

极端临氢环境金属材料力学性能数据库开发及应用

韩勇¹, 陈兴阳¹, 周成双¹, 郑津洋², 赵永志², 张林¹, 张凤华³

1. 浙江工业大学材料成型及控制工程研究所, 杭州 310014
2. 浙江大学化工机械研究所, 杭州 310027
3. 中国石油大学机电工程学院, 青岛 266555

摘要 石化和氢能领域中高压氢系统承载件在制造残余影响、高压氢气和复杂载荷耦合作用下易发生氢致损伤。为确保高压氢系统长期、稳定、安全、可靠地运行,亟需为高压氢系统产品开发提供材料性能基础数据。本文从数据独立性和易扩展性方面入手,结合前期高压氢环境中材料实验数据(慢应变速率拉伸实验、断裂韧性实验和疲劳裂纹扩展实验),基于VB编程语言开发了高压氢环境金属材料力学性能数据库。结合国内外学者的研究对数据库应用进行了分析,展示了数据库收录金属材料氢脆数据的多面性和全面性。

关键词 氢脆;金属材料;数据库;氢环境

早在半个世纪前人们就从铸锻钢白点(银点)裂纹的研究中认识到氢环境中氢对金属材料断裂性能的影响,在此期间,积累了许多相关研究成果^[1-5],尽管如此,氢脆机理依然没能真正解开,并被许多学者称之为永恒的课题^[6]。近年来在材料的高强度化和氢能源系统材料方面,氢脆作为一个新课题被重新提起,再度成为研究热点。氢脆是一种由金属材料中的氢引起的材料塑性下降、开裂或损伤的现象^[7]。金属材料在高温高压下的氢脆现象和机理已有深入研究,而在常温高压下的氢脆研究尚不成熟^[8]。随着近年来燃料电池技术和加氢站的建设和发展,发达国家已开始关注常温高压下金属材料的氢脆问题,且在这方面做了积极的探索^[9],国内在这方面的研究还很少^[10]。

中国从20世纪80年代开始建立材料数据库^[11],并取得了可喜成绩,如航空材料数据库、纳米材料专题数据库、储氢材料数据库等,但国内有关金属材料在常温高压氢环境下的力学性能方面的数据库为零。因此,开发高压氢环境金属材料力学性能数据库具有重要的科研意义和工程价值。

高压氢环境金属材料氢脆性能数据库采用桌面数据库 Microsoft Access^[12]作为后台数据库存储材料数据、表格和图片,选用 Visual Basic 6.0(VB6.0)^[13]作为数据库系统的开发工具,同时采用 SQL Server^[14]标准化的查询工具进行数据库中

材料的查询、表格的调用和图片的显示,利用 ADODC 和 DataGrid 接口实现 VB6.0 和 Access 数据库的完美衔接。不仅可以实现数据快速查询、添加、删除等功能,而且也满足材料性能数据大、使用方便、实用性强等特点。

1 数据库开发原理

金属材料在高压氢环境下的氢脆性能参数主要通过慢应变速率拉伸实验、疲劳裂纹扩展速率实验和断裂韧性实验等途径获得,并将各数据与在惰性气体(如氩气)中的实验数据进行对比。

1.1 高压氢脆性能参数

金属材料的高压氢环境中的相关性能参数:慢应变速率拉伸性能、断裂力学性能和疲劳裂纹扩展速率,这些参数主要通过实验获得^[15]。

1.1.1 慢应变速率拉伸性能

慢应变速率拉伸性能相关参数是通过材料在高压氢环境中进行慢拉伸实验测得的。具体过程为首先将标准拉伸试样装入高压氢环境箱密封,抽真空,然后充入高压气体(氢气或氩气),达到预定压力,待压力和温度稳定后开始慢应变速率拉伸试验,应变速率为 1×10^{-5} /s 左右,拉伸至试样断裂后采集实验数据。

收稿日期:2015-09-06;修回日期:2015-12-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB057601);国家自然科学基金项目(51401181);浙江省自然科学基金项目(LY15E010006, LQ14E010003)

