

航空个体防护 技术与装备

■ 刘 峰 编著



科学出版社

www.sciencep.com

航空个体防护技术与装备

刘峰 编著

国防工业出版社

ISBN 7-03-021181-1
2008年1月第1版
2008年1月第1次印刷

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第028130号
I. 航... II. 刘... III. 航空安全-技术-用品 IV. V244

责任编辑：王...
封面设计：王...
出版：国防工业出版社

国防工业出版社

地址：北京市海淀区中关村大街226号

邮编：100048

电话：(010) 61512000

网址：http://www.defence.com.cn

电子邮箱：defence@163.com

发行：新华书店

印刷：北京印刷厂

开本：787mm×1092mm

印张：10.5

字数：200千字

定价：38.00元

科学出版社

北京

举报电话：010-64030303 010-64034313 010-64034315

内 容 简 介

本书简要介绍了个体防护设备的生理学基础知识和实验评价方法,分析了航空环境和防护装备对人体影响的因素,探讨了个体防护设备的生理学原理,重点阐述了部分个体防护设备的结构、工作原理及主要设计参数的计算,以及个体防护设备的研究与发展。本书内容丰富、新颖,理论联系实际,既反映出近年来航空个体防护技术的新成果,又展现出航空个体防护装备的发展前景。

本书既可供从事飞行员防护设备方面工作的工程技术人员参考,又可作为飞机设计专业和人机环境系统工程专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

航空个体防护技术与装备/刘峰编著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021181-1

I. 航… II. 刘… III. 航空安全-个体保护用品 IV. V244

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 025739 号

责任编辑:陈 迅 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 3 月第一次印刷 印张:30 1/4

印数:1—2 000 字数:698 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

航空个体装备的防护作用对飞行安全至关重要,是飞行员飞行活动中“首当其冲,全程使用”、性命攸关的保障系统。航空个体防护装备研究由来已久。自人类早期升空探索以来,创造和发展了高空用氧、增压座舱、加压供氧等技术。这些技术为人类的飞行、飞机性能的提高起到了不可估量的作用。

航空个体装备技术是飞机性能发展的具体体现。20 世纪末随着航空科学技术的发展,第 3 代战斗机的问世,航空供氧与个体防护装备发展了四大高新技术,即:高空低总压供氧、简化防护装备、正压呼吸抗 G 和机载分子筛制氧。这四大新技术成为 20 世纪末和 21 世纪第 3、4 代战斗机先进氧气防护装备的重要标志。

随着机载设备的发展,个体防护装备还有更多样的功能。例如:与瞄准具相结合形成的头盔瞄准具,使飞行员头盔与火控系统有了直接联系;又如为使座舱环境控制系统的功能分配更为合理,发展了多种调温服、液冷头盔等。

本书主要介绍现代航空个体防护装备的技术现状和发展,各种防护装备的原理和结构。对航空医学的生理学基础知识、个体防护设备的生理学原理和主要供氧附件的计算方法有较详尽的论述,并以丰富的科研生产实践数据为基础;同时,还对航天员防护装备做了简介。因此,本书可供有关厂、所、院校、部队从事人机与环境工程专业研究、设计、生产、使用维护等方面的科技人员和航空医学人员参考,亦可用作航空院校专业教学的教材。

本书共分 14 章。第 1 章概要介绍了航空个体防护装备的发展历程和发展趋势;第 2 章介绍了防护救生设备的生理学基础知识;第 3 至第 5 章介绍了供氧系统的结构、工作原理及主要设计参数的计算;第 6 章介绍了供氧系统的设计;第 9 章介绍了供氧系统的主要附件;第 7、8、10、11、12 章介绍了抗荷及其他防护救生设备和生理学要求;第 13 章是航天员防护装备的简介;第 14 章介绍了航空供氧装备与个体防护装备评定方法。

随着 21 世纪空天飞机的出现,超高空飞机和跨大气层飞行器的飞行,军民用运输机的高空防护,还有许多问题有待解决。21 世纪乘空天飞机到太空畅游的个体防护仍然是难度较大的未来技术。因此,高空个体防护是一个经久不衰的研究领域。

本书在撰写过程中,参考并引用了相关文献资料,在此,向这些作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2007 年 6 月,于北京

