

烟火气体发生剂技术

韩志跃 杜志明 龚丽 姜琪◎编著

PYROTECHNIC GAS GENERATOR
TECHNOLOGY

兵器科学与技术学科特区资助出版

烟火气体发生剂技术

韩志跃 杜志明 龚丽 姜琪◎编著

PYROTECHNIC GAS GENERATOR
TECHNOLOGY

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

烟火气体发生剂技术 / 韩志跃等编著. —北京:北京理工大学出版社,
2020.4

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8314 - 4

I. ①烟… II. ①韩… III. ①烟火剂 - 研究 IV. ①TQ567

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 051802 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 9

彩 插 / 4

字 数 / 126 千字

版 次 / 2020 年 4 月第 1 版 2020 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 49.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

烟火型气体发生剂是一种能快速燃烧产生大量气体的烟火药剂，通常用于制造需要快速充气的装置。其具有产气量大、燃速快、残渣少、燃气多为对人体无害的氮气二氧化碳等清洁气体等特点。

大多数人对气体发生剂的了解主要是从汽车安全气囊开始，事实上，它还广泛应用于诸如推动飞机涡轮、鱼雷的导向叶片等的旋转，各种救生筏和民航应急安全滑梯的快速充气，铁路运输的紧急制动系统，石油、天然气输送管道紧急关闸系统等。近年来，其在航天器变轨、无人机着陆、巡飞弹翼展等方面也在不断获得新的重要应用。烟火技术在中国已有上千年的历史，但烟火型气体发生剂在我国的研究与应用尚处于起步阶段。近年来，世界各国的气体发生剂研究工作非常活跃，配方专著如雨后春笋，经过 20 多年的发展，我国产气药剂配方技术达到了较高水平，配方设计的目的和重心也逐渐从追求高产气量、低燃温、高燃速转移为追求高燃气成分洁净、残渣量少、产气清洁环保等性能。但是，对于气体发生剂的研究过程，目前市面上并未见系统描述的教材或专著。因此，本专著弥补了该方面的空白，首次对气体发生剂从合成到配方制备再到实际充气展开这一系列过程进行了系统的论述。

烟火型气体发生器是一门综合性应用的研究，涉及化学、物理、力学等多学科的交叉科学。它所研究的主要内容涉及：以无机和有机化学为基础的产气药剂的分子设计与合成；以物理化学理论为基础的氧化还原反应效应以及分散成型技术为基础的混合烟火药剂配方设计与制备研究；以流体力学以及热动力学为基础的气体发生器的机械设计和气囊充气展开模拟研究等。

本书涉及的内容主要是作者以往的科研成果和教学经验的积累，在编写过程中，我们注意收集近年来国内外专家的相关学术论文和科



2 烟火气体发生剂技术

研成果，同时结合作者本人近年来的实践经验，尽量向读者系统地介绍气体发生剂的研究过程和最新的研究成果，为将来可能从事该方面研究的科研人员提供了入门指导。因此，本书可为高等院校兵器科学与技术、能源与武器、含能材料等相关专业的研究生及本科生提供参考。

作者



目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 烟火药剂概述	(1)
1.1.1 烟火药的分类	(1)
1.1.2 烟火药的用途	(2)
1.2 烟火气体发生剂及用途	(5)
第2章 产气剂	(9)
2.1 产气剂研究发展概况	(9)
2.1.1 火药型产气剂	(9)
2.1.2 烟火型产气剂	(12)
2.2 富氮产气剂要求	(21)
2.3 典型气体发生剂种类及配方	(21)
2.3.1 叠氮化物类气体发生剂	(21)
2.3.2 非叠氮化物类气体发生剂配方	(23)
2.4 本课题组典型气体发生剂配方及其性能	(30)
2.4.1 偶氮四唑胍	(30)
2.4.2 5-氨基四唑硝酸盐	(34)
2.4.3 4,5-二四唑基-1,2,3-三唑	(38)
第3章 烟火气体发生剂配方	(43)
3.1 烟火气体发生剂配方设计	(43)
3.1.1 原材料筛选	(43)
3.1.2 气体发生剂配方设计基本原则	(48)
3.2 烟火气体发生剂制备方法	(49)