作者简介:韩勇,硕士研究生,研究方向为氢腐蚀断裂,电子信箱:810641515@qq.com;张林(通信作者),教授,研究方向为极端环境材料环境失效及控制,电子信箱:zhlin@zjut.edu.cn

引用格式:韩勇,陈兴阳,周成双,等. 极端临氢环境金属材料力学性能数据库开发及应用[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 89-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.08.015

1.1.2 断裂力学性能参数

断裂力学性能实验采用标准的单边缺口试样,在以下加载条件下进行:

1) 在空气中对单边缺口试样进行断裂韧性实验,获得材料的平面应变断裂韧性 K_{Ic} 。

2) 首先在单边缺口试样上利用疲劳载荷制备预裂纹,然后将试样置于高压氢气环境下,通过加载孔对试样施加拉伸载荷,并获得材料氢脆裂纹失稳扩展的临界应力强度因子 K_{IH} 及临界裂纹尺寸 a_c 。

1.1.3 疲劳裂纹扩展速率

裂纹失稳扩展前的稳态扩展符合 Paris-Erdogan 关系,即裂纹扩展速率与应力强度因子范围有如下关系:

$$da/dN = c(\Delta K)^n \quad (1)$$

式中, a 为裂纹尺寸, N 为疲劳加载循环次数, ΔK 为应力强度因子范围, c 和 n 为常数。

疲劳裂纹扩展速率实验是先将标准缺口试样装入高压氢环境箱,抽真空,然后充入高压气体(氢气或氩气),达到预定压力并待压力和温度稳定后,利用疲劳载荷在单边缺口试样上制备预裂纹,之后进行疲劳加载循环实验,加载频率取决于材料服役环境。通过实验,获得材料在高压氢和氩气中疲劳裂纹扩展速度 da/dN 与应力强度因子范围 ΔK 的关系,为预测材料在高压氢环境下的服役寿命奠定基础。

1.2 数据库开发

根据实验数据需求和数据库设计一般流程制定了如图1所示的研制方案,下面从实验数据分析和数据库设计流程详细介绍。

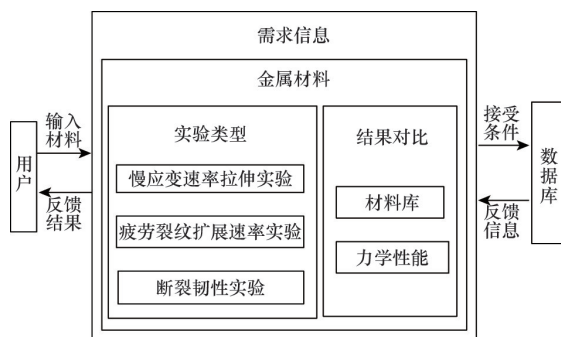


图1 数据库研制方案

Fig. 1 Design scheme of database

1.2.1 数据分析

利用 VB 语言构建一个数据管理系统,将金属材料氢脆性能的数据科学合理地管理起来。经过研究,数据分析包含的环节被分为以下4个步骤:

1) 实验方案:根据需要,针对不同金属材料制定不同的实验方案。

2) 实验进程:进行实验,将实验数据所包含的曲线、图片和图表等一并记录,分析其有效性。

3) 数据入库:将获得的实验数据进行分类整合,编入 VB 数据库中,然后对数据库页面进行优化管理。

4) 用户数据查阅:用户获得数据库安装包,成功安装后即可应用数据库查阅。将整个数据库系统分为:检索、添加、删除、显示详细信息和结果对比等多个功能。

1.2.2 数据库设计流程

计算机数据库设计流程包括系统分析、系统设计(数据库结构设计)、系统实施和系统维护4个部分,其具体流程如图2所示^[16]。

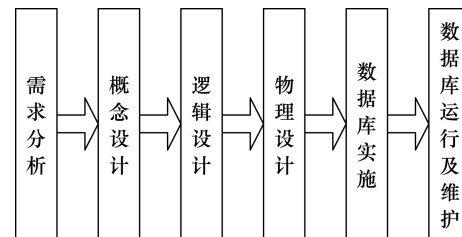


图2 数据库设计流程图

Fig. 2 Flow chart of database design

数据库结构设计包括概念结构设计、逻辑结构设计和物理结构设计3部分。其中概念结构设计以 E-R(Element-Relationship)图表示,主要用来确定数据库系统中的实体、实体属性及实体间的关系^[17]。在本系统中,材料氢脆性能包含慢应变速率拉伸、断裂韧性和疲劳裂纹扩展3种平行部分,而各部分又分别包含从属的材料性能,如材料的化学成分、力学性能、应力-应变曲线、组织结构图等相关性能。逻辑结构设计主要是确定数据模型。数据模型是对现实世界中数据特征的抽象,是数据库系统中用于提供信息表示和操作手段的形式框架,是数据库的核心和基础。常用的数据模型主要有3种:层次模型、网状模型和关系模型^[17]。根据预定实现功能与实验数据特点,本数据库系统采用了 Access 支持的关系模型。物理结构设计是指在计算机中存储的各种物理文件的组织方法,对物理文件的组织有利于将来的维护和整理。本系统是建立一个安装软件管理材料氢脆性能数据。其总体结构如图3所示。

2 数据库功能实现

2.1 数据库主要特点

高压氢环境金属材料力学性能数据库具有以下主要特点:

1) 实现了对金属材料氢脆性能数据的统一管理,建立了面向对象可操作的数据库。

2) 数据库涵盖不同种类金属材料氢脆性能的实验数据。

3) 数据库软件包基本上支持所有的计算机安装,方便数据库的流动和数据查阅。

4) 数据库支持可扩展功能,继续对数据库添加补充,完善多种金属材料氢脆性能数据。

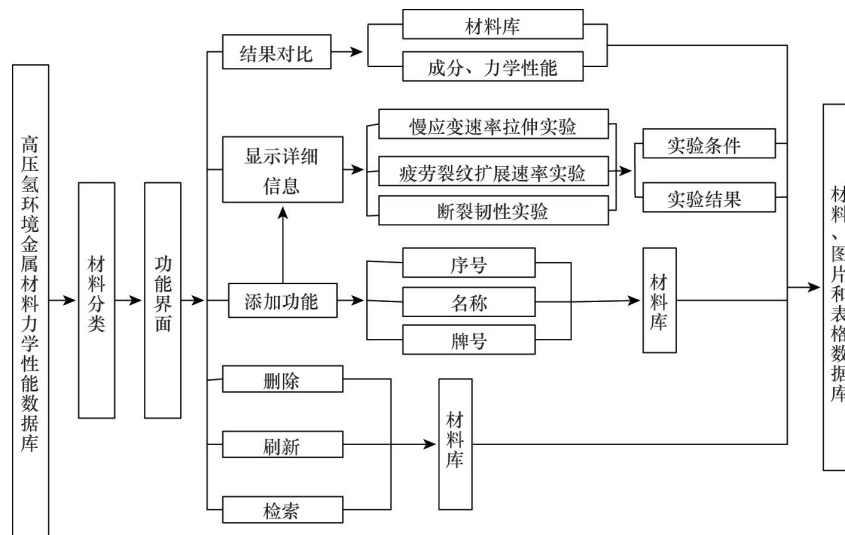


图3 高压氢环境金属材料力学性能数据库设计框图

Fig. 3 Design diagram of database of the mechanical properties of metallic materials in high-pressure environment

5) 实现了不同金属材料氢脆性能的对比,方便常温高压氢系统材料选择。

2.2 功能界面

数据库系统的功能界面主要分为主界面、材料分类界面、材料检索界面、材料对比界面和一些材料结果界面。这些功能界面的实现,很好地诠释了金属材料氢脆性能数据,方便用户查阅和理解。

2.3 检索功能

检索功能是利用数据库管理系统对数据库中收录的金属材料氢脆性能数据进行相关的查询,该功能既支持完全检索也支持模糊检索。如图4即为材料检索界面,输入要查询的材料单击检索按钮,如果检索的材料在数据库里存在,则系统单独显示检索到的材料;否则系统会提示“没有您搜索的记录!”。检索成功后,单击显示详细信息即可查看该材料的氢脆性能实验数据,如图5所示。