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 环境对人体的影响	1
1.1.1 弹射救生过程中的过载	2
1.1.2 气流吹袭	3
1.1.3 高空低温低气压环境	4
1.2 航空供氧防护装备的发展趋势	6
1.2.1 高空供氧防护的地位	6
1.2.2 高空防护装备发展趋势	8
1.2.3 供氧与个体防护装备的展望	11
1.3 飞行员个体防护救生装备现状及发展	15
1.3.1 个体防护救生装备发展简史	15
1.3.2 个体防护救生装备发展现状	16
1.3.3 个体防护救生装备发展趋势	17
1.4 我国新型战斗机飞行员个体防护救生装备发展设想	17
1.4.1 新型个体防护救生的需求及国外现状分析	18
1.4.2 我国飞行员个体装备的发展现状及与国外装备的差距	19
1.4.3 我国飞行员新型个体防护救生装备发展设想	20
第2章 航空生理学基础知识	23
2.1 呼吸生理简介	23
2.1.1 呼吸器官的结构特点	23
2.1.2 肺的通气功能	26
2.1.3 肺的气体交换功能	34
2.1.4 血液的氧运输功能	38
2.2 高空生理	41
2.2.1 低气压与气压剧变的物理性影响	41
2.2.2 高空缺氧对人体的影响	46
2.3 持续性正加速度对人体的影响及其防护原理	57
2.3.1 循环生理简介	57
2.3.2 加速度的生理学分类	60
2.3.3 正加速度对人体的影响	61
2.3.4 人对正加速度的耐力	65
2.3.5 提高对正加速度耐力的措施	65

2.4 航空环境温度	67
2.4.1 航空环境温度特点	67
2.4.2 温度对人体的作用	69
2.4.3 人体对不同温度的耐受限度	73
2.4.4 异常环境温度的防护	80
第3章 航空供氧装备防护原理	82
3.1 氧气系统的组成	82
3.1.1 氧源	82
3.1.2 调节装备	82
3.1.3 个体防护装备	82
3.2 高空供氧调节装备	83
3.2.1 航空供氧装备的种类	83
3.2.2 高空供氧装备的防护功能	86
3.2.3 高空供氧参数的调节	87
3.2.4 航空供氧装备的调节原理	99
3.3 弹射跳伞供氧装备	109
3.3.1 跳伞供氧器的防护要求	110
3.3.2 跳伞供氧工作原理	110
3.4 防护装备原理	112
3.4.1 呼吸防护装备分类	112
3.4.2 供氧呼吸原理	115
3.5 高空代偿服防护原理	116
3.5.1 防护原理	117
3.5.2 代偿方式	117
3.6 飞机增压座舱	119
3.6.1 增压座舱组成	119
3.6.2 增压座舱类型	120
3.6.3 增压座舱压力制度	122
第4章 航空供氧装备对人体生理的影响	129
4.1 供氧装备对人体生理的影响	129
4.1.1 供氧装备阻力对生理的影响	129
4.1.2 供氧装备流量对人体的影响	130
4.1.3 气体温度对生理的影响	130
4.2 装备空间、重量、体积的影响	131
4.2.1 装备重量、重心对生理的影响	131
4.2.2 防护装备材料性能对生理的影响	133
4.2.3 装备空间容腔对生理的影响	134
4.2.4 个体装备对视野的影响	135

4.3 高空加压供氧方式对人体的生理影响	137
4.3.1 加压供氧对呼吸系统的影响	137
4.3.2 加压供氧对循环系统的影响	138
4.3.3 加压供氧对头颈部的影响	140
4.3.4 影响加压供氧耐力的因素	141
4.4 高空低总压供氧制度对人体的影响	141
4.4.1 高空加压供氧总压值	141
4.4.2 高空加压供氧持续时间	143
4.4.3 高空应急加压供氧速度	144
4.5 简化代偿装备的防护效果	146
4.5.1 代偿部位与面积	147
4.5.2 体表代偿压力	150
第5章 供氧装备生理防护要求	153
5.1 正常飞行供氧调节参数要求	154
5.1.1 生理阈限高度要求	154
5.1.2 供氧浓度调节要求	157
5.1.3 呼吸流量要求	160
5.1.4 吸气阻力要求	167
5.1.5 小余压接通高度	168
5.1.6 防窒息要求	170
5.2 高空应急加压供氧生理要求	170
5.2.1 高空加压供氧总压制度	170
5.2.2 高空加压供氧断通高度	171
5.2.3 高空加压供氧接通时间	171
5.2.4 高空加压供氧顺序	172
5.2.5 高空加压供氧压力比值	172
5.2.6 高空应急加压供氧参数	172
5.2.7 氧气装备的工效要求	173
5.2.8 跳伞供氧防护要求	174
5.2.9 氧气装备防化要求	174
第6章 飞机氧气系统设计	176
6.1 氧气与基础心理学	176
6.1.1 氧气	176
6.1.2 基础生理学	176
6.2 概述	180
6.2.1 氧气设备的分类	180
6.2.2 功能性分系统	182
6.3 飞机氧气系统	184

