

文章编号:1673-9981(2017)04-0211-06

固体储氢材料的研究综述*

张四奇

广东省稀有金属研究所,广东省稀土开发及应用重点实验室,广东 广州 510650

摘 要:氢能是替代化石燃料的首选新能源之一,氢气的安全、经济、高效储存是制约氢能推广应用的技术瓶颈。固体储氢是最有发展前景的储氢技术,本文综述了主要固体储氢材料的优缺点,总结了现有的研究状况,并展望了未来储氢材料的发展方向。

关键词:氢能;储氢材料;储氢合金;固体储氢

中图分类号:TK91

文献标识码:A

能源为现代社会的正常运转和持续发展提供了动力。工业革命以来,能源技术取得了突破性进展,因而人类社会得以快速发展。当前,人们开发利用的主要能源是化石燃料,包括煤、石油和天然气等。这些能源存在一些问题:一方面化石燃料具有不可再生的特点,随着人们消耗能源速度的加快,化石燃料终有一天会枯竭;另一方面,化石燃料在使用过程中会产生一系列的环境问题,包括环境污染和全球变暖等,将对人类的生存造成威胁^[1]。

氢能原料来源广泛、对环境无污染并且能量转换效率高,是替代化石燃料的首选新能源之一^[2]。氢能的开发利用是一个有机的系统工程,主要包括氢的生产、应用、储存及运输几大关键技术^[3]。

目前氢的生产和应用已有相当成熟的技术,制约氢能推广应用的技术瓶颈在于氢气的储存^[4]。目前氢气的规模化制备主要通过石油裂解和天然气重整等技术实现。未来还可以利用太阳能光解/电解水或生物制氢等技术来生产氢气。氢能利用技术主要有氢燃料电池和氢内燃机,氢内燃机技术已基本成熟,且能量利用效率已远远超越汽油内燃机^[2]。用氢作为汽车动力的来源越来越受重视,交通运输业将是氢能的一个主要应用领域^[5]。然而,氢是所有元素

中最轻的,在常温常压下为气态,氢气的密度为 0.0899 kg/m^3 ,是水的万分之一。如何将氢在常温常压下安全有效地储存和运输成为制约氢能利用的核心问题,其关键是开发合适的储氢技术,使其具有足够的质量与体积储氢密度,并能够使氢在温和的条件下可控制地释放^[2]。

1 储氢技术概述

氢的储存技术可以分为三类:气态、液态和固态储氢^[6-7]。气态储氢是将氢气压缩后储存在高压容器中,储存压力一般是 $10 \sim 15 \text{ MPa}$ 。气态储氢的优点是充放氢速度快,成本较低,缺点是储氢量小,充满 15 MPa 氢气的标准高压钢瓶的储氢量(质量分数)仅为 1.0% ,并且在运输和使用过程中存在氢气泄漏、容器破裂或爆炸的危险,安全性差。此外,在氢气压缩的过程中,需要消耗大量的压缩功^[1,4]。液态储氢法是利用低温技术将氢气液化后,储存在特殊容器内。该方法具有储氢体积密度高、容器体积小等优点,缺点是液化过程能耗高(约占储氢能量的 $25\% \sim 45\%$),储存的容器需要具有非常好的绝热性能,因而成本高昂;同时,液态储氢也存在一定的泄漏风

收稿日期:2017-10-30

* 基金项目:稀有金属冶金及功能材料开发(2017GDASX-0110)

作者简介:张四奇(1960-),男,河北省冀州人,工程师,本科。

险^[2,4]。固体储氢技术是利用氢气与储氢材料通过物理或化学方式结合来实现氢气的储存,能有效克服气、液两种储存方式的不足,而且储氢密度大、安全性高、运输方便,特别适合在氢能汽车上使用。因此,固体储氢引起了人们特别的关注,成为目前储氢技术研究的热点^[4,6,8]。

衡量储氢技术性能的主要参数有:储氢体积密度、质量分数、充放氢的可逆性、充放氢速率、能耗高低、可循环使用寿命及安全性等。许多机构和部门对储氢技术提出了标准,包括国际能源协会(International Energy Agency, IEA)、日本世界能源网络(World Energy Network, WENET)等。其中,美国能源部(Department of Energy, DOE)公布的标准指出理想储氢技术,需满足含氢质量分数和体积密度高、循环寿命长、安全性高等条件^[9]。此外,还应尽量降低储氢成本、提高充放氢速率^[10]。2001年以来,国际能源协会(IEA)制定了车用氢气存储系统目标:建立一种可逆的质量储氢容量大于5%的媒介,在低于80℃和0.1 MPa下释放氢气。为实现这一目标,科学家开展了大量研究工作^[4,11]。

