航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Sep. 15 2018 Vol. 29 No.09 58-63

飞机氧气系统着火案例分析及安全性设计要求

封文春 *

航空工业第一飞机设计研究院，陕西 西安 710089

摘　要：飞机氧气系统曾多次出现着火事故。根据公开的文献资料和网络信息，统计分析了 50 例飞机氧气系统着火事故。分析结果表明，充氧、打开或关闭阀门等动态过程是最易着火阶段，氧气瓶及阀体组件、调节器、关断阀等是最易着火部位。开展系统动态过程和关键部件氧气危险及着火风险分析是减小或避免系统着火的重要措施。对氧气系统着火因素进行了简要分析，列举了一些常见的因素。材料选择及氧气兼容性分析是氧气系统安全性设计的关键，介绍了氧气系统材料尤其是非金属材料选择一般准则和氧气兼容性分析方法，为氧气系统安全性设计提供参考。

关键词：飞机氧气系统；着火事故；着火因素；氧气兼容性；氧气危险及着火风险分析

中图分类号：V245.3+1　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.09.058

虽然氧气自身并不燃烧，但却是强烈的氧化剂。许多物质，包括金属和非金属，尤其是碳氢化合物，在高压纯氧条件下只需较低的能量和温度就能燃烧。仅 1998—2004 年间我国就发生了 17 起氧气燃烧爆炸事故。1993—1999 年间，美国食品与药物管理局（FDA）收到的 16 起着火事故报告，每起事故都牵涉到便携式氧气瓶以及压力流量组合调节器，共造成 11 名人员严重烧伤[1]。2003—2006 年来自美国消费者产品安全委员会的国家电伤监控系统的数据表明，平均 1190 例烧伤牵涉到家庭医疗用氧。来自美国火灾管理局的国家火灾事故报告系统的数据表明，2002—2005 年间，每年估计平均有 206 例家庭火灾牵涉到氧气设备着火[2]。美国空军 1978—1993 年的飞机氧气系统统计数据表明，氧气系统着火事故率为 0.77 次 / 百万飞行小时[3]。2008 年我国西北航空公司的 A319 飞机、美国 ABX 航空公司波音 767-200 货机和澳大利亚快达航空公司波音 747-400 飞机分别发生了氧气系统着火事故[4]。美国 P-3 飞机分别在 1984 年、1998 年和 2003 年发生氧气系统着火事故[5]。在 20 世纪 60 年代中期，波音公司曾因氧气管路的设计缺陷在连续两年内共发生 18 次氧气系统着火事故[6]。根据美国空军 Norton 安全办公室的报告，1978—1990 年共发生 7 例涉及飞机充氧车的着火事故[7]。我国在近几年也出现了数起飞机氧气系统着火事故。

针对飞机氧气系统来说，系统内为高压纯氧，所采用的材料都可成为燃烧物质，流动状态的突变、高速气流冲击、粒子碰撞、共振、摩擦、静电等都可成为激发着火的能量，因此，着火三因素是必然存在的。一般通过系统安全性设计来减少或避免系统着火。了解着火因素或机理，可以为系统安全性设计提供基础。本文统计分析了近几十年部分飞机氧气系统的着火案例，对导致着火的因素进行了分析，为飞机氧气系统安全性设计提供参考。

1 飞机氧气系统

对于民用航空飞机来说，氧气系统一般由三个分系统组成，即机组氧气系统、旅客氧气系统和便携式氧气。机组氧气系统一般采用存储在高压气瓶内的高压气氧作为氧源；旅客氧气系统则根据需要，既有采用高压气氧，也有采用化学氧作为氧源；便携式氧气一般包括防护性呼吸设备（PBE）和便携式氧气设备。PBE 一般采用化学氧，便携式氧气设备一般采用高压气氧为氧源。目前便携式氧气浓缩器也作为个人便携式氧气允许在飞机上使用。

对于军用飞机，氧源主要有气氧、液氧和机载分子筛制氧。机载分子筛制氧是目前军用作战飞机广泛采用的氧源，

收稿日期：2018-05-16；　退修日期：2018-07-19；　录用日期：2018-08-05

* 通信作者 . Tel.：029-86832621　E-mail：chunfeng@buaa.edu.cn

引用格式：Feng Wenchun. Analysis of aircraft oxygen system fire accident and safety requirement[J].Aeronautical Technology and Science，2018，29（09）：58-63. 封文春．飞机氧气系统着火案例分析及安全性设计要求［J］. 航空科学技术，2018，29（09）：58-63.