4 烟火气体发生剂技术

3.2.1	成分的准备	(50)
3.2.2	混药、造粒及干燥	(53)
3.3	烟火气体发生剂性能测试	(59)
3.3.1	药剂燃烧温度	(59)
3.3.2	燃烧速度	(64)
3.3.3	产气量	(67)
3.3.4	压力—时间曲线测试	(68)
3.3.5	吸湿性测试	(69)
3.3.6	感度测试	(71)
3.3.7	热重差热分析	(72)
3.3.8	安定性和相容性测试	(73)
3.3.9	气体成分检测	(75)
3.3.10	PM2.5 和 PM10 测试	(77)
3.4	典型的应用配方	(79)
第4章	高温燃气快速冷却技术	(81)
4.1	冷却技术	(81)
4.1.1	化学冷却剂	(81)
4.1.2	物理冷却剂	(84)
4.2	冷却剂的使用方式	(87)
4.2.1	内冷却	(87)
4.2.2	外冷却的装药方式	(89)
4.3	过滤网技术	(92)
4.3.1	过滤网的种类	(92)
4.3.2	过滤介质对比	(94)
4.4	其他冷却技术	(97)
4.4.1	自由装填式过滤冷却设计	(97)

4.4.2	迷宫式过滤冷却设计	(97)
4.4.3	迷宫式过滤冷却与传统冷却对比	(99)
第5章	烟火气体发生器设计	(101)
5.1	烟火气体发生器	(101)
5.2	烟火气体发生器结构	(103)
5.3	典型气体发生器设计计算	(105)
5.4	烟火式气体发生器点火及气囊技术	(110)
5.4.1	点火	(110)
5.4.2	气囊	(112)
5.5	气体发生器的应用	(119)
5.5.1	汽车气囊气体发生器	(119)
5.5.2	火星探测气体发生器	(120)
5.5.3	水下打捞	(121)
5.5.4	其他应用场合	(122)
第6章	烟火气体发生剂技术展望	(128)
6.1	气体发生剂技术发展趋势	(129)
6.2	气体发生器技术的发展	(129)
6.3	气体发生器技术的应用展望	(130)
参考文献	(132)

第 1 章 绪 论

1.1 烟火药剂概述

中国是世界烟火技术故乡，烟火在中国的发展由来已久^[1]，早在公元前八世纪的周朝已有了烽火“狼烟”。周末（公元前 500 年）《孙子兵法》中就著有“火攻篇”；汉末三国战争有著名的“火烧赤壁”，蜀、魏交战（公元 227 年）已使用了“火箭”，这比古罗马的“希腊火”（公元 673 年）早了数百年。不过那时的烟火技术还只是一种“火”的应用技术，它是采用可燃物质借空气中的氧来燃烧的，并没有构成一种自供氧（利用氧化剂）体系的烟火药剂。

由于医药学和炼丹术的发展，促进了黑火药在我国的发明。黑火药是最初的烟火药剂。随着技术的发展，最初的黑火药发展为：燃烧性兵器中的燃烧剂、爆炸性兵器中的炸药和引线装药及火药的发射药。总的来说，烟火药剂是一种特殊的含能材料。

