

文章编号: 2095-2163(2023)03-0133-10

中图分类号: TP182

文献标志码: A

# 开放知识驱动的绿色工程材料选择方法

安 宁, 张应中, 田景海

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 材料选择直接影响产品性能,是机械产品设计制造的重要一环。材料选择需要考虑材料全生命周期,涉及多领域专业经验知识,需要一个开放知识驱动的工程材料选择方法。本次研究提出一个基于本体的工程材料选择知识概念模型和开放的知识表示框架,基于该本体模型可以为新的产品设计材料选择提供语义检索;将产品设计需求与制造、使用和材料特性等之间的映射关系通过知识规则进行开放的显式定义,通过知识推理自动获取材料选择特性指标,有助于高效和高质量完成材料选择。最后以压铸模具材料选择为例,展示了基于知识推理的材料选择过程。所提出的材料选择知识表示方法具有较好的开放性和知识表达能力,为开放知识驱动的工程问题智能解决方案提供有益的尝试。

**关键词:** 工程材料选择; 绿色材料选择; 开放知识驱动; 知识表示; 知识推理

## Open knowledge driven green engineering material selection method

AN Ning, ZHANG Yingzhong, TIAN Jinghai

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**[Abstract]** Material selection is an important part of mechanical product design and manufacturing, and directly affects product performance. Material selection needs to consider the entire life cycle of materials, involving multi-domain professional experience and knowledge, and requires an open knowledge-driven engineering material selection method. This research proposes an ontology-based conceptual model of engineering material selection knowledge and an open knowledge representation framework. Based on the ontology model, semantic retrieval can be provided for new product design material selection. The mapping relationship between them is openly and explicitly defined through knowledge rules, and the characteristic indicators of material selection are automatically obtained through knowledge reasoning, which is helpful for efficient and high-quality material selection. Therefore, taking die casting mold material selection as an example, the material selection process based on knowledge reasoning is shown. The proposed material selection knowledge representation method has good openness and knowledge expression ability, and provides a beneficial attempt for intelligent solutions to engineering problems driven by open knowledge.

**[Key words]** engineering material selection; green material selection; open knowledge driven; knowledge representation; knowledge reasoning

## 0 引言

工程材料是制造产品的物质基础,工程材料的选择对产品性能、制造成本和环境有不可忽视的影响,在产品设计中材料选择是至关重要的一环。然而随着科学技术的发展,可用的工程材料的种类和数量快速增长,据估算,世界上有大约超过16万种的工程材料,并且大量的新兴材料还在不断涌现<sup>[1]</sup>。工程材料具有不同的机械、物理和化学特

性,同时从原材料开采到加工制造、再到产品的使用及报废处理等材料全生命周期中,材料对环境的影响占据较大的比重。工程材料选择是一项高强度知识活动,要选择到能够满足设计需求、全生命周期环境影响较小并且成本合理的绿色工程材料,需要具备关于工程材料各种特性及材料全生命周期的综合知识。

由于材料选择的重要性,国内外开展了很多关于工程材料选择方法研究<sup>[2-3]</sup>。近年来由于环境问

**基金项目:** 国家科技重点研发计划项目(2020YFB1711601)。

**作者简介:** 安 宁(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:知识工程;张应中(1961-),男,博士,教授,主要研究方向:计算机辅助设计、知识工程、产品全生命周期评价;田景海(1993-),男,博士研究生,主要研究方向:知识工程、产品全生命周期评价。

**通讯作者:** 张应中 Email: zhangyz@dlut.edu.cn

收稿日期: 2022-04-26

题的不可忽视,绿色工程材料选择成为新的研究方向。同时随着智能信息技术的发展,基于知识的工程材料选择方法日益得到重视。Goel 等学者<sup>[4]</sup>较早地在工程设计中采用专家知识网络用于材料选择。Zarandi 等学者<sup>[5]</sup>提出一个面向可持续产品设计的材料选择方法和专家系统。Ipek 等学者<sup>[6]</sup>提出一个基于专家系统的材料选择方法。Urrea 等学者<sup>[7]</sup>开发一个材料选择专家系统用于起重机的主体结构设计。Zhang 等学者<sup>[8]</sup>提出了一个基于本体的工程材料选择知识框架。王飞<sup>[9]</sup>开展了基于本体的材料选择知识库研究。Peng 等学者<sup>[10]</sup>提出一个知识驱动的材料设计和选择平台。但上述研究缺乏对材料全生命周期分析,材料选择知识表示和开发的专家系统缺乏开放性,材料选择知识之间的映射关系缺乏知识表示和推理机制的研究。

本文针对工程材料全生命周期环境影响特性,采用本体和语义表示技术,提出一个面向材料全生命周期的知识概念本体模型和开放知识驱动的绿色工程材料选择知识表示框架和材料选择方法。系统可以根据产品的类型、功能、结构形式、使用环境和

制造工艺等设计需求,自动推理出要选择材料的各项特性指标要求,提高材料选择效率和质量;用户也根据上述材料设计需求从材料选择知识实例库中进行语义查询,选择出相类似的工程材料。

## 1 基于全生命周期知识的绿色工程材料选择框架

### 1.1 工程材料全生命周期分析

工程材料的全生命周期对环境产生影响<sup>[2]</sup>,其全生命周期分析是材料选择的重要依据。材料全生命周期过程如图1所示,包括从矿石中提取生产原材料、材料毛坯生产、加工制造、装配制造、产品使用、产品拆解、再制造、回收和废弃处理等全过程。

从图1可以看出,工程材料的全生命周期都会对环境和资源产生影响。例如对于运动产品,轻质(密度低)材料消耗较少的能源;对于需要机械加工的产品,易加工材料会减少能源消耗和刀具损耗;可回收再利用材料能够减少对自然资源的消耗和对环境土壤的排放。上述这些构成工程材料的全生命周期环境影响知识,是绿色工程材料选择的基础。