图4 材料检索界面

Fig. 4 Material retrieval interface

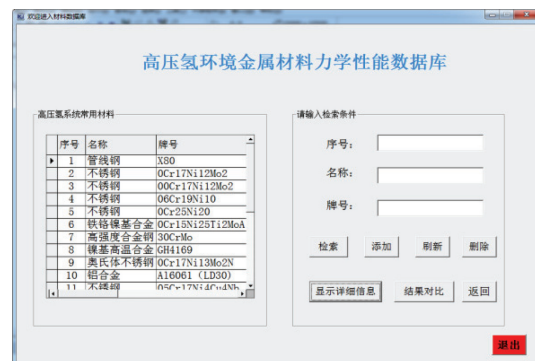


图5 实验界面

Fig. 5 Experimental interface

2.4 添加功能

添加功能是该数据库管理软件中的一个可扩展的功能,即用户可以添加与本数据库相关的材料数据,支持材料成分、力学性能、拉伸曲线和扫描电镜图片的添加。如图4材料检索界面功能区中的添加,在添加材料数据时,先在序号、名称和牌号里面输入要添加的材料,单击“添加”按钮,如果添加的材料在系统中不存在,则系统会把要添加的材料录入 Access 数据库中并提示添加成功;否则系统会提示数据库中已存在该材料不能进行添加。添加成功之后,系统会自动进入实验数据的界面,在这些界面上自行添加数据及图片。

2.5 对比功能

单击如图4所示的材料检索界面功能区的结果对比,系统会进入材料对比功能界面如图6所示。该功能实现的是不同材料的成分和力学性能对比,通过对比,找出不同材料成分和力学性能之间的差异,方便从中选择想要的材料性能。输入2种材料,单击材料性能对比按钮,系统会进入材料性能比较界面如图7所示。



图6 材料对比界面

Fig. 6 Material contrast interface

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	Nb	V	Mo	Fe
百分含量/%	0.063	0.28	1.83	0.011	0.0006	0.03	0.03	0.016	0.016	0.059	0.22	余

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
百分含量/%	0.04	0.49	0.66	0.010	0.002	10.05	17.10	2.02	余

图7 性能对比图

Fig. 7 Figure for performance comparison

3 数据库应用

数据库中可检索到多种金属材料数据:材料的化学成分、组织结构图、测试试样工程图、屈服强度、抗拉强度、延伸率、断面收缩率、相对延伸率、相对断面收缩率、慢应变速率拉伸应力-应变曲线、慢拉伸断口形貌、断裂韧性、断裂韧性试样断口形貌、疲劳裂纹扩展曲线、疲劳裂纹扩展试样断口形貌等。

3.1 氢对力学性能的影响

如果力学性能用正常加载速率测出,其持续时间很短,原子氢来不及扩散富集。而采用慢应变速率拉伸,这时氢通过应力诱导扩散富集,从而引起氢致塑性损失和滞后开裂^[18]。对实用的低碳钢和低合金钢,合金元素和杂质含量远比纯铁要高,因而氢致软化和硬化行为也将更为复杂。关于氢对钢的力学性能的影响已进行了大量的工作。基于本数据库中304奥氏体不锈钢(以下简称304)、316奥氏体不锈钢(以下简称316)和316L奥氏体不锈钢(以下简称316L)数据与国外相关合金在高压氢环境下力学性能对比如表1所示。

许多学者对304进行了室温下光滑拉伸试样在高压惰性气体和氢气中的慢拉伸实验研究,但是结果不尽相同(如表1所示)。总体来说,氢对304的屈服强度影响很小,可忽略不计,但可轻微降低抗拉强度。Louthan^[19]和Capeletti^[20]的试验发现,在惰性气体或空气中304断面收缩率达到74%~82%,在氢环境下减少至33%~54%;同样数据库中87.5 MPa下氩

表1 室温下304、316和316L不锈钢光滑拉伸试样测试性能
Table 1 Tensile properties of 304、316 and 316L stainless steels tested at room temperature