部分运输类飞机也采用机载分子筛作为氧源之一。由于分子筛氧气浓缩器自身特性限制，其产氧浓度最高只有95%，而且为了保证供氧安全性，采用机载分子筛制氧作为氧源的，仍然需要备用氧。备用氧一般为存储在气瓶内的高压气氧。

相对于液氧、化学氧和机载制氧，高压气氧的着火风险最高，大多数飞机氧气系统的着火事故均是氧气系统。

2 着火案例统计分析

根据公开的文献资料和网上信息，1960年至今共收集统计了军用、民用飞机氧气系统50例着火事故，见表1[7~11]。

表1 着火案例统计

Table 1 Statics of oxygen system fire accidents

序号	日期	机型	着火部位	着火时机	着火原因
1	1960.04.18	Boing 707	氧气面罩	正常飞行	点烟
2	1962.08.14	Boing 707-436	便携式氧气瓶	地面充氧	泄漏的阀
3	1962.12.01	Boing 707	未明确	飞行前检查	未知
4	1963.11.16	Boing 720	机组供氧阀	维修检查	绝热压缩
5	1967.06.13	Boing 707-351C	未明确	登机	未知
6	1968.08.07	Boing 720-047B	面罩供氧处	飞行中	泄漏
7	1968.09.08	Boing 707-300C	未明确	充氧	未知
8	1969.01.25	Boing 737-222	未明确	充氧完成关闭时	未知
9	1969.04.15	Boing 720	充氧阀	充氧完成关闭时	使用了人造橡胶座
10	1970.12.31	Boing 737-200	关断阀	充氧	污染物
11	1972.03.15	Boing 727-100C	便携式氧气瓶阀	维修检查流量	未知
12	1972.06.10	Boing 727-100	便携式氧气瓶	使用中调节氧气流量	阀门和密封圈使用了硅润滑剂
13	1973.05.01	Boing 707	便携式氧气罐	使用时打开阀门检查流量	未知
14	1973.05.01	Boing 707	便携式氧气瓶	飞行中使用时	未知
15	1973.07.08	DC-10	氧气罐	使用中	发生器发热
16	1975.12.28	Trident	氧气管路	地面停机	电器短路起火，烧透氧气管路
17	1976.05.06	Boing 747-100	便携式氧气瓶调节器	充氧完成关闭时	未知
18	1977.11.09	DC-8-51	调节器	飞行前检查，打开关断阀时	怀疑有污染物
19	1987.01.15	DC-8-61	未知	维修	未知
20	1984.01	P-3B	止回阀	维修	绝热压缩
21	1984.05.25	Boing 727-51C	未知	充氧	氧气接头被LPS-3污染
22	1985.09.15	Boing 727	氧气罐	使用时	底部泄漏
23	1985.10.21	Boing 747	便携式氧气瓶	使用时	吸烟
24	1986.08.10	DC-10	氧气罐	飞行中	氧气加剧了火势
25	1987.01.30	Boing 737-200	调节器	飞行中	电器短路
26	1987.10.07	Boing 747-SR	关断阀	飞行前检查	未知
27	1988.02.19	Boing 757-200	便携式氧气罐	使用时	未知
28	1988.10.20	Boing 727	氧气管路	维修	电器短路起火，烧透氧气管路
29	1989.04.10	DC-10	氧气发生器	地面停机	电器过热，引燃附近的氧气发生器
30	1989.10.14	Boing 727-200	减压器和流量控制阀	维修更换氧气瓶	未知
31	1991.10.29	Boing 737-2A8	调节器和流量控制	维修检查流量	未知
32	1991.11.10	Boing 727-25	氧气瓶	充氧	未知
33	1993.06.08	Cosmopolitan	充氧阀和充氧软管	充氧	未知
34	1996.05.11	DC-9	运输的化学氧气发生器	飞行中	没有按要求包装固定
35	1997.05.02	Bell 206-L3	高压软管	地面	绝热压缩或粒子冲击
36	1998.04.25	EP-3J	止回阀	充氧结束关闭时	绝热压缩或粒子冲击
37	2003.07.10	P-3C	止回阀	充氧结束关闭时	绝热压缩或粒子冲击
38	2008.06.19	A319	减压阀	飞行中	减压阀失效
39	2008.06.28	Boing 767-200	未知	准备飞行前	氧气管路设计缺陷[8]
40	2008.07.25	Boing 747-400	氧气瓶	飞行中	氧气瓶失效破裂
41	2009.05.18	某型	氧气瓶高压释放阀	充氧过程中	使用了不合格零件
42	2009.07.16	CRJ-200	JB1连接箱组件	地面停机	氧气泄漏
43	2010.02.08	某型	氧气瓶阀	地面充氧	阀体表面有油
44	2010.07.01	CRJ-700	减压器	着陆滑行	未知
45	2011.07.29	Boing 777-200	未知	飞行前检查	未知
46	2013.08.23	某型	氧气瓶阀	地面充氧	绝热压缩
47	2014.01.18	A319	调节器	充氧	内部组件失效[10]
48	2015.04.30	RC-135V	氧气管路	起飞时	使用了不合格零件，氧气泄漏
49	2015.06.12	Boing 737-300	氧气瓶	飞行前检查	未知
50	2016.12.23	某型	氧气瓶阀	地面充氧	绝热压缩或静电

