

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C17-低温材料
C17-Cryogenic Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C17. 低温材料

分会主席：李殿中、李来风、秦经刚、王维

C17-01

Recent advances in SMA-based elastocaloric refrigeration

Qingping SUN^{1,*}

1. Hong Kong University of Sci. and Tech.

This talk will report recent advances in shape memory alloy (SMA) based elastocaloric refrigeration including heating and cooling. It includes how to achieve large temperature span of 75 degree celsius using SMAs with different austenite temperatures and uniaxial compression in series; how to achieve large cooling power of 1.3 kW using thin-walled multicelled refrigeration structures with high specific surface area; and how to achieve a high energy efficiency driving using work recovery. Future perspectives on sub-zero temperature cooling and high temperature heat pumps will be given. Challenging issues in material design and processing and in device design will be outlined.

C17-02

极低温用超高韧性高强度钢

钱立和^{1,*}

1. 燕山大学

从室温、低温到极低温，很多关键结构零部件都需要用超高强度、超高韧性材料来制备。材料高韧性是结构零部件安全保障的一个重要性能指标。可是，大多数金属，特别是 bcc 和 hcp 金属在低温下呈现脆性[Kimura et al, Science, 320 (2008)1057; Gludovatz et al, Science, 345 (2014) 1153]。一些具有低层错能的 fcc 金属在低温下具有优异的延展性和韧性，但其强度较低。此外，传统低温材料，如奥氏体不锈钢、9%Ni 钢等，以及近年的研究热点之一——中/高熵合金——均含有大量 Ni、Cr 等贵重元素，原材料成本高。因此，目前真正可用于制造一些关键结构用超高性能低成本材料，特别是极低温环境下关键零部件用材料还非常有限。

针对一些重大装置对低温或极低温用超高强度/超高韧性金属材料的需求，本研究在传统 Fe-Mn-C 高锰钢基础上，通过调控 C/Mn 元素含量，并添加 Al/Si 等合金元素，来调控钢的层错能和变形机制，设计出一种新的 Fe-Mn-C-Al-Si 高锰钢；并通过优化热机械处理工艺，制备出具有超高韧性、高强度、低成本奥氏体钢。结果表明，随着试验温