牌号	测试环境	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断面收缩 率/%	数据出处
304L	空气	207	573	82	[19,20]
	69 MPa He	196	565	81	
	69 MPa H ₂	207	503	33	
304N	69 MPa He	641	848	74	[20]
	69 MPa H ₂	641	841	54	
304	87.5 MPa Ar	387	915	58.82	数据库
	87.5 MPa H ₂	384	770	23.14	
316	空气	263	568	75	[21]
	70 MPa He	248	565	70	
	70 MPa H ₂	249	566	75	
316	98 MPa Ar	258	631	83.24	数据库
	98 MPa H ₂	250	612	38.60	
316L	98 MPa Ar	255	651	83.24	数据库
	98 MPa H ₂	262	648	77.15	

气环境下的断面收缩率为58.82%,在外部氢环境下为23.14%。

316和316L是为提高抗腐蚀能力和高温强度而添加钼成分的奥氏体合金,很多研究结果显示316型不锈钢比其他大部分奥氏体不锈钢具有更好的抗氢脆断裂能力,且该性能与Ni含量有关。室温下,高压氢环境对316屈服强度影响略有下降,对316L影响略有升高,但对它们的抗拉强度影响很小。Marchi^[21]的实验发现,316在不同介质下其韧性没有太大的变化,而数据库中氢环境下韧性有明显的下降(如表1所示),这是因为国外316和国内316L比较接近。Tamura^[22]的研究表明,316L在45 MPa氢气中拉伸性能与惰性气体中的测试结果相似,数据库中的数据表明在98 MPa氢气中的力学性能与氩气中的基本上一致,说明316L在室温下具有较好的抗氢脆性能。

综上所述,在高压氢环境下,316L比304和316具有更好的抗氢脆性能。数据库中提供了力学对比功能,能更快捷方便地检索到满足氢气环境力学性能较好的金属材料。

3.2 数据库实验数据应用

钢的氢脆取决于很多因素,如环境、材料和金属表面情况等,环境包括氢的压力和纯度。在这些方面,很多学者都有研究,但得出的结论却不太相同。因为氢对材料的影响研究相对比较复杂,对其中的机理至今没有确切的定义,而且偶然因素也会影响实验结果。而本数据库中的数据是基于高压氢环境下慢拉伸、疲劳裂纹扩展和断裂韧性3种实验的基础上,再对比国外研究结果进行收录的。

Barthélémy^[23]研究了多种低合金钢、低碳钢和奥氏体不锈钢在高压(70~100 MPa)高纯度氢环境下的氢脆,如X42、X52、4130等管线钢,这些钢数据库也有录入,但实验结果有出入,这可能是由于材料成分、压强和氢纯度不同造成的。

如 4130 钢的断裂韧性, 随着氢压的增大而降低, 在 87.5 MPa 下 Barthélémy^[23]论文中的曲线显示在 $42 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右, 而数据库中为 $45 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 左右, 如果考虑偶然因素, 这种结果差异似可以忽略不计。但从这些数据中可以了解到氢对这些钢有一定的影响, 而 X42、X52、4130 这些暴露在氢环境下的管线钢应充分考虑在不同压强下氢的影响, 这样在工程应用上才能确保其安全使用。

304 和 316L 的氢脆研究相对比较多, Mauro Martín^[24]研究了在高压氢环境下微结构和表面处理对 AISI304L 奥氏体不锈钢的影响, C. San Marchi^[25]研究了 304 和 316 在充氢和外部氢压拉伸测试下的物理性质。对 304、316 和 316L 的测试, 数据库中数据与 Mauro Martín 和 C. San Marchi 的研究吻合, 同样与国外学者在相同条件下的测试结果基本相同。就氢气

