

# A Fire Extinguisher Using Supersonic Jet

Zhi Chen<sup>1</sup>, Yangzhu Zhu<sup>2,3</sup>, Lifeng Tian<sup>4</sup>, Guangyuan Liu<sup>1</sup>, Dundian Gang<sup>5</sup>

<sup>1</sup>China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang Sichuan

<sup>2</sup>The 63926 Troop of PLA, Beijing

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA Army Engineering University, Nanjing Jiangsu

<sup>4</sup>Air Defense Forces Academy, Zhengzhou Henan

<sup>5</sup>College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Email: gfdkchenzhi@163.com, zyzhb123@163.com

Received: Aug. 17<sup>th</sup>, 2017; accepted: Sep. 1<sup>st</sup>, 2017; published: Sep. 8<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Exploring a novel and environmental technique for fire extinguishing is one of the important development of fire protection. In this manuscript, the theory that substance can hardly be burned under supersonic situation is adopted to design a supersonic jet fire extinguisher using the air as the working medium. This paper discussed the theory, design and validation. This device would not contaminate valuable burning substance and is useful in condition without or lack of water. Together with the existing devices, it can help to improve the efficiency and reduce the consuming of water.

## Keywords

Supersonic, Environment Friendly, Fire Extinction

---

# 超声速喷气式清洁灭火技术

陈植<sup>1</sup>, 朱杨柱<sup>2,3</sup>, 田立丰<sup>4</sup>, 刘光远<sup>1</sup>, 冈敦殿<sup>5</sup>

<sup>1</sup>中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳

<sup>2</sup>解放军63926部队, 北京

<sup>3</sup>解放军陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京

<sup>4</sup>防空兵学院, 河南 郑州

<sup>5</sup>国防科技大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙

Email: gfdkchenzhi@163.com, zyzhb123@163.com

收稿日期: 2017年8月17日; 录用日期: 2017年9月1日; 发布日期: 2017年9月8日

## 摘要

探索新型、环保的灭火技术，是消防领域研究的重要发展方向之一。本文利用物质在超声速条件下极难燃烧的原理，设计一种能喷射超声速气流的灭火装置，利用廉价和充足的环境大气作为气源，为抗争火灾提供新的手段。文中对该技术的原理、设计以及验证进行了论述。该类新型灭火装置，不易对贵重的燃烧物造成破坏，在缺水或某些不适合用现有灭火手段的场合可以发挥作用，而且与现有灭火手段配合使用，能够提高灭火效率，降低对水资源的消耗及对环境的污染。

## 关键词

超声速，环保，气流灭火

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

火灾是人类生产、生活中的主要灾害之一，与我们的日常生活息息相关。2015年8月12日，天津港发生大爆炸，火势迅速蔓延，相继引发多次爆炸，牺牲了数十名消防队员，造成严重的经济损失、环境污染。在这种情况下，如果能够更快地将火扑灭，就有可能抑制火势蔓延，防止二次灾害。诸如此类的灾害经常发生。我们知道，燃烧的必要条件是燃点和氧气。常见的灭火方式，比如冷却法使燃烧的温度低于燃点之下进而使燃烧停止，窒息法则是阻止空气流入燃烧区域或用不燃烧物质冲淡空气或者覆盖燃烧物从而使燃烧物得不到足够的氧气而熄灭。因此，常见的灭火器有干粉灭火器、二氧化碳灭火器、泡沫灭火器、清水灭火器等。但是，目前人们与火灾的对抗手段比较有限，效率不高。在某些特殊的场合，采用传统的灭火手段则不一定适合，可能导致二次灾害或二次污染。

