DOI: 10.11883/bzycj-2025-0362

氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数的变化规律*

纪文涛[1,2,3], 肖海利[1,2,3], 吕先舒[1,2,3], 侯振海[1,2,3], 孟令宣[1,2,3], 王雅歌[1,2,3], 王　燕[1,2,3]

（1. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000;
2. 河南省燃爆动力灾害预警与应急工程技术研究中心, 河南 焦作 454000;
3. 煤炭安全生产与清洁利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000）

摘要： 在钛基固态金属储氢技术应用及钛金属制品生产加工过程中极易形成氢气/钛粉两相体系, 具有较高的爆炸风险。为探究氢气/钛粉两相体系的爆炸特性, 采用 20 L 球形爆炸装置, 在氢气体积分数为 0%～30%、钛粉粉尘质量浓度为 100～700 g/m^3 范围内, 对氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数的变化规律进行了研究, 并结合爆炸产物, 分析了爆炸强度参数变化规律形成机理。结果表明, 氢气的存在会显著影响钛粉的爆炸强度。总体上, 不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力随氢气体积分数的增大先降低后升高再降低, 当氢气体积分数为 4% 时降至最低, 当氢气体积分数为 29% 时升至最高; 不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力上升速率随氢气体积分数的增大先降低后升高, 当氢气体积分数为 4% 时降至最低, 当氢气体积分数为 30% 时升至最高。氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力同样随氢气体积分数的增大先降低后升高再降低, 在氢气体积分数为 4% 时降至最低, 在氢气体积分数为 29% 时达到峰值; 最大爆炸压力上升速率随氢气体积分数的增大先降低后升高, 当氢气体积分数为 4% 时达到最小值, 随后持续上升, 在氢气体积分数为 30% 时达到峰值。爆炸产物分析结果表明, 低浓度氢气会导致或加剧钛粉的不完全氧化反应, 进而导致钛粉爆炸强度降低; 当氢气体积分数增至临界值后, 氢气的自主燃烧将促进钛粉与氮气之间的反应, 并促使爆炸过程由异相燃烧向均相燃烧转变, 进而导致钛粉爆炸强度提高。

关键词： 钛粉; 氢气; 两相体系; 爆炸压力; 爆炸压力上升速率

中图分类号： O389　　**国标学科代码：** 13035　　**文献标志码：** A

Variation of explosion strength parameters in hydrogen/titanium dust two-phase systems

JI Wentao[1,2,3], XIAO Haili[1,2,3], LYU Xianshu[1,2,3], HOU Zhenhai[1,2,3],
MENG Lingxuan[1,2,3], WANG Yage[1,2,3], WANG Yan[1,2,3]

（1. *College of Safety Science and Engineering*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*;
2. *Explosion Dynamic Disaster Early Warning and Emergency Engineering Technology Research Center of Henan Province*, *Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*;
3. *Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization*, *Jiaozuo* 454000, *Henan*, *China*）

Abstract: The advancement of titanium-based solid-state hydrogen storage technologies and titanium manufacturing processes inherently involves the formation of hydrogen/titanium dust hybrid mixtures, which present substantial explosion hazards. To investigate the explosion behavior of such two-phase systems, this study systematically examined the variation patterns of explosion intensity parameters in hydrogen/titanium dust hybrid systems using a standardized 20 L spherical

* **收稿日期：** 2025-11-04；**修回日期：** 2025-12-16
基金项目： 国家自然科学基金（52374197, 52474217）; 河南省自然科学基金（252300421106）; 河南省科技研发计划联合基金（235200810079）; 河南省高校科技创新团队（25IRTSTHN005）
第一作者： 纪文涛（1989—　），男, 博士, 教授, jiwentao@hpu.edu.cn
通信作者： 王　燕（1982—　），女, 博士, 教授, yanwang@hpu.edu.cn

explosion vessel. The experimental matrix covers hydrogen volume fraction ranging from 0% to 30% and titanium dust mass concentrations from 100 to 700 g/m^3. Specifically, titanium dust concentrations were tested at seven discrete levels (100, 200, 300, 400, 500, 600, and 700 g/m^3), while hydrogen volume fractions were selected at eight critical values (4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 29%, and 30%). Dynamic parameters, including explosion pressure and rate of explosion pressure rise, were synchronously recorded. Furthermore, the phase composition and surface chemical states of explosion residues were characterized using X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). This integrated approach provides in-depth insights into the macroscopic evolution of explosion intensity with varying gas-solid ratios and elucidates the underlying microscopic reaction mechanisms. Experimental results demonstrate that hydrogen volume fraction critically modulates explosion severity. The explosion pressure exhibits a characteristic three-stage dependence on hydrogen volume fraction: it initially decreases, reaching a minimum at 4% H_2, subsequently increases to a maximum at 29% H_2, and finally declines at higher volume fractions. Correspondingly, the maximum rate of pressure rise rate decreases to its lowest value at 4% H_2 before increasing continuously up to 30% H_2. The maximum explosion pressure shows an analogous trend, peaking at 29% H_2 after an initial reduction, while the maximum rate of pressure rise reaches its minimum at 4% H_2 and peaks at 30% H_2. Residue analysis indicates that at low hydrogen volume fraction (<4%), incomplete oxidation of titanium predominates, thereby reducing explosion intensity. Beyond the critical threshold of 4% H_2, hydrogen self-combustion promotes titanium-nitrogen reactions and facilitates the transition from heterogeneous to homogeneous combustion, significantly enhancing explosion severity. This investigation provides fundamental insights into the explosion dynamics of hydrogen/titanium dust mixtures and delivers essential parameters for risk assessment and safety mitigation in related industrial applications.

