

数控设备故障知识图谱的构建与应用

赵 倩

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 数控设备故障发生原因复杂、隐蔽,且不易排查,为实现对历史数控设备故障知识的积累、组织和共享,提出一种针对数控设备故障领域的垂直知识图谱构建方法。采用数据驱动的增量式本体构建技术建立数控设备故障本体模型,提出基于模式的数据映射机制,将关系型数据库(RDB)数据转化为资源描述框架(RDF)四元组进行存储,在此基础上实现知识图谱的可视化分析和管理应用,最终完成数控设备故障知识图谱构建系统的开发,验证了方法的合理性和有效性。实践证明,构建知识图谱对数控设备故障领域的知识积累与组织、故障推理与诊断有一定的指导意义。

关键词: 知识图谱; 数控设备故障; 本体建模; 资源描述框架(RDF); R2RML

Building and Application of CNC Equipment Fault Knowledge Graph

ZHAO Qian

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] The causes of CNC equipment fault are complicated, concealed and difficult to be investigated. To realize the accumulation, organization and sharing of the historical cases of CNC equipment fault, the method of constructing vertical knowledge graph was put forward. Firstly, the data-driven incremental construction technology is used to build CNC equipment fault ontology model. Then the data-mapping mechanism based on mode, which transform related database data into resource description framework data for storage, is proposed. Based on this, the visualization, management and application of the knowledge graph are realized. Finally, knowledge graph construction system in CNC equipment fault field is developed and the validity and rationality of the knowledge graph construction method is verified. Practice has proven that the construction of knowledge graph to the fault data accumulation, organization, fault reasoning and fault diagnosis on the field of CNC equipment fault has some guiding significance.

Keywords: Knowledge graph; CNC equipment fault; Ontology modeling; Resource description framework (RDF); RDB to RDF mapping language (R2RML)

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.03.096

随着工业产线的自动化、智能化和集成化水平逐步提高,数控设备的机械与电气控制系统越来越复杂,这对数控设备的维修保障实施提出了更高要求。由于数控设备系统是一个融合了计算机技术、自动控制、检测技术等多学科知识的技术密集型机电一体化复杂系统^[1],仅凭故障表征很难快速地找到其根本故障部位及原因,这就大大地增加了故障维修时间成本,严重降低了自动化产线设备利用率和生产效率;同时,工厂车间历年来积累的故障案例知识、排故专家经验和实时采集的结构化故障数据不能被有效地利用与共享,基于关系数据库的扁平存储形式不能直观地展现故障案例间的复杂隐性关系,使得设备的故障诊断与维修水平提升缓慢。

因此,本文提出构建数控设备领域知识图谱,利用知识管理的相关先进技术与理论,通过将历史故障数据转化为有价值的知识,探究故障案例间的复杂关联关系,并将故障知识与关系结构化、显性化和可视化,从而实现故障知识的有效积累与组织,辅助车间工人更加快速高效地排故,为将来的设备健康管理提供良好的知识输送和共享。

1 相关工作与技术

知识图谱作为描述海量知识、知识属性及知识间关系的有效工具,自2012年Google将其成功应用到搜索引擎以来,受到了学术界和工业界的广泛关注^[2]。知识

图谱根据其包含的知识范围主要分为通用领域和垂直领域。通用领域知识图谱的特点是数据量大、通用性强、知识范围广、权威性低等,垂直领域知识图谱则具有数据量相对较小、质量高、密度大、知识集中、权威性高以及知识准确率高等特点^[3]。

目前国内外针对通用知识图谱的研究与应用发展迅速,国外有 Satori^[4]、Probase^[5]、NELL^[6]、DBPedia^[7]和 Freebase^[8]等,国内有百度知心、搜狗知立方和 CN-DBPedia^[9]等。国外的垂直领域知识图谱涉及到地理领域 GeoNames、学术领域 DBLife^[10]和生物领域 UniProtKb^[11]等。国内的行业知识图谱则只限于学术研究,例如阮彤等^[12]提出数据驱动的增量式垂直知识图谱构建方法,并构建了中医药知识图谱、海洋知识图谱和企业知识图谱,验证了方法的可行性;李文鹏等^[13]提出了面向开源软件项目的软件知识图谱构建方法,并提供了基于软件知识图谱的软件知识检索技术,使用户可以在软件复用过程中方便地检索知识;葛斌等^[14]提出了军事知识图谱构建方法与计算框架,将其应用于军事情报搜集分析领域,提出了一种针对知识存储的基于约束条件的分块管理框架;俞思伟等^[15]则提出了医疗知识图谱的构建方法,并将其应用于基于医疗和知识库的语义分析、推理以及疾病辅助诊断系统。