随着航空航天技术的发展，超声速、高超声速技术逐渐向民用领域应用。如何维持燃料在超声速条件下的有效燃烧，是研制高超声速飞行器的难点问题，这里我们反其道行之，可以利用超声速气流的某些特性，探索一种新型灭火手段，提高灭火效率，降低二次污染和负面效应，为灭火技术的发展提供新的思路并能够在一定程度上扩展现有灭火器的应用范围，实现经济、高效灭火。目前关于超声速灭火的研究虽然有一些[1][2][3][4]，但比较有限，而且主要是采用干粉作阻燃剂，应用于大型灭火装置，容易造成粉尘污染，灾后清理困难。本文则提出一种新型清洁超声速灭火技术，仅利用常规大气作为动力源进行灭火，节约水资源且干燥清洁环保，有助于维护贵重物品的完整性。

## 2. 技术原理

超声速喷气式清洁灭火的原理是：物质在超声速气流条件下极难组织燃烧，犹如在飓风中要点燃一根蜡烛一样。超声速气流能使燃烧物在瞬间就处于极其严峻的环境而无法继续维持燃烧。高速气体所带来的低温效应能够降低燃烧物温度使其低于燃点，同时冷凝周围环境中的水汽在燃烧物表面形成覆盖从而在一定程度上隔离氧气。另外，高速气体强大的剪切力可以将分散、冲撞燃烧物。因此，设计一种能喷射超声速气流的灭火装置，利用廉价和充足的环境大气作为气源，在原理上是可行的。

基于上述原理所设计的新型灭火装置，具有以下特点：

- 以取之不尽的空气作为灭火气源既廉价又充足，而且能够节约宝贵的水资源；
- 在某些不能用水或干粉灭火的场合可以发挥有效作用，比如某些燃烧的带电装置不能用水直接扑灭；
- 对一些较为贵重的仪器、珍贵文物等，采用该灭火装置可以避免对其造成二次污染；
- 在某些干旱地区，水资源极为匮乏，该类灭火装置可以及时发挥作用，避免因此导致延误救灾而造成更大的损失；

实际上，无论采用何种灭火方式，单一的灭火器所起的灭火效果往往是有限的，特别是对于燃烧物种类多、火灾现场比较复杂的情况。本文所设计的灭火器并非要取代市面上已经发展较为成熟的灭火设备，而是与现有的灭火装置配合使用，将进一步提高灭火效率，为抢救人民群众生命财产安全增添一份保障。

### 3. 设计思路

#### 3.1. 总体方案

该超声速喷气式灭火装置主要包括超声速喷嘴、气源、动力和阀门管路四个子系统以及其他辅助部件。

如图 1 所示，其主要结构及功能为：

- ① 超声速喷嘴，用于产生超声速气流，可以更换不同马赫数、不同出口形状的喷嘴；
- ② 截止阀，控制气流的开闭；
- ③ 橡胶软管，方便调节喷嘴方向以对准火焰；
- ④ 减压阀，调节喷嘴总压和流量；
- ⑤ 截止阀，控制气流开闭；
- ⑥ 气源储罐，储存所需的空气；
- ⑦ 安全阀，当气源储罐压力过大时可泄压，防止出现危险；
- ⑧ 压力表，显示气源压力；
- ⑨ 减压阀，用于调节外部大型气源对储罐充气的压力和流量；
- ⑩ 截止阀，控制压气机气体进入气罐的开闭；
- ⑪ 小型压气机，可为气罐重复充气。