Keywords: titanium powder; hydrogen; two-phase system; explosion pressure; explosion pressure rise rate

氢气作为一种低碳、高效、可再生的清洁能源，是人类社会“深度脱碳”的重要选择[1-3]。但氢气具有易氢蚀、密度低、易扩散、易燃爆等特点，导致其储运成本和安全风险过高，严重制约了氢能的利用。因此，氢气的高效、安全储运是氢能应用的关键。固态金属储氢技术具有储氢密度高、安全性好、吸放氢速度稳定等优势[4]，是目前最具应用前景的储氢技术之一[5]。在常见的金属储氢材料中，钛基金属储氢材料因其储氢密度高（质量分数为 4%）、原材料来源广泛、成本低廉等优势而备受关注。然而，在基于氢化钛（TiH_2）可逆反应的钛基固态储氢技术应用过程中，即 TiH_2 的制备以及释氢过程中，容易形成氢气与钛金属粉尘共存的两相体系。此外，随着工业流程的复杂化与集成化，氢气/钛粉两相体系也广泛存在于钛金属制备、加工等环节。若因操作失误或设备故障引发爆炸，极易造成较大的人员伤亡和财产损失。例如，2010 年美国 AL Solutions 公司发生爆炸事故，该事故最初由金属工具作业时产生的机械火花引燃悬浮的钛锆粉尘云引发，但在随后的消防扑救过程中，水基灭火系统与高温钛锆粉尘发生剧烈反应，生成大量氢气，最终诱发氢气与钛锆粉尘发生耦合爆炸，导致事故扩大，最终导致 3 人死亡，1 人受伤[6]。因此，探索氢气/钛粉两相体系的爆炸特性与机理，对相关领域的安全防护设计具有重要意义。

爆炸强度参数是反映介质爆炸特性的关键参数，同时也是涉爆场所危险区域划分、通风系统设计、防爆设备选型、安全操作规程制定、风险评估管理以及应急方案制定的重要依据，主要包括爆炸压力（p_{ex}）、爆炸压力上升速率（$(dp/dt)_{ex}$）和爆炸指数等。目前，学者们已经对单相氢气和钛粉爆炸强度参数变化规律进行了大量研究，基本明确了不同条件下单相氢气和钛粉爆炸强度参数的变化规律[7-15]。但是，氢气和钛粉两相体系的爆炸过程是一个耦合了氢气均相燃烧与钛粉异相燃烧的复杂过程，且受实际生产过程中氢气和钛粉粉尘浓度动态变化的影响，氢气和钛粉两相体系的爆炸特性更加复杂。目前，已有学者针对氢气/镁粉和氢气/铝粉两相体系爆炸强度进行了初步探究[16-26]，但鉴于钛粉自身特殊的物化属性及燃爆特性，已有氢气/镁粉、氢气/铝粉两相体系爆炸特性的研究结果可为探究氢气/钛粉两相体系提供参考，但不能作为依据。尽管已有学者开展了氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数变化规律研究[27-29]，但相关研究选取的氢气和钛粉粉尘浓度范围有限，难以全面反映氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数的变化规律。

基于此，本文中拟采用标准 20 L 球形爆炸装置，对多种不同气体体积分数与钛粉粉尘浓度配比下氢气/钛粉两相体系爆炸压力及爆炸压力上升速率的变化规律进行研究，并结合爆炸产物表征分析结果，分析氢气/钛粉两相体系的爆炸机理，以期为钛基固态金属储氢技术的应用安全及钛金属行业的生产安全提供理论依据。

1　实验装置与材料

1.1　实验装置

采用标准 20 L 球形爆炸装置开展相关实验，实验系统结构如图 1 所示。该实验装置由爆炸容器、喷粉系统、点火系统、配气系统、控制系统和数据采集系统组成。爆炸容器为带夹层的不锈钢球形容器，容积为 20 L，夹层中循环通入冷却水，使爆炸容器内的温度保持稳定，从而在最大程度上保证实验数据的准确性以及实验的可重复性。球体顶部设置有可拆卸法兰盖，用以安装点火头及清理爆炸实验后的粉尘残渣。底部安装有分散阀，与气粉两相阀相连接。球体正中设有可视化窗口，可以直接观察爆炸过程。侧面接口分别与真空泵和排气阀相连，真空泵用于在喷粉前将容器内部抽至所需负压，保证在粉喷完毕后，容器内压力等于环境压力；排气阀则用来排出爆炸发生后在容器内部燃烧生成的废气。球体背面安装有压力传感器，用来测定并记录爆炸过程中的压力。本实验采用符合 GB/T-16426 的 10 kJ 化学点火头（锆粉、硝酸钡、过氧化钡的质量之比为 4∶3∶3，总质量为 2.4 g）进行点火。