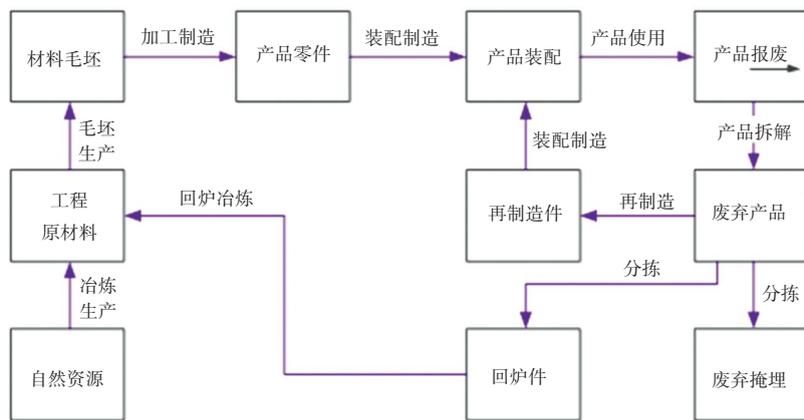


图1 工程材料的全生命周期

Fig. 1 The full life cycle of engineering material

### 1.2 工程材料全生命周期选择知识

绿色工程材料选择是要从众多的可用材料中选出符合产品设计要求、资源合理利用、环境友好、成本低并且有益于社会发展的材料。工程材料选择涉及大量的材料知识和材料数据。材料的基本数据,包括材料名称、机械力学特性、物理和化学特性等,通常存储在工程材料数据库中,为选材提供数据支持;材料知识是对材料本身及其在全生命周期过程中行为特性的总结与凝练的系统认识,是材料选择的依据。主要包括如下知识:

(1)工程材料特性知识。每一种工程材料都有其特有的物质结构和多种物理、化学和机械力学等特性,这些特性是对材料性能定量的刻画。每一种材料特性通过特性概念和具体量化值进行描述,特性概念的语义构成工程材料特性知识。此外,产品设计需求与材料特性之间的映射关系也构成工程材料选择知识,例如要求材料耐高温,则材料要具备较高的熔点。

(2)制造工艺与材料特性之间关系知识。根据产品功能需求,要求各种形式的产品的物理结构,通

过各种制造方式实现。例如箱体结构,一般形状结构复杂,通过铸造方式制造,即要求工程材料具有好的可铸造性,与材料晶体结构和物理化学特性相关;钣金结构通过冲压形成,要求材料具备较好的塑性变形能力,制造工艺与材料特性之间关系是工程材料选择知识重要的部分。

(3)产品使用与材料特性之间关系知识。产品最终目的是产品使用,产品使用涉及各种使用环境、使用方式和失效形式,选择的工程材料必须适应使用需求。例如,产品在室外潮湿环境使用,要求产品材料防腐性强。通过使用需求到材料特性之间的映射关系构成工程材料使用知识。

(4)产品回收利用和再制造的工程材料知识。

产品在服役完成后进入报废阶段,哪些材料是可回收再利用的,哪些材料制造的零部件可通过再制造重新使用构成工程材料回收利用知识。

从上述分析看,工程材料选择知识大部分是材料特性与功能、制造、使用和环境等之间关系的映射知识,难以结构化,并且依赖企业场景和工程师的设计经验。开放模式的知识表示方法可以根据使用者的经验和实际情况方便地定义和修改材料选择知识。

### 1.3 开放知识驱动的工程材料选择框架设计

根据上述面向全生命周期的绿色工程材料选择知识分析,本文提出一个面向材料全生命周期的绿色工程材料选择知识表示框架,如图2所示。该知识表示框架由3层组成,对此拟做阐释分述如下。

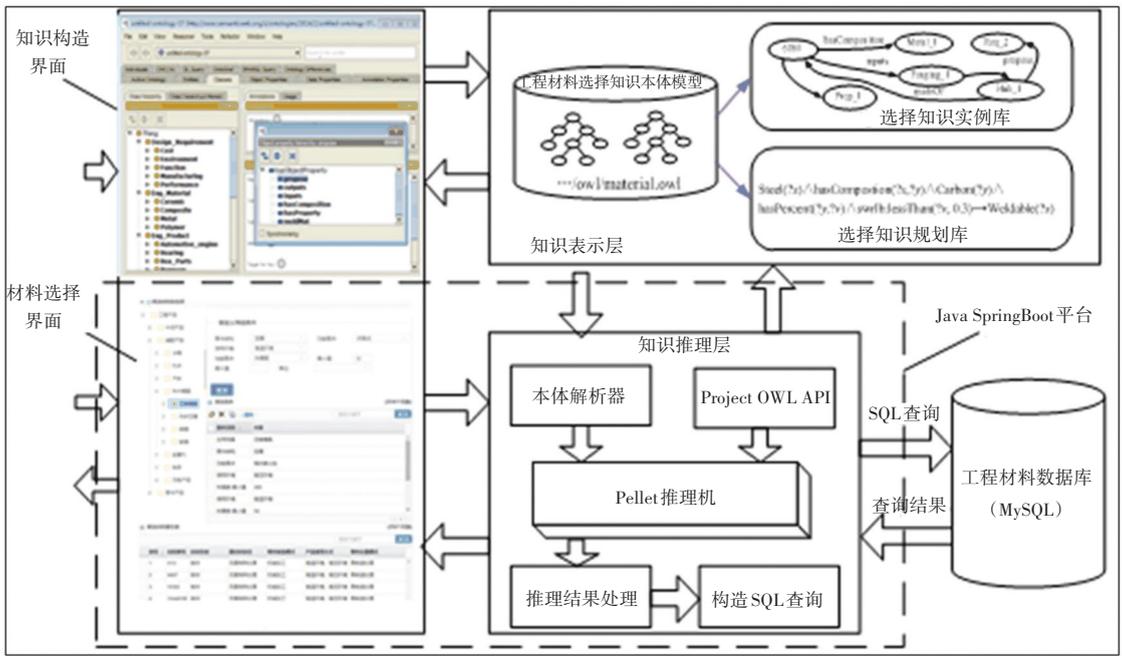


图2 工程绿色材料选择知识框架

Fig. 2 Knowledge framework for engineering green material selection

(1)知识表示层。知识表示层主要包括:

① 材料选择知识概念本体模型。采用 OWL (Web Ontology Language) 语言,在 Protégé<sup>[11]</sup> 本体工具软件下定义。

② 材料选择知识实例库。由一组描述和记录工程材料选择实例组成,可以为后续材料选择提供语义检索。

③ 材料选择知识规则库。材料概念之间映射的因果关系、概念语义的显式定义等知识都可以用产生规则描述,本文采用 SWRL (Semantic Web Rule Language)<sup>[12]</sup> 规则语言定义因果关系知识规则。

(2)知识推理层。知识推理层是知识库层的执

行机构,其主要任务是基于事实和规则挖掘出知识体系中隐含知识。本文采用 OWL API 4.5.19 开源库接口库函数实现本体知识库的加载和解析、本体实例的构建和 SQWRL (Semantic Query - enhanced Web Rule Language)<sup>[13]</sup> 语义查询引擎的配置等功能操作,采用 Pellet 作为知识推理机,可根据知识库中的概念、属性关系、实例等事实,并借助规则库完成对用户材料选择的知识推理,自动生成对材料数据库查询和材料选择实例库的实例语义查询。

(3)用户界面层。界面是连接用户与计算机的桥梁,主要包括2个界面。一是知识本体构造器,采用 Protégé 本体开发工具,构建全生命周期绿色工程

材料选择知识领域概念本体,包括概念类、类属性关系、实例及规则等,以 OWL/XML 格式文件存储。二是绿色工程材料选择器,基于 IntelliJ IDEA 集成 Java Springboot 平台开发,浏览器运行。知识表示层为选择界面提供数据支持,即材料选择本体为选择界面提供数据模板;用户在材料选择过程中,系统根据选择意向,自动捕捉选择意图,经过知识推理自动更新选择列表框内容。

## 2 工程材料全生命周期选择知识表示模型

### 2.1 工程材料选择知识概念本体模型

工程材料选择的目的是从可用的材料数据集中选择能满足产品设计需求的材料。材料选择知识涉及材料全生命周期,并且材料选择知识大部分隐性

存在各种关系中,很难结构化和形式化。如何表示非结构化和隐性的材料选择知识是一个大的挑战。

一般情况下,概念是表示实体和关系的一类抽象形式,知识可以由一组相互联系的概念描述,概念是知识表示的基础。从材料全生命周期看,材料选择知识主要涉及如下概念:

$C = \{ \text{工程材料, 材料特性, 工程产品, 设计要求, 制造工艺, 使用过程, 处置过程, 材料成本, 材料牌号} \}$

上述知识概念及其概念间语义关系构成知识概念本体模型,本体模型部分内容如图 3 所示。这里针对工程材料类、材料特性类和制造工艺类,将给出探讨论述如下。

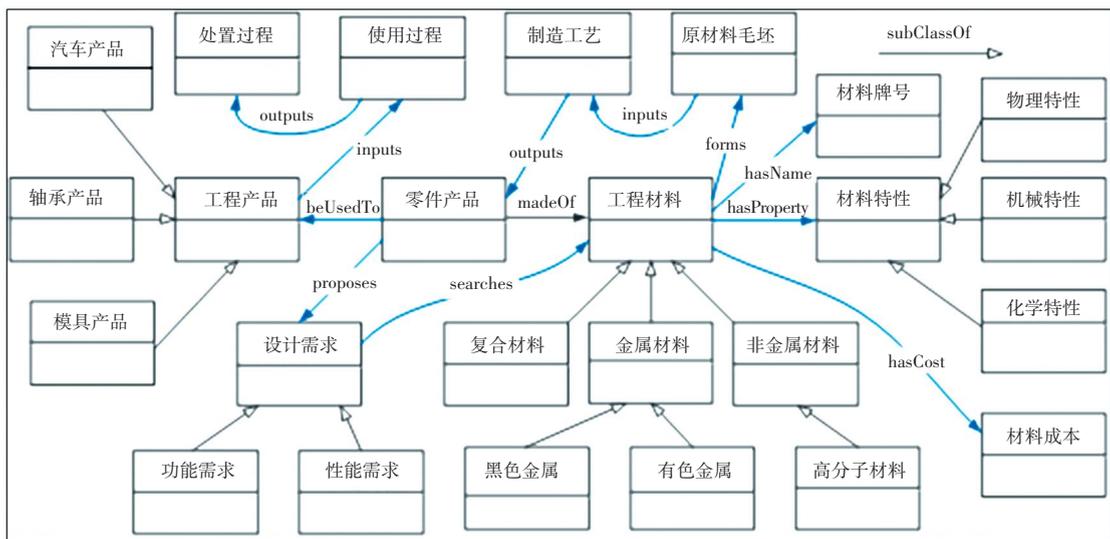


图3 工程绿色材料选择知识概念本体模型(部分内容)

Fig. 3 Ontology model of knowledge concept for engineering green material selection (partial content)

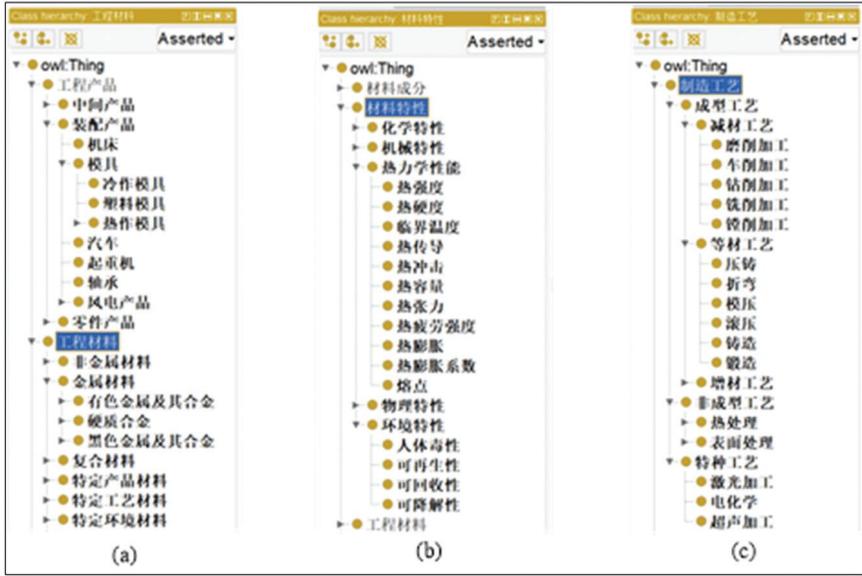
(1)工程材料类。工程材料表示工程中涉及的各种材料。在面对数量和种类庞大的工程材料及应用时,工程材料分类是一项重要的知识活动。本文将工程材料的分类和应用知识进行融合,定义“工程材料”类,如图 4(a)所示。“工程材料”类作为基类,不仅派生出“复合材料”类、“金属材料”类和“非金属材料”类,而且针对在不同应用下的工程材料分类,还增加了“特定环境材料”类、“特定产品材料”类、“特定工艺材料”类等。