在数控设备故障领域的相关研究中,研究者大多倾向于基于设备故障模型来建立故障树,这种以拓扑网形式表征的故障概念树具有层次分明、父子关系明确等优势,但缺乏对故障案例隐性网状关系的挖掘和展现。而数控设备故障往往是多层次、多因素共同作用的结果,单一的故障树难以全面准确地描述故障知识和其关联关系。针对这一需求引入知识图谱的相关技术,该技术利用其在构建知识网络与展现知识关联方面的巨大优势,为具有复杂关系的知识信息提供了一种新的获取、存储、组织、管理、更新和展示的手段^[16],并提供更符合认知习惯的知识应用方式。

2 数控设备故障知识图谱构建

数控设备故障作为复杂事件,受机械部件、输入装置、数控系统、伺服系统等多方面因素的影响。例如某型号五轴联动数控叶片铣床的空气静压单元发生故障,原因可能归咎于进口空气过滤器阻塞、出口管路有泄漏、安全阀失灵、压缩机失效等;某型号车削中心转塔刀架没有抬起动作,故障原因是抬起液压缸损坏或密封圈损坏,且与转塔抬起链接的机械部分研损有关。针对某个数控设备故障案例事件来说,其各个故障影响因素与案例事件本身构成复杂的网络关系,而同属于一个故障现象的同类事件集组成了庞大的知识网络体系。知识

图谱作为知识关系的直接表示和组织方式,更有利于积累知识库,并有效地分析复杂关系中存在的特定的潜在故障。

本文结合数控设备故障领域的数据特点,采用“自顶向下”与“自底向上”相结合的知识图谱构建技术、数据驱动的增量式本体建模方法和基于模式的知识映射机制来组织丰富知识库,并完成数控设备故障知识图谱的构建与应用。其中,“自顶向下”方式是指从顶层概念开始,定义数据模式,然后逐步细化,扩充实体;而“自底向上”方式是指从实体开始,将其归纳组织形成底层概念,然后逐步往上抽象生成顶层概念。本文采取两者相结合的构建方式,首先通过人工总结归纳概念、扩充实体,然后在顶层概念逐步完善的情况下,随着实体的积累和丰富,归纳总结出新的概念和关系。

数控设备故障知识图谱是指由组成故障案例的知识实体和这些知识实体之间的关联关系所构成的用以描述整类事件的知识语义网络。其中,知识实体指故障案例中可区分的、可辨识的且具有一定语义关系的事实,是事件元素而非数据的知识表达;知识实体之间的关联关系指知识实体(即故障案例事件元素)之间的具有某种类型的二元关系。数控设备故障知识图谱构建过程包括故障知识来源分析、领域概念关系本体建模、本体模型解析与存储、RDB 到 RDF 的数据知识映射、知识图谱可视化分析以及管理与应用等步骤,如图 1 所示。

2.1 知识表示

知识表示的过程分为两个阶段:数据采集与领域本体建模。经分析,数控设备故障案例数据来源于生产执行系统中积累的 RDB (Relational Database, 关系型数据库,是基于关系模型的数据库,是数据与数据库对象的集合)结构化数据、案例文本资料、领域专家经验,通过获取更多更全面的数据,为领域本体建模提供数据支持。

数控设备故障案例知识图谱构建的前提是将知识进行分析、归纳和规范化定义,构建有效的、可扩展的知识模式。本体作为一种明确且规范的知识表达方式,能够清楚地描述领域概念、概念间的层次和逻辑关系、概念的属性以及约束等,能够保证知识在传递和共享过程中理解的唯一性与无二义性。因此针对数控设备故障案例知识的丰富层次结构和复杂逻辑关系,本文通过分析知识来源与知识属性,以故障案例为核心,对案例信息所涉及的知识模块进行细节划分,建立设备故障案例知识本体框架;采用数据驱动的增量式本体建模方法,进一步实现对模块细节的概念和关系扩展,本体构建流程如图 2 所示。