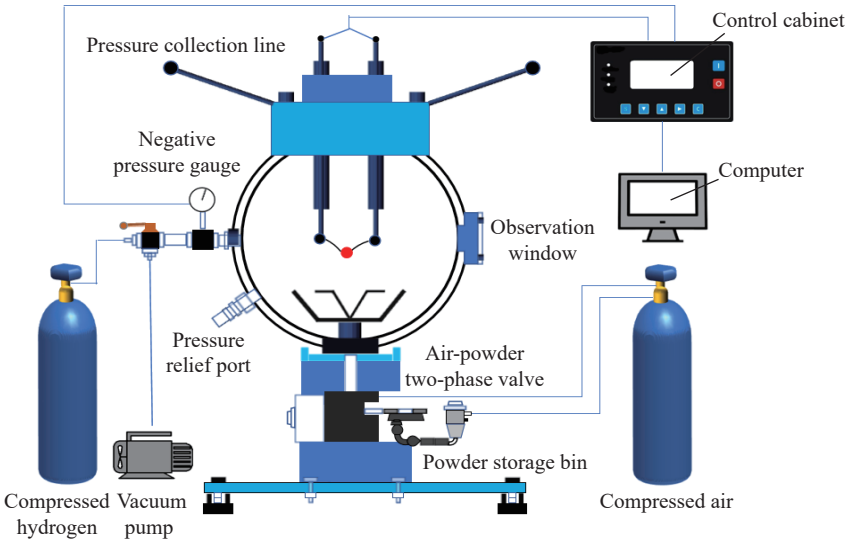


图 1　20 L 球形爆炸实验装置示意图

Fig. 1　20 L spherical explosion experimental device

为确保粉尘云分散的均匀性，在实验前对喷粉压力、喷粉时间、点火延迟时间进行测试，测得的最佳喷粉压力为 2.0 MPa，喷粉时间为 50 ms，点火延迟时间为 60 ms。由于粉尘在球内的分布存在着一定的随机性，因此，每组实验至少重复 3 次，取相对稳定的 3 次实验结果的算术平均值进行分析，以减小粉尘分布的随机性导致的实验误差。

1.2　实验材料

实验所的钛粉购自上海攀田纳米粉体材料有限公司，纯度为 99.9%；氢气购自河南源正特种气体有限公司，纯度为 99.999%。实验前。将钛粉置于真空干燥箱中于 50 ℃ 干燥 10 h，以避免湿度对钛粉及氢气/钛粉两相体系爆炸特性的影响。采用超高速智能粒度分析仪（Mastersize3000）和扫描电子显微镜（Merlin Compact）对钛粉的粒径分布和形貌特征进行分析，结果如图 2 所示。钛粉粒径基本呈正态分布，中位直径（D_{50}）为 27.70 μm，钛粉颗粒呈不规则形状，表面粗糙，局部凸起，棱角较多。选取粒径为 27.70 μm 的钛粉是因为该粒径介于典型细颗粒（粒径小于 10 μm）与粗颗粒（粒径 50 μm）之间，其作为基准粒径有利于

揭示气固两相相互作用的普适规律。同时，该粒径与钛合金机械加工、钛基储氢材料制备产生粉尘的主要分布区间(10～50 μm)较吻合。

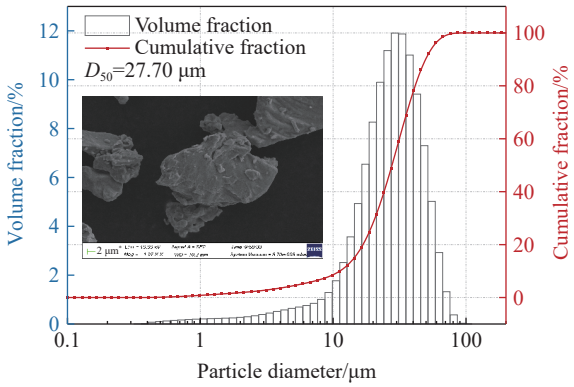


图 2　钛粉粒径分布

Fig. 2　Particle size distributions of Ti dust

2　实验结果与分析

2.1　单相氢气与钛粉爆炸超压变化规律

开展氢气/钛粉两相体系爆炸超压测试实验前，先对单相钛粉及氢气的爆炸超压进行测试，结果如图 3～4 所示。由图 3 可知，单相钛粉的爆炸压力 p_{ex} 和爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{ex}$ 均随钛粉粉尘浓度的增加先升高后降低，分别在钛粉粉尘浓度(质量浓度)为 500 和 600 g/m^3 时达到最大值，分别为 0.53 MPa 与 24.76 MPa/s。由图 4 可知，氢气爆炸压力 p_{ex} 随氢气体积分数(φ_{H_2})的增加而先升高后降低，并在氢气体积分数为 29% 时达到最大值(0.69 MPa)；爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{ex}$ 随氢气体积分数的增加而升高，在氢气体积分数为 30% 时达到最大值(229.97 MPa/s)。相比之下，氢气的最大爆炸压力 p_{max} 显著高于钛粉的，最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 远大于钛粉的。