(2)材料特性类。材料特性是指材料具有的某些不可改变的特征和固有的行为,材料特性基本决定了所选择的材料在制造产品中的性能,因此材料特性是选择工程材料的重要依据。本文采用“材料特性”类作为材料特性概念的基类,根据材料的特

征行为和和应用需求,“材料特性”类下派生出“机械特性”类、“物理特性”类、“化学特性”类、“热力学特性”类和“环境特性”类,如图 4(b)所示,定义的材料特性类形成一个层次关系。

(3)制造工艺类。制造工艺是为了满足产品设计需求,对材料产品进行成型和改性的制造方法。随着技术的发展,目前可用的制造工艺很多,但是不同的材料适应不同的工艺,例如铸铁材料通常通过铸造工艺制造成箱(壳)体零件。此外,一些制造工艺,例如热处理过程,可能改变材料的某些特性。因此材料的制造工艺构成重要的材料选择知识。

本文定义“制造工艺”类表示制造工艺概念,按照处理材料的工艺特点,制造工艺类的层次关系如图 4(c)所示。



(a) 工程材料类 (b) 材料特性类 (c) 制造工艺类

图4 工程材料知识本体类定义

Fig. 4 Engineering material knowledge ontology class definitions

### 2.2 工程材料选择规则的知识表示

知识概念模型只是对材料选择知识概念(术语)进行形式化的定义,但在选材过程中存在大量因果映射关系,是材料选择知识的重要部分。产生式知识规则是表示因果知识的一种有效方法。产生式知识规则基本形式是:如果条件成立,则结论成立。本文采用 SWRL 来创建知识规则,SWRL 规则的标准形式为:

$$A_1 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge \dots \wedge A_n \rightarrow B_1 \wedge B_2 \wedge B_3 \wedge \dots \wedge B_m \quad (1)$$

其中,  $A$  为推理条件,  $B$  为推理结果。  $A$  有  $C(x)$ 、 $P(x,y)$  两种形式, 如果  $x$  是  $C$  的实例, 则  $C(x)$  为真; 如果实例  $x$  和实例  $y$  具有  $P$  关系, 则  $P(x,y)$  为真。

在材料选择中,要从产品设计需求出发,将材料特性与产品需求对应。产品需求通常是宏观的,而材料特性是材料本身所具有的性质,通常是具体的。产品需求与材料特性一般也不是一对一关系,有时一个产品需求可能对应多种材料特性,两者之间信息映射关系如图5所示。

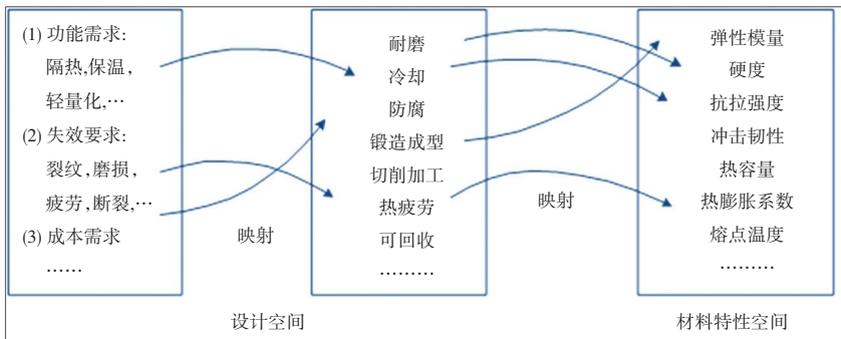


图5 产品设计需求与材料特性之间的映射关系

Fig. 5 Mapping relationship between product design requirements and material properties

产品需求与材料特性是多对多的关系,需要多种材料特性的组合,定义知识规则较困难。为了表示产品设计需求与材料特性之间的知识映射关系,本文提出通过特定材料概念方式进行定义,即将材料特性组合映射到一个工程需求相关的特定材料概

念中。SWRL 规则形式如下:

$$C_1^1 \wedge C_2^1 \wedge C_3^1 \wedge \dots \wedge C_m^1 \rightarrow M_1, \dots,$$

$$C_1^k \wedge C_2^k \wedge C_3^k \wedge \dots \wedge C_n^k \rightarrow M_k \quad (2)$$

在式(2)中,  $M$  表示新的特定材料概念,  $C$  表示

一组材料特性组合。材料选择知识规则库可表示为： $R = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 。下面列出2类SWRL材料选择知识规则定义。

(1) 产品设计需求与材料特性的映射。产品设计需求是特定产品对要选择材料在功能、结构、成

本、制造方式和使用环境等方面的定制要求,每一类要求一般对应一项或多项材料性能指标。本文对这些要求进行分解,建立知识规则,表1列出部分材料特性与产品设计需求知识规则。