本文将本体模型定义为 $O=\langle C, R, A, I, F \rangle$ 五元组,

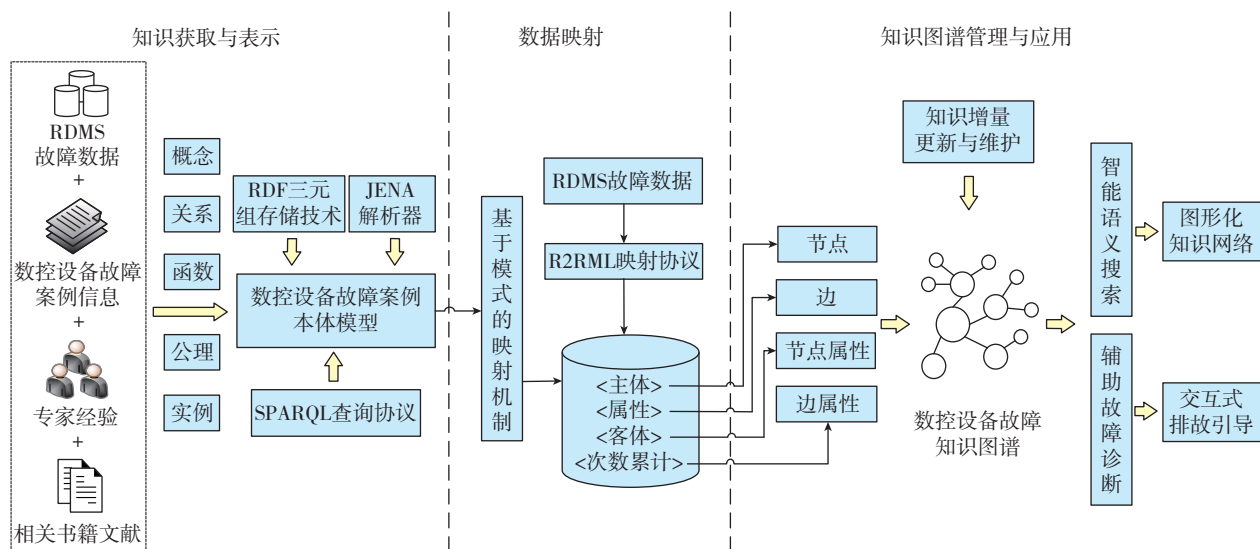


图1 数控设备故障知识图谱构建总体架构图

Fig.1 Overall architecture diagram of CNC equipment fault knowledge graph

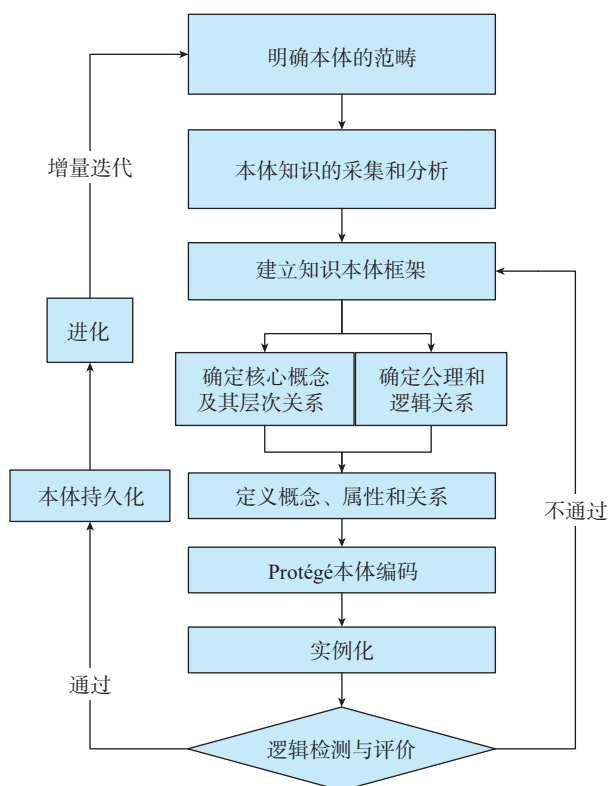


图2 本体构建流程图

Fig.2 Ontology construction process chart

其中各元素的含义如下：

- O ：数控设备故障案例事件本体模型；
- C ：概念(或类)，指表达某一类实体对象的集合；
- R ：概念(或实例)逻辑关系，指概念之间的交互作

用关系,包括组成关系、继承关系以及其他业务关系；

A ：概念(或实例)属性关系,指概念具有的属性和属性值；

I ：实例(即独立的实体),是属于某概念类的基本元素；

F ：函数(或公理),用于表示关系或函数之间存在的关联或约束。

根据上述定义,将数控设备故障案例知识进行系统地归纳组织,形成网状的知识结构体系,每个概念包含一个或多个实例,实例继承其所属概念的所有属性关系,实例之间存在交叉概念和关联关系。

基于数控设备故障案例知识本体,采用 JENA 解析器(Jena 是一个 Java 的 API (应用程序编程接口),用来支持语义网的有关应用,例如解析本体模型等),将本体元数据转化为资源描述框架 RDF^[17] (Resource Description Framework,一种用于描述 Web 资源的标记语言,是一个处理元数据的 XML 应用),以 <主体-属性-客体>三元组的形式实现本体的解析、存储与查询。

2.2 数据映射

由于数控设备故障案例数据大量存储于关系型数据库中,因此本文采用基于模式的数据映射机制完成从结构化数据到网状化知识的转化,即 RDB2RDF 数据转换过程。

根据 W3C 于 2012 年推出的 2 种映射语言标准^[18]：“Direct Mapping”(A direct mapping of relational data to RDF)和 R2RML (RDB to RDF mapping language),其