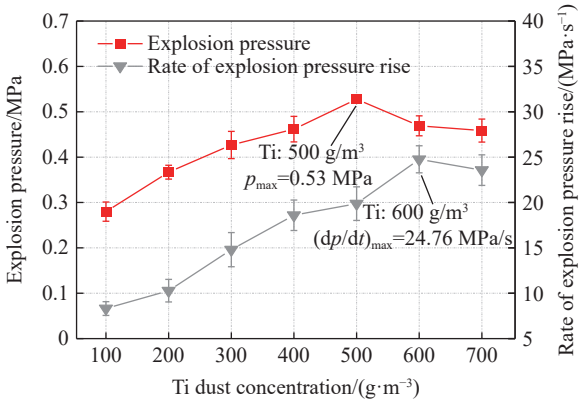


图 3　单相钛粉爆炸超压变化规律

Fig. 3　Patterns of overpressure changes in Ti dust explosions

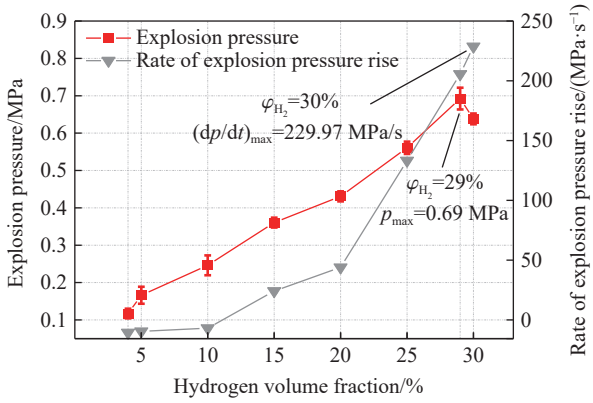


图 4　单相氢气爆炸超压变化规律

Fig. 4　Patterns of overpressure changes in H_2 explosions

2.2　氢气/钛粉两相体系爆炸超压变化规律

为全面反映氢气/钛粉两相体系的爆炸超压变化规律，选取 5% 作为氢气体积分数变化梯度，100 g/m^3 为钛粉粉尘质量浓度变化梯度，在 0%～30% 氢气体积分数和 0～700 g/m^3 钛粉粉尘质量浓度范围内，对不同气/粉配比下氢气/钛粉两相体系的爆炸压力和爆炸压力上升速率进行测试，结果如图 5～6 所示。由图 5 可知，在 0%～4% 氢气体积分数范围内，当钛粉粉尘浓度为 100 g/m^3 时，其爆炸压力随氢气体积分数的增大而升高；当钛粉粉尘浓度为 200～700 g/m^3 时，其爆炸压力随氢气体积分数的增大而降低。这是

因为，粉尘浓度为 100 g/m^3 的钛粉在爆炸过程中氧气充足，少量氢气的加入不仅不会对其氧化反应造成显著影响，还会通过自身燃烧提供额外的热量，进而提升其爆炸压力。随着钛粉粉尘浓度提升至 200～700 g/m^3，其在爆炸过程中对氧气的需求量显著提升，受氧气浓度的影响也越来越大。此时，钛粉在与低浓度氢气混合爆炸过程中占主导地位。低浓度氢气的存在不仅会降低容器内的氧气浓度，还会优先与氧气反应，消耗部分氧气，这将导致或加剧钛粉爆炸过程中的不完全氧化反应，进而导致钛粉爆炸压力的降低。

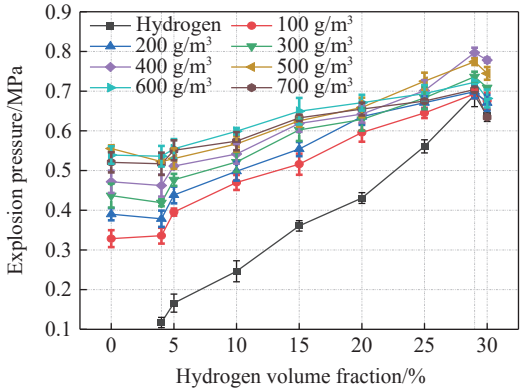


图 5　氢气/钛粉两相体系爆炸压力变化规律

Fig. 5　Variation patterns of explosion pressure in the H_2/Ti powder two-phase system

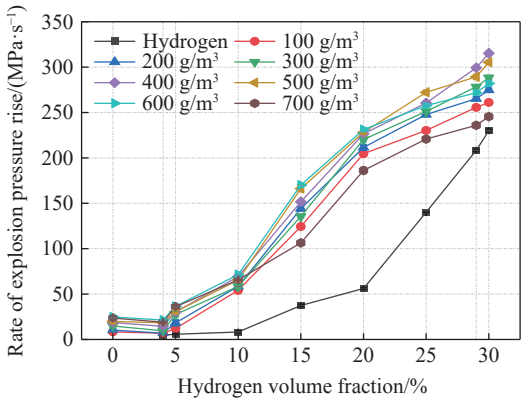


图 6　氢气/钛粉两相体系爆炸压力上升速率变化规律

Fig. 6　Variation patterns of explosion pressure rise rate in the H_2/Ti two-phase system

当氢气体积分数提升至 5% 后，7 种不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力均显著升高，且随氢气体积分数的增大而升高。这是因为，氢气体积分数高于 5% 时开始具备自主燃烧性能，两相体系爆炸过程将逐渐由钛粉主导转变为由氢气与钛粉共同主导。虽然氢气体积分数的增大将进一步降低和消耗容器内的氧气，进而对钛粉氧化反应造成影响。但是，氢气燃烧产生的高温（火焰温度可达 2 045 ℃[14]）将可能激发或促进钛粉与氮气的反应（$2Ti+N_2$—2TiN，反应激发温度高于 800 ℃[30]），释放出更多的热量，进而导致钛粉爆炸压力的提升。当氢气体积分数增大至 29% 时，7 种不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力均达到峰值，并在氢气体积分数为 30% 时出现明显的降低。这是由于，当氢气体积分数超过 29% 时，氢气燃烧强度降低，其对钛粉与氮气反应的激发作用也将降低，双重作用导致两相体系的爆炸压力降低。

由图 6 可知，在 0%～4% 的氢气体积分数范围内，7 种不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力上升速率均随氢气体积分数的增大而降低。这是因为，体积分数为 0%～4% 的氢气不具备自主燃烧性能，7 种不同粉尘浓度的钛粉在与其混合爆炸过程中，爆炸压力上升速率主要由钛粉燃烧速率控制，而钛粉燃烧速率主要受爆炸容器内氧气浓度的影响。低浓度氢气的存在不仅会降低容器内的氧气浓度，还会优先与氧气发生反应，消耗一部分氧气，导致钛粉燃烧速率降低，进而导致整个体系爆炸压力上升速率的降低。

当氢气体积分数提升至 5% 后，7 种不同粉尘浓度的钛粉的爆炸压力上升速率均显著增大，且随氢气体积分数的增大而升高。这是因为，当氢气体积分数增大至 5% 后，开始具备自主燃烧性能。此时，两相体系的爆炸压力上升速率开始由氢气与钛粉共同主导，并随着氢气体积分数的增大，逐渐演变为由氢气主导。氢气爆炸为均相燃烧过程，其在相同体积分数条件下的燃烧速率远超钛粉。因此，具备自主燃烧性能的氢气能够显著提升钛粉的爆炸压力上升速率，且氢气体积分数越大，提升效果越好。

