防科学技术工业委员会.高速风洞和低速风洞流场品质规范:GJB 1179—1991[S].北京:国防工业出版社,1991.
- [12] 恽起麟.风洞实验数据的误差与修正[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [13] ADRIAN R J. Twenty years of particle image velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2005,39(2):159-169.
- [14] 田海栋,刘方,刘江,等.基于 Micro-PIV 的毛细管内流场的可视化研究[J].上海电力学院学报,2019,35(1):31-35.
- [15] 胡丹梅,渠敬群.水平轴风力机塔筒近尾迹流场 PIV 实验研究[J].可再生能源,2018,36(7):1074-1079.

(责任编辑 谢 冉)