中“Direct Mapping”是采用关系数据库表结构直接输出为 RDF 图的映射机制,而 R2RML 则是通过自定义词汇表实现关系数据库到 RDF 数据集的转化,这种方式具有可定制性和较高的灵活性。故本文采用 R2RML 映射语言完成数据映射。

R2RML 映射设计一个从关系数据库中检索数据的逻辑表,将关系数据库的一个基表的 SQL 查询定义为逻辑表。每个逻辑表被一个三元组映射(triples map)转换成 RDF,即逻辑表中每一行实例数据被映射为若干 RDF 三元组。R2RML 映射机制表达式为

triplesMap={logicalMap, subMap, preobjMap} (1)
 其中的 3 个要素分别是:(1)逻辑表(logicalMap),用于描述数据库表名;(2)主语映射(subMap),该逻辑表行对应的全部 RDF 三元组的公共主语,用于映射产生 RDF 三元组的主语;(3)谓语-宾语映射(preobjMap),每个映射由谓语映射与宾语映射或值映射组成,用于映射产生 RDF 三元组的谓语和宾语。

一个关系数据的全部 R2RML 映射构成了一个映射文档(mapdoc),它由一系列 RDF 三元组映射构成,

通常以 Turtle 语法格式书写。可以被描述为:

mapdoc={tripleMap1, tripleMap2, ..., tripleMapN} (2)

根据数控设备故障案例本体中的概念与概念间的逻辑关系,基于上述模式编写 R2RML 映射文档,图 3 所示为部分实体的 R2RML 映射原理图。

图 3 中包括 3 部分内容,上部分的输入为关系型数据库表(DATA_FAULTINFO 表)及相应的属性列和元组行数据;中间部分的映射文档为主要的逻辑关系定义;下部分的输出则是通过映射产生的 RDF 数据集,以三元组的形式表示。在此映射的基础上,在每一条三元组中加入<累计次数>(用于记录每个相同三元组发生的次数,便于后续数据分析),即数据存储模式成为<主体>-<属性>-<客体>-<次数>四元组的形式。