进一步分析图 5 和 6，可以获得不同体积分数氢气氛围下，多种不同粉尘浓度钛粉的爆炸压力和爆炸压力上升速率的最大值，即钛粉在不同体积分数氢气氛围下的最大爆炸压力（p_{max}）与最大爆炸压力上升速率（$(dp/dt)_{max}$），结果如表 1 所示。

基于表 1，可以得到以氢气体积分数为自变量的氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率的变化规律，如图 7 所示。由图 7(a) 可知，随着氢气体积分数由 0% 增至 30%，氢气/钛粉两

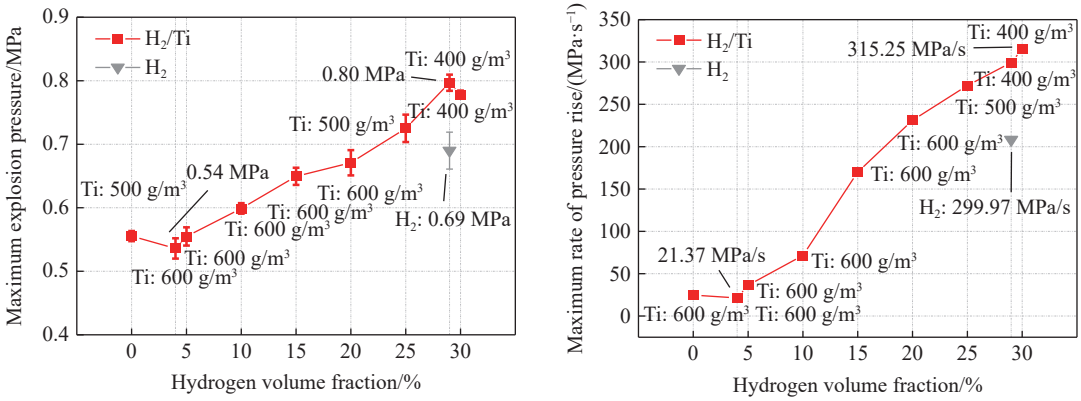
相体系的最大爆炸压力总体呈现先降低后升高再降低的变化趋势，当氢气体积分数为 4%、钛粉粉尘浓度为 600 g/m^3 时，两相体系的最大爆炸压力取得最小值(0.54 MPa)；当氢气体积分数为 29%、钛粉粉尘浓度为 400 g/m^3 时，两相体系的最大爆炸压力取得最大值(0.80 MPa)，该值既高于纯钛粉，又高于纯氢气。

由图 7(b) 可知，随着氢气体积分数的增大，氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力上升速率呈现先降低后升高的趋势，当氢气体积分数为 4%、钛粉粉尘浓度为 600 g/m^3 时，两相体系的最大爆炸压力上升速率取得最小值(21.37 MPa/s)；当氢气体积分数为 30%、钛粉粉尘浓度为 400 g/m^3 时，两相体系的最大爆炸压力上升速率取得最大值(315.25 MPa/s)，该值同样既高于纯钛粉，又高于纯氢气。

表 1　不同氢气体积分数氛围下钛粉的最大爆炸压力与最大爆炸压力上升速率

Table 1　Maximum explosion pressure and maximum explosion pressure rise rate of Ti dust at different H_2 volume fractions

氢气体积分数/%	最大爆炸压力/MPa	最大爆炸压力上升速率/(MPa·s^{-1})
0	0.56	24.76
4	0.54	21.37
5	0.56	36.46
10	0.60	71.54
15	0.65	170.04
20	0.67	231.21
25	0.73	272.26
29	0.80	299.33
30	0.78	315.25



(a) Maximum explosion pressure　　(b) Maximum explosion pressure rise rate

图 7　氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力与最大爆炸压力上升速率变化规律

Fig. 7　Variation patterns of the maximum explosion pressure and the maximum explosion pressure rise rate in H_2/Ti powder two-phase systems

2.3　氢气/钛粉两相体系爆炸产物分析

2.3.1　爆炸产物 X 射线衍射分析

为进一步研究氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数变化规律形成机理，对爆炸产物进行 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)测试，结果如图 8 所示。

由图 8(a) 可知，粉尘浓度为 600 g/m^3 的纯钛粉爆炸产物仅包含 TiO_2 和 TiN，表明 600 g/m^3 的纯钛粉在爆炸过程中主要与氧气发生氧化反应，同时伴随有高温下与氮气的氧化反应。由图 8(b)、(c)、(d) 可知：当粉尘浓度为 600 g/m^3 的钛粉混入体积分数为 10% 的氢气后，爆炸产物中产生了低价态钛氧化合物 Ti_3O_5(Ti^{3+}/Ti^{4+}混合价态)；当氢气体积分数提升至 20% 时，形成了更低价态的钛氧化合物 Ti_2O_3；当氢气体积分数提升至 25% 时，形成了更低价态的钛氧化合物 TiO。这表明，氢气在与钛粉混合爆炸过程中，将优先与氧气发生反应，消耗体系中的氧气，进而导致钛粉与氧气之间发生不完全反应，逐步将钛的氧化产物从高价态(TiO_2)经中间态(Ti_3O_5)转向低价态(Ti_2O_3、TiO)。

