《锆管室温闭端爆破试验方法》

编制说明（送审稿）

1.工作简况

1.1项目必要性简述

锆及锆合金的热中子吸收截面低，用锆合金代替不锈钢作核反应堆的结构材料，可以节省铀燃料1/2左右，良好的经济性推动了锆合金的研发。同时，锆合金具有适中的力学性能，良好的加工性能、抗腐蚀性能和较好的抗中子辐照性能，因此锆合金被普遍用作核动力水冷反应堆的燃料包壳管、压力管、导向管、仪表管、端塞棒和定位格架等结构材料。

近年来随着国家能源行业的不断发展，国家大力发展核能，锆合金管材产品需求量还在不断增加，随着近年来雾霾影响，改变我国以燃煤为主的能源结构，大力发展清洁能源，规模化核电建设，同时伴随“一路一带”战略实施，将核电推向国外市场，与此同时锆合金无缝管需求量将迅速增加。而目前国内锆管室温闭端爆破仍没有统一的标准，行业内均是采取供需双方协商的技术协议或依照ASTM B811执行。由于相关技术协议或ASTM B811中对锆管室温闭端爆破试验方法描述过于含糊，不同的检测机构在使用同一标准或技术协议上存在较大差异和不确定性，对最终产品的应用影响较为突出，有必要建立统一的技术规范。

1.2适用范围

本标准适用于室温下的锆合金管材闭端爆破试验检测。

锆合金管材爆破性能是在一端密封的情况下，以一定的升压速率由管材的另一端口注入性能较为稳定的液体介质，随着压力的增加，管材受到横向、径向及轴向的持续压力，其管壁最薄弱的部位最先发生塑性变形并最终导致破口的形成，其是检验相同性能条件下管材抵抗内部压力的最直接最迅速的方法。

对于锆合金管材，室温闭端爆破试验有着及其重要的作用，相比于蠕变、疲劳等试验，可以在最短时间内，最快捷有效的判断管材抵抗核燃料裂变能力。常规的室高温拉伸、平面应变收缩测试不能全部反应出该材料的性能要求，非常有必要在内部承受高压的条件下，测定管材横纵方向上承受压力的临界能力。进行高压爆破性能的检测，可以在一定程度上确保材料具备堆内的性能要求，目前美国材料协会已建立相应标准，主要适用于室温情况下的高压爆破试验，该技术已被国内的某些科研机构所采用。

1.3可行性

国核宝钛锆业股份公司、国核锆铪理化检测有限公司已经开展了大量锆管室温闭端爆破试验方法研究工作，目前该方法过程稳定、可靠，方法条件成熟，并持续近十年的产品检测工作。

1.4拟要解决的主要问题

1.4.1任务来源

根据国标委综合【2017】128号《国家标准委关于下达2017年第四批国家标准制修订计划的通知》要求，由国核宝钛锆业股份公司起草《锆管室温闭端爆破试验方法》国家标准，项目计划编号为20173511-T-610，计划完成年限2019年。

1.4.2标准项目编制单位

国核宝钛锆业股份公司（简称“国核锆业”）由国家核电技术公司和宝钛集团有限公司于2007年11月共同出资组建。国核锆业是集研发与生产为一体的核级锆材专业化公司，被确定为引进美国西屋公司AP1000全套核级锆材技术的唯一指定用户。

国核锆业产品体系涵盖核级海绵锆生产，锆合金熔炼、坯料制备及返回料加工，管、棒、板、带材成品制造等完整的核级锆材产业链。国核锆业生产线设计产能为：年产核级海绵锆2000吨、锆合金铸锭2000吨、板带材80吨、管棒材1000吨可以满足100台百万级核电机组用锆材的需要，生产规模与能力位居世界前列。

依托国核锆业而设立的“国家能源核级锆材研发中心” （简称“中心”），于2009年11月被国家能源局正式批准授牌，因此国核锆业成为集生产制造平台、科技研发平台和理化检测平台为一身的高科技技术领军企业。中心已成为核级锆材基础技术研究、应用性能研发与检测机构。

通过核级锆材技术的引进、吸收和在创新，国核锆业正在成为具备拥有各种堆型核级锆材生产技术、门类齐全、能够满足市场各类需求的综合性供应厂商。

国核锆铪理化检测有限公司，原名国核宝钛锆业股份公司理化检测中心，始建于2009年12月，主要从事稀有金属/黑色金属检测及技术咨询和技术服务。公司先后通过与美国和俄罗斯实验室、国内外能力认证机构比对验证，是核级材料检测领域的权威机构，2016年8月经工商行政注册，变更成立为独立法人检测公司。同时作为国家能源核级锆材研发中心不可缺少的关键组成部分，为国家核电事业提供重要保障和支持。