通过 R2RML 映射文档,利用 D2R Server 关系数据映射引擎实现数据从扁平化到网状结构化形式的转换,在很大程度上丰富了本体中的实例与属性关系。

2.3 知识图谱可视化与应用

知识图谱的本质是由概念、实体以及实体间关系构成的语义网络。2.1 节和 2.2 节中构建的本体模型为

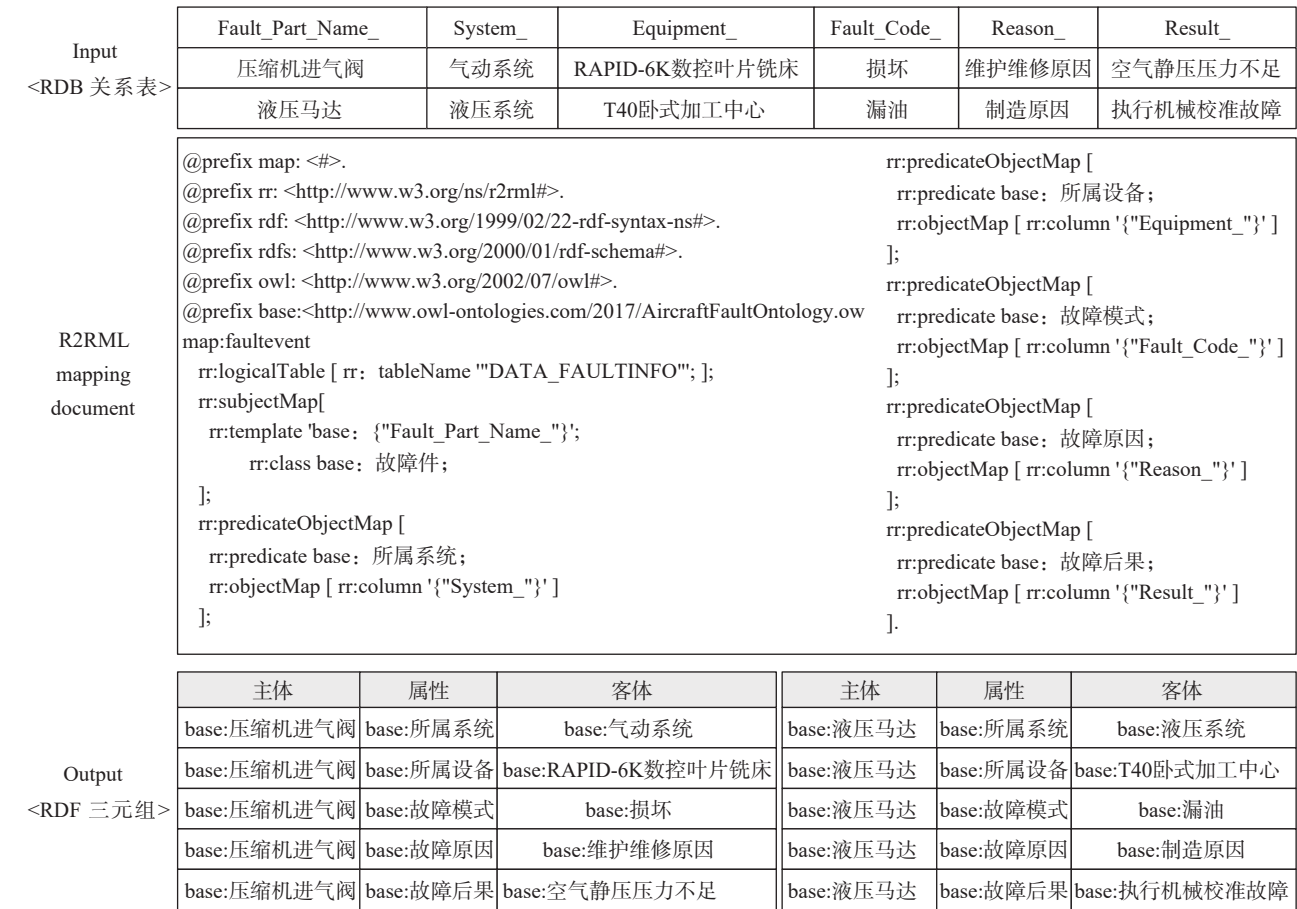


图3 R2RML映射原理图
 Fig.3 R2RML mapping schematic

知识图谱定义了基本的数据模式,并通过 RDB 数据到 RDF 的规则映射,极大地丰富了实体和实体间关系,它们最终分别以 RDF 三元组和四元组的形式进行持久化存储。这些资源描述框架中的元素与知识图谱的对应关系如图 4 所示。其中 RDF 存储模式包括两种:本体解析后的三元组和数据映射的四元组;将<主体>和<客体>抽取为知识图谱的实体,<属性>和<次数累计>抽取为知识图谱的实体属性和实体关联,结合数据可视化技术,实现知识图谱的构建与展现。

