

金属镁粉尘爆炸机理及防护技术研究进展

代世梅, 谢乐源

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月11日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月24日

摘要

在镁合金生产加工过程中, 由于除尘的不及时, 存在大量的镁粉。在一定条件下, 镁粉被扬起, 遇到点火源, 产生爆炸危机人们生命和财产安全。本研究将对镁粉爆炸机理和防爆方面的研究加以总结, 归纳出镁粉的爆炸机理并根据镁粉的爆炸机理对防爆技术加以研究, 从而完善其相关产品的保护措施, 最大程度的减少金属镁粉尘爆炸的风险和危害。

关键词

金属镁粉尘, 爆炸机理, 惰化技术, 抑爆技术

Research Progress on Explosion Mechanism and Protection Technology of Magnesium Dust

Shimei Dai, Leyuan Xie

School of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Mar. 11th, 2024; accepted: Mar. 31st, 2024; published: Apr. 24th, 2024

Abstract

During the production and processing of magnesium alloys, a large amount of magnesium powder exists due to insufficient dust removal. Under certain conditions, magnesium powder is lifted up and encounters an ignition source, causing an explosion that threatens people's lives and property. This research will summarize the research on the explosion mechanism and explosion-proof of magnesium powder, conclude the explosion mechanism of magnesium powder, and study the explosion-proof technology according to the explosion mechanism of magnesium powder, so as to

improve the protection measures of its related products and minimize the risk and harm of metal magnesium dust explosion.

Keywords

Metal Magnesium Dust, Explosion Mechanism, Inerting Technology, Explosion Suppression Technology

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在粉尘爆炸事故中金属粉尘爆炸事故占总比例的一半, 其中镁粉爆炸的后果十分严重, 爆炸会产生的高温、高压和热辐射, 同时爆炸后燃烧较持久, 容易产生有毒有害气体, 对设备、环境和人造成较大的危害[1]。该爆炸还可能会引起粉尘的二次爆炸, 造成更为严重的后果。

随着建筑、汽车工业等领域的快速发展, 对高强度低硫钢的需求越来越大, 许多钢厂经常使用镁粉对普通钢进行深度脱硫, 以获得优质钢材。此外, 镁粉还广泛应用于航空、军工、石油、化工、制药、冶炼等行业[2]。镁粉比一般金属粉末更敏感, 其最小点火能量小于 10 mJ [3], 在镁的生产、使用和运输过程中容易发生爆炸。因此, 研究镁粉的爆炸机理并建立镁粉爆炸预测和防爆机制, 降低镁粉爆炸事故的发生率和严重程度, 对我国航空、化工、冶炼等行业健康发展具有重要意义。

本文通过查找相关的文献资料从中寻找和提取镁粉爆炸的相关理论, 熟悉镁粉爆炸的原因、掌握镁粉爆炸的机理。从镁粉爆炸的基础理论出发, 探究现阶段防治爆炸技术的优缺点, 从而为工业生产中的防爆抑爆提供一定的技术指导。

2. 金属镁粉尘的爆炸机理

2.1. 镁的物理化学性质

1) 物理性质: 镁粉是具有银白色金属光泽, 不溶于水、碱液, 溶于酸。

2) 化学性质: 镁属于活泼金属, 在潮湿的环境中容易与水反应生成氢气并放出大量的热; 分散在空气中形成粉尘云, 当粉尘云到达一定浓度范围时, 遇明火发生爆炸。镁粉不仅能在空气中燃烧还能在氮气和二氧化碳气体中燃烧。

2.2. 镁粉的爆炸机理

镁粉的爆炸在最开始是镁的燃烧, Breiter A 等人[4]针对镁合金进行了燃烧性能实验研究, 发现当合金中 Mg 的质量分数达到 60%时, 镁合金可以被火焰直接引燃。杨泗霖[5]通过研究分析, 发现 Mg 燃烧属于无火焰燃烧, 燃烧过程不会产生 Mg 蒸气, 属于表面燃烧, 即固相燃烧。但 Breiter A 等[4]人通过实验研究了镁粉燃烧机理, 发现镁粉的燃烧过程中存在着气相反应。同时, 曹泰岳等人[6]在实验中发现, 镁粉燃烧属于气固两相或多项燃烧组合状态, 当燃烧环境温度较低时燃烧发生在金属颗粒表面, 属于多相燃烧; 当温度较高时金属颗粒变为蒸汽属于蒸汽相燃烧。

也有研究表明镁粉的燃烧爆炸实质上是镁颗粒外层的氧化膜不能完全包裹金属颗粒的内芯, 氧化膜疏松多孔, 不能形成有效稳定的保护膜。氧化镁的熔点(3125 K) [7]明显高于镁的熔点(923 K), 纯镁粉尘