环境下拉伸断口来说, 304 是解理断口, 而 316L 为缩颈断口 (如图 8 所示)。

从断口看, 对高于 40 MPa 氢环境下同一种奥氏体不锈钢断口基本相同。304 在高压氢气环境下缩颈很小, 断口像是脆断, 但在高压惰性气体下为缩颈断口; 316L 在不同高压氢气下仍为缩颈断裂, 与惰性气体下的断口相差不大, 说明氢气对其影响很小。对于不同的低碳钢和高合金钢在高压氢气环境下拉伸断口也可能会产生二次裂纹, 如 Mauro Martín 研究的 Ni 含量为 11.08% (316), 其断口不仅脆断, 而且还出现大量的二次裂纹 (图 9 所示)。同样, 数据库中 316 断口也出现了二次裂纹, 说明氢能促进裂纹扩展并降低材料的塑性。

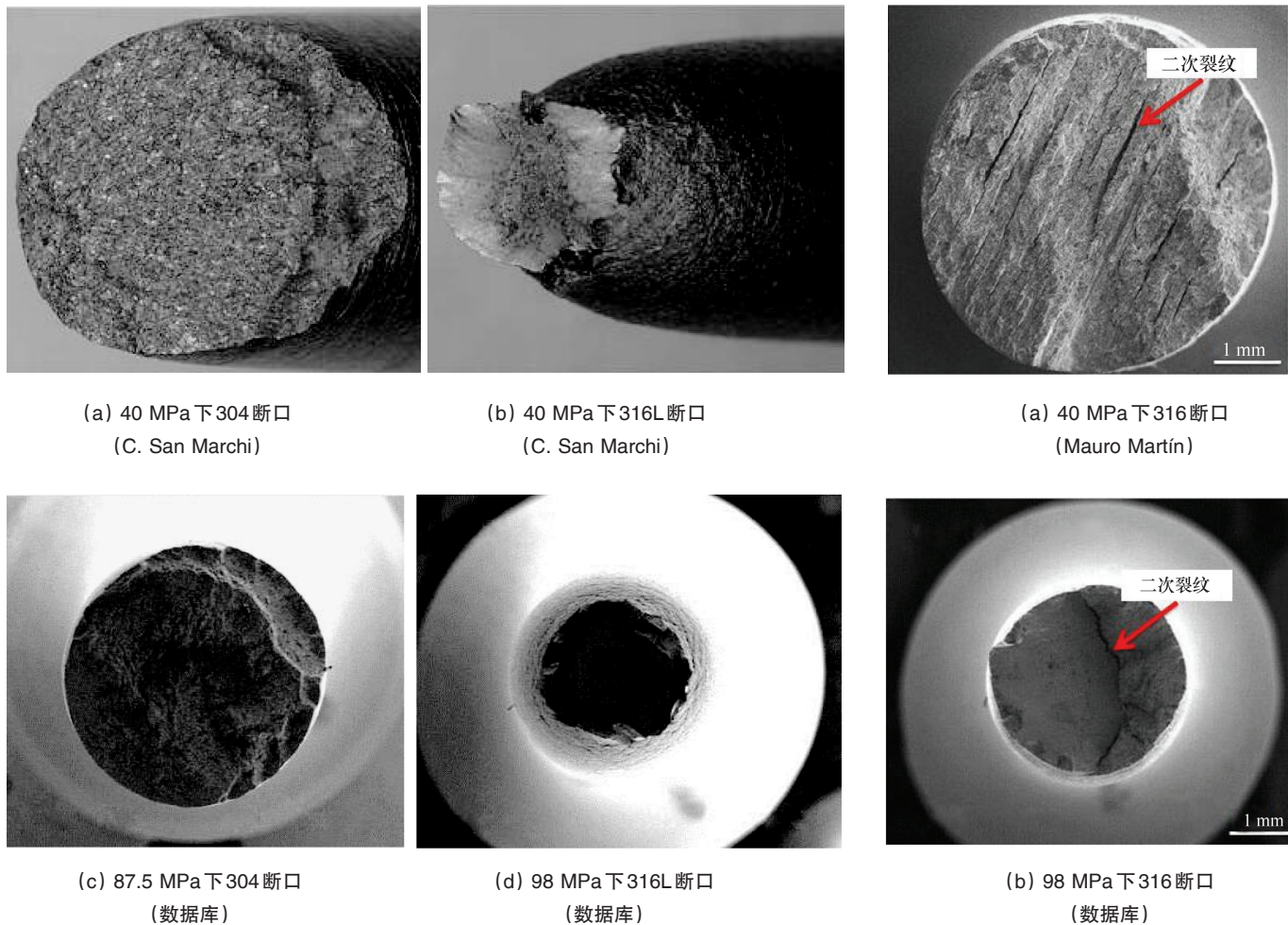


图 8 在氢压下的拉伸断口

Fig. 8 The tensile fracture under hydrogen pressure

图 9 氢压下的二次裂纹

Fig. 9 Secondary cracking at hydrogen pressure

综上所述, 氢对不同奥氏体不锈钢的影响差异, 归根结底是合金成分和显微组织不同引起的, 这在数据库的结果对比中易于发现。对于高压氢环境下 304、316 和不同管线钢的断口和断裂韧性分析可知, 氢能降低其塑性劣化材料性能,

对 316L 而言, 氢影响很小; 对于高压氢环境下的 316、低碳钢和高合金钢断口的二次裂纹分析可知氢能促进裂纹扩展导致材料脆断, 充分体现了数据库应用的多面性。

4 结论

1) 结合前期高压氢环境中材料实验数据, 基于 VB 编程语言开发了高压氢环境金属材料力学性能数据库。

2) 该数据库的填补了国内高压氢环境下氢脆性能数据的空白, 为长寿命、高可靠性高压氢系统产品开发提供了材料性能基础数据。

3) 结合国内外文献, 分析了氢对不锈钢的影响, 展示了数据库收录金属材料氢脆数据的多样性和全面性。

参考文献 (References)