根据统计的 50 例着火事故，按年代事故次数分布如图 1 所示。虽然图 1 不能完全代表飞机氧气系统着火事故分布概率，但大致能够表明飞机氧气系统着火事故呈逐渐减少的趋势。说明随着对氧气系统着火机理认识的加深，系统的安全性设计水平也越来越高。

在统计的 50 例飞机氧气系统事故中，有 7 例着火是由其他原因导致氧气系统着火，泄漏的氧气加剧了火势，其中有两例是由吸烟引起的，有 4 例与电器短路或过热相关。在 50 例氧气系统事故中，仅有 1 例为物理事故，为 2008 年波音 747-438 飞机的氧气瓶破裂导致飞机座舱失压。在本次事故中，虽然氧气瓶发生破裂，但并没有导致着火。事故调查中没有发现任何过火或烧蚀痕迹。

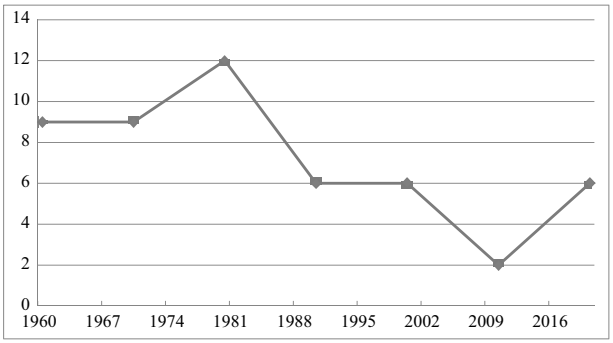

图 1 着火案例按年代分布
Fig.1 Oxygen sysem fire accident distribution by years

按照充氧（包括原位充氧和离位充氧）、使用操作、检查（包括飞行前检查、日常检查和维修检查）、维修保养及其他（包括未进行任何操作以及其他情况）等着火时机的分类统计分析结果如图 2 所示。

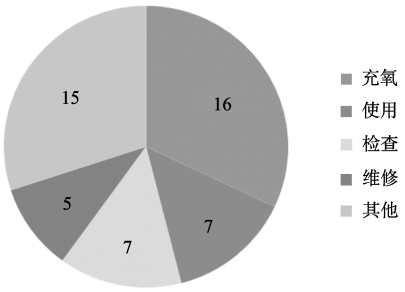

图 2 按着火时机统计分析结果
Fig.2 Statics analysis result by fire occasion

从图中可以看出，在充氧操作中着火事故 16 例，占样本数的 32%，其中充氧完成关闭阀门时发生着火 5 例，充氧期间着火 11 例，说明动态过程是导致氧气系统着火的主要因素之一。使用时出现的 7 例着火都是利用便携式氧气瓶为乘客提供氧气在调节流量时出现的。其他事件中，有 7 例是在飞行中出现的，有 6 例是在地面停机期间，1 例是着陆滑行，1 例是在起飞阶段。

关于着火部位的统计结果如图 3 所示。由图可以看出，在氧气瓶或瓶阀出现着火的次数占总样本数的 38%，调节器、减压器或其他阀类出现着火的次数占 26%，二者合计占 64%，说明了氧气瓶及阀是系统设计的关键，是进行氧气危险及着火风险分析和材料选择、结构设计重点考虑的对象。