6.3.1	飞机氧气系统的组成	184
6.3.2	飞机氧气系统的分类	184
6.3.3	飞机氧气系统的设计要求	185
6.3.4	供氧量	185
6.3.5	飞机储氧量	188
6.3.6	系统布局	189
6.3.7	主要部件及其安装	192
6.4	飞机液氧系统	198
6.4.1	飞机液氧系统的组成	198
6.4.2	飞机液氧系统的设计要求	198
6.4.3	液氧转换器	203
6.5	化学氧系统	205
6.5.1	氯酸盐氧烛	205
6.5.2	碱金属超氧化合物	206
6.6	分子筛制氧系统	207
6.6.1	分子筛制氧系统的原理和组成	207
6.6.2	分子筛制氧系统的系统布局	207
6.6.3	氧浓缩器	210
6.6.4	备用氧源	211
6.7	携带式氧气装置	211
6.7.1	携带式氧气装置的组成	211
6.7.2	机上再充氧的要求	211
6.7.3	装置原理图	212
6.7.4	防烟设备	212
第7章	呼吸代偿装备生理学要求	213
7.1	供氧面罩生理要求	213
7.1.1	供氧面罩气密性要求	213
7.1.2	供氧面罩呼吸性能要求	217
7.1.3	供氧面罩配套设计要求	219
7.1.4	其他要求	222
7.2	高空代偿服生理要求	226
7.2.1	设计尺寸要求	226
7.2.2	代偿部位与面积要求	228
7.2.3	充压速度与建压流量要求	228
7.2.4	代偿压力分布要求	229
7.2.5	服装布面材料要求	230
7.2.6	配套使用要求	232
7.3	通风、降温要求	233

7.3.1 通风服	233
7.3.2 液冷服	237
第8章 飞机增压座舱生理学要求	242
8.1 飞机增压座舱压力调节要求	242
8.1.1 座舱气压高度	242
8.1.2 座舱环境空气的总压	243
8.1.3 飞机座舱压差	245
8.1.4 座舱调压起始高度	247
8.1.5 座舱应急卸压要求	248
8.2 座舱气密性要求	248
8.3 座舱环境控制的生理要求	249
8.3.1 飞行中座舱温度控制要求	249
8.3.2 座舱气流方向	250
8.3.3 座舱内风速	250
8.3.4 座舱内温差	250
8.3.5 座舱湿度要求	251
8.4 座舱环境卫生问题	251
8.4.1 座舱有害气体的来源与影响	251
8.4.2 座舱气体卫生要求	252
8.4.3 控制座舱气体污染措施	253
第9章 供氧系统的主要附件	255
9.1 连续式供氧调节器	255
9.1.1 工作原理	255
9.1.2 主要性能指标	258
9.1.3 性能指标的保证	260
9.2 肺式供氧调节器	269
9.2.1 一般原理及功用	269
9.2.2 典型调节器的工作原理	270
9.2.3 主要性能指标	278
9.3 肺式供氧调节器主要性能指标的保证	288
9.3.1 肺式机构和流量特性	288
9.3.2 安全余压机构及安全余压特性	295
9.3.3 含氧浓度调节机构及其特性	301
9.3.4 加压机构和余压特性	304
9.3.5 压力比机构和压力比特性	310
9.3.6 加压顺序控制	314
9.4 氧气减压器和开关	319
9.4.1 氧气减压器	319