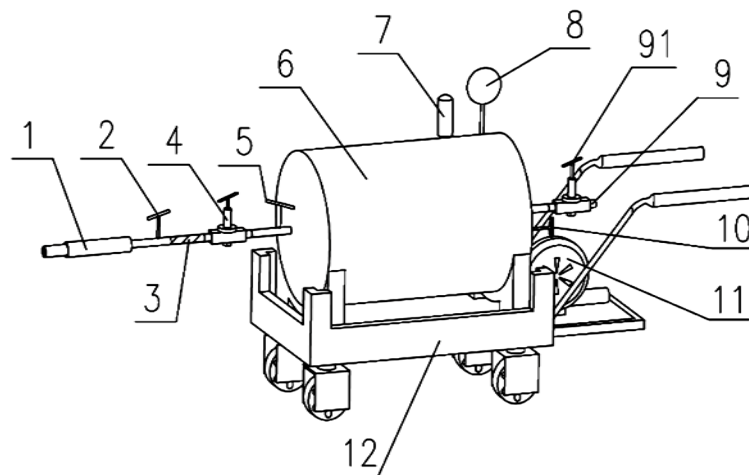


Figure 1. One preliminary design of the fire extinguisher using supersonic jet

图 1. 超声速喷气灭火器的一种初步设计方案

该装置工作流程为：

⑥气罐内事先储备了压缩空气；当打开②⑤截止阀，将④调节至合适大小，①喷嘴可形成超声速气流，③橡胶管可以调整喷嘴的对准方向；当气罐内压力不足时，启动⑩压气机，开启⑩截止阀，关闭②④⑤，即可对气罐进行充气；另外，如果有外部大型气源或大型压力装置，也可以通过预留的接口⑨进行充气；当充气压力过大时，安全阀可自动泄压，压力表也可以时刻反映气罐压力。

### 3.2. 喷嘴设计

喷嘴是一个内壁面先收缩后扩张的管道，在满足入口出口压力比的条件下能够在该管道的出口形成超声速低温的气流。该管道内壁面的型面不是用普通的曲线设计或靠经验设计的。该型面是采用基于 B 样条曲线配置轴线马赫数分布的特征线方法设计的，能够使喷嘴出口获得均匀性好、气流速度精确、不存集中波系的高品质超声速流场。这样可以保证高速气流对火苗或燃烧物的有效覆盖率，从而提高喷嘴的灭火效率。实现超声速气流灭火的原理主要包括：

首先，超声速气流包裹燃烧物，使燃烧物瞬间处于超声速气流环境。自然界中若无人为干涉，要维持超声速燃烧是不可能的。这就降低了燃烧的可能性。

其次，根据空气动力学原理，随着气流速度的提高，气流温度将急剧下降，尤其是当气流速度超过声速的时候，甚至可以达到零下几十度。

$$T = \frac{1}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2} \cdot T_0, \quad T \text{ 为气流温度, } T_0 \text{ 为气源温度}$$

如上式所示，超声速气流的温度仅为其气源温度的若干分之一。那么这就可以达到两方面效果，一是高速低温气体的换热效应可以带走大量的热量，从而降低燃烧物的温度，使其低于燃点而增大燃烧难度；另一方面是低温气体还可降低燃烧物周边空气的温度，使空气中所含的水汽冷凝而覆盖于燃烧物表面，可在一定程度上隔绝燃烧所需的氧气。第三，超声速气流具有极强的剪切力和极高的总压，能够高效地粉碎、分散燃烧物表面的火星，可以阻止燃烧物继续燃烧和复燃。

以设计马赫数为 1.5 的喷嘴为例，若其气源的压力为 3.6 个大气压，气源温度为 25 摄氏度，那么在喷嘴出口处形成的超声速气流 428 m/s，气流的温度仅有零下 66 摄氏度左右，驻点压力达到 2~3 个大气压。这样的高速低温气流具有极强的灭火能力。

超声速喷嘴设计主要包括收缩段和扩张段设计。收缩段可以采用双三次曲线、五次方曲线等设计方法(图 2)。

$$\frac{D - D_2}{D_1 - D_2} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{x_m^2} \left( \frac{x}{L} \right)^3, & (x/L) \leq x_m \\ \frac{1}{(1 - x_m)^2} [1 - (x/L)]^3, & (x/L) > x_m \end{cases}$$