表1 部分产品设计需求与材料特性知识规则

Tab. 1 Some product design requirements and material property knowledge rules

序号	SWRL 规则	含义
1	工程材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? d) $\wedge$ 密度(? d) $\wedge$ hasValue(? d, ? v) $\wedge$ hasUnit(? d, ? u) $\wedge$ Gcm(? u) $\wedge$ swrlb:lessThan(? v, 2.8) $\wedge$ swrlb:greaterThan(? v, 1.7) $\rightarrow$ 较轻型材料(? m)	密度小于 2.75 的材料称为较轻型材料(铝密度 2.7)
	工程材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? d) $\wedge$ 密度(? d) $\wedge$ hasValue(? d, ? v) $\wedge$ hasUnit(? d, ? u) $\wedge$ Gcm(? u) $\wedge$ swrlb:lessThan(? v, 1.7) $\wedge$ swrlb:greaterThan(? v, 1) $\rightarrow$ 轻型材料(? m)	密度小于 1.7 的材料称为较轻型材料(环氧树脂、碳纤维)
2	工程材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? d) $\wedge$ 密度(? d) $\wedge$ hasValue(? d, ? v) $\wedge$ hasUnit(? d, ? u) $\wedge$ Gcm(? u) $\wedge$ swrlb:lessThan(? v, 1) $\rightarrow$ 超轻型材料(? m)	密度小于 1 g/cm <sup>3</sup> 的材料称为超轻型材料(聚丙烯 0.95)
3	工程材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? h) $\wedge$ 硬度(? h) $\wedge$ hasValue(? h, ? v) $\wedge$ hasUnit(? h, ? u) $\wedge$ HRC(? u) $\wedge$ swrlb:greaterThan(? v, 50) $\rightarrow$ 耐磨材料(? m)	硬度大于 HRC50 的材料称为耐磨材料
4	金属材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? p) $\wedge$ 熔点(? p) $\wedge$ hasValue(? p, ? v) $\wedge$ swrlb:greaterThan(? v, 1 200) $\wedge$ hasUnit(? h, ? u) $\wedge$ Centigrade(? u) $\rightarrow$ 耐高温金属材料(? m)	熔点大于 1 200° 的材料为耐高温金属材料

(2) 制造工艺与材料特性的映射。不同的制造工艺对材料的性能要求有很大差异,如焊接过程对材料的碳含量有要求,而锻造工艺对材料的伸长率、抗拉强度有要求。制造工艺与材料特性类映射的主

要方式是:将材料特性组合映射到一个制造工艺概念。表2展示了部分制造工艺与材料特性的映射知识规则。

表2 部分材料特性与制造工艺知识规则

Tab. 2 Some material properties and manufacturing process knowledge rules

序号	SWRL 规则	含义
1	金属材料(? m) $\wedge$ hasCarbon(? m, ? c) $\wedge$ swrlb:lessThan(? c, 0.25) $\rightarrow$ 焊接材料(? m)	碳含量小于 0.25% 的金属材料定义为焊接材料
2	金属材料(? m) $\wedge$ hasProperty(? m, ? p) $\wedge$ 屈服强度(? p) $\wedge$ hasValue(? p, ? v) $\wedge$ hasUnit(? p, ? u) $\wedge$ MPa(? u) $\wedge$ swrlb:lessThan(? v, 270) $\wedge$ hasProperty(? m, ? q) $\wedge$ 拉伸强度(? q) $\wedge$ hasValue(? q, ? v) $\wedge$ hasUnit(? q, ? w) $\wedge$ MPa(? w) $\wedge$ swrlb:greaterThan(? v, 200) $\rightarrow$ 折弯材料(? m)	屈服强度小于 270 MPa、并且拉伸强度大于 200 MPa 的金属材料为折弯材料

### 2.3 工程材料选择实例的知识表示

绿色工程材料选择依赖知识,并且很多还是隐性知识,难以用显性的知识规则表示。在产品材料选择实践中有大量的成功选择实例,是企业知识财富,可以作为材料选择实例知识保存下来,为以后遇

到类似的设计需求时,通过基于实例的知识推理查询可以直接做出选择。

根据本文由图3提出的材料选择知识本体模型,将材料选择过程的事实通过本体模型标注,可以表达为一个 RDF(Resource Description Framework)

三元组的知识图:  $G = \langle V, E \rangle$ 。其中,  $V$  表示图实例节点的集合,  $E$  表示图关系边的集合。实例是在材料选择中的一个事实, 例如选择了一个具体为 40Gr 钢的材料, 则生成一个材料实例  $m1$ ,  $m1$  类型是 40Gr 钢, 40Gr 钢的父类是金属材料。图 6 给出

一个汽车轮毂材料选择实例知识图部分内容。图 6 中, 椭圆符号表示一个实例节点, 实例标识上面带下划线的术语是该实例所属的类。

由  $n$  个工程材料选择实例知识图构成材料选择知识实例库:  $L_{实例库} = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ 。

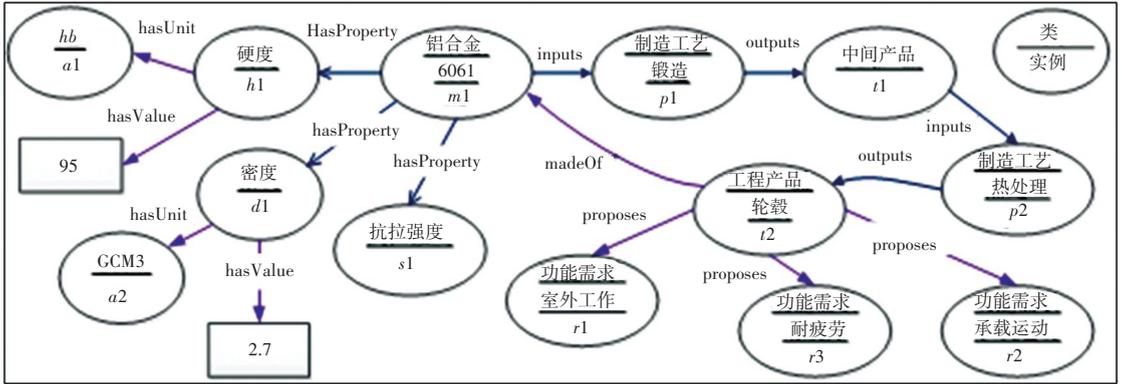


图 6 轮毂材料选择实例知识图(部分内容)

Fig. 6 Knowledge map of wheel hub material selection example (part of the content)