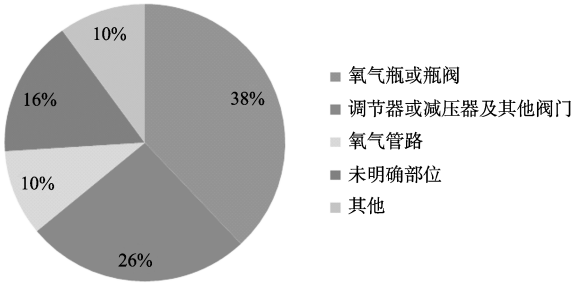

图 3 着火部位统计
Fig.3 Statics analysis by fire position

关于起火原因的统计结果如图 4 所示。其中外部原因导致着火的占 15%，主要包括吸烟、电器短路等；部件失效（包括使用不合格零件）的占 14%，其中 1 例是因为使用了不合格零件，氧气泄漏导致着火；因污染导致着火的占 12%，包括被油脂、润滑剂等污染；未知原因或不能确认的占 35%，给出最大可能着火因素，如绝热压缩、静电或粒子碰撞等的占 14%。实际上，最大可能因素等同于未确认，二者合计占 49%，说明了氧气系统的着火原因除了一些明显的如有污染物、外部因素等导致着火，其他的基本上都很难准确确定，开展氧气系统着火机理理论基础研究将有助于着火原因的分析。

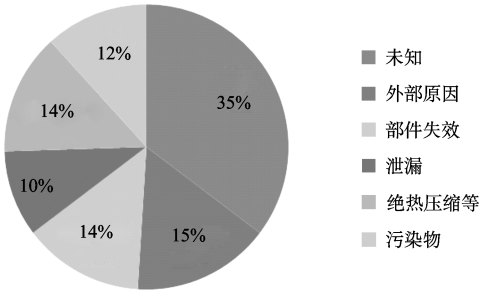

图 4 着火原因统计
Fig.4 Fire causation statics

3 着火因素分析

导致氧气系统着火的因素很多，目前已经认识到的引

起着火的因素有[12]：温度、自燃、压力、浓度、污染物、粒子碰撞、压缩热、摩擦及卡滞、共振、静电放电、电弧、流动摩擦、机械碰撞、着火链等。温度和压力是导致系统着火的主要因素。温度是材料着火的必要条件，当温度升高到一定程度时，材料就会着火，即自燃。材料的着火温度与系统构型、压力、材料的性质、形状、使用环境以及系统的动态流动情况有关。随着系统压力的增加，大多数材料的着火温度降低，火焰的扩展速率增加。

参考文献 [13] 列出了下列氧气系统着火源：(1) 单次或重复剧烈压力冲击（来自绝热压缩的热）；(2) 管路或部件内过高的气流速度；(3) 粒子碰撞；(4) 运动件或静止件之间的摩擦；(5) 共振，对金属和非金属均有效；(6) 电火花（包括静电或闪电）；(7) 污染物。已经证明，在氧气系统中，绝热压缩、摩擦、机械冲击和含有粒子的高速气流曾引起系统着火。

实际上，对于氧气系统来说，所谓的着火因素或着火源可统一归结为能量，也即氧气系统内能够产生能量的各种机理都可作为系统着火因素。因为，在氧气系统中，着火三要素中氧气、可燃物是必然存在的，着火的发生主要取决于能量。不同机理产生的能量不同，不同材料的最低着火能量不同，而且与材料的结构形状、质量大小等也有一定的关系。如碳氢化合物仅需很少的能量就可燃烧，而金属则需较多的能量才能燃烧。促进燃烧、摩擦热和粒子碰撞是导致金属材料着火的三个主要着火因素，高速氧气流冲击是非金属材料着火的主要因素。

由于着火事故的特殊性，往往很难取得直接证据，在进行氧气系统着火因素分析时一般通过残骸失效分析、故障复现试验等手段，给出最大可能着火因素。但大多数事故并不能给出准确的起火原因，这从统计的事故案例中也说明了这点。

4 系统安全性设计要求

由于氧气特殊属性以及着火后的危害性，减少或避免系统着火和降低着火后的危害是氧气系统安全性设计的目的。材料选择和氧气危险及着火风险分析（OHFRA）是氧气系统安全性设计的基本要求。

4.1 材料选择

选择合适的材料是减小或避免氧气系统着火风险的重要措施，氧气系统中使用的材料必须是与氧气兼容的。应针对耐久性进行加速（时间—温度—浓度）氧退化和氧降解试验，还应进行环境或构型可燃性评估[14]。材料选择的基本原则是：(1) 必须避免选择在氧气中易引起剧烈化学反应的材料；(2) 虽然在氧气中不易反应，但仍可燃的材料可以应用，但应进行可燃性和火焰扩展率评估。美国国家航空航天局（NASA）给出的评估用于航天飞机的材料的程序为：