1.4.3 主要工作过程

（1）2018年年初，在国家标准委下达了《锆管室温闭端爆破试验方法》编制任务，国核宝钛锆业股份公司成立了项目组，确定了各成员的工作职能和任务，制定了工作计划和进度安排。

（2）2018年4月完成标准初稿，编制说明，召开项目组内部工作会议。项目组调研了国内外锆管室温闭端爆破试验方法，结合国内锆合金管材爆破的应用情况和经验，在收集、整理相关文献资料后，形成了试验方法的整体思路并开始方法试验研究，在此基础上形成了征求意见稿。

（3）2018年7月，全国有色金属标准化技术委员会稀有金属分标委会在哈尔滨市召开了《锆管室温闭端爆破试验方法》等国家标准的讨论会。来自西部新锆核材料科技有限公司、西部金属材料股份有限公司、广州有色金属研究院、西北有色金属研究院、遵义钛业股份有限公司、金堆城钼业股份有限公司、宝钛集团有限公司、宁夏东方钽业股份有限公司、广东省工业分析检测中心等单位的专家代表参加了会议。各代表对本标准（讨论稿）、编制说明、实验报告进行了认真、细致的讨论，并提出了对本标准的修改意见和建议。并形成以下会议意见：

1）将封面中“中华人民共和国国家质量监督检验总局”更改为“国家市场监督管理总局”；

2）3.术语及定义中增加“下列术语和定义适用于本标准”；

3）建议删除“4 符号及说明”条款内容；

4）将最大周向伸长率结果数值修约至1%；

5）将编制说明的格式按照最新版本进行更改。

与会代表一致同意，标准编制组按照以上修改要求，对标准文稿和编制说明进行修改后形成预审稿。

（4）2018年12月，全国有色金属标准化技术委员会稀有金属分标委会在福州市召开了《锆管室温闭端爆破试验方法》等国家标准的讨论会。来自中国核动力研究设计院、西部新锆核材料科技有限公司、宁夏东方钽业股份有限公司、有研科技集团有限公司、广东省工业分析检测中心、西北有色金属研究院、中国科学院理化技术研究所、云南科威液态金属谷研发有限公司、云南省科技技术院、宝钛集团有限公司、西部超导材料科技股份有限公司等单位的专家代表参加了会议。各代表对本标准（预审稿）、编制说明、实验报告进行了认真、细致的讨论，并提出了对本标准的修改意见和建议。并形成以下会议意见：

1）建议将3.4条款中“Lumin改为Lu”；

2）将文中的关于试样焊接密封的相关部分删除；

3）将7.4.2中“爆破缺口”改为“爆破破口”；

4）将7.5.1中“破口位置距试样两端距离不足试样自由长度的1/4”改为“破口位于密封接头处”。

5）对文本和编制说明的其他编辑性修改。

与会代表一致同意，标准编制组按照以上修改要求，对标准文稿和编制说明进行修改后形成送审稿。

2. 标准编制原则

1. 科学性原则：在对国内、外锆管材的室温闭端爆破试验方法进行调研的基础上，结合国核锆业近年来锆及锆合金管材力学性能检测的经验，制定本标准条款、技术参数等；
2. 适用性原则：本标准是在对行业调研的基础上，结合用户对产品的性能要求，根据国内设备等技术发展水平及测试指标要求确定标准适用范围，对锆及锆合金材料研发/加工企业、使用单位及设计单位都有较强的指导意义和适用性。
3. 规范性原则：本标准按照GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》和GB/T 20001.4-2015《标准编写规则 第四部分：试验方法标准》的要求进行编写。
4. 实用性原则：本标准以与实际检测项目需求结合，确保标准的可操作性。

3. 标准主要内容的论据

1. 试验装置要求
2. 试验机准确度及安全性确定

爆破试验中所测得最关键参数之一即爆破瞬间所对应的流体压力值，此值亦为试验过程中的最大流体压力值，而测量装置工作的最佳量程范围为20%至80%间，因此可将试验机的额定爆破压力确定为“尽可能保证测试样所承受的最大流体压力不超过试压机额定压力的80%”。

因锆管室温闭端爆破试验为超高压压力试验，因此对试验机的安全性应该有一定的要求，但目前市场上的爆破试验机为非标设备，没有统一的安全要求，也无法对安全规定进行量化，因此在本标准中对其安全性提出了“试验机应设计有安全防护罩，在试验过程中发生超压、泄露等各种危险后能够保证人员和设备的安全”的要求，对试验过程中存在的安全风险也提出了“当试验过程中监测到试样的流体压力超过额定压力80%后应中止试验，以保证人员与设备的安全”要求。

