

基于区块链的新材料供应链溯源系统开发

沈佳棋

煜涵新材料（杭州）有限公司，浙江杭州，311227；

摘要：新材料产业作为制造业高质量发展的关键支撑，其产品广泛应用于新能源、航空航天、半导体、生物医药等领域，对材料来源、制程合规与产品性能要求极高。然而当前供应链体系存在数据割裂、溯源困难、信任缺失等痛点，严重制约产品质量可追溯与全链条透明化。区块链技术以其去中心化、防篡改、可溯源的特点，为新材料供应链溯源体系的重构提供了全新技术路径。本文围绕新材料行业的溯源需求与数据结构特征，提出一套基于联盟链架构的新材料供应链溯源系统开发方案，系统分析区块链网络设计、数据确权机制、智能合约应用等关键模块，并结合典型产业场景验证其可行性与实际价值，旨在为新材料行业的质量安全治理与数字供应链建设提供技术支撑。

关键词：区块链；新材料；供应链管理；溯源系统；智能合约；产业数字化

DOI：10.69979/3041-0673.25.10.053

1 溯源系统建设的行业需求与区块链技术适配性

1.1 新材料产业链的溯源需求特征分析

新材料产品通常有着‘技术含量高、对批次差异极为敏感、应用方面耦合性较强’的特点，其在流通以及应用的整个过程当中面临着诸多颇为复杂的挑战。就拿原材料来说，其来源相当复杂，产地以及供应路径都不够透明，尤其是像稀有金属、特殊化学品这类关键材料，在全球采购这样的大背景之下，很容易出现产地造假、信息脱节之类的情况。再看制程方面，环节众多，而且不同企业在工艺上存在着显著的差异，像在配方、温控、压制、热处理等环节上，各个企业的加工过程没办法有效地进行记录，也难以做到共享，这样一来，要从材料片段一直到整件产品去进行质量追溯就会变得十分困难。另外，整个行业对于溯源信息的完整性以及可信度的要求是比较高的，特别是在高端制造、医疗器械、航天军工等领域，如果一旦出现溯源数据被篡改或者缺失的情况，那就很可能会引发重大的责任事故。所以说，去构建一个能够覆盖全链条、具有较强可信度并且可审计的溯源系统，这已然成为推动新材料行业朝着高质量发展方向发展的必然要求了。

1.2 区块链技术在供应链可信建设中的优势

跟传统的中心化数据库系统有所不同，区块链依靠分布式账本机制，让各参与方能够一同对数据展开维护、验证以及监督等工作。在供应链的具体场景当中，区块链技术能够被用来构建起“共识信任”的相关机制，以此去解决诸多企业之间存在的数据互不信任、信息没办法

法实现共享、操作难以达成统一等一系列的问题。它所具备的不可篡改性，使得任意一个节点所上传的信息都拥有法律证据方面的效力，而时间戳机制则可以保证数据在其全生命周期当中都能够实现回溯，另外，智能合约还能够自动去执行像数据上链、质量验证、条件触发等等这样的业务逻辑，进而有效地提升供应链的响应效率。对于新材料行业而言，区块链不单单是一个单纯的信息共享平台，实际上它是一个涉及信任交互的协议，能够从源头处将原材料的采购、加工、质检一直到交付的整个过程数据流全部打通，构建起以“数据不造假、源头可追溯、去向可查询”作为核心要点的质量防线，从而助力该产业达成“链式信任”以及“源端治理”这两个方面的目标。

1.3 新材料供应链场景的区块链技术适配性分析

新材料行业在应用区块链时，并非是简单地照搬互联网场景哦，而是得依据行业自身所具备的流程特点、数据特性以及业务方面的种种约束条件，来展开定制化的设计工作呢。就拿其中一点来说吧，新材料行业有着很显著的多主体协同特征呀，在其产业链当中呢，会涉及到像原料商、加工厂、检测机构、运输单位、终端客户等等诸多主体哦，在这种情况下，那就得去构建联盟链或者许可链架构，如此才能满足数据共享以及权限管控这两方面的需求。再看另外一点，新材料行业的数据类型那是多种多样的，而且格式也并非标准化的，会有生产批号、合格证书、检测参数、图纸文档等，面对这样的情况，就需要把 IPFS 之类的分布式存储技术和结构化索引机制结合起来，以此来提升对链下数据的管理能力。还有一点也很重要，那就是链上操作必须要

具备业务规则可配置的特性,就好比材料入库验收得合规,参数校验要自动化,合格证签发审批等等这些方面,在这种时候,就得通过智能合约来对流程逻辑进行灵活的定义,并且实现自动执行。所以说只有把区块链底层的那些特性和新材料行业的具体场景非常深入地融合到一起,才能够真正地让区块链在供应链溯源系统当中发挥出它的赋能作用。