### 3 知识驱动的工程材料选择

#### 3.1 材料选择知识推理需求

知识推理是利用已知的知识通过推理得出结论的过程, 或者从已知的知识中通过推理获取所蕴含的新的事实。知识推理是绿色工程材料选择知识系统的关键。

工程材料选择一般从产品设计需求开始, 从大量已有的工程材料中选择出能够满足设计需求、绿色环保和价格合适的材料, 材料选择知识推理主要体现在如下方面:

(1) 工程材料跨领域知识映射推理需求。从工程材料全生命周期看, 材料选择知识涉及材料本身特性、材料向产品转变过程的制造、产品使用过程中由于材料产生的环境影响等多个学科领域, 各学科之间存在因果联系, 需要知识和经验。

(2) 工程材料概念语义关系推理需求。工程材料涉及很多概念和关系, 理解这些概念和关系需要理解具体的语义。这些语义关系大都是蕴含在概念中的。例如, 碳钢是一种金属材料, 即碳钢定义为金属材料的子类, 通过语义层次关系推理, 计算机就能知道金属材料具备的特性, 碳钢也具备。

(3) 工程材料应用实例知识推理需求。实际工作中, 工程材料选择考虑的因素很多, 不仅在材料特

性上满足设计需求, 还有制造、使用、价格和库存等很多因素。有些因素是不可表达的, 称为经验或者隐性知识。如果将这些成功的材料选择形式化地存储, 构成材料选择知识实例库, 当新的材料选择问题出现时, 可以通过知识推理, 检索出所需的材料。

#### 3.2 基于知识推理的工程绿色材料选择

根据前面所述的材料选择推理需求, 本文基于知识推理框架, 实现了基于知识的工程绿色材料选择。主要实现 2 种模式的知识推理服务, 如图 7 所示。相应的阐释表述具体如下。

(1) 从产品设计需求到材料特性的知识推理。在开始选择材料时, 通常对选择材料的特性指标是模糊的, 但产品设计需求是确定的。工程师通常需要根据产品设计需求查询手册和相关文献或者回忆自己经验(或请教他人经验)等知识活动, 确定选择材料的各项特性指标, 通过材料特性指标才能搜索材料数据库。本文参考这种知识推理模式, 实现从产品设计需求到材料特性指标的知识推理服务。

一般在设计需求确定后, 就有了材料需求的概念。例如, 设计的产品是汽车保险杠, 则保险杠产品特性决定了材料的需求概念, 例如轻型材料、耐腐蚀材料、吸能材料、压注成型材料等。这些材料概念可以通过材料的一种或者多种材料特性显式知识规则定义。因此, 本文提出如下知识推理过程:

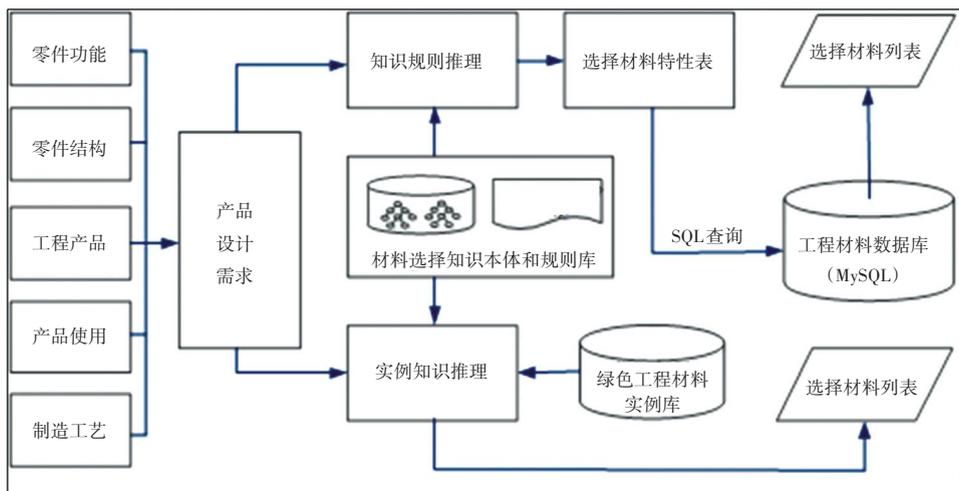


图7 工程材料选择知识推理模式

Fig. 7 Engineering material selection knowledge reasoning model

① 产品设计的宏观需求转换为材料目标概念的需求。将使用者在产品分类、产品功能、产品结构和使用环境的列表框中选择按照知识规则映射,转化为一组特定材料目标概念。这一步通过对定义的知识规则正向推理完成。

② 通过对需求的材料目标概念获取选择材料各项特性指标。对定义的知识规则采取逆向非实例可满足性推理,即假设已知推理结果,实例已知找到,查找可满足条件。本文采取的方法是首先从规则库中,寻找与目标概念匹配的知识规则,如果找到,将推理实例带入 SWRL 规则左侧,该部分是一个标准的 SWRL 规则前提,通过布尔运算符将概念和关系原子连接起来,形成查询条件。将已知实例带入测试查询条件,检查能返回是真的材料特性关系,如果测试是真,该项材料特性关系及数值作为推理出来的材料特性指标。

在查询过程中,由于查询条件中的概念和关系可能是由 SWRL 规则定义导出的概念和关系,或者是由 OWL 语义隐含的关系,需要对查询中出现的类和属性原子递归测试,这些通过推理机语义推理完成。

(2) 基于产品设计需求的材料选择实例推理。上述已经介绍,一个材料选择事实通过形式化存储为一个选择实例 RDF 知识图,大量成功的材料选择构成材料选择实例库。当新的产品设计任务提出新的材料选择需求时,可以通过对材料选择实例库进行语义查询推理,可以找出设计需求和制造工艺相符合的工程材料。知识查询过程如下:

根据产品新设计需求,构建 SQWRL 语义查询

语句。其查询语句类似 SWRL 规则语言,一般工程材料查询语句形式为:工程材料(?  $m$ )  $\wedge$  工程产品(?  $p$ )  $\wedge$  madeOf(?  $p$ , ?  $m$ )  $\wedge$  proposes(?  $p$ , ?  $r$ )  $\wedge$  设计需求(?  $r$ )  $\wedge$  inputs(?  $m$ , ?  $w$ )  $\wedge$  制造工艺(?  $w$ )  $\wedge$  outputs(?  $w$ , ?  $p$ )  $\rightarrow$  sqwrl:select(?  $m$ )