1. 压力变送器精度确定

将压力变送器的测量精度确定为“压力变送器的测量精度为0.5级或优于0.5级，其检定周期不超过12个月”。

某些锆管材爆破试验过程中所对应的流体压力已经接近甚至超过140MPa，而此时所选择的压力变送器精度若是仅仅满足1级要求，此时的压力变送器所测试最大压力偏差将有可能接近±1.4MPa，此时很难保证升压速率偏差±1.4MPa/min的要求。而选择采用0.5级的压力变送器，其此时最大压力应小于±0.7MPa，可以满足升压速率偏差的要求。故对压力变送器的要求至少满足测量精度为0.5级或优于0.5级。

1. 压力介质的确定

压力介质推荐采用抗磨液压油。锆管室温闭端爆破试验为超高压试验，试样等部位所承受的压力大多均已经超过了100MPa，因此应选择粘度较大的抗磨液压油。

1. 试样要求
2. 试样一般要求及制备

试样的最小自由长度应为平均外径的10倍。

试样的密封可以采用很多方式，最常见的两种方式即机械密封和焊接密封两种方式，但焊接密封从技术性要求比较高，且其焊接过程中的热影响区对材料性能的影响均需要进行评估，而且焊接后能否达到预期的密封效果很难把握，因此不将其作为爆破试验的密封方式进行规定。而机械密封相对来说比较便捷，且可操作性强，安全性更高。故推荐用机械密封的方式。

在试样内一般不使用芯轴。使用芯轴应供方与需方之间商定，并在试验报告中注明。芯轴的外径应小于管材平均内径0.25mm±0.05mm，但其作为试样制备中的另外一个方式予以保留。

1. 尺寸测量精度的确定
2. 尺寸测量精度理论计算

选择两种不同规格的管材（Φ9.5mm×0.57mm、Φ12.45mm×Φ11.25mm）对尺寸测量精度进行计算验证：

选择所要进行计算的两种管材试样，试样结果信息如下表1所示：

表1管材试样爆破试验结果信息

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 试样  编号 | 平均外径  /mm | 平均壁厚/mm | 最小壁厚/mm | 爆破后圆周周长/mm | 最大流体  压力/MPa | 爆破强度  /MPa | 最大周向伸长率/% |
| 1# | 9.502 | 0.574 | 0.571 | 40.10 | 89.37 | 698.7 | 34.33 |
| 2# | 12.452 | 0.600 | 0.593 | 51.92 | 71.78 | 717.3 | 32.72 |

1. 外径测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm对试验结果的影响计算

分别取测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm的最大正/负偏差对其进行验证。即对表1中的平均外径值均+0.01mm、-0.01mm、+0.005mm、-0.005mm、+0.001mm、-0.001mm然后对试验数据进行重新计算，得到试验结果如下表2所示：

表2 外径测量精度对爆破试验结果的影响

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 平均外径  /mm | 外径测量精度偏差/mm | 爆破强度/MPa | | 变化率/% | 最大周向伸长率/% | | 变化率/% |
| 结果 | 变化量 | 结果 | 变化量 |
| 1 | 9.512 | 0.010 | 699.5 | 0.8 | 0.11 | 34.19 | -0.14 | -0.41 |
| 2 | 9.492 | -0.010 | 697.9 | -0.8 | -0.11 | 34.47 | 0.14 | 0.41 |
| 3 | 9.507 | 0.005 | 699.1 | 0.4 | 0.06 | 34.26 | -0.07 | -0.21 |
| 4 | 9.497 | -0.005 | 698.3 | -0.4 | -0.06 | 34.40 | 0.07 | 0.21 |
| 5 | 9.503 | 0.001 | 698.8 | 0.1 | 0.01 | 34.32 | -0.01 | -0.04 |
| 6 | 9.501 | -0.001 | 698.6 | -0.1 | -0.01 | 34.35 | 0.01 | 0.04 |
| 7 | 12.462 | 0.010 | 717.9 | 0.6 | 0.08 | 32.62 | -0.11 | -0.33 |
| 8 | 12.442 | -0.010 | 716.7 | -0.6 | -0.08 | 32.83 | 0.11 | 0.33 |
| 9 | 12.457 | 0.005 | 717.6 | 0.3 | 0.04 | 32.67 | -0.05 | -0.16 |
| 10 | 12.447 | -0.005 | 717.0 | -0.3 | -0.04 | 32.78 | 0.05 | 0.16 |
| 11 | 12.453 | 0.001 | 717.4 | 0.1 | 0.01 | 32.71 | -0.01 | -0.03 |
| 12 | 12.451 | -0.001 | 717.3 | -0.1 | -0.01 | 32.73 | 0.01 | 0.03 |