- [1] Eliezer D, Chakrapani D G, Altstetter C J, et al. The influence of austenite stability on the hydrogen embrittlement and stress-corrosion cracking of stainless steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1979, 10(7): 935-941.
- [2] Michler T, Naumann J. Hydrogen environment embrittlement of austenitic stainless steels at low temperatures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(8): 2111-2122.
- [3] Martin M, Weber S, Theisen W, et al. Effect of alloying elements on hydrogen environment embrittlement of AISI type 304 austenitic stainless steel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(24): 15888-15898.
- [4] Michler T, Marchi C S, Naumann J, et al. Hydrogen environment embrittlement of stable austenitic steels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(21): 16231-16246.
- [5] Zhang L, Li Z Y, Zheng J Y, et al. Influence of low temperature pre-strain on hydrogen gas embrittlement of metastable austenitic stainless steels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 11181-11187.
- [6] 南雲道彦. 钢的氢脆的新研究方向[J]. 热处理, 2010, 25(3): 1-6. Michihiko Nagumo. Turning of the research direction on hydrogen embrittlement of steels[J]. Heat Treatment, 2010, 25(3): 1-6.
- [7] 李依依, 范存淦, 戎利建, 等. 抗氢脆奥氏体钢及抗氢铝[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1335-1346. Li Yiyi, Fan Cungan, Rong Lijian, et al. Hydrogen embrittlement resistance of austenitic alloys and aluminium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1335-1346.
- [8] 陈瑞, 郑津洋, 徐平, 等. 金属材料常温高压氢脆研究进展[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 502-508. Chen Rui, Zheng Jinyang, Xu Ping, et al. Hydrogen embrittlement of metallic materials in high-pressure hydrogen at normal temperature[J]. Acta Energetica Sinica, 2008, 29(4): 502-508.
- [9] Shigeharu H, Fukunaga T, Takahashi K, et al. Hydrogen embrittlement of high strength steel in high pressure hydrogen at ambient temperature [J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1978, 64(7): 899-905.
- [10] Wada Y, Ishigaki R, Tanaka Y, et al. Evaluation of metal materials for hydrogen fuel stations[A]. Proceedings of International Conference on Hydrogen Safety[C]. Pisa: ICHS, 2005.
- [11] 周洪范, 张朝纲. 材料数据库的进展和应用[J]. 机械工程材料, 1993, 17(1): 1-4. Zhou Hongfan, Zhang Chaogang. The progress and application of materials database[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1993, 17(1): 1-4.
- [12] 史国川, 黄剑. Access 数据库技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-337. Shi Guochuan, Huang Jian. Access database technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-337.
- [13] 王红亮, 马志刚. Visual Basic 6.0 程序设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1-324. Wang Hongliang, Ma Zhigang. Visual Basic 6.0 program design[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011: 1-324.
- [14] 田彬. SQL 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1-500. Tian Bin. SQL bible[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 1-500.
- [15] Chandler W T, Walter R J. Hydrogen embrittlement testing[M]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1974: 1-274.
- [16] 赵林, 武建军. 灾害风险防范数据库的设计与开发[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 44-48. Zhao Lin, Wu Jianjun. Design and development of database for disaster risk governance[J]. J of Natural Disasters, 2008, 17(1): 44-48.