上述语句中,“工程产品”表示新选择材料的产品,具体产品是“工程产品”类下的某个子类,例如“轮毂”;“设计需求”表示产品设计需求的集合,即  $r = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ ,通过“proposes”关系将产品与设计需求联系起来;“制造工艺”表示由材料制造成产品的制造工艺的集合,即  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ,将材料和产品通过 inputs 和 outputs 关系联系形成闭环。最终 sqwrl:select(?  $m$ ) 选择出一组符合查询要求的材料集:  $m = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 。

将构造的语义查询语句加载到 SQWRL 引擎中,系统自动进行语义推理,从实例库中查询到满足上述查询语句工程材料汇总到一个列表中。语义查询不同于关键字匹配查询,即:

(1) 是一个实例查询,包括一个概念类下的所有实例,例如“工程材料(?  $m$ )”是指所有的工程材料实例,无论是金属材料、还是非金属材料。

(2) 查询概念可以是本体定义的原子概念,也可以是通过 SWRL 规则定义的导出概念。

## 4 应用实例

本文提出方法在 IntelliJ IDEA 集成开发平台上采用 Java 语言,以浏览器运行模式编程实现,图 8 是开发的工程材料选择系统界面。下面以热作模具

的材料选择作为应用实例。热作模具是在较高的温度条件下,使金属材料产生塑性变形的加工方法,一般分为铸模、锻模和热挤压模。由于论文篇幅,下面仅介绍通过材料选择知识推理自动给出压铸模具定模的材料选择特性指标,根据材料特性指标查询工程材料数据库,选择出一组候选材料。

在材料选择知识收集和定义的基础上,首先从应用产品列表框中选择热作模具的压铸模具;系统

将压铸模具主要结构(定模、动模和其它)分解,更新零件结构列表,选择定模;系统根据已构建的知识推理,在使用环境列表中列出使用场景和失效形式。使用场景为高温、高压,失效形式为:裂纹、腐蚀、磨损和热疲劳。使用者分别对高温的温度和高压的压力进行初始设置,并对失效形式进行选择,系统推理出选择材料的特性指标,推理过程见表3。

表3 压铸模材料选择知识推理

Tab. 3 Knowledge reasoning of die-casting material selection

选择阶段	SWRL 知识规则	推理结果
产品选择: 压铸模	热作模 (? p) $\wedge$ contains (? p, ? m1) $\wedge$ 定模 (? m1) $\wedge$ contains (? p, ? m2) $\wedge$ 动模(? m2) $\wedge$ contains (? p, ? m3) $\wedge$ 其它(? m3) $\rightarrow$ 压铸模(? p)	结构:定模、动模、其它
结构选择: 定模	定模 (? p) $\wedge$ workIn (? p, ? t1) $\wedge$ 高温 (? t1) $\wedge$ workIn (? p, ? t2) $\wedge$ 高压 (? t2) $\wedge$ hasFailure (? p, ? f1) $\wedge$ 裂纹 (? f1) $\wedge$ hasFailure (? p, ? f2) $\wedge$ 腐蚀 (? f2) $\wedge$ hasFailure (? p, ? f3) $\wedge$ 磨损 (? f3) $\wedge$ hasFailure (? p, ? f4) $\wedge$ 热疲劳 (? f4) $\rightarrow$ 压铸定模 (? p)	使用环境:高温、高压; 失效:裂纹、腐蚀、磨损、热疲劳
使用环境选择: 高温(>200°)、 高压(>20 MPa) 失效形式: 裂纹、腐蚀、 磨损、热疲劳	定模 (? p) $\wedge$ madeOf (? p, ? m) $\wedge$ hasProperty (? m, ? h) $\wedge$ 热硬度 (? h) $\wedge$ hasValue (? h, ? v) $\wedge$ swrlb:greaterThan (? v, 50) $\wedge$ hasUnit (? h, ? u1) $\wedge$ HRC (? u1) $\wedge$ hasProperty (? m, ? s) $\wedge$ 热强度 (? s) $\wedge$ hasValue (? h, ? v) $\wedge$ swrlb:greaterThan (? v, 400) $\wedge$ hasUnit (? s, ? u2) $\wedge$ MPA (? u2) $\wedge$ hasProperty (? m, ? y) $\wedge$ 屈服强度 (? y) $\wedge$ hasValue (? y, ? v) $\wedge$ swrlb:greaterThan (? v, 1 000) $\wedge$ hasUnit (? y, ? u3) $\wedge$ MPA (? u3) $\wedge$ hasProperty (? m, ? c) $\wedge$ 高抗氧化 (? c) $\rightarrow$ 金属 (? m)	制造定模金属材料特性要求: 热硬度:HRC45/580°、 热强度:400 MPa/580°、屈服强度 1 000 MPa、高抗氧化

### 5 结束语

绿色工程材料选择需要考虑材料全生命周期,涉及多领域专业知识。这些知识大部分都是难以结构化的专业经验知识,因而亟需一个开放的、可共享和可扩充的工程绿色材料选择知识表示模式和方法。本文面向工程材料全生命周期,对材料选择知识进行深入分析,提出一个面向材料全生命周期的工程材料选择知识本体模型,构建了一个开放知识驱动的绿色工程材料选择框架。基于该本体模型,采用 OWL 构建形式化的材料选择知识实例库,采用 SWRL 构建材料选择知识规则库,实现开放的工程材料选择知识表示。通过对选择知识的推理,实现工程材料选择实例的语义检索和工程材料特性指标的自动获取,提高材料选择效率和质量。为工程材料选择知识开放表示和应用奠定了研究基础。