根据试验结果的变化量可以看出来，外径测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm对试验结果的性能影响均比较小，但美标ASTM B811对外径测量的精度要求为0.005mm。本标准技术要求在原则上不低于美标，故选择0.005mm精度作为本标准的要求。

1. 壁厚测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm对试验结果的影响计算

分别取测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm的最大正/负偏差对其进行验证。即对表1中的平均壁厚值和最小壁厚值均+0.01mm、-0.01mm、+0.005mm、-0.005mm、+0.001mm、-0.001mm然后对试验数据进行重新计算。得到试验结果如下表3所示：

表3 壁厚测量精度对爆破试验结果的影响

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 平均壁厚  /mm | 最小壁厚  /mm | 壁厚测量精度偏差/mm | 爆破强度/MPa | | 变化率/% | 最大周向伸长率/% | | 变化率/% |
| 结果 | 变化量 | 结果 | 变化量 |
| 1 | 0.584 | 0.581 | 0.010 | 685.9 | -12.8 | -1.83 | 34.33 | 0 | 0 |
| 2 | 0.564 | 0.561 | -0.010 | 711.9 | 13.3 | 1.90 | 34.33 | 0 | 0 |
| 3 | 0.579 | 0.576 | 0.005 | 692.2 | -6.5 | -0.92 | 34.33 | 0 | 0 |
| 4 | 0.569 | 0.566 | -0.005 | 705.2 | 6.6 | 0.94 | 34.33 | 0 | 0 |
| 5 | 0.575 | 0.572 | 0.001 | 697.4 | -1.3 | -0.19 | 34.33 | 0 | 0 |
| 6 | 0.573 | 0.570 | -0.001 | 700.0 | 1.3 | 0.19 | 34.33 | 0 | 0 |
| 7 | 0.610 | 0.603 | 0.010 | 704.8 | -12.5 | -1.74 | 32.72 | 0 | 0 |
| 8 | 0.590 | 0.583 | -0.010 | 730.2 | 12.9 | 1.80 | 32.72 | 0 | 0 |
| 9 | 0.605 | 0.598 | 0.005 | 711.0 | -6.3 | -0.88 | 32.72 | 0 | 0 |
| 10 | 0.595 | 0.588 | -0.005 | 723.7 | 6.4 | 0.89 | 32.72 | 0 | 0 |
| 11 | 0.601 | 0.594 | 0.001 | 716.0 | -1.3 | -0.18 | 32.72 | 0 | 0 |
| 12 | 0.599 | 0.592 | -0.001 | 718.6 | 1.3 | 0.18 | 32.72 | 0 | 0 |

根据计算结果的变化量可以看出来，壁厚测量精度0.01mm、0.005mm和0.001mm对试验结果性能均有比较明显影响。壁厚测量精度0.01mm下所得试验结果值与真实值相比较变化量达到1.9%。测量精度0.001mm下的试验结果影响最小，但壁厚测量精度0.001mm要求较高，目前在业内推广比较困难。因此选择0.005mm作为本标准的壁厚测量精度比较合适。

1. 圆周长度精度0.1mm、0.05mm和0.01mm对试验结果的影响计算

分别取测量精度0.1mm、0.05mm和0.01mm的最大正/负偏差对其进行验证。即对表1中的爆破后圆周长度值均+0.1mm、-0.1mm、+0.05mm、-0.05mm、+0.01mm、-0.01mm然后对试验数据进行重新计算，得到试验结果如下表4所示：