2 储氢材料

固体储氢技术的关键是储氢材料的开发,储氢材料主要包括物理吸附类材料、金属基储氢合金和配位氢化物等。

2.1 物理吸附类材料

物理吸附类材料主要是通过范德华力将氢气可逆地吸附在比表面积高的多孔材料上,具有储氢方式简单、吸放氢容易等优点。这类材料包括碳基材料(如石墨、活性炭、碳纳米管)、无机多孔材料(如沸石分子筛)和金属有机骨架化合物等。由于大多数物理吸附类材料在较低的温度下才能达到一定的储氢密度,常温常压下吸氢量很低,所以限制了其应用。但其作为车载动力储氢材料,可以通过控制压力达到较高的瞬时氢脱附量,这是化学吸附类材料所不具备的优势。如果能开发出在常温下具有较高储氢量的物理吸附类材料,将对未来以氢为动力的移动装置产生重要的影响^[2]。

2.1.1 碳基储氢材料

碳质材料具有高度的无序多孔结构,广泛用作干燥剂、净化器和解毒剂等,同时有很强的吸附气体

能力,因而能用作储氢材料。碳基储氢材料主要包括高比表面积活性炭(AC)、石墨纳米纤维(GNF)和碳纳米管(CNT)等^[4,8]。

碳基材料的储氢能力与其本身的比表面积大小成正比,与温度和压力等储氢条件也有密切的关系^[8]。碳材料的储氢特点是安全性高、成本低、可逆性良好以及寿命长等。碳材料可以储存高密度的氢气,但需满足以下两点:一是要屏蔽分子之间的斥力;二是在碳材料表面和管束间吸收尽可能多的氢气^[9]。国内外学者的研究成果表明碳材料储氢具有很好的应用前景^[12-14]。

活性炭(AC)又称碳分子筛,因具有孔隙度高、比表面积高^[8]、吸附能力大、表面活性高、循环使用寿命长、储氢量高和价格低等优点,使其成为一种独特的多功能吸附剂。活性炭储氢的原理为在中低温(77~273 K)、中高压(1~10 MPa)下利用其超高的比表面积来吸附储氢。一方面H₂的吸附量与碳材料的表面积成正比;另一方面活性炭吸氢性能与温度和压力密切相关,温度越低、压力越大,则储氢量越大^[15]。

石墨纳米纤维(GNF)是一种由含碳化合物经所选的金属催化剂催化分解而产生的,主要有薄片状、管状、带状、棱柱状和鲑鱼骨状几种类型^[1,16]。Chambers等^[17]用鲑鱼骨状的石墨纳米纤维在12 MPa和25℃下得到储氢质量分数为67%,但其他科研人员对石墨纳米纤维的储氢性能进行了大量的研究,均未达到Chambers得到的高储氢量,现有的理论也根本无法解释如此高的吸附量。目前,科研人员认为石墨纳米纤维高密度储氢希望渺茫^[6,8]。

从微观结构上来看,碳纳米管(CNT)具有特殊的微孔结构,由一层或者多层同轴中空管状石墨烯构成,对气体有很强的吸附性。碳纳米管可以分为单壁碳纳米管(SWNT)、多壁碳纳米管(MWNT)以及由单壁碳纳米管束形成的复合管^[4,8]。1997年,美国可再生能源国家实验室的Dillon等首次报道了碳纳米管储氢的实验结果,纯的碳纳米管的质量储氢能力可达5%~10%,因此成为世界范围内的研究热点^[6]。世界各国的科研人员对CNT储氢做了广泛的研究,证明CNT具有一定的储氢能力。相同条件下,SWCNT和MWCNT的储氢容量有差异;不同温度和压力条件下,同一种CNT的储氢容量也不同^[8]。氢在CNT中的吸附为单分子层吸附,饱和吸附量的对数值随温度升高呈线性下降^[4]。