9.4.2	氧气开关	326
第10章	面罩、头盔和加压服	332
10.1	氧气面罩	332
10.1.1	功用和工作原理	332
10.1.2	设计要求	336
10.1.3	氧气面罩的机构设计	337
10.1.4	闭式回路供氧面罩	345
10.2	保护头盔	346
10.2.1	一般构造和功用	347
10.2.2	主要技术要求	349
10.2.3	防护外壳和减震垫的设计	350
10.2.4	面板和滤光镜设计	354
10.2.5	耳罩、受话装置的设计	355
10.2.6	几种保护头盔简介	355
10.2.7	试验及试验设备	358
10.3	加压头盔	362
10.3.1	分类及技术要求	362
10.3.2	典型加压头盔	363
10.3.3	机构设计	366
10.4	加压服	369
10.4.1	概述	369
10.4.2	全压服	370
10.4.3	分压服	372
10.4.4	高空代偿服	373
10.4.5	囊式分压服	381
第11章	抗荷设备	385
11.1	国外抗荷系统概况及发展趋势	385
11.2	飞行中的过载和人体对正过载的耐受限度	387
11.3	抗荷系统	388
11.3.1	几种抗荷措施	389
11.3.2	抗荷服系统	390
11.4	抗荷调压器	394
11.4.1	直接作用式抗荷调压器	395
11.4.2	间接作用式抗荷调压器	396
11.4.3	预充压大流量抗荷调压器	397
11.4.4	抗荷调压器的技术要求和设计计算	398
11.5	抗荷服	401
11.5.1	囊式抗荷服	401

11.5.2 侧管式抗荷服	402
第 12 章 其他防护救生装备	404
12.1 特殊环境对人体的影响	404
12.1.1 海上环境特点及其对人体的影响	404
12.1.2 沙漠环境对人体的影响	404
12.1.3 寒区环境对人体的影响	405
12.2 海上救生物品	405
12.2.1 救生船	405
12.2.2 救生背心	405
12.2.3 腋下救生器	406
12.2.4 救生颈套	407
12.2.5 抗浸防寒服	407
12.2.6 通讯工具	413
12.2.7 联络工具	413
12.2.8 生活用品	414
12.2.9 防护急救用品	415
12.2.10 辨别方向用品	415
12.3 沙漠、寒区的救生物品	416
12.3.1 沙漠救生物品	416
12.3.2 寒区救生物品	416
第 13 章 航天员防护装备	417
13.1 宇宙空间环境因素对人体的危害	417
13.1.1 近似真空环境	417
13.1.2 高温与低温环境	419
13.1.3 辐射与宇宙线	419
13.1.4 流星与微流尘	421
13.1.5 失重	422
13.2 飞船密闭座舱	423
13.2.1 概述	423
13.2.2 生命保障系统	424
13.2.3 供氧回路	427
13.2.4 空气净化回路	430
13.2.5 制冷剂回路	433
13.2.6 供水回路	436
13.2.7 控制和显示仪表	438
13.3 航天服	439
13.3.1 外罩	440
13.3.2 真空隔热屏蔽层	440

13.3.3	气密限制层	441
13.3.4	通风结构与水冷服	447
13.3.5	保暖层与内衣	451
13.3.6	加压手套	451
13.3.7	航天靴	451
13.3.8	背包生命保障系统	452
13.3.9	稳定和移动装置	454
第 14 章 航空供氧装备与个体防护装备评定方法		455
14.1	航空供氧装备生理鉴定要求	455
14.2	航空供氧装备生理鉴定实验方法	455
14.2.1	实验目的	455
14.2.2	实验步骤	456
14.2.3	人体实验的安全措施	458
14.3	机载分子筛制氧氧气系统生理实验评价方法	460
14.3.1	实验目的	460
14.3.2	实验环境模拟与实验要求	460
14.3.3	实验设备、计量与标准	461
14.3.4	实验内容与方法	461
14.3.5	判定依据	463
14.4	航空供氧个体服装热负荷评定方法	464
14.4.1	隔热值的测定方法	464
14.4.2	服装的透湿指数	468
主要参考文献		471

第1章 概述

人类离开世代栖息生存的地面自然环境升入高空时,首先遇到的是大气压力突变的问题,即从人类业已习服的地球进入低气压、气温突变和辐射增强等异常严峻的外界环境,使正常生命活动受到威胁。人在高空中从事飞行活动时,受到飞机座舱外高空低压环境因素的威胁和影响,危及飞行安全,因此,迫切需要利用防护装备创造“人工气压或气体供氧环境”,为飞行员、乘员提供低压与缺氧防护,保证其工作能力和生命安全。