表4 圆周长度测量精度对爆破试验结果影响

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 爆破后圆周周长  /mm | 周长测量精度偏差/mm | 爆破强度/MPa | | 变化率/% | 最大周向伸长率/% | | 变化率/% |
| 结果 | 变化量 | 结果 | 变化量 |
| 1 | 40.20 | 0.10 | 698.7 | 0 | 0 | 34.67 | 0.33 | 0.98 |
| 2 | 40.00 | -0.10 | 698.7 | 0 | 0 | 34.00 | -0.33 | -0.98 |
| 3 | 40.15 | 0.05 | 698.7 | 0 | 0 | 34.50 | 0.17 | 0.49 |
| 4 | 40.05 | -0.05 | 698.7 | 0 | 0 | 34.16 | -0.17 | -0.49 |
| 5 | 40.11 | 0.01 | 698.7 | 0 | 0 | 34.37 | 0.03 | 0.10 |
| 6 | 40.09 | -0.01 | 698.7 | 0 | 0 | 34.30 | -0.03 | -0.10 |
| 7 | 52.02 | 0.10 | 717.3 | 0 | 0 | 32.98 | 0.26 | 0.78 |
| 8 | 51.82 | -0.10 | 717.3 | 0 | 0 | 32.47 | -0.26 | -0.78 |
| 9 | 51.97 | 0.05 | 717.3 | 0 | 0 | 32.85 | 0.13 | 0.39 |
| 10 | 51.87 | -0.05 | 717.3 | 0 | 0 | 32.60 | -0.13 | -0.39 |
| 11 | 51.93 | 0.01 | 717.3 | 0 | 0 | 32.75 | 0.03 | 0.08 |
| 12 | 51.91 | -0.01 | 717.3 | 0 | 0 | 32.70 | -0.03 | -0.08 |

根据计算结果的变化量可知，圆周长度测量精度0.1mm、0.05mm和0.01mm对试验结果的性能影响较小，0.1mm的圆周长度测量精度下所得试验结果值与真实值相比较变化量基本接近1%。而0.01mm测量精度下的试验结果最好，但0.01mm圆周长度测量精度要求较高，目前在业内推广比较困难。因此选择0.05mm作为本标准的破断后圆周长度测量精度比较合适。

1. 尺寸测量精度的确定

结合目前的测量工具的精度情况和试验的可行性要求，并参考本文3.3.1的计算结果情况，最终规定“外径测量使用外径千分尺或其他具有相当精度的测量工具，测量精度不低于0.005mm。壁厚测量使用壁厚千分尺或其他具有相当精度的测量工具，测量精度不低于0.005mm。破断后圆周长度的测量，测量工具精度不低于0.05mm。”

1. 升压速率

爆破试验中的升压速率规定为(13.8±1.4）MPa/min，在试验报告中对此升压速率进行了试验，结果见下表5。

表5.在不同升压速率下的试验结果

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 性能指标 | 升压速率 | 结果数值 | 平均值 | 标准偏差SD | 精密度RSD% |
| 爆破强度  （MPa） | 13.8 MPa/min | 690,680,690,680,680 | 686.0 | 5.07 | 0.74 |
| 12.4 MPa/min | 690,690,680,680,690 |
| 15.2 MPa/min | 690,690,690,690,680 |
| 最大周向伸长率（%） | 13.8 MPa/min | 32,34,36,34,32 | 33.9 | 1.55 | 4.58 |
| 12.4 MPa/min | 34,36,36,34,35 |
| 15.2 MPa/min | 34,32,35,32,32 |

经计算，升压速率在(13.8±1.4）MPa/min范围内的爆破强度及最大周向伸长率结果性能指标精密度良好。

而在锆合金管材生产和研发的过程中会经常遇到有些试验要求采用不同的升压速率进行试验，故在本标准的7.3.2条编写了“对于升压速率有特殊要求的试验，其速率可通过协商自行设定，但试验速率必须在试验报告中说明。”

1. 结果计算及修约

结果计算及修约参照ASTM B811的要求。锆管材所测试样的最小直径约为6mm，而其对应的周长接近20mm，而其对应的周长测量精度为0.05mm，因此可预估计最大周向伸长率的精度约为0.25%，但考虑到测量方式上的影响因素，故对其修约要求为1%。最终确定了修约规则为“爆破强度结果数值修约至10MPa，最大周向伸长率结果数值修约至1%”。

4 标准水平分析

在公开发行技术标准中，与锆管室温闭端爆破试验方法相关的标准仅查到ASTM B811和ASTM B353（技术要求与ASTM B811相同）。本标准借鉴了ASTM B811，并在长期试验的经验基础上，针对压力变送器精度和最大周向伸长率结果修约，试样方法测量等提出了相应要求，本标准整体技术水平优于ASTM标准。

5 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

与有关的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

6 标准中的专利及涉及知识产权

本标准起草过程中，没有检索到专利和知识产权问题。

7 分歧意见的处理经过和依据

编制组严格按既定的编制原则进行了编写，本标准起草过程中未发生重大的分歧意见。

8 标准用为强制性或推荐性国家标准的建议

本标准规范了锆管室温闭端爆破试验方法的主要技术指标，建议本标准作为推荐性国家标准发布实施。

9 贯彻标准的要求和措施建议

无

10 废止现行有关标准的建议

无

11 其它应予以说明的事项

无

《锆管室温闭端爆破试验方法》编制工作组

2019年5月