2.1.2 无机多孔材料

无机多孔材料是指具有结构性纳米孔道的多孔材料,如沸石、海泡石等。目前作为储氢材料研究最多的主要是沸石。沸石是一种水合结晶硅铝酸盐,具有规则的孔道结构。沸石的储氢量主要取决于其独特的孔笼结构或复杂的孔道体系^[8]。通过对沸石吸附储氢的研究,人们不断地发展和丰富沸石吸附储氢的理论内容。但沸石等无机多孔材料因其自身单位质量较大,且操作温度低等原因,其储氢效果同样不够理想^[2]。

2.1.3 金属有机框架储氢材料

金属有机框架化合物(Metal Organic Frameworks, MOFs)又称为金属有机配位聚合物,是一类具有超大比表面积的新型多孔结晶材料,一般由过渡金属离子与有机配体通过金属-配体的络合作用自组装形成具有超分子微孔网络结构的类沸石(有机沸石类似物)材料^[18]。MOFs 中的氢气是以分子态被吸附的,其金属与氢的结合比石墨化的碳与氢的结合更为牢固^[2,4]。MOFs 具有微孔尺寸和形状可调、比表面积高、纯度高及结晶度高等优点,在气体存储上显示出一定的优势,适合用于氢的长距离运输和长周期性储存^[2]。

压力对 MOFs 材料的储氢容量影响较小,而温度对 MOFs 材料的储氢容量有较大影响^[8,19]。目前,储氢用金属有机框架化合物类材料主要有 MOF-5、HKUST-1 和 MIL-53,它们在液氮下的氢气饱和吸附量(质量分数)分别为 5.1%,3.6%和 4.5%^[18]。室温条件下,MOFs 材料的储氢容量较小,且催化加氢脱氢设备成本较高,技术操作复杂,脱氢反应效率低,因而商业应用前景黯淡^[2,9]。

2.1.4 玻璃微球储氢材料

作为储氢材料的中空玻璃微球通常直径为 25~500 μm ,壁厚低于 1 μm 。在 200~400 $^{\circ}\text{C}$ 范围内玻璃微球壁面的穿透率增大,使氢气可在一定压力的作用下进入到玻璃球中。当温度降到室温附近时,玻璃微球的穿透性消失,氢气留在玻璃微球内;随着温度的升高,玻璃微球的穿透性又逐渐增大,使氢气得逐渐释放出来。中空玻璃微球储氢质量分数为 15%~42%,其技术难点一方面在于制备高强度的空心微球^[4],另一方面由于玻璃微球本身导热率较低,因而氢的释放速率也很低^[8]。

2.2 金属基储氢合金材料

储氢合金是指在一定温度和压力下能可逆地大

量吸收、储存和释放氢气的金属间化合物。储氢合金是利用金属或合金与氢反应后生成金属氢化物来储氢,金属氢化物经加热后又可以释放出氢。元素周期表中的部分金属能够与氢反应形成金属氢化物,反应比较简单,只要控制一定的温度和压力,金属和氢气接触便能发生反应^[11]。相比气态高压储氢和液化储氢,金属氢化物储氢更加安全。此外,基于氢化物的固态储氢具有可逆循环、制备技术和工艺相对成熟等优点,被认为是最具发展前景的一种储氢方式^[1,4]。金属基储氢合金材料主要分为镁系、稀土系、钛系等种类。

大部分金属氢化物的储氢质量分数为 1%~3%,重量储氢容量有待进一步提高^[1]。金属氢化物要实现商业化还须提高单位质量、单位体积的吸氢容量,降低分解温度和分解压力,减少放氢时所需的能量^[9]。

2.2.1 镁基合金储氢材料

镁基合金储氢材料凭借储氢量高、原料丰富、价格低廉以及释放产生氢气的纯度高的特点成为很有发展前途的固态储氢材料之一^[20-23]。

单质镁在较高的温度和压力下可直接与氢发生反应生成 MgH_2 ,其理论含氢量为 7.6%。 MgH_2 在 287 $^{\circ}\text{C}$ 的分解压约为 101.3 kPa,但纯镁的吸放氢条件比较苛刻,吸放氢反应的动力学性能较差,放氢需要的温度较高,因此少有应用^[2,4]。