航空个体防护装备,作为航空人员生活保障系统的一个重要组成部分,是保证现代空勤人员正常工作效能以及应急安全救生所必需的装备。

随着航空技术的发展,现代航空个人防护装备的功能已从单纯的缺氧防护扩大到下列各个方面:

- 1) 提高机动飞行时,飞行员对过载的耐力;
- 2) 防护各种高空太阳辐射和宇宙粒子辐射的危害;
- 3) 防护各种噪声的影响;
- 4) 防护大机动飞行或强迫着陆时头颅的碰撞;
- 5) 防护高温和低温环境的影响;
- 6) 防护应急离机时高速气流的侵袭;
- 7) 保证在应急落水时的浮力和体温的保持等。

1.1 环境对人体的影响

高空气压环境因素之所以对人类飞行活动如此重要,是因为它们的改变能引起一系列的生理效应,其中作用时间过长或变化过快,都会使人的生理效应过于剧烈,超出耐受极限,导致飞行失能影响飞行操纵。气压环境的改变致使人体产生病理变化,或招致功能性影响和器质性的伤害。

火箭弹射座椅工作时,首先击发弹射弹,在短时间内使座椅向上加速,脱离飞机座舱。这时乘员在座椅上经受着很大的头-骨盆方向的垂直过载。座椅离开飞机以后,乘员就受到迎面气流的吹袭,特别是在高速弹射救生时,迎面气流速度压很大,乘员受到很大的减速过载。这时火箭启动,继续将座椅向上推,座椅连同乘员是一个自由体,在空中作六自由度运动,所以乘员受到不同方向上的气动载荷、过载、座椅旋转所产生的载荷以及随后的开伞等载荷。如果是在高空离机,则座椅连同乘员要经受高空低气压低温的考验,并在较长时间内迅速下降。待降落到一定高度后,打开救生伞,人椅分离,乘员乘救生伞缓慢降落,最后着陆。

在弹射救生整个过程中,乘员所承受的力与环境的作用必须是在人体能承受的范围之内,否则就达不到救生的目的;因此救生装置设计人员的首要任务就在于解决人体生理条

件和救生要求之间的矛盾。在这一节中简要叙述环境对人体生理的影响和人体的耐受限度。

1.1.1 弹射救生过程中的过载

当人体的速度改变时,人体本身就要受到惯性力的作用。人体质量力与人体重量之比称为过载,用 G 值表示,过载方向始终与运动加速度方向相反。航空医学上往往把 G 称为生理加速度。 G 值是一个空间矢量,为便于分析和计算,像速度和加速度一样,标定在直角坐标系的三轴上。 y 轴是沿脊椎向下, $+G_y$ 表示加速度作用使心脏向下移位; x 轴是前胸到后背, $+G_x$ 表示加速度作用使心脏向背部移位; z 轴是由右到左, $+G_z$ 表示加速度作用使心脏向左移位。

$+G_y$ 对人体的影响有三个方面的,分别是增加体重;身体上部血压降低;器官和组织移位。

1) 在 $+G_y$ 的持续作用下,人体和各个器官、组织的重量都随 G 值成比例地增加。 $+3G_y$ 至 $+4G_y$ 时,四肢沉重,操作动作不准确; $+4.5G_y$ 至 $+6G_y$ 时,上述现象更趋严重,只有用力才能把手抬到拉防护面帘的高度。

2) 在 $+G_y$ 的持续作用下,身体上部的动静脉血压降低,血液供应减少;而身体下部的动静脉血压升高,血液蓄积。这种血液转移的后果首先是视觉机能的丧失,随后是意识丧失。随着 $+G_y$ 由小到大,视力逐渐模糊,像透过薄雾看目标那样。也有的人能看到的范围逐渐缩小,这是由周边视力丧失引起的,称为灰视,一般在 $+4.1G_y$ 时发生;当 $+G_y$ 再增加时,什么东西都看不见了,这种现象称为黑视,一般在 $+4.7G_y$ 时发生。发生黑视后,如这种 G 值再继续作用 $3\sim 5\text{ s}$ 以上,或比发生黑视的 G 值再提高 $0.5\sim 1.0$,就会出现意识丧失。