扩张段在本文中则是采用基于 B 样条曲线配置轴线马赫数分布的特征线方法设计。B 样条曲线除了具有变差减小性、几何不变性之外还有局部性、可微性和凸包性。由于 B 样条曲线的局部性，k 阶 B 样条曲线上的点至多与 k 个控制顶点有关，移动某一控制点，至多影响该区间内的曲线形状，其余曲线段不发生变化，这一特点保证了喷嘴设计中局部马赫数的可调性。B 样条曲线的可微性表明，每一曲线段内部是无限可微的，在节点处是 k-r 次可微的，其中 r 为节点的重复度，这一性质可以保证喷管壁面曲率的连续性(图 3)。

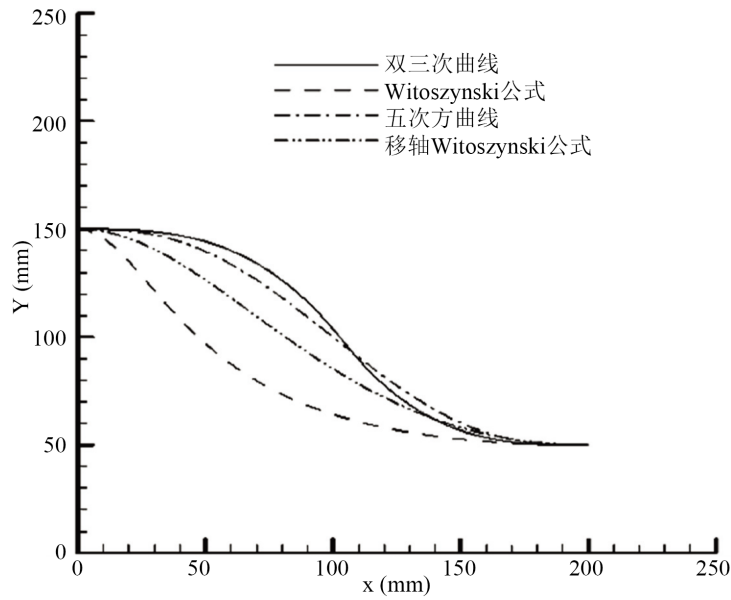


Figure 2. Common design methods of the contraction profile  
图 2. 收缩段型面设计的常见方法

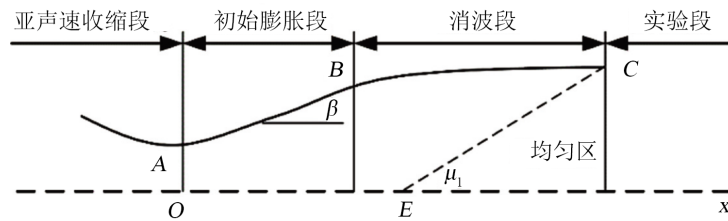


Figure 3. Design method of the diffuser in the supersonic nozzle  
图 3. 超声速喷嘴扩张段设计方法

一般说来，喷嘴设计中应该保证壁面曲率连续，三次 B 样条曲线即可满足该条件，其和式形式为：

$$r_i(u) = [1uu^2u^3] \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_{i+1} \\ V_{i+2} \\ V_{i+3} \end{bmatrix}$$

其中： $0 \leq u \leq 1$ ， $V_i$ 、 $V_{i+1}$ 、 $V_{i+2}$  和  $V_{i+3}$  为控制顶点。由于 B-样条曲线的上述性质，本文利用 B-样条曲线给定喷管轴线的马赫数分布，然后采用特征线法进行内部流场的迭代求解。通过适当的调整 B-样条曲线各个顶点的坐标就可以调整喷管壁面的曲线形状，由此实现了可调型线的超声速喷管设计。

### 3.3. 气源

要产生超声速气流必须在喷嘴的上游提供足够高的压力，以满足产生超声速气流所需的压比要求。根据空气动力学原理，

$$p_0 = p \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad p \text{ 为气流压力, } p_0 \text{ 为气源压力。}$$