镁基合金储氢材料主要是 Mg-Ni 系合金,镍的加入对镁氢化物的形成起催化作用,加快了氢化反应速度。由镁和镍熔炼成的 Mg_2Ni 合金在 2 MPa 和 300 $^{\circ}\text{C}$ 下与氢反应生成 Mg_2NiH_4 ,在压力为 0.101 MPa 下的放氢温度为 253 $^{\circ}\text{C}$,比纯镁的要低。在 Mg-Ni 合金中添加第三种元素,如 Ti, Fe, La,可以改善 Mg-Ni 合金的储氢性能。单纯用一种元素取代 Mg 或 Ni,虽然合金性能有所改善,但总体性能仍不能满足需要。因此,许多研究者采取同时对 Mg 和 Ni 进行部分取代的方法制取储氢材料^[4]。目前,镁基合金储氢材料主要存在镁易氧化、材料易粉化以及吸放氢温度过高等问题,这些制约着其作为氢能规模化利用候选材料的发展^[2]。

2.2.2 稀土系储氢材料

稀土储氢合金具有优良的动力学性能和稳定性以及较高的储氢容量,在固体储氢方面得到了极大的应用。稀土储氢合金中稀土元素主要以轻稀土 La 和 Ce 为主^[10]。

稀土系储氢合金以 LaNi_5 为代表,可用通式 AB_5 表示。 LaNi_5 是最早被发现的稀土系储氢材料,也是储氢合金中性能较好的一类材料,具有较好的应用前景。其最大储氢密度约 1.38%,25℃时分解压约 0.2 MPa。其优点是吸氢能力较高且条件较温和、吸放氢速度快、活化容易、对杂质不敏感、平衡压适中及滞后小。 LaNi_5 的缺点是吸氢后晶胞体积膨胀较大、容易粉化、循环退化严重且成本很高。为降低稀土合金的成本,采用混合稀土如 Ce,Pr,Nd,Sm,Gd,Y 等元素部分取代 La,形成混合稀土 MmNi_5 储氢合金,储氢量与 LaNi_5 基本相同,但氢分解压增大,活化条件苛刻,难于实用。研究发现,在富 La 的 MmNi_5 系合金中, MmNi_5 合金 $[(\text{La}+\text{Nd})\geq 70\%]$ 不仅保持了 LaNi_5 合金的优良特性,而且储氢量和动力学特性优于 LaNi_5 ,所以这种合金更具有实用价值^[10]。以第三组分元素如 Al,Cu,Mn,Si,Ca,Zr,V,Co,Ag 等部分取代 Ni,可改善 LaNi_5 储氢性能,降低其氢分解压。元素 Co 能减小合金氢化后的体积膨胀,提高合金的抗粉化能力和合金的使用寿命。总之,稀土系储氢材料因稀土元素价格高、循环性能差及易粉化等问题,目前无法得到规模化应用^[2,4,10]。

2.2.3 钛系储氢材料

钛铁合金是钛系储氢合金的典型代表,活化后在室温下能可逆地吸放大量氢,理论储氢量(质量分数)为 1.86%,平衡氢压在室温下为 0.3 MPa,可以工业应用,且资源丰富、价格便宜。其缺点是不易被活化,吸放氢需要高温高压条件(450℃,5MPa),抗杂质能力中毒性差,易受 H_2O 和 O_2 等气体杂质的影响,且反复吸氢后性能下降,循环寿命短。用其它元素代替 Fe,可以实现室温活化^[4]。研究结果表明:用 Mn,Cr,Zr 和 Ni 等过渡元素取代 TiFe 合金中的部分 Fe 可明显改善合金的活化性能。目前,钛基储氢材料因易形成 TiO_2 致密层而导致其难活化,使其应用受到严重限制^[2]。 TiNi 系合金被认为是一种良好的储氢电极材料,但容量较低,与其它储氢合金相比,还存在可逆容量小且循环寿命短的问题^[4]。

2.3 配合物储氢材料

配合物储氢材料是由碱金属(Li,Na,K)或碱土金属(Mg,Ca)与第ⅢA主族元素(B,Al)组合形成的。目前,开发中的高容量配合物储氢材料主要包括:金属铝复合氢化物、金属硼氢化物和金属氮化

物等。这类材料的理论储氢量高,如 NaBH_4 , $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$ 和 LiBH_4 的理论储氢量分别为 10.8%,14.9%和 18%,是最有希望满足美国 DOE 对轻型汽车用车载储氢系统最新要求的储氢介质^[1]。但这类材料储氢的可逆性较差,且常伴有副反应发生^[2],因而没能大量商业化应用^[4,8]。