云被点燃后, 短时间内产生的温度难以熔化氧化膜。这使得点火过程中产生的高温和湍流首先通过多孔结构作用在金属镁上, 将镁颗粒内芯的外层熔化破碎成小雾滴。镁液滴会从氧化膜的孔隙中扩散出去, 这是一个非均相缩核反应过程。当纯镁尘云浓度大于 250 g/m^3 时, 爆炸过程产生的高温大于氧化镁熔点 [8]。氧化膜处于熔融状态, 在激波作用下更容易破碎, 使镁颗粒未熔化的中心部分在周围高温条件下逐渐熔化汽化, 逐渐转变为均相缩核反应过程。

当前已有大量的文献对金属镁粉尘的燃烧爆炸机理做了研究, 并取得了有效的进展, 但在实际情况中金属镁粉尘的燃烧爆炸通常是伴随着表面燃烧和蒸汽燃烧的一个混合过程, 且镁粉尘颗粒也是伴随着非均相缩核和均相缩核同时进行的过程。对金属镁粉尘的爆炸机理还没有结合实际情况进行更精确的研究, 因此仍需更进一步开展研究。

3. 镁粉爆炸防护技术

粉尘爆炸必须要满足三大要素和五大条件, 三大要素有点火源、可燃性粉尘、助燃性气体, 在以上要素的基础上, 镁粉必须在一定粒径内并且存在受限空间才能发生爆炸。现阶段粉尘爆炸防护技术可分为预防爆炸技术和防护爆炸技术两种。

预防爆炸技术是探测器在粉尘爆炸发生前或者发生中探测到爆炸信号, 采取的气态或固态惰化技术等手段来阻止粉尘云的爆炸, 降低爆炸危险性; 防护爆炸技术是当粉尘爆炸发生后, 通过对爆炸结果采取某些措施来有效地减少粉尘爆炸产生的危害, 减少经济损失。目前常见的防护爆炸技术包括采用泄爆、抑爆和抗爆等手段。

金属镁的活泼性, 使得金属镁粉尘云的危险性极大, 镁粉尘云在一定的浓度范围内遇到微小点火源会发生强烈的爆炸, 特别是粒径越小的镁粉尘爆炸越剧烈, 带来的伤害越高。在现在超细镁粉的应用越来越广泛, 那么传统的泄爆和抑爆技术是否适用于当前条件的金属镁粉尘还需要进行进一步的研究。

3.1. 抑爆技术

Mg 粉尘的抑爆技术主要是通过使用抑爆系统来实现的, 抑爆系统主要通过接收探测器发出的电信号转发给控制系统, 再由控制系统控制抑爆器喷出抑爆剂, 减弱金属镁粉尘的爆炸。与抗爆、隔爆和泄爆技术措施相比抑爆的优点主要体现在以下几个方面 [9]: ① 有效的抑制粉尘爆炸过程中的有毒有害气体、易燃易爆物质和爆炸产生的明火窜出设备; ② 抑爆技术对设备要求较低, 一般设备满足 0.1 MPa 以上即可; ③ 抑爆技术对设备的位置没有要求, 该技术即可以适用于容易发生二次爆炸的设备也适用于没有开设泄爆口的设备。

在工业生产活动中常用的抑爆剂有水、卤代烃、粉末及混合型抑爆剂等。考虑到金属镁粉的物理和化学性质, 选择抑爆剂应该要考虑 2 个方面: ① 金属镁粉化学性质比较活泼, 在一定条件下能和水反应生产氢气, 氢气可促进燃烧爆炸, 所以在镁粉的燃烧爆炸过程中不能用水作为抑制剂; ② 金属镁粉尘在常温下能与氯、溴和卤代烷进行反应生成的氯化镁可以对镁粉的燃烧爆炸起催化作用。因此金属镁粉尘的抑爆剂不能使用 1211、四氯化碳等灭火剂。

根据上述金属镁粉的特性选用抑爆剂应该选用不与镁发生反应的, 同时不会产生有毒有害气体的抑爆剂, 即可选用 7150 和粉末抑爆剂等, 该抑爆剂在作用时可以覆盖镁金属的表面, 隔绝空气的进入, 并且增加镁的重量防止再次扬起从而达到阻止燃烧的目的。

3.2. 泄爆技术

泄爆技术作为一种有效的防护技术, 广泛应用于有爆炸风险的船舶和设备。其实质是安装在容器上

的泄压装置在爆炸后通过排气口的破裂, 使得高温火焰和压力波被快速释放, 进一步避免了因容器破裂而发生的重大事故[10]。现较成熟的泄爆装置包含 RSBP 泄爆装置和无焰泄放装置 IQR 系统两种。

RSBP 泄爆装置可分为爆炸泄放装置(粉尘泄爆装置)和 FLEX 无焰泄爆装置, 较前一装置 FLEX 无焰泄爆装置是不会产生火焰的排放, 更有效的保护人员的安全, 但无法有效地过滤烟雾。