1.1.1 烟火药的分类

烟火药在多数情况下为混合药剂，主要由氧化剂、可燃剂和黏合剂混制而成，按其产生的光、声、烟、热、气动、延期等烟火效应进行分类，如图 1-1 所示。

也可以根据烟火药在燃烧过程的特点分类,将其分成火焰剂、高热剂、发烟剂和借空气中氧燃烧的物质及混合物等。

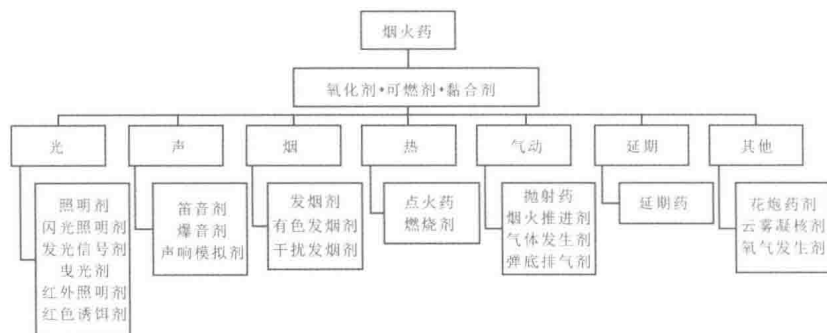


图 1-1 烟火药分类

1.1.2 烟火药的用途

烟火药剂主要用于制造各种军事的或民用的烟火制品和烟火器材。

(1) 照明剂。用于制造照明弹及其他照明器材,如照明枪弹、照明火箭弹、照明炮弹、照明航弹以及照明跳雷、手持照明火炬和飞机着陆用照明光炬等,供夜间照明用。

(2) 闪光照明剂(摄影照明剂)。用于制造闪光照明弹(摄影航弹),供飞机航空摄影或电影摄制。

(3) 发光信号剂。军事上用于制造各种信号弹(枪弹、榴弹),供远距离传递信息和联络用。交通运输业用于制造各种手持信号火炬和信号火箭,供遇险求救或险情预报用。花炮工业用于制造五颜六色的烟花或礼花,供人们娱乐观赏。

(4) 曳光剂。军事上用于制造曳光弹,如曳光枪弹、曳光炮弹、穿甲曳光枪弹或炮弹、穿甲燃烧曳光枪弹等。曳光弹在飞行途中留下示踪轨迹,供射手校正方向和弹道跟踪用。

(5) 红外照明剂。军事上用于制造红外隐身照明弹,如红外照明迫弹、榴弹、火箭弹、航弹等,供红外夜视仪和微光夜视仪等器材大幅提高视距。

(6) 红外诱饵剂。军事上用于制造红外诱饵弹,如红外诱饵榴榴

弹、迫弹、火箭弹等，对红外制导导弹和红外探测、观瞄实施引诱、迷惑、扰乱干扰。也可以对红外测角仪三点式制导系统实施致盲干扰。

(7) 爆音剂。军事上用于制造教练弹，供训练时模仿枪炮声和各种弹药的爆炸音响；民用上多用于鞭炮、双响炮、礼炮、拉炮、发令纸等，供娱乐和庆典用。

(8) 笛音剂。又称为哨音剂，军事上用于制造啸声模仿训练器材；民用上用于制作烟花哨声娱乐制品。

(9) 声响模拟剂。除具有声响效应外同时伴随有闪光和烟雾效果。军事上用于制造声、光、烟模拟烟火器材，供部队演习和训练用；民用上用于制作各式各样的烟花制品。

(10) 发烟剂。军事上用于制造烟幕器材，如烟幕弹、发烟罐、发烟车等，用以产生烟幕；民用上用于农作物的防霜冻、杀虫灭鼠，也用于制造烟花制品。

(11) 有色发烟剂。军事上用于制造昼用信号弹（枪弹、榴弹等），供白天远距离传递信息与联络；民用上用于制造海上漂浮信号烟器材，供海上遇险求救传递信号。也用于制造手持信号烟制品（信号管等），供飞机驾驶员跳伞着陆联络，航空表演用于空中形成彩色飘带，花炮用于制作彩烟球等。

(12) 干扰发烟剂。用于制造干扰烟幕，对红外、激光、微波实施无源干扰。

(13) 点火药。也称为点火剂，通常用作点火器材的基本装药，用于点燃烟火药剂、推进剂、发射药或起爆药。在烟火制品中又称之为引燃药，压装在被引燃的主装药药面上。

(14) 燃烧剂。军事上用于制造燃烧弹及燃烧器材，如燃烧枪弹、炮弹、航弹、火焰喷射器等；民用上用于烟火冶炼、切割、焊接和作其他加热源。

(15) 抛射药。用于烟火制品和器材（弹）某些部件的抛射、弹射，也用于近程短管掷榴发射器抛射干扰弹。

(16) 烟火推进剂。用于固体火箭冲压发动机装药。



(17) 气体发生剂。用于制造各种不同用途的气体发生器和充气装置，如救生筏、汽车安全气囊等。

(18) 弹底排气剂。军事上用于榴弹底部燃烧排气增程，它在改变火炮结构系统、发射装药等条件下，可使弹丸射程提高 30%。

(19) 延期药。用于各种需要有延迟点火的烟火器材和装置，作延期传递点火用。

(20) 花炮药剂。指仿生药剂、有色火药药剂、有色闪烁药剂、有色喷波药剂、白色火焰药剂、有色发烟药剂、气动药剂、引燃药剂以及某些特殊用途药剂等，用于制造五彩缤纷的观赏烟火制品。