在通用领域知识图谱构建中,大量的实体抽取、关系抽取和属性抽取会带来许多冗余和错误信息,需要进行知识融合,即实体链接和知识合并,以消除概念的歧义,剔除冗余和错误概念。然而本文所关注的数控设备故障领域,知识来源是经过人工筛选去冗的数据信息,且本体模型也保证了知识图谱的高质量和准确性。同时基于垂直领域知识图谱的特殊性,对知识图谱的更新、管理与维护至关重要。

数控设备故障知识图谱的应用主要在以下两个方面:(1)智能语义检索。该知识图谱以图结构的形式对故障案例事件的概念、属性以及实体关系进行组织和存储,使得领域隐性知识显性化、显性知识立体化。后续可利用基于本体的语义检索技术,并借助知识图谱的可视化分析,实现知识的智能检索与推理;(2)辅助故障诊断。相对于扁平化的数据信息,图结构的知识在语义层面上将围绕整个案例事件的所有元素有效地组织关联起来,并利用知识图谱的优势,辅助用户交互式排故

引导,实现故障推理与故障诊断。

3 数控设备故障知识图谱实现

基于本文提出的知识图谱构建方法,采用真实的故障案例数据实现并验证了该方法的可行性与有效性。首先,利用 Protégé 本体建模工具建立了数控设备故障本体模型,共包含 155 个概念、61 个概念间逻辑关系和 122 个概念属性关系。其次,以 RDMS 中的故障信息表为逻辑表,基于人工定义的 R2RML 映射文档中的规则,利用开源 r2rml-parser 工具实现从 RDB 到 RDF 四元组的映射;最后,应用 Eclipse 开发工具和 Dorado7 展现中间件开发了数控设备故障知识图谱平台,其中知识图谱可视化部分主要采用 SPARQL 查询和 GoJS 前台可视化技术实现。本文以“与压缩机进气阀相关的故障信息”为检索语句,检索出的相关实体和关系如图 5 所示。

4 结论

本文针对如何高效积累、组织与共享数控设备故障案例信息的问题,提出了数控设备故障领域知识图谱构建方法。构建了数控设备故障本体模型,提出了针对结构化故障数据的知识获取方法,采用了基于模式规则的数据映射机制,最终实现并验证了该方法的有效性和合理性。应用数控设备知识图谱可以改善故障知识组织方式,极大地提高历史故障知识利用率和故障诊断效率,并在故障推理与知识共享方面有非常高的应用价值。