- [17] 洋海棠, 杨瑞成, 袁晓波, 等. 耐磨料磨损材料数据库的设计与实现 [J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(4): 345-348. Yang Haitang, Yang Ruicheng, Yuan Xiaobo, et al. Design and actualization of database of wear resistance materials[J]. Materials Science & Technology, 2006, 14(4): 345-348.
- [18] 褚武扬, 乔利杰, 李金许, 等. 氢脆和应力腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 226-276. Chu Wuyang, Qiao Lijie, Li Jinxu, et al. Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking[M]. Beijing: Science Press, 2013: 226-276.
- [19] Louthan M R, Caskey G R, Donovan J A, et al. Hydrogen embrittlement of metals[J]. Materials Science and Engineering, 1972, 10: 357-368.
- [20] Capeletti T L, Louthan M R. The tensile ductility of austenitic steels in air and hydrogen[J]. Journal of Engineering and Technology, 1977, 99: 153-158.
- [21] Marchi C S. Technical reference on hydrogen compatibility of materials-austenitic stainless steels: Type 316[M]. Sandia National Laboratories, 2005.
- [22] Tamura M, Shibata K. Evaluation of mechanical properties of metals at 45 MPa hydrogen[J]. Journal of the Japan Institute of metals, 2005, 69(12): 1039-1048.
- [23] Barthélémy H. Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels[J]. Hydrogen Energy, 2011, 36: 2750-2758.
- [24] Mauro M, Wener T. Impact of the microstructure and surface finishing on the ductility response of AISI type 304L steel tested in high pressure hydrogen gas atmosphere[J]. Procedia Materials Science, 2015, 9: 396-403.
- [25] Marchi C S, Michler T, Nibur K A, et al. On the physical differences between tensile testing of type 304 and 316 austenitic stainless steels with internal hydrogen and in external hydrogen[J]. Hydrogen Energy, 2010, 35: 9736-9745.

Design and application of database of the mechanical properties of metallic materials in extreme hydrogen environment

HAN Yong¹, CHEN Xingyang¹, ZHOU Chengshuang¹, ZHENG Jinyang², ZHAO Yongzhi², ZHANG Lin¹, ZHANG Fenghua³

1. Research Institute of Material Forming and Control Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

2. Research Institute of Chemical Machinery, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3. Mechanical and Electronic Engineering College, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China

Abstract In hydrogen energy, petroleum and chemical industries the bearing parts in high pressure hydrogen systems are prone to hydrogen-induced damage due to the coupling effect of manufacturing residual effects, high-pressure hydrogen and complicated loadings. In order to ensure long-term, stable, safe and reliable operations of the high-pressure hydrogen system, it is necessary to provide the data of material properties for the development of high-pressure hydrogen system products. Considering the independence and extendibility of data, a database for mechanical properties of metallic materials in high-pressure environment is developed with VB programming language. based on the materials data previously obtained in high-pressure hydrogen environments (slow strain rate tension test, fracture toughness test and fatigue crack propagation test). The analysis of the database, which combines domestic and foreign researches and applications, has shown its versatility and comprehensiveness in terms of metal material hydrogen embrittlement data.

Keywords hydrogen embrittlement; metallic materials; database; hydrogen environment

(编辑 傅雪)