3) 人体的组织和器官,如皮肤、胃、心脏等,都不是完全固定的。在 $+G_y$ 持续作用下,很容易引起组织变形,器官移位和变形。 $+3G_y$ 至 $+4G_y$ 时,面部软组织向下移位,膈肌下降,呼吸感到困难,由于内脏向下移位的牵拉和压挤,所以人体感觉不舒服。随着 $+G_y$ 的增加,除感觉疼痛不适外,器官的正常机能活动逐步受到阻碍,其中显著的是呼吸器官。当 $+G_y$ 增大到 $6\sim 9$ 倍时,由于膈肌的向下移位,可能出现呼吸暂停。

以上的生理现象是在 $+G_y$ 持续作用下发生的,如果持续时间很短,人体能承受的过载值可以加大。例如以出现意识丧失为标准,过载作用时间为 0.1 s 时, $+G_y$ 可增大到 20 倍,比长时间作用要大 $3\sim 4$ 倍。

弹射座椅的弹射轴线与靠背的夹角一般不超过 5° ,也就是说,弹射方向与人体的脊柱基本平行。因此,从弹射开始到座椅脱离座舱这一阶段,人体承受 $+G_y$ 方向的过载,并且弹射作用时间一般不超过 0.3 s 。在这样短的时间内,血液下流和器官移位的现象反应迟缓,但体重增加的反映却比较明显,脊柱容易受伤。弹射救生的事例也证明,弹射时乘员脊柱受伤的概率较大。

弹射座椅脱离座舱后,火箭推力继续将座椅连同乘员向上推,迎面的气流阻力使座椅减速。这时座椅虽然处于自由飞行状态,但由于火箭推力的持续时间不长(一般不超过 0.5 s),所以座椅的旋转角度不会很大。这时人体承受的过载已不是单一方向了。

在火箭熄火以后,弹射座椅完全处于自由飞行状态,如果座椅稳定性不好,或稳定装

置不理想,人椅系统就要绕本身重心旋转。人体在旋转过程中,身体每一点的过载都不一样,从生理上看,脑充血是一个薄弱环节。一般认为人能承受的角速度极限值为 2 rad/s ,即 $720^\circ/\text{s}$ 。但美国海军规范于1983年已将极限值放宽为 $1000^\circ/\text{s}$ 。

1.1.2 气流吹袭

当弹射座椅脱离座舱上升时,人椅系统受到了气流的迎面吹袭。气流的动压力与气流速度的平方、空气密度成正比,例如,当量空速 1000 km/h 的气流对物体可产生 $47\,400 \text{ N/m}^2$ 的动压力。在这种气动力的作用下,乘员在弹射离机后就受到3种影响:气动力对人体表面软组织的直接损害、气动力对人体活动部分(四肢和头部)的影响和气动力对人椅造成减速过载的影响。

1) 动压对人体表面未加防护的软组织直接造成的损伤,首先是使颜面变形,随着压力的增加,皮下出血和眼结膜出血,严重时软组织撕裂。如果嘴张开没有保护的话,气流可吹入肺部,造成肺部不同程度的损伤。但现在使用弹射座椅的飞行员,一般都戴头盔,在实际弹射造成伤害的事例中气流直接造成的伤害是极个别的。

2) 气流吹到人体各部位,其动压对人体各部位施加不同的力。各部位的减速公式计算:减速过载 $G = \text{阻力} / \text{重量} = \text{动压} \times \text{阻力系数} \times \text{迎面面积} / \text{重量}$ 。人体头部、躯干、四肢的迎风面积,阻力系数和质量都不一样,一般四肢的减速比躯干的减速要快。这样对四肢可能造成两种伤害情况,一种是四肢超出肌肉能够控制的活动范围,造成脱臼、骨折性脱臼和韧带损伤;另一种是四肢向外向后运动,不由自主地甩打到座椅的坚硬部件上造成骨折或其他严重损伤。美国的实验表明,身体在无支持的情况下,约 $36\,300 \text{ N/m}^2$ 的动压(当量空速 873 km/h),可以在 0.1 s 内使髋关节完全外展;动压再增加,负荷可超过四肢大关节的强度。英国的实验表明,在当量空速 740 km/h 吹袭时,作用在膝部使腿向外分开的力有 490 N 。如果座椅不稳定,偏航转动 30° ,则作用在下风的腿上使向外分开的力达到上述力的3倍。