(1) 材料的燃烧；

(2) 热释放率；

(3) 非金属材料的气味和废气成分；

(4) 电绝缘可燃性试验；

(5) 材料在气氧和液氧中的机械和气动冲击试验；

(6) 在高压氧气中材料的燃烧；

(7) 电线绝缘电弧跟踪。

非金属材料由于其自燃点较低，在氧气系统中使用非金属材料应受到限制，使用量和暴露于氧气的量应最小。非金属材料的选用原则为[15]：

(1) 当进行机械冲击时应不反应；

(2) 具有较高的自燃温度（AIT），通常要求与工作温度至少有 100℃的差值；

(3) 具有较低的燃烧热值，建议小于 2500cal/g（1cal=4.187J）；

(4) 根据应用，应选择具有较高的氧指数（OI），建议选择 OI 超过 55 的材料，OI 低于 20 的材料不适用于所有条件；

(5) 具有较低火焰温度；

(6) 具有较高的安全阈值压力；

(7) 具有较低的火焰扩展率。

4.2 氧气危险及着火风险分析

氧气危险及着火风险可用氧气兼容性来描述。一般来说，如果一个系统不能燃烧或不可能燃烧，或者着火的概率很低，或者甚至潜在的着火能够隔离并且产生的危害能够接受，那么这个系统就是氧气兼容的。当气氧设备的应用压力为 0.345MPa 或更高，就应进行氧气兼容性评估。对于液氧，其氧气兼容性分析与应用压力为 3.45MPa 的气氧设备类似。氧气兼容性的一般评估过程为[16]：

(1) 确定最严酷的工作条件；

(2) 评估系统所用材料的可燃性；

(3) 评估存在的着火机理及概率；

(4) 确定着火链；

(5) 分析反应效果；

(6) 鉴别应用历史；

(7) 输出分析结果报告。

在进行氧气危险及着火风险分析过程中，一般将着火机理出现的概率分为5类，用0~4数字表示，0代表几乎不可能（Almost Impossible），即不可能事件；1代表极小的（Remote），即发生的概率及其微小；2代表不太可能（Unlikely），即发生的概率较小；3代表很可能（Probable）；4代表极大可能（Highly Probable）。系统着火后的反应程度分为4级，用字母A~D表示，A表示无关紧要的（negligible）：个人没有受伤，产品、存储、分配或其他应用无不可接受的影响，系统功能性能没有不可接受的损坏；B表示次要的（Marginal）：个人受伤害可控，产品、存储、分配或其他应用是可能的，不超过一个部件或子系统损坏，在事发点可接受的时间内可更换；C表示严重的（Critical）：人员受伤，产品、存储、分配或其他应用严重被损坏，两个或多个部件、子系统被损坏，需要较大的维修；D表示灾难的（Catastrophic）：有人死亡或多人受伤，产品、存储、分配或其他应用的修复是不可能的，主要元件丢失，系统任何部分都不能补救，完全损失。一个典型的氧气兼容性或氧气危险及着火风险（OHFRA）分析见表2。

表2 氧气危险及着火风险分析表
Table 2 Analysis table of OHFRA

应用项	工作条件		潜在的着火机理			着火影响	应用历史	接受标准			评估结果
	P	T	A1	A2	A3			S1	S2	S3	

表中第1列为应用项，可以是选用的材料，也可以是系统部件或子系统。工作条件主要是温度和压力，如果有特殊的工况也进行评估。潜在的着火机理主要是根据系统构型、使用环境，从已知的着火机理如高速气流冲击、粒子碰撞、绝热压缩、摩擦、共振等，分析其发生的可能性，填写数字0~4。着火影响则是根据使用环境和潜在的着火链，分析出现着火后可能产生的影响，填写字母A~D。应用历史主要是填写所选材料或部件在应用历史上是否出现过着火现象。接受的标准一栏则根据具体的应用项进行填写，如果是材料，可根据相关标准填写自燃温度、氧指数、安全阈值压力、坠撞冲击着火能量等；如果是部件或子系统，则应填写使用温度、压力、气流速度等，应根据实际应用情况填写。评估结果则是根据前述各项进行综合评估，填写着火风险可能性大小，用数字0~4表示。一般来说，评估结果为0、1、2的可以接受，即与氧气是兼容的，3和4则是不可接受，表示与氧气不兼容。