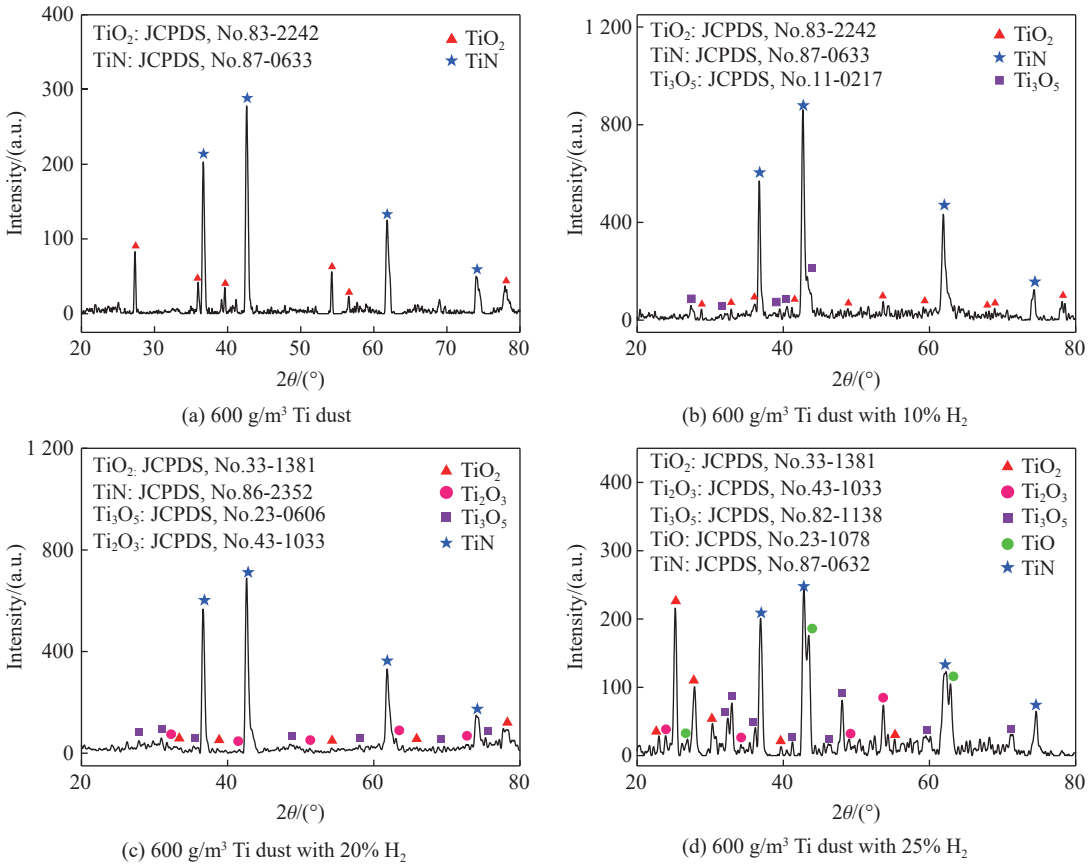


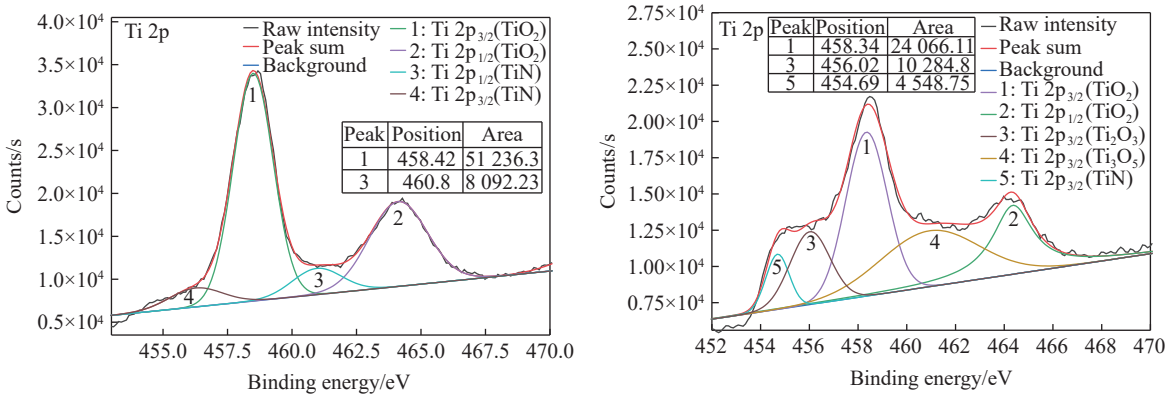
图 8　爆炸产物的 XRD 谱

Fig. 8　XRD patterns of explosion products

2.3.2　爆炸产物 X 射线光电子能谱分析

为进一步研究氢气/钛粉两相体系爆炸强度参数变化规律形成机理，采用 X 射线光电子能谱（X-ray photoelectron spectroscopy, XPS）对氢气/钛粉两相体系爆炸开展进一步分析。测试使用单色化 Al Kα X 射线源（能量为 1 486.6 eV），分析光斑尺寸设定为 500 μm，宽谱扫描以通过分析器的传输能量 100 eV 进行，而对 Ti 2p、O 1s 和 C 1s 核心能级区域的高分辨率扫描则采用 50 eV 通能，以获得更精确的化学态信息。所有光谱均参考吸附碳的 C 1s 特征峰（结合能设定为 284.8 eV）进行荷电校正，以消除表面荷电效应导致的结合能偏移。图 9(a) 与 (b) 分别展示了 600 g/m^3 纯钛粉及其与 20% 氢气两相体系爆炸产物 XPS 分析结果。根据图 9(a) 可知，钛的氧化产物中不仅含有钛的氧化物 TiO_x，还含有 TiN。为精确解析钛的化学态，对 Ti 2p 光谱进行分峰拟合。Ti 2p 谱图分解为自旋轨道分裂产生的 Ti $2p_{3/2}$ 和 Ti $2p_{1/2}$ 峰双峰。在拟合中，每个双峰的 2 个组分强度比 $A(\text{Ti } 2p_{1/2})/A(\text{Ti } 2p_{3/2})$ 等于 0.5，且其结合能之差 ΔE^b固定为 5.7 eV。对于图 9(a) 所示的纯钛粉爆炸产物，其 Ti 2p 谱图主要由 2 套双峰构成：主双峰的 Ti $2p_{3/2}$ 结合能位于 458.42 eV，归属于 TiO_2 中的 Ti^{4+}；次双峰的 Ti $2p_{3/2}$ 结合能位于 455.61 eV，归属于 TiN 中的 Ti^{3+}。相比之下，从图 9(b) 可以看出，氢气体积分数为 20% 的两相体系爆炸产物则呈现出更复杂的化学价态组成。Ti 2p 谱在结合能 $E^b(\text{Ti } 2p_{3/2})$ 为 458.34、456.02、460.92、454.69 eV 处分别归属于 Ti 在 $TiO_2(Ti^{4+})$、$Ti_2O_3(Ti^{3+})$、$Ti_3O_5(Ti^{3+}/Ti^{4+}$混合价态) 和 $TiN(Ti^{3+})$ 中的成键能。根据各拟合组分的峰面积可知，纯钛爆炸产物的主要状态为 $TiO_2(Ti^{4+})$ 和 $TiN(Ti^{3+})$，而在掺氢条件下，钛的价态分布更加多样化，且 TiO_2 对应的 XPS 峰面积明显减小，而 TiN 对应的 XPS 峰面积明显增大。爆炸产物虽仍以 $TiO_2(Ti^{4+})$ 为主，但出现了显著的 $Ti_2O_3(Ti^{3+})$、$Ti_3O_5(Ti^{3+}/Ti^{4+}$混合价态) 和 $TiN(Ti^{3+})$。这证实了氢气的引入促进了低价态钛氧化物的生成，同时促使更多 TiN 的生成，即氢气的添加将加剧钛粉在爆炸过程中与氧气之间的不完全反应，同

时促进钛粉与氮气之间的氧化反应。这与 XRD 的结论相互印证，符合氢气/钛粉两相体系爆炸强度的变化规律。



(a) 600 g/m³ Ti dust　　(b) 600 g/m³ Ti dust with 20% H_2

图 9　爆炸产物 XPS 图谱

Fig. 9　XPS patterns of explosion products

3　结　论

(1) 当氢气体积分数为 0%～4% 时，粉尘浓度为 100 g/m³ 的钛粉爆炸压力随氢气体积分数的增大而升高，粉尘浓度为 200～700 g/m³ 的钛粉爆炸压力随氢气体积分数的增大而降低；当氢气体积分数为 5%～30% 时，粉尘浓度为 100～700 g/m³ 的钛粉爆炸压力均随氢气体积分数的增大而先升高后降低，并均在氢气体积分数为 29% 时达到峰值。当氢气体积分数为 0%～30% 时，粉尘浓度为 100～700 g/m³ 的钛粉爆炸压力上升速率均随氢气体积分数的增大先降低后升高，并在氢气体积分数为 4% 时达到最小值，在氢气体积分数为 30% 时达到峰值。

(2) 当氢气体积分数为 0%～30% 时，氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力随氢气体积分数的增大先降低后升高再降低，在氢气体积分数为 4% 时降至最小值，在氢气体积分数为 29% 时达到最大值；最大爆炸压力上升速率随氢气体积分数的增大先降低后升高，在氢气体积分数为 4% 时降至最小值，在氢气体积分数为 30% 时达到最大值。氢气/钛粉两相体系的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率均高于纯钛粉与纯氢气，即氢气/钛粉两相体系的爆炸强度既高于纯钛粉又高于纯氢气。