美国空军1971~1978年8年时间内非战斗弹射的统计资料显示,在447例有空速记录而且证据确凿的敞开式座椅的弹射中,有33例发生了由于气流吹袭引起四肢严重甩扭伤,占总数的7.4%,严重的四肢扭伤包括骨折、脱臼、大关节韧带损伤、大肌肉群撕裂和臂丛牵拉损伤。用统计概率分析可知,四肢严重甩扭伤的概率随着弹射速度增加而上升,在当量空速超过 930 km/h ,估计有50%的弹射者会受到严重甩扭伤,当量空速超过 1300 km/h ,估计严重甩扭伤将达到100%。但这种概率分析是针对当时使用的弹射座椅,这些座椅都没有手臂固定装置,也没有很牢靠的腿固定装置。高动压本身不一定会造成甩扭伤,只要将四肢牢固地固定住,甩扭伤就可避免。

头部甩打扭伤的可能性比四肢要小。只要座椅保持稳定,头部枕在头靠上,受力状态有利于防止甩扭,在头靠与头盔外形贴合较好的情况下,更可以提高头部抗甩扭的能力。但是一旦头部甩打,其伤害就容易造成死亡。另外,当飞行员佩戴的头盔、服装等装具质量不好时,高速气流把这些装具吹开、脱落也是人员受危害的一个因素。

3) 气流吹袭的第三种影响是对人椅造成的减速过载影响。目前敞开式弹射座椅的最大使用速度还没能够突破 1400 km/h 当量空速,这与减速过载有关。各式弹射座椅

的迎风面积、阻力系数和重量差别都不大。当减速过载受到生理限制时,也就是速压受到了限制。这样,座椅的最大使用速度就被限制在一定的数值上。

目前飞机性能提高得比较快,速压值早已超过了 $8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 。因此,弹射座椅扩大高速度的救生范围是当前的一个重大研究课题。

在耐受气流吹袭和减速过载试验研究中,值得一提的是美国 J·P·斯塔普的真人试验。如在 1947~1956 的 9 年时间内,他用火箭滑车进行了减速过载和气流吹袭的试验研究工作,意图是找出这两种作用力对人体的耐限,为高速弹射救生提供依据。他不仅用了假人与动物做试验,而且几次亲自上火箭滑车做真人试验。例如,1954 年 10 月,在一次减速过载和气流吹袭的联合试验中,他头戴专用头盔,罩住整个面部,将躯干和手足牢固地固定于座椅上,以避免手足的甩扭伤,滑车上边没有安装风挡,滑车最大速度达到 1030 km/h, M 值为 0.9,气流动压为 $53\,000 \text{ N/m}^2$,水刹车在 1.4 s 内将滑车从最大速度减速到停止,减速过载增长率为 600 每秒,平段的平均减速过载为 25,持续时间约 1 s,有 35 和 45 的过载峰值。试验后检查,除了表皮有背带勒伤和砂粒造成的出血点外,主要是眼有痛觉。他说:“进入水刹车后,双眼的感觉像没有上麻药时拔牙一样。”试验后他的双眼完全黑暗,8 分 30 秒后视力才恢复正常。这次试验证明气流吹袭对人体没有大的影响,并且 1.1 s 持续时间的减速过载值 25 是在人体耐受范围之内。后来他用黑猩猩做了 $960\,000 \text{ N/m}^2$ 动压的气流突然吹袭试验,做了 40 过载值,0.6 s 以下的各种持续时间的减速试验,还做了短时 80 过载值的减速试验,试验结果证明对正确保护和拘束的人体,气流吹袭不是一个问题。对减速过载,试验结果并没有找到明确的耐限值。