2 新材料供应链溯源系统的区块链架构设计

2.1 基于联盟链的系统网络拓扑设计

在新材料行业那颇为复杂的供应链协作架构当中,企业相互间常常会存在信息方面的壁垒,同时信任也有所缺失。在这样的情形下,去构建一个既能够让人信赖,又具备高效特点的数据互通机制,就变成了达成供应链透明化以及具备追溯能力的关键所在。和开放同时又是匿名的公有链系统作比较的话,联盟链有着自身的优势,它的节点准入是可控的,数据处理效率也比较可观,权限管理机制同样表现良好,所以它更加适宜被运用到涉及多方展开协作、信息敏感度颇高的新材料场景之中。在针对系统架构展开设计的时候,不妨把产业链核心企业(就好比主制造商)、原材料供应商、第三方检测机构、物流仓储单位以及终端客户当作是区块链节点的参与者,并且引入监管节点,让行业协会或者主管单位来对其进行统一的维护,通过这样的方式来提升整个网络的数据可信度,让治理更加规范有序。该系统运用的是基于 PBFT 或者 Raft 这类轻量级的共识机制,如此一来,不但能够确保链上数据是真实的,而且还能保证其具有一致性,同时还可以兼顾到处理效率以及网络的稳定性,进而满足在实际业务开展过程中对于实时响应以及高频写入这两方面的双重要求。

在平台底层技术挑选之时,不妨优先选用 Fabric 或者 FISCO BCOS 这类开源联盟链框架。这些平台有着成熟的身份认证功能,能够实现通道分隔,还可以进行权限划分,并且对智能合约提供支持,另外其企业级部署适配性也很不错。与此同时,把微服务架构引入进来用于划分系统模块,如此一来,像数据采集、数据验证、合约执行以及可视化展示等功能就能够分别独立部署,从而保证系统在运行期间拥有灵活性以及可维护性。在网络拓扑设计方面,得预留出跨链的能力以及和异构链对接的接口,这样做是为了方便未来系统朝着上游供应链金融、下游产线溯源以及平台监管对接等方向去拓展,进而为新材料行业打造出一套极为安全、稳定且能够可持续发展的区块链协同网络。

2.2 材料全生命周期数据上链机制设计

要达成对新材料产品从原料直至应用的整个流程实现质量溯源这一目标,系统就得依照‘诞生—转变—运用—封存’这四个重要节点去规划分阶段的数据上链机制。在‘诞生’阶段,原材料供应商要上传诸如采购合同、合格证书、采矿或者生产来源证明、原厂检测报告之类的各类信息,系统会针对每一批材料生成独一无二的‘材料身份码’又或者链上索引 ID,并且将其基础元数据与之绑定起来,以此确保原始物料溯源能够实现唯一性的精准识别。在‘转变’阶段,加工企业需要把材料在生产环节中的各项参数,像设备运行记录、热压曲线、关键工艺控制点、操作者相关信息等整合打包,随后借助哈希算法来计算出摘要信息并在链上存证,与此同时,还要将大型图像、视频或者 PDF 文档等非结构化数据上传到分布式存储(比如 IPFS)当中,而且要在链上记录下它们的索引值,进而达成链上链下的协同验证。

在“应用”这一阶段当中,当相关材料被集成到终端产品里面,又或者是分发给下游的客户之时,系统能够同步地去上传材料的流向信息、应用批次号,还有环境适应性测试数据以及用户反馈评估等方面的内容,这样做能够进一步地强化使用端的可溯性,从而便于在日后的售后服务或者是召回事件里可以快速地定位到关键责任段。而到了“封存”阶段呢,系统会通过设定生命周期状态变更的标记,针对那些已经交付、已经封存或者是已经失效的材料来进行状态的冻结操作,并且对其最终合格报告、质量承诺书以及售后协议等加以存档处理,以此来达成数据记录的闭环闭合状态。整个上链的过程务必要结合多级权限控制机制、链下数据映射机制以及数据加密处理机制等多种机制,以此确保敏感信息的安全性以及使用方的合规性,同时还得通过链上数据一致性校验机制去防止出现数据伪造、数据缺失或者是重复上传等情况,进而构建起完整的材料履历档案以及那种具备不可篡改特性的数据凭证链。

2.3 智能合约驱动的业务流程控制模块

溯源系统的核心价值,其关键之处不光在于数据能够被查询,更重要的是规则可以得到执行。在这之中,通过引入智能合约技术,系统能够把像质量校验、批次验收以及合规判定这类业务规则,一一写入到合约模板里面去。当达到预先设定好的条件之后,就会自动去执行与之相对应的操作。要是入库批次检测出来的参数超出了规定的标准,那么系统便会自动判定其处于不合格的状态,同时还会冻结出库的权限;倘若样品的性能经过验证是成功的,而且还顺利通过了三方检测,此时系统就会自动生成带有数字签章版的合格证,并且把它