2.3.1 金属铝复合氢化物储氢材料

典型的金属铝复合氢化物包括 NaAlH_4 , LiAlH_4 , $\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$, $\text{Na}_2\text{LiAlH}_6$, $\text{LiMg}(\text{AlH}_4)_3$ 等。 NaAlH_4 的放氢产物再氢化非常困难,因此,尽管 NaAlH_4 的理论重量储氢量(质量分数)可达 7.4%,但在很长一段时间内,只是作为有机合成反应里的还原剂使用,并未考虑其在储氢领域的应用^[1]。后来研究人员将 Ti,Fe,Ce,Cr 等金属掺杂到 NaAlH_4 中来提高其储氢性能,且加氢反应可在低于材料熔点(185℃)的固态条件下实现。尽管材料的某些性能得到改善,但仍存在材料储氢可逆性差等问题,而无法得到应用^[2,4]。

2.3.2 金属硼氢化物储氢材料

典型的金属硼氢化物包括 LiBH_4 , NaBH_4 , $\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$, $\text{Ca}(\text{BH}_4)_4$ 等,它们的氢含量均超过 10%。但由于 B—H 之间强的共价键作用,导致其热力学稳定性较高,其吸放氢反应在较高的温度下才能进行,严重阻碍了其实用化^[1]。

2.3.3 金属氮氢化物储氢材料

金属氮氢化物是 2002 年才被引入储氢材料研究领域的一种新型高容量储氢体系,它是一类由金属氨基氢化物和金属氢化物组成的复合储氢体系,典型的包括 LiNH_2/LiH , $\text{Mg}(\text{NH}_2)_2/\text{LiH}$, $\text{Ca}(\text{NH}_2)_2/\text{LiH}$ 和 $\text{LiNH}_2/\text{LiBH}_4$ 等^[1-2]。金属氨基氢化物 Li-N-H 体系是最早报道的金属氮氢化物类储氢材料, Li_3N 可以在 170~210℃下吸氢后生成 LiNH_2 和 LiH 。 Li_3N 放氢温度较高,放氢速度缓慢,采用 Mg 元素部分替代 Li 元素,开发出的 Li-Mg-N-H 系储氢材料可以降低金属氮氢化物储氢材料的吸放氢温度^[1-2,24-26]。金属氮氢化物体系尽管表现出良好的应用发展前景,但现有体系的储氢容量以及吸放氢温度和速度尚不能满足实用化的要求,有待于进一步改善^[1]。

3 结 语

固体储氢技术由于安全、可靠,具有良好应用前

景. 开发适用于常温条件下的低成本、高容量储氢材料, 保证氢气安全有效的储存, 是解决氢能规模化应用的关键. 目前储氢材料主要集中在开发新材料或对原有材料进行改性, 对不同储氢材料的储氢机理有待于进一步研究. 尽管储氢材料的研究取得了许多进展, 但现有的主要储氢材料均存在不同程度的缺陷, 离氢能技术的规模化应用尚有相当长的距离. 开发安全稳定高效、循环寿命长的储氢材料, 实现固体储氢材料的工业化制备是未来储氢材料研究的主要方向.

参考文献:

- [1] 刘永锋, 李超, 高明霞, 等. 高容量储氢材料的研究进展[J]. 自然杂志, 2011, 33(1): 19-26.
- [2] 杨明, 王圣平, 张运丰, 等. 储氢材料的研究现状与发展趋势[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(7): 1053-1060.
- [3] 陈军, 朱敏. 高容量储氢材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(5): 2-10.
- [4] 汪云华, 王靖坤, 赵家春, 等. 固体储氢材料的研究进展[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2011, 25(5): 120-124.
- [5] CARRETTE B L, FRIEDRICH K A, STIMMING U. Fuel cells-fundamentals and applications[J]. Fuel Cells, 2001(1): 1-39.
- [6] 秦天像, 杨天虎, 甘生萍. 储氢材料现状和发展前景的研究[J]. 甘肃科技, 2016, 32(21): 56-57.
- [7] EBERLE U, FELDERHOFF M, SCHUTH F. Chemical and physical solutions for hydrogen storage[J]. Angew Chem Int Ed, 2009, 48: 6608-6630.
- [8] 郭浩, 杨洪海. 固体储氢材料的研究现状及发展趋势[J]. 化工新型材料, 2016, 44(9): 19-21.
- [9] 高金良, 袁泽明, 尚宏伟, 等. 氢储存技术及其储能应用研究进展[J]. 金属功能材料, 2016, 23(1): 1-11.
- [10] 张怀伟, 郑鑫遥, 刘洋, 等. 稀土元素在储氢材料中的应用进展[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(1): 1-10.
- [11] 冯晶, 陈敬超, 肖冰. 金属基储氢合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(专辑 IV): 239-241.
- [12] BADER N, OUEDERNI A. Optimization of biomass-based carbon materials for hydrogen storage[J]. Journal of Energy Storage, 2016, 5: 77-84.
- [13] YÜRÜ M Y, TARALP A, VEZIROGLU T N. Storage of hydrogen in nanostructured carbon materials[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 3784-3798.
- [14] LI Yan, ZHAO Donglin, WANG Yuntao, et al. The mechanism of hydrogen storage in carbon materials[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 32: 2513-2517.
- [15] 张志强, 王玉平. 储氢材料及其在含能材料中的应用[J]. 精细石油化工进展, 2006, 7(11): 28-31.
- [16] 苏海燕, 徐恒泳. 储氢材料研究进展[J]. 天然气化工, 2005, 30(6): 47-53.
- [17] CHAMBERS A, PARK C, BAKER R T K, et al. Hydrogen storage in graphite nanofibers[J]. Phys Chem B, 1998, 102(22): 4253-4256.
- [18] 龙沛沛, 程绍娟, 赵强, 等. 金属-有机骨架材料的合成及其研究进展[J]. 山西化工, 2008, 28(6): 21-25.
- [19] ROLAND U, BRAUNSCHWEIG T, ROESSNER F. On the nature of spilt-over hydrogen [J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 1997, 127(1): 319-321.
- [20] 王宏宾, 年洪恩, 任秀峰, 等. Mg-RE-Ni 系镁基储氢材料的特性与制备[J]. 化学通报, 2011, 74(10): 903-908.
- [21] 李法兵, 蒋利军, 詹锋, 等. 机械合金化直接合成镁基复合储氢材料研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(5): 750-753.
- [22] 周佑武, 刘金水, 卢远志, 等. 镁基储氢材料的吸放氢性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(4): 5-10.
- [23] 原建光, 李莹, 谈亚军, 等. 碳载钨的添加对镁基储氢合金吸放氢性能的影响[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 1-7.
- [24] 李超, 范美强, 陈海潮, 等. MgNH 改性 Li-Mg-N-H 体系的储氢性能及其机理[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(2): 183-188.
- [25] 秦董礼, 赵晓宇, 张轲, 等. 组成对 Li-Mg-N-H 系统储氢性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(2): 355-359.
- [26] 原建光, 李莹, 谈亚军, 等. 碳载钨的添加对镁基储氢合金吸放氢性能的影响[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2015, 37(3): 1-7.

(下转第 223 页)

tortuosity fractal dimension and area fractal dimension on the effective thermal conductivity was also studied. The results show that the effective thermal conductivity of PIM green part was decreased with the increasing of porosity. Under the condition of the same porosity, the value of effective thermal conductivity increased as the area fractal dimension value increased, at the same time reduced as the tortuosity fractal dimension value increased.

Key words: powder injection molding; fractal; effective thermal conductivity



(上接第 215 页)

Review of solid-state hydrogen storage materials

ZHANG Siqi

Guangdong Research Institute of Rare Metals, Guangdong Province Key Laboratory of Rare Earth Development and Application, Guangzhou 510650, China

Abstract: Hydrogen energy is one of the preferred alternative fuels for fossil fuels. The safety, economical and efficient storage of hydrogen is a technical bottleneck restricting the popularization and application of the hydrogen energy. Solid-state hydrogen storage is the most promising hydrogen storage technology. In this paper, the advantages and disadvantages of main solid-state hydrogen storage materials are summarized. The current research status is summarized and the future development of hydrogen storage materials is also expected.

Key words: hydrogen energy; hydrogen storage material; hydrogen storage alloy; solid-state hydrogen storage