对于马赫数为 2.5 的喷嘴，要在常压下工作，其气源至少要有 8 个大气压。那么气源储罐的结构强

度就需要按照相应的规范来设计。同时,为了使整个灭火装置能够运行足够长的时间,对气源储罐的容积有一定的要求,根据不同的使用场所设计不同大小的气源罐。另一方面,为了提高本装置的普适性,采用空气填充气源储罐,这样既方便、廉价,又能减少灭火中的水资源消耗。

另外,为了提高超声速喷流的利用率,降低对气源的消耗,可以采用组合喷嘴的方式,如图4所示。

### 3.4. 管路与动力系统

管路的设计主要考虑有两个方面的要求,一是管路的承压,原因和气源的设计一样;二是易弯曲、便携,灭火时要将气流对准火源,因而管路必须活动自如。为了降低整个超声速气流灭火装置的成本,希望气体使用完后能够迅速、便捷、廉价地将气源充满重新使用。因此在本装置上设计了一个小型压气机,只要提供电源即可工作。另外还需要一些辅助部件,包括手推式移动小车、控制喷嘴工作的电磁阀及其开关、压力表、安全泄压阀等。

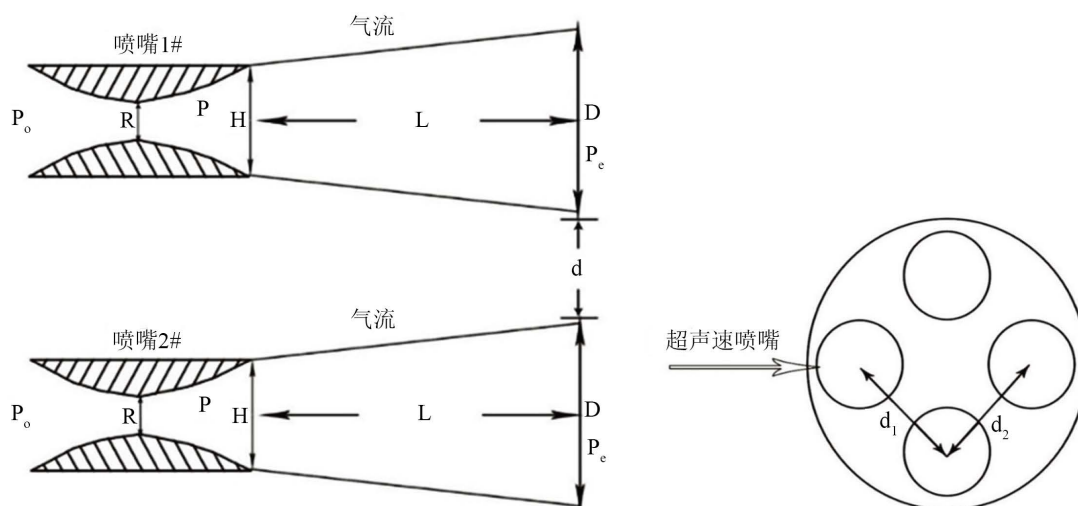
## 4. 数值仿真与试验验证

采用目前广泛应用的商业软件 **Fluent** 对所设计的超声速喷嘴的流场进行数值仿真模拟,可以获得喷嘴气流的基本参数分布。对喷嘴内部进行结构网格划分,如图5所示,给出了喷嘴计算域的网格划分以及数值模拟得到的流场马赫数分布。可以看出,喷嘴内部马赫数变化平缓无波系干扰,喷嘴出口处流场均匀,获得了预期的喷流速度。

针对日常所见的火灾类型,设计了如下几个实验,用来检验超声速气流的灭火效果:易燃物品(如酒精、汽油等)的燃烧、普通的衣物、木结构的燃烧、贵重物品(文物、古籍等)的燃烧、电器线路的燃烧。研究表明,超声速气流可以极高效地扑灭衣物、布料类燃烧物,对于木制燃烧物的灭火效果也非常好并且有效地粉碎火星,灭火效果彻底。