(3) 在氢气与钛粉两相体系爆炸过程中，氢气将优先与氧气发生反应，消耗体系中的氧气，逐步将钛的氧化物从高价态（TiO_2）经中间态（Ti_3O_5）转向低价态（Ti_2O_3、TiO），即氢气的添加将加剧钛粉在爆炸过程中与氧气之间的不完全反应。同时，氢气燃烧产生的高温环境，还将促进钛粉与氮气之间的氧化反应，生成更多的 TiN。

参考文献：

[1] TU H L. Hydrogen energy: a global trend and China's strategy [J]. Engineering, 2021, 7(6): 703. DOI: 10.1016/j.eng.2021.04.006.

[2] ZHANG X Q. The development trend of and suggestions for China's hydrogen energy industry [J]. Engineering, 2021, 7(6): 719–721. DOI: 10.1016/j.eng.2021.04.012.

[3] YANG L, WANG S N, ZHANG Z H, et al. Current development status, policy support and promotion path of China's green hydrogen industries under the target of carbon emission peaking and carbon neutrality [J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10118. DOI: 10.3390/su151310118.

[4] 章楚. 氢能储运技术发展现状与前景展望 [J]. 能源化工财经与管理, 2024, 3(2): 1–9, 25.
ZHANG C. Development status and prospect of hydrogen energy storage and transportation technologies [J]. Finance and

Management of Energy Chemical Industry, 2024, 3(2): 1–9, 25.

[5] LIU Y F, ZHANG W X, ZHANG X, et al. Nanostructured light metal hydride: fabrication strategies and hydrogen storage performance [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 184: 113560. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113560.

[6] 李红玉, 樊运晓. 基于系统思考的 AL Solutions 粉尘爆炸事故分析 [J]. 安全与环境工程, 2016, 23(2): 90–95. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.02.018.
LI H Y, FAN Y X. Analysis of the dust explosion accident at AL Solutions based on system thinking [J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(2): 90–95. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.02.018.

[7] LU Y W, FAN R J, WANG Z R, et al. The influence of hydrogen concentration on the characteristic of explosion venting: explosion pressure, venting flame and flow field microstructure [J]. Energy, 2024, 293: 130562. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130562.