本文提出方法经由编程研发,通过实例测试表明提出的开放知识驱动的绿色工程材料选择方法是

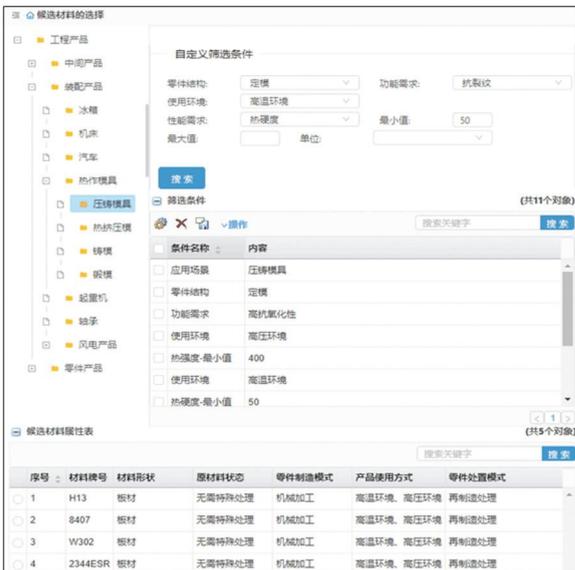


图8 压铸模具材料的选择界面

Fig. 8 Die-casting mold material selection interface

可行的。目前,该方法可以帮助设计者筛选出满足产品设计需求的一组工程材料,后续将开展对筛选材料的多目标和多属性决策评价工作,从中选择出最合适的绿色工程材料。本文工作为通过开放知识驱动智能解决工程问题进行了有益的尝试。

## 参考文献

- [1] ASHBY M, SHERCLIFF H, CEBON D. Materials engineering, science, processing and design[M]. Oxford: Elsevier, 2007.
- [2] BARBARA P, VALENTINA R. Early-stage material selection based on life cycle approach: tools, obstacles and opportunities for design [J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 28: 1130-1139.
- [3] 陈蕴博,岳丽杰. 机械工程材料优选方法的研究现状[J]. 机械工程学报, 2007, 43(01): 19-24.
- [4] GOEL V, CHEN J H. Application of expert network for material selection in engineering design [J]. Computers in Industry, 1996, 30(2): 87-101.
- [5] ZARANDI M H F, MANSOUR S, HOSSINIJOUS A, et al. A material selection methodology and expert system for sustainable product design [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57: 885-903.
- [6] IPEK M, SELVI I H, FINDIK F, et al. An expert system based material selection approach to manufacturing [J]. Material Design,

2013, 47: 331-340.

- [7] URREA C, HENRIQUEZ G, JAMETT M. Development of an expert system to select materials for the main structure of a transfer crane designed for disabled people [J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(1): 691-697.
- [8] ZHANG Yingzhong, LUO Xiaofang, ZHAO Yong, et al. An ontology-based knowledge framework for engineering material selection [J]. Advanced engineering informatics, 2015, 29(4): 985-1000.
- [9] 王飞. 基于本体的工程材料选择知识库的设计与实现[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [10] PENG Gongzhuang, LI Tie, ZHAI Xiang, et al. Knowledge-driven material design platform based on the whole-process simulation and modeling [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2022, 13(2): 2241001.
- [11] Protégé-OWL API [EB/OL]. [2022]. <http://plugins/owl/api/protege.stanford.edu>.
- [12] HORROCKS I, PATEL-SCHNEIDER P F, BOLEY H, et al. SWRL: A semantic web rule language combining OWL and RuleML [EB/OL]. [2013-06-02]. <http://www.w3.org/Submission/SWRL>.
- [13] O'CONNOR M J, DAS A K. SQWRL: A query language for OWL [C]// Owled'09: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Owl: Experiences and Directions. Chantilly VA: ACM, 2009, 529: 208-215.

(上接第132页)

## 4 结束语

传统的清结算系统是由中心化的模型构建的,随着业务的不断发展以及数据量的扩张,原有清结算模式已经无法满足当下需求。原有的网间结算业务流程冗长、人工成本高、且存在信任风险问题,本文通过引入区块链,极大程度上简化了网间结算原有的业务流程,通过数据链上流转保证了数据安全、可信,解决了原有的业务流程中的信任痛点问题。经生产统计,网间结算出账效率提高80%以上,出账周期缩短60%以上,出账结果准确率可达100%。对账差异自动定位,将业务人员从手工对账中解放出来,大大降低了人工成本。中国移动、联通通过区块链建立起了高度互信的联盟链网络,以网间结算业务为切入点,为助力传统清结算模式升级进行了有效的尝试。

联盟链技术问世以来,难以组网投产的主要原因是在各参与方对谁牵头、谁主导、谁参与、谁负责、谁运维的一系列问题上没有确定下来,本文提出的组网方式<sup>[9]</sup>,各参与方完全对等,各自运维,为大型企业跨区区块链组网起到了示范作用。

在未来的工作中,中国联通将以结算链为基础,

逐步推进国际漫游、增值结算等业务链上结算,继续推动传统清结算模式升级。同时,区块链作为新基建对行业生态建设有重要意义,中国联通计划推动区块链跨行业组网,在供应链金融领域进行下一步的探索。

## 参考文献

- [1] 程书芝, 师文轩, 刘偲婷. 区块链技术综述[EB/OL]. [2016-11-22]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [2] 刘思尧, 李强, 李斌. 基于 Docker 技术的容器隔离性研究[J]. 软件, 2015(04): 110-113.
- [3] BURNS B, BEDA J, HIGHTOWER K. Kubernetes: Up and running: Dive into the future of infrastructure[M]. 2<sup>nd</sup> ed. USA: Wiley, 2019.
- [4] 林剑宏. 从零开始部署区块链超级账本网络[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(30): 56-59.
- [5] XU Xiaoqiong, SUN Gang, LUO Long, et al. Latency performance modeling and analysis for hyperledger fabric blockchain network [J]. Information Processing & Management, 2021, 58(1): 102436.
- [6] 李世勇, 张悦, 苑凯博, 等. 一种企业应用云部署的云数据中心资源分配方法及系统: 中国, CN110096337B [P]. 2021-01-05.
- [7] 欧阳丽炜, 王帅, 袁勇, 等. 智能合约: 架构及进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(03): 445-457.
- [8] 朱风霞. 基于区块链技术的交易数据库加密技术[J]. 电子设计工程, 2020, 28(03): 93-97.
- [9] 何帅, 黄襄念, 陈晓亮. 区块链跨链技术发展及应用研究综述[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(03): 1-14.