对不同马赫数喷嘴(包括马赫 3.5, 2.5, 1.5 三种,分别对应气流速度约为 647 m/s、573 m/s、428 m/s)的灭火效果进行对比实验。结果表明,气流速度越高,灭火效率和效果就越好。

不同形状的喷嘴能够产生不同的超声速气流包裹,可以在适当的场合发挥各自的功效。针对扁平气流(二维)和柱状气流(轴对称)两种进行了灭火效果对比。结果表明,二维喷嘴对长条状燃烧物的灭火效果较好,而轴对称喷嘴对类似球状的燃烧物的灭火效果较好(图6~8)。



**Figure 4.** Nozzles distribution design with combination type  
**图 4.** 采用组合方式的喷嘴布局设计

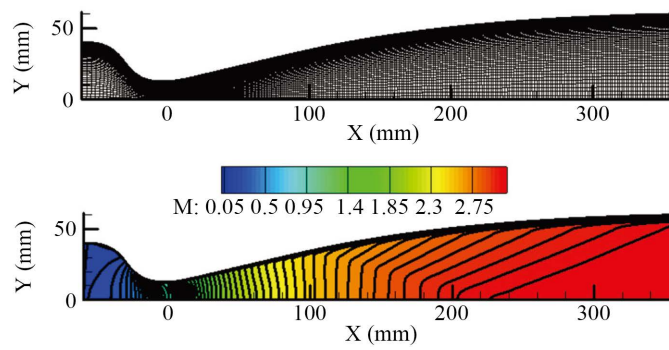


Figure 5. Numerical simulation of the nozzle flowfield

图 5. 喷嘴流场数值模拟

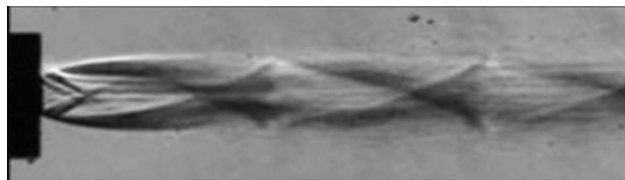


Figure 6. Supersonic jet

图 6. 超声速喷流



Figure 7. Supersonic jet nozzles

图 7. 超声速喷嘴



Figure 8. Demonstration of fire extinguishing using supersonic jet

图 8. 超声速喷流灭火演示

## 5. 结论与展望

本文对超声速气流灭火技术及初步设计进行了论述。研究表明超声速气流灭火技术简便易行,能够在实际生产生活中得到应用,并同时具备以下几个优点:高效、快速,洁净、环保,持续性好,降低水资源消耗、解决缺水地区的灭火困扰,防止水灭火、干粉灭火等方式对贵重物品的损坏及污染等,最大限度减小财产损失。超声速气流灭火技术有两个发展方向,一是大型化,主要用于工业灭火、森林灭火、城市消防等;二是小型化,主要使用对象为个人或家庭。作为对现有灭火技术的一种补充,有望在消防及防灾减灾工程中发挥一定作用。

## 基金项目

国家自然科学基金(11527802)和江苏省博士后科研资助计划(进站编号 45631)。

## 参考文献 (References)

- [1] 吴建勋, 吴越. 试论燃气、超声速与超声化学在发展灭火技术中的作用[J]. 消防技术与产品信息, 2005(5): 26-27.
- [2] 蔡俊德. 超音速灭火技术[J]. 消防技术与产品信息, 2003(1): 70-71.
- [3] 张森, 张成喆. 超音速灭火技术的设计基础 [J]. 消防技术与产品信息, 2007(12): 3-6.
- [4] 罗晖. 浅谈固定式超音速干粉灭火系统在烟草库房中的应用[J]. 广西城镇建设, 2011(5): 62-64.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2330-4677, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [jsst@hanspub.org](mailto:jsst@hanspub.org)