(21) 云雾凝核剂。用于人工防雹降雨，它能在云雾中产生人造冰核，促使过冷云层中的水汽凝结而降雨。

(22) 氧气发生剂。又称生氧剂，用于制造氧气烛或氧气发生器，供登山运动员、飞机或舰艇乘员和坑道作业人员的应急供氧之用；也可用于制作便携式供氧的氧炔焰焊接装置。氧气发生剂一般是由富氧氧化剂（如 NaClO_3 、 NaClO_4 等）、可燃剂（如 Fe 、 C 、 Zr 等）、黏合剂和催化剂（如 Mn 、 Co 、 Cu 、 Ag 的氧化物的混合物 Li_2O 、 BaO_2 等）组成。

需要指出，以上分类与用途是就烟火药的作用特点和产生的烟火效应所做的相对划分。有些药剂的应用并不局限于某一种用途。例如，照明剂也可用作曳光剂，有色发烟剂除用作信号外亦用作日间目标指示和弹道示踪。此外，很多药剂都可用来作模仿教练器材。

烟火药在部分领域的应用如图 1-2 所示。

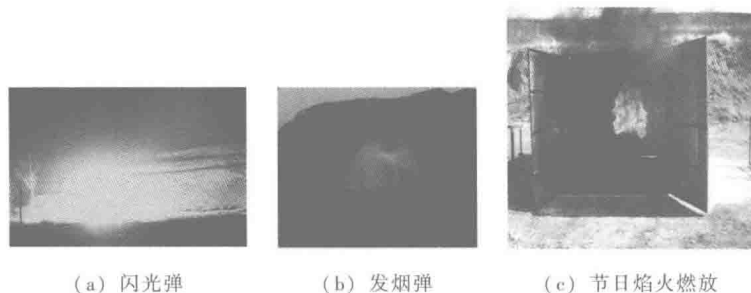
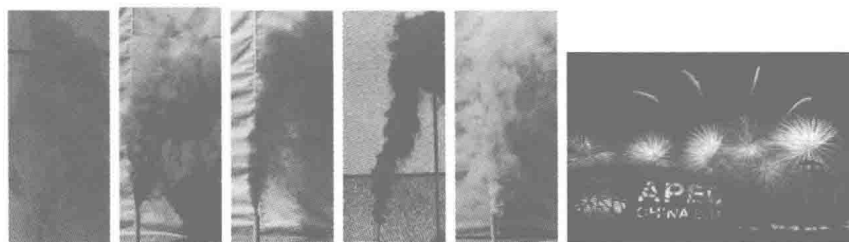


图 1-2 烟火药在部分领域的应用



(d) 环保型彩色发烟剂

(e) 烟火气溶胶灭火

图 1-2 烟火药在部分领域的应用 (续)

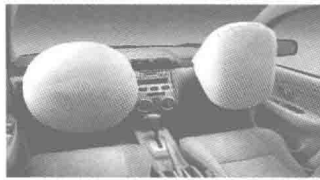
1.2 烟火气体发生剂及用途

烟火气体发生剂是一种能以快速化学反应(燃烧)方式产生大量气体的烟火药剂,简称为气体发生剂^[2],通常用于制造各种不同用途的气体发生器和充气装置。

大多数人对气体发生剂的了解主要是从汽车安全气囊开始的。从20世纪80年代末到90年代初陆续装备汽车以来,安全气囊挽救了许多司乘人员的生命。目前,安全气囊已成为国内外著名汽车厂家品牌汽车的标准装备,而烟火型气体发生剂是安全气囊系统的关键技术之一。事实上,气体发生剂在其他领域也有广泛的用途。例如,用于推动飞机涡轮、鱼雷的导向叶片和陀螺转子旋转;还可用于飞机驾驶员座椅弹射和各种救生筏以及民航应急安全滑梯的快速充气、特殊场合的快速灭火等。另外,铁路运输的紧急制动系统,石油、天然气输送管道紧急关闸系统等都离不开气体发生剂的应用。近年来,气体发生剂在航天器变轨、无人机着陆、巡飞弹翼展等方面不断获得新的重要应用,在许多场合都发挥着不可替代的作用。最近,美国又成功地将气体发生剂用于“勇气”号和“机遇”号火星探测器的安全着陆系统中,并获得了极大的成功,引起了世人的高度关注。