无焰泄放装置 IQR 系统由防爆板和灭火模块组成, 可以有效地消除爆炸产生的火焰, 降低气体温度, 同时还能消除爆炸产生的高压。

3.3. 惰化技术

工业上常用的惰化技术有气体惰化和粉尘惰化技术两种。针对金属镁粉尘惰化技术的研究已经进行到了一定程度, 并取得了一定的成果。

Li G 等[11]采用 20L 球形爆炸装置, 研究了常见的三种惰性气体(Ar、N₂、CO₂)氛围下金属镁粉尘的爆炸特性。钟圣俊等[12]假设气体在均匀混合的情况下, 在采用加压或者抽真空的措施下, 得到了该条件下惰化次数的计算方法, 并在设备采用惰化之后提出了惰化时间的计算公式, 并在该公式的基础上进一步提出了估算惰化流量的经验公式并结合实例进行了验证。李亚男等人[13]通过实验进行了不同粒径, 浓度和抑制剂种类对镁粉爆炸特性的影响, 发现不同粒径抑制剂 NH₄H₂PO₄ 对镁粉爆炸抑制效果随粒径增大而减小。其中 NH₄H₂PO₄ 抑制为化学和物理相互作用, CaCO₃ 主要从物理方面来实现惰化作用。

尽管现阶段对金属镁粉尘爆炸的防护已经进行了大量的研究, 但研究还处于初级阶段, 在实际生活中还有许多方面没有被考虑到。并且传统的抑爆剂在使用过程中一般是会污染原料改变原料的特征, 所以在抑爆剂的抑爆性能和安全性能上面还需研究和探索。

4. 结论

针对当前我国对粉尘爆炸, 特别是金属粉尘爆炸少有研究, 本文主要是从 2 个方面, 即金属镁粉尘的燃烧爆炸机理和爆炸防护方面对金属镁粉尘的燃烧爆炸过程和机理进行了阐述, 对当前取得的一些研究成果进行了分析, 得出了以下结论。

1) 在对金属镁粉爆炸采取防护措施时, 应该从金属镁粉的爆炸机理和爆炸形成的条件出发, 在防护措施上并不限于单一的措施, 可以采用惰化和抑爆技术两者相结合的方法措施。

2) 在金属镁粉的抑爆系统中, 通常抑爆剂选用粉末和 7150 这两种抑爆剂, 7150 抑爆剂有更好的抑爆效果, 因为 7150 在抑爆炸的过程中自身也发生化学反应, 反应物可覆盖在金属镁粉尘上, 隔绝空气有良好的抑爆效果。

3) 在金属镁粉的惰化技术上, 采用 NH₄H₂PO₄ 会有更好的惰化性, NH₄H₂PO₄ 在惰化过程中自身会吸热分解, 分解物偏磷酸铵、聚磷酸铵可以粘附在燃烧的金属镁粉尘表面隔绝空气。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(项目批准号: YKJCX2220710)。

参考文献

- [1] 谭迎新, 霍晓东, 尉存娟. 不同粒度铝粉在水平管道内的爆炸压力测定[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 80-83.
- [2] Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., *et al.* (2020) Magnesium Matrix Composite for Biomedical Applications through Powder Metallurgy—Review. *Materials Today: Proceedings*, **27**, 736-741. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.003>
- [3] Sankhe, M., Bernard, S., Pellerin, S., *et al.* (2018) Pyrometric and Spectroscopic Measurements of Temperatures of

- Metallic Dust Combustion Ignited by Characterized Spark Discharge in a Hartmann Tube. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **47**, 488-499. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2883543>
- [4] Breiter, A., Kashporov, L.Y., Mal'tsev, V., *et al.* (1971) Combustion of Individual Aluminum-Magnesium Alloy Particles in the Flame of an Oxidizer-Fuel Mixture. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, **7**, 186-190. <https://doi.org/10.1007/BF00748969>
- [5] 杨泗霖. 防火与防爆[M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1991.
- [6] 曹泰岳, 张为华, 王宁飞. 轻金属颗粒燃烧理论研究进展[J]. 推进技术, 1996(2): 82-87.
- [7] Tsai, Y.T., Huang, G.T., Zhao, J.Q., *et al.* (2021) Dust Cloud Explosion Characteristics and Mechanisms in MgH₂-Based Hydrogen Storage Materials. *AIChE Journal*, **67**, e17302. <https://doi.org/10.1002/aic.17302>
- [8] Xiong, X., Gao, K., Mu, J., *et al.* (2022) Study on Explosion Characteristic Parameters and Induction Mechanism of Magnesium Powder/Hydrogen Hybrids. *Fuel*, **326**, Article ID: 125077. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125077>
- [9] 王海福, 冯顺山. 防爆学原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [10] Wang, Q., Jin, S., Luo, Z., *et al.* (2023) Flame Propagation Characteristics of Methane Explosion under Different Venting Conditions. *Fuel*, **334**, Article ID: 126721. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126721>
- [11] Li, G., Yuan, C., Fu, Y., *et al.* (2009) Inerting of Magnesium Dust Cloud with Ar, N₂ and CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, **170**, 180-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.121>
- [12] 钟圣俊, 李刚, 史建业. 惰化设计方法及其在煤粉干燥工艺中的应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 118-21.
- [13] 谭迎新, 李亚男. 磷酸二氢铵对铝粉的爆炸抑制研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(4): 458-461.