5 结论

本文通过公开的文献资料和网络信息，对飞机氧气系统着火案例进行了统计分析。虽然统计的样本数量有限，但分析结果基本上能够反映氧气系统着火特性。地面充氧、打开和关闭阀门的瞬间最易引起着火，说明动态过程分析是系统安全性设计的关键。氧气瓶及其阀体、调节器、关断阀、止回阀等部件是氧气系统最易着火的部位，对这些部件的氧气危险及着火风险分析是系统安全性设计的关键。

此外，本文对氧气系统的着火因素、材料选择一般原则、氧气危险及风险分析方法进行了简要描述，可供氧气系统安全性设计参考。

参考文献

[1] Thomas H M. Fires involving medical oxygen equipment[R]. United States Fire Administration, Technical Report Series, 1999.

[2] Marty A. Fires and burns involving home medical oxygen[Z]. National Fire Protection Association, 2008.

[3] JSSG-2010-10 Crew systems: oxygen systems handbook[Z]. United Stafes Department of Defence, 1998.

[4] 李勇，谢孜楠. 飞机氧气系统引发着火案例的调查研究 [J]. 航空安全，2010，112（4）：68-70.
Li Yong, Xie Zinan. Investigation of aircraft oxygen system fire case[J]. Aviation Safety, 2010, 112 (4): 68-70. (in Chinese)

[5] Joel S. Fires in P-3 aircraft oxygen systems[J]. Journal ASTM International, 2006, 3 (6): 13.

[6] Halstead H. More Boeing adventures: Another quiet American[Z]. 2003.

[7] Department of the Air Force . Description of seven aircraft servicing fires prior to 1991[Z]. Department of the Air Force, 1991.

[8] Ground fire aboard cargo airplane, ABX air flight 1611, Boeing 767-200, N799AX[R]. Aircraft Accident Summary Report, 2008.

[9] Final report concerning Egypt Air Boeing 777-200 aircraft cockpit fire at Cairo Airport on 29th July 2011[Z]. Aircraft Accident Irestigottion Central Directon Ggyptian Ministry of civil Aircotion, 2012.

[10] Oxygen system fire. Air Accident Investigation Sector

(AAIS) [R]. Incident Summary Report, AIFN/0001/2014, 2017.

[11] USAF RC-135V Rivet Joint oxygen fire[Z]. Aero Assurance, 2015.

[12] ASTM. ASTM G88-13 Standard guide for designing systems for oxygen service[S]. ASTM, 2000.

[13] EIGA. Safety principles of high pressure oxygen systems[Z]. EIGA Safety Information, 2008.

[14] Barthélémy H, Ruhland F, Simondet F. Design consideration to mitigate the potential risks of toxicity when using non-metallic materials in high pressure oxygen breathing gas systems[R]. AIGA 059/17, 2017.

[15] ASTM. ASTM G63-99 Standard guide for evaluating nonmetallic materials for oxygen service[S]. ASTM , 2007.

[16] Keisa R R, Shoffstall M S, Stoltzfus J M. Guide for oxygen compatibility assessments on oxygen components and systems[R]. NASA/TM-2007-213740, 2007.

作者简介

封文春（1972- ）男，博士，研究员。主要研究方向：飞机环控、救生、氧气系统设计，智能弹射救生、氧气系统着火机理及风险评估。

Tel：029-86832621

E-mail：chunfeng@buaa.edu.cn

Analysis of Aircraft Oxygen System Fire Accident and Safety Requirement

Feng Wenchun*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Fire accident have occurred many times on the aircraft oxygen system. According to the document and internet information, the total 50 fire accidents of aircraft oxygen system was counted and analyzed. The result show that the dynamic condition of filling oxygen, open or close valve is the phase which fires is easy occurred. Oxygen cylinder assembly, regulator, shut off valve is the part which fires is easy occurred. Dynamic process analysis and oxygen hazard and fire risk analysis of critical part is an important method to reduce or avoid fire occurred at the oxygen system. Ignition mechanisms of oxygen system was analyzed and some general ignition mechanisms was listed. Material selection and oxygen compatibility was an critical method for system safety. An selection general rules of material used in oxygen was described. The method of oxygen compatibility was also present which can be as a reference for oxygen system safety design.

Key Words: aircraft oxygen system; fire accident; ignition mechanisms; oxygen compatibility; oxygen hazard and fire risk analysis

Received: 2018-05-16; **Revised:** 2018-07-19; **Accepted:** 2018-08-05

***Corresponding author.Tel.:** 029-86832621 **E-mail:** chunfeng@buaa.edu.cn