[8] WU H C, CHANG R C, HSIAO H C. Research of minimum ignition energy for nano titanium powder and nano iron powder [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(1): 21–24. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.10.002.

[9] ZHANG K, LUO T P, LI Y C, et al. Effect of ignition, initial pressure and temperature on the lower flammability limit of hydrogen/air mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(33): 15107–15119. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.224.

[10] HAN H, MA Q F, QIN Z K, et al. Experimental study on combustion and explosion characteristics of hydrogen-air premixed gas in rectangular channels with large aspect ratio [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 57: 1041–1050. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.125.

[11] YU J L, ZHANG X Y, ZHANG Q, et al. Combustion behaviors and flame microstructures of micro- and nano-titanium dust explosions [J]. Fuel, 2016, 181: 785–792. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.085.

[12] 董海佩, 程贵海, 李晓泉, 等. 钛粉尘云的爆炸特性 [J]. 中国粉体技术, 2018, 24(4): 32–36. DOI: 10.13732/j.issn.1008-5548.2018.04.007.
DONG H P, CHENG G H, LI X Q, et al. Explosion characteristic of titanium dust cloud [J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(4): 32–36. DOI: 10.13732/j.issn.1008-5548.2018.04.007.

[13] BOILARD S P, AMYOTTE P R, KHAN F I, et al. Explosibility of micron and nano-size titanium powders [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1646–1654. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.06.003.

[14] 李畅. 微米及纳米钛粉爆炸特性参数的理论与实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
LI C. Theoretical and experimental study on explosibility parameters of micro and nano titanium powders [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[15] 李世周. 典型固体抑爆剂对 TiH_2 粉尘云燃爆特性影响及抑爆机理研究 [D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2024. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000063.
LI S Z. Effects of typical solid suppressants on TiH_2 dust cloud explosion characteristics and explosion suppression mechanism [D]. Huainan, Anhui, China: Anhui University of Science and Technology, 2024. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2024.000063.

[16] TSAI Y T, HUANG G T, ZHAO J Q, et al. Dust cloud explosion characteristics and mechanisms in MgH_2-based hydrogen storage materials [J]. AIChE Journal, 2021, 67(8): e17302. DOI: 10.1002/AIC.17302.

[17] 王阳. 氢气/镁粉两相体系混合爆炸特性与机理研究 [D]. 河南焦作: 河南理工大学, 2023. DOI: 10.27116/d.cnki.gjzgc.2023.000386.
WANG Y. Investigation on hybrid explosion characteristics and mechanism of hydrogen/magnesium dust two-phase system [D]. Jiaozuo, Henan, China: Henan Polytechnic University, 2023. DOI: 10.27116/d.cnki.gjzgc.2023.000386.

[18] TSAI Y T, FU T, ZHOU Q. Explosion characteristics and suppression of hybrid Mg/H_2 mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(78): 38934–38943. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.145.

[19] CHENG Y F, SU J, LIU R, et al. Influential factors on the explosibility of unpremixed hydrogen/magnesium dust [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(58): 34185–34192. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.040.

[20] XIONG X Y, GAO K, MU J, et al. Experimental study on the explosion destructive ability of magnesium powder/hydrogen hybrids in large space [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 173: 237–248. DOI: 10.1016/j.psep.2023.02.091.

[21] WU X L, XU S, PANG A M, et al. Hazard evaluation of ignition sensitivity and explosion severity for three typical MH_2 (M= Mg, Ti, Zr) of energetic materials [J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1262–1268. DOI: 10.1016/j.dt.2020.06.011.

[22] DENKEVITS A, HOESS B. Hybrid H_2/Al dust explosions in Siwek sphere [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 509–521. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.03.024.

[23] YU X Z, YU J L, WANG C Y, et al. Experimental study on the overpressure and flame propagation of hybrid hydrogen/aluminum dust explosions in a square closed vessel [J]. Fuel, 2021, 285: 119222. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119222.

[24] 于小哲. 氢气/铝粉混合体系爆炸特性及火焰传播机理研究 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.004094.
YU X Z. Explosion characteristics and flame propagation mechanism of hydrogen/aluminum dust hybrid mixtures [D]. Dalian, Liaoning, China: Dalian University of Technology, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.004094.

[25] QIU D Y, CHEN X F, LIU L J, et al. Explosion characteristics and suppression evaluation of hydrogen mixed with low-concentration aluminum powder [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 58: 1552–1561. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.344.

[26] ZHU C C, GAO W, JIANG H P, et al. A comparative investigation of the explosion mechanism of metal hydride AlH_3 dust and Al/H_2 mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 1296–1305. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.178.

[27] CHENG Y F, SONG S X, MA H H, et al. Hybrid H_2/Ti dust explosion hazards during the production of metal hydride TiH_2 in a closed vessel [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(21): 11145–11152. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.189.

[28] CHENG Y F, WU H B, LIU R, et al. Combustion behaviors and explosibility of suspended metal hydride TiH_2 dust [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(21): 12216–12224. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.137.

[29] 李星国. 氢燃烧特性对氢内燃机性能的影响 [J]. 自然杂志, 2023, 45(1): 57–67. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2022.03.007.
LI X G. Effect of hydrogen combustion characteristics on the performance of hydrogen internal combustion engine [J]. Chinese Journal of Nature, 2023, 45(1): 57–67. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2022.03.007.

[30] 邬渊文, 庄汉锐, 张宝林. 高压氮气中自蔓延燃烧合成氮化钛 [J]. 无机材料学报, 1993, 8(4): 441–446.
WU Y W, ZHUANG H R, ZHANG B L. Self propagation high-temperature synthesis of titanium nitride in pressurized nitrogen atmosphere [J]. Journal of Inorganic Materials, 1993, 8(4): 441–446.

(责任编辑　蔡国艳)