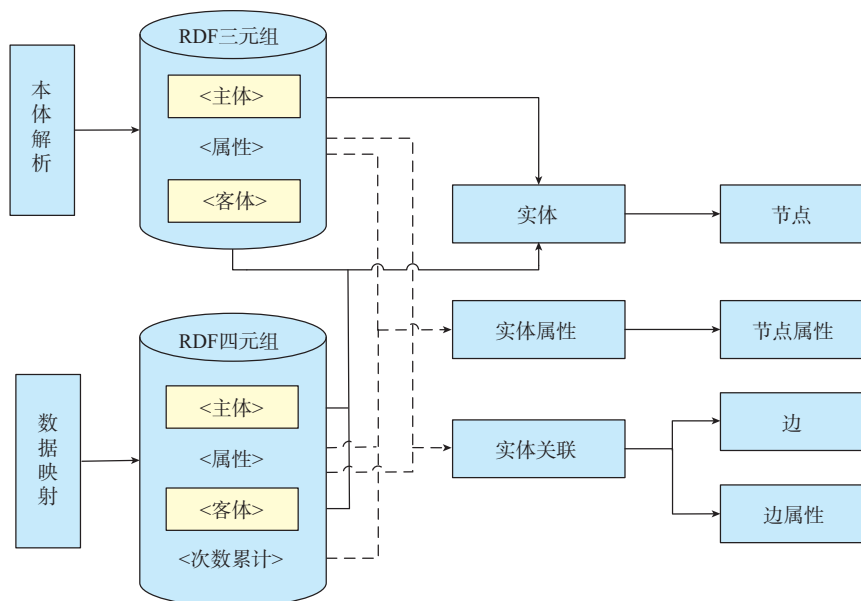


图4 RDF元素与知识图谱元素的对应关系

Fig.4 Relations between RDF elements and knowledge graph elements



Fig.5 Partial visualization interface of CNC equipment fault knowledge graph

参考文献

- [1] 史晋芳. 基于专家系统的数控机床故障诊断技术研究[J]. 机械设计与制造, 2006(7): 133-134.
- SHI Jinfang. Searching of the method for fault diagnosis expert system for NC device[J]. Machinery Design and Manufacture, 2006(7): 133-134 .
- [2] 李涛, 王次臣, 李华康. 知识图谱的发展与构建[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 22-34.
- LI Tao, WANG Cichen, LI Huakang. Development and construction of knowledge graph[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(1): 22-34.
- [3] 刘峤, 李杨, 段宏, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600.
- LIU Qiao, LI Yang, DUAN Hong, et al. Knowledge graph construction techniques[J]. Journal of Computer Research and Development, 2016, 53(3): 582-600.
- [4] MA Y, CROOK P A, SARIKAYA R, et al. Knowledge graph inference for spoken dialog systems[C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2015: 5346-5350.
- [5] WU W, LI H, WANG H, et al. Probbase: a probabilistic taxonomy for text understanding[C]// ACM International Conference on Management of Data. Scottsdale, 2012: 481-492.
- [6] CARLSON A, BETTERIDGE J, KISIEL B, et al. Toward an architecture for never-ending language learning[C]// Proceedings of the

- Twenty-fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence. Georgia, 2010.
- [7] LEHMANN J, ISELE R, JAKOB M, et al. DBpedia - a large-scale, multilingual knowledge base extracted from wikipedia[J]. Semantic Web, 2015, 6(2): 167–195
- [8] BOLLACKER K, EVANS C, PARITOSH P, et al. Freebase: a collaboratively created graph database for structuring human knowledge[C]// ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, SIGMOD 2008. Vancouver, 2008.
- [9] XU B, XU Y, LIANG J, et al. CN-DBpedia: A never-ending Chinese knowledge extraction system[J]. Lecture Notes Computer Science, 2017, 10351: 428–438.
- [10] DEROSE P, SHEN W, CHEN F, et al. DBLife: A community information management platform for the database research community (Demo)[C]// CIDR 2007, Third Biennial Conference on Innovative Data Systems Research. Asilomar, 2007: 169–172.
- [11] CONSORTIUM U P. The universal protein resource (UniProt) [J]. Nucleic Acids Research, 2008, 36(Database issue): D190.
- [12] 阮彤, 王梦婕, 王昊奋, 等. 垂直知识图谱的构建与应用研究[J]. 知识管理论坛, 2016(3): 226–234.
- RUAN Tong, WANG Mengjie, WANG Haofen, et al. Research on construction and application of vertical knowledge map[J]. KM Forum, 2016(3): 226–234.
- [13] 李文鹏, 王建彬, 林泽琦, 等. 面向开源软件项目的软件知识图谱构建方法[J]. 计算机科学与探索, 2017, 11(6): 852–861.
- LI Wenzheng, WANG Jianbin, LIN Zeqi, et al. Software knowledge

graph building method for open source project[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2017, 11(6): 852–861.

[14] 葛斌, 谭真, 张翀, 等. 军事知识图谱构建技术[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(4): 302–308.

GE Bin, TAN Zhen, ZHANG Chong, et al. Military knowledge graph construction technology[J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(4): 302–308.

[15] 俞思伟, 范昊, 王菲, 等. 基于知识图谱的智能医疗研究[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(3): 109–111.

YU Siwei, FAN Hao, WANG Fei, et al. Intelligent medical research based on knowledge map[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(3): 109–111.

[16] 吴运兵, 阴爱英, 林开标, 等. 基于多数据源的知识图谱构建方法研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017(3): 329–335.

WU Yunbing, YIN Aiyong, LIN Kaibiao, et al. Research on knowledge mapping construction method based on multiple data sources[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2017(3): 329–335.

[17] 项灵辉. 基于图数据库的海量 RDF 数据分布式存储[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.

XIANG Linghui. Distributed storage for massive RDF data based on graph database[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.

[18] 周书锋, 许卓明. 基于 R2RML 的关系数据库向资源描述框架映射算法[EB/OL]. [2013–02–04]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201302–35>.

ZHOU Shufeng, XU Zhuoming. R2RML-based relational database to resource description framework mapping algorithm[EB/OL]. [2013–02–04]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201302–35>.