气体发生剂在部分领域的应用如图1-3所示。

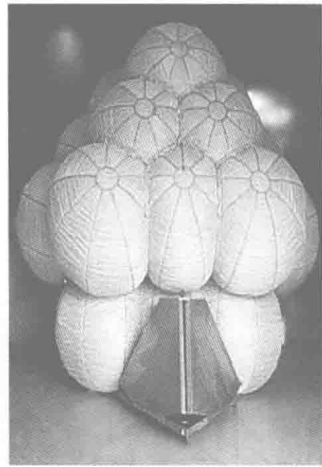
气体发生剂经历了由叠氮化钠类到非叠氮化物类的研究发展过程,目前广泛使用的气体发生剂为叠氮化钠/氧化剂体系,该体系的



(a) 汽车安全气囊



(b) 无人飞行器充气机翼



(c) 火星探测器软着陆

图 1-3 气体发生剂在部分领域的应用

气体发生剂具有点火容易、燃烧温度低、气体产物为无毒的氮气等优点。但是，由于叠氮化钠毒性较大，经常接触叠氮化钠的工作人员已经遇到各种不同的健康问题，例如严重的头痛、呼吸短促和痉挛等症状，给安全生产带来一定的隐患。除此之外，以叠氮化钠为产气物质的气体发生剂产气量相对较小，对航天器等场合也不太适用。因此，研制环保、无毒、廉价、实用的气体发生剂来代替叠氮化钠类气体发生剂，是未来的发展趋势。另外，随着使用场合的不同，对气体发生剂的性能要求也不尽相同。气体发生剂将从以往主要追求温度低、燃速快的配方向特色明显、品种多样的方向发展。产气技术与冷却技术、点火技术、气囊材料技术、控制技术相结合，将使烟火型气体发生剂在太空、空中、地面、水面、水下等不同环境中获得更为广阔的应用。近年来，人们开发了叠氮化钠型和非叠氮化型气体发生剂，并成功用于深水救捞，可以在较短时间内将沉入水下几十米的重物快速捞起。与传统救捞方式相比，具有成本低、速度快、使用灵活方便等许多优点。随着我国空间技术的发展，预计烟火型气体发生剂在我国航天技术领域会发挥重要的独特作用。

相对而言，烟火型气体发生剂在我国的研究和应用尚处于起步阶段，在汽车工业、国防工业等领域的应用明显落后于美国、日本、俄

罗斯等先进国家。随着我国汽车、航空航天和兵器等行业以及其他领域的快速发展，对环境保护和人身安全的日益重视，开发环保、廉价、产气量大和多品种的气体发生剂，并对其性能进行深入研究，对气体发生剂在不同场合的广泛应用无疑具有重要意义。

第2章 产气剂

2.1 产气剂研究发展概况

气体发生剂指配方中含有爆炸性基团或含有氧化剂和可燃物，其燃烧气体成分取决于药剂配方，并且主要取决于其中的产气物质组分，即产气剂^[3]。产气剂在特殊的封闭体系中可独立进行燃烧反应并迅速释放大量气体，主要用于完成动力做功或充气缓冲等特种效应。产气剂的本质是含能材料，因此凡是含能材料，都有用作气体发生剂的可能。目前，产气剂大致可分为两种类型，即火药型和烟火型。

2.1.1 火药型产气剂

在含能材料中，火药可分为推进剂和发射药两种。与固体推进剂类似，黏合剂是这类配方的主体，主要有两类，一类是热塑性黏合剂，如硝化棉（NC）、聚氯乙烯等；另一类是热固性黏合剂，包括聚硫橡胶、聚氨酯、聚丁二烯（HTPB）等。氧化剂通常采用硝酸铵（AN）、高氯酸铵（AP）等无机盐和RDX、HMX等硝胺炸药，以及新型合成的六硝基六氮杂异伍兹烷（CL-20）和二硝酰胺铵（ADN）等。因此，火药型气体发生剂分为双基和复合两个类型。

20世纪40年代以后，国外开始对双基型气体发生剂进行研发，