根据前苏联的资料,应急离机时,使用现代弹射救生装置作用在乘员身上的最大过载值见表 1.1。

表 1.1 作用在乘员身上的最大过载值

过载作用形式	方 向	过 载 值	作用时间/s
弹射过载	头-骨盆	18~20	0.2
气流吹袭的减速过载 (当量空速 1200 km/h)	背-胸	35~40	0.17~0.25 峰值时间 (减速总时间 2~2.5)
负升力引起的过载	骨盆-头	3~15	0.13~0.15
绕相应轴旋转引起的过载 x 轴和 y 轴 z 轴	骨盆-头 胸-背	8~9.5 到 6	0.3~0.5 每秒 2 转 到 3~4 转
角加速度引起的过载	胸-背或侧身-侧身	4~6	0.3~0.5
降落伞开伞过载	头-骨盆	到 14~16 (在空中)	0.2~0.3
着陆过载	头-骨盆	0~15	0.02~0.15
局部冲击		到 3000 N	0.01~0.05

1.1.3 高空低温低气压环境

1. 低气压与气压剧变对人体的物理影响

人体的组织和体液中溶解有一定数量的氮,当环境压力降到一定程度时,这些溶解气体就能游离出来,在血管内外形成气泡,引起关节痛、气哽、中枢神经系统症状,甚至发生休克,这就是高空减压症。一般是在 8 km 以上高空暴露一段时间后发病。

人体的体液中含有大量水分。当环境压力降低到等于或低于体温条件下的水蒸气压力时,这些水分就发生“沸腾”,而成大量水蒸气。这种现象称为“体液沸腾”。所形成水蒸气可使皮下组织发生肿胀,血管内的水蒸气可造成循环停滞。这种病症称为高空组织气肿。一般在 19 km 以上高空才出现此症状。

胃肠道的器官壁富有弹性,当外界气压降低时,腔内气体有膨胀余地,引起腹痛胃肠胀气症状。减压前,胃肠道内所含气体越多,症状就越严重。此症状一般在 8~10 km 以上高度发生。同样,肺的含气量最多,而且其支气管系统的分枝也极其复杂繁多,由于肺组织的机械强度较低,压力升高到一定程度后就能引起肺的机械性损伤,造成肺组织破裂,肺实质出血、气胸、气体进入血管形成气栓等严重后果。由动物实验证明,引起哺乳动物肺破裂的临界肺内压力平均为 80 mmHg^①。但人体试验结果是,当急速减压使肺内压力峰值达 80 mmHg 时,肺部未见有任何异常,这说明人体还可以耐受压力值更高的一时性肺内压力升高。

从人体不适于高空减压环境来看,没有对人体提供生理防护是不可能进行高空飞行的。现代飞行员的座舱凡是进行高空飞行的都做成密封增压,基本上克服了低压的威胁。飞行员穿戴头盔和高空代偿服,可对体表施加一定压力。飞更高的高空时,可穿戴全压服,这种人体防护装备可以保证,一旦增压座舱失效或在高空应急弹射救生时,飞行员可免受低压环境的威胁。

2. 高空缺氧

高空飞行所遇到的缺氧是高空大气压力降低引起吸入空气的氧分压相应降低所致,故称为高空缺氧,它一般发生于下述两种情况:

1) 在增压座舱采用低压差制的飞机上,座舱虽然完好,但因氧气面罩渗气,或供氧装备发生故障,或未按规定正确使用供氧装备都可引起高空缺氧。这时,人的体力及脑力活动能力往往是在不知不觉中逐步变得迟钝,经过一定时间的智力紊乱,最后发生意识丧失。如不立即供氧,则呼吸、循环机能也相继停止。

2) 当增压座舱的增压系统出现故障,舱内出现减压,以及由于迅速减压而引起爆发性高空缺氧时,人体可以在没有什么明显征兆的情况下,突然发生意识丧失。因此,通常在爆发性高空缺氧时要求人体供氧装备应在 3~5 s 内为面具建立规定的余压值。高空应急弹射救生是飞行员弹离增压座舱并切断飞机上的供氧系统,进入高空低压缺氧区的过程。因此,为了保证飞行员的安全,不发生爆发性高空缺氧症,在弹射座椅上必须备有应急供氧系统,在弹射瞬间切断机上供氧系统的同时,自动接上应急供氧系统,保证供氧的连续性。

3. 高空低温环境

在高空飞行中常遇到低温环境。在中纬度的对流层内,高度每上升 100 m,气温平均下降 0.65℃;在 11 km 高度以上的同温层内,气温是 -56.5℃。现代喷式飞机常在

^① 1 mmHg = 1.33322 × 10² Pa