通讯作者: 赵倩, 硕士, 助理工程师, 研究方向为知识管理、知识图谱、故障诊断等, E-mail: zhaoqian0912@126.com。

(责编 大漠)

(上接第95页)

耗为止。在碳含量较低的晶界处, 730℃时效时 γ' 相在两侧晶粒基体中的析出将先于 $M_{23}C_6$ 相在晶界的析出, 当 $M_{23}C_6$ 相在晶界形成稳定核心后, 两侧晶粒中预先析出的 γ' 相将阻止 $M_{23}C_6$ 相沿有利的晶向生长, 此时其生长受元素扩散控制。尽管沿晶界的元素扩散速率较快, 但晶界上的多个 $M_{23}C_6$ 相核心的生长必然快速导致 C 和 Cr 元素的贫化, 因此其生长必然依赖于两侧晶粒不断提供 C 和 Cr 元素, 最终使 $M_{23}C_6$ 相生长成嵌入两侧晶粒的块状。

综上所述, $M_{23}C_6$ 相的析出形态受 γ' 相的析出控制。当 γ' 相预先在基体中析出时, $M_{23}C_6$ 相只能生长成块状; 当 γ' 相与 $M_{23}C_6$ 同时析出时, 有可能以共析方式生长成互相交迭的片状。

4 结论

(1) 当 980℃固溶冷却速率低于 4.5℃/h, GH4145

合金的 γ' 相会在冷却过程中析出; 高于 22℃/s 时, γ' 相的析出会被完全抑制。

(2) 当 GH4145 合金的基体中预先析出 γ' 相时, $M_{23}C_6$ 相的析出和长大受元素扩散控制, 最后将生长成嵌入两侧晶粒的块状。当基体中无 γ' 相析出时, 有可能导致局部晶界发生 γ' 相与 $M_{23}C_6$ 相的共析反应, 形成互相交迭的片状组织。

参考文献

[1] BARLOW C Y, RALPH B. Observations of cellular transformation products in nickel-base superalloys[J]. Journal of Materials Science, 1979, 14(10): 2500–2508.

[2] FLOREEN S, NELSON J. The effects of heat treatment and composition on the stress corrosion cracking resistance of Inconel alloy X-750[J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(1): 133–139.

[3] HATTORI K, TSUBOTA M, OKADA T. Effect of chloride on the stress corrosion cracking susceptibility of Inconel X-750 in high-temperature water[J]. Corrosion, 1986, 42(9): 531–532.

[4] KEKKONEN T, HÄNNINEN H. The effect of heat treatment on the microstructure and corrosion resistance of Inconel X-750 alloy[J]. Corrosion Science, 1985, 25(8–9): 889–893.

[5] KOTVAL P, HATWELL H. Discontinuous precipitation of $M_{23}C_6$ carbide in a nickel base superalloy[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1969, 245(8): 1821–1823.

[6] MILLS W. Fracture surface micromorphology of Inconel X-750 at room temperature and elevated temperatures[R]. Richland: Hanford Engineering Development Lab, 1977.

[7] MILLS W, MASTEL B. Room temperature and elevated temperature deformation characteristics of Inconel X-750[R]. Richland: Hanford Engineering Development Lab, 1979.

[8] MISHRA B, MOORE J. Effect of single aging on stress corrosion cracking susceptibility of INCONEL X-750 under PWR conditions[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(5): 1295–1304.

[9] SIMS C T, STOLOFF N S, HAGEL W C. Superalloys II [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1987.

[10] VOICE W, FAULKNER R. The discontinuous precipitation of $M_{23}C_6$ in Nimonic 80A[J]. Journal of Materials Science, 1987, 22(12): 4221–4232.

[11] WANG Y, PAN Q, SONG Y, et al. Hot deformation and processing maps of X-750 nickel-based superalloy[J]. Materials & Design, 2013, 51: 154–160.

[12] ZHANG H K, YAO Z, MORIN G, et al. TEM characterization of in-reactor neutron irradiated CANDU spacer material Inconel X-750[J]. Journal of Nuclear Materials, 2014, 451(1–3): 88–96.

通讯作者: 张伟红, 副研究员, 博士, 研究方向为高温合金及其加工技术, E-mail: whzhang@imr.ac.cn。

(责编 大漠)