推送到链上的客户那里；要是出现了产品召回这样的事件，智能合约就会自动对关联批次进行追溯，进而触发预警机制。所有智能合约执行的记录全部都被固化到链上了，是具备法律效力的，而且还具有可审计性。另外，平台还应当支持合约的编排以及动态更新，这样便于企业依据新材料工艺流程的优化情况、质量管理制度的演进状况等来进行灵活的调整，以此确保业务逻辑在长期使用过程中是可用的，并且能够合规地不断演进。

3 系统落地场景与产业化应用成效分析

3.1 高端应用场景中的质量可信保障机制

在航空航天、高功率电子以及轨道交通等新材料起着关键作用的应用领域当中，产品对于材料的来源、制造的具体过程以及性能的稳定性等方面，其可追溯性方面的要求是非常之高的。借助溯源系统的有效部署，能够为上述所提及的这些应用场景给予全过程数据的可信保障机制。就拿航空发动机涡轮叶片所采用的陶瓷基复合材料来举例说明吧，溯源系统可以把原材料的烧结温度、压模工艺以及切片路径等诸多参数，按照全流程的方式进行固化并且上链处理，要是在后期出现了结构方面的疲劳情况或者是性能失效等问题，那么就能够迅速且准确地定位到出现问题的责任批次以及具体的过程环节。与此同时，在军工项目里面，溯源系统通过对权限进行合理设置以及运用密文加密这样的机制，能够保障那些涉及机密的材料信息仅仅在项目节点范围内才可以被读取，这样既兼顾了安全性，又能够保证可控性，从而为国家重大工程项目当中的材料安全起到保驾护航的重要作用。

3.2 多企业协同下的全链条透明化管理

在传统的新材料供应链里面，不同企业在数据标准这块、管理流程方面以及责任界定上，本身就存在着差异，而且合作周期往往比较长，磨合成本也挺高的。借助区块链溯源系统，达成了‘数据能够被验证、操作可以被审计以及流程可实现追溯’这样一种透明化协同机制，极大地降低了企业相互之间的信任摩擦以及协调成本。就拿某碳纤维复合材料产业集群试点来讲，该系统把上游原丝厂、中游预浸料厂以及下游部件制造商都联通起来了，将那些核心质量节点的数据按照统一格式上传到链上，并且凭借智能合约来实现对关键指标的闭环判断，十分明显地提升了协同效率，使得产品交付周期缩短了18%，质量投诉率更是下降超过了30%，给构建‘透明制造加上可信供应’的产业生态树立了一个范例。

3.3 数据价值释放与企业合规能力提升

供应链数据在很长时间里一直都被当作是那种处于“沉默”状态的资产。借助区块链溯源系统所具备的数据治理方面的能力，能够把原本分散开来的质量方面的数据、工艺相关的数据以及业务方面的数据，聚合起来转化为企业层面的知识资产，进而在研发、风控以及合规等好些个业务领域当中去释放出其应有的价值。基于全生命周期的溯源数据来举例，企业是可以去构建起材料失效的模型的，以此来对生产参数做出优化；当参与到像 REACH、RoHS 这类国际标准认证的时候呢，企业能够迅速地调取完整的材料来源以及性能方面的历史记录，从而提高认证通过的概率；而在碰到客户索赔以及仲裁这类场景的时候，企业还可以把链上的数据当作是“合规凭证”来主张免除责任或者实现快速理赔的操作，这样便能够在很大程度上提升企业法务方面的响应能力以及品牌所具有的公信力。

4 结语

区块链作为底层技术工具，其在新材料行业的应用价值不应仅局限于“数据上链”，更在于其对产业协同模式、数据治理范式与质量控制体系的重塑能力。本文从新材料行业供应链管理的实际需求出发，系统阐述了基于区块链的供应链溯源系统开发框架，涵盖网络架构、数据机制与智能合约等关键模块，并通过实际产业应用验证了其在提升质量追溯能力、优化协作效率与增强企业合规治理方面的显著成效。未来，随着隐私计算、数字身份与区块链跨链互操作技术的发展，新材料供应链溯源系统将向更深层次的产业生态协同与全球可信供应体系演化，成为智能制造与产业数字化转型的关键支撑力量。

参考文献

- [1] 柏亮. 区块链技术在工业物联网的应用研究[J]. 网络空间安全, 2018, 9(9): 87—91.
- [2] 华为区块链技术开发团队. 区块链技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [3] 2019年中国工业物联网市场前景研究报告[J]. 电器工业, 2019(10): 42—44.
- [4] 黄涛. 浅论有色金属加工工艺及装备智能化工作的现状及提升[J]. 中国金属通报, 2019(10): 277—278.
- [5] 陈丁文. 中国铝加工产业升级思考[J]. 有色金属加工, 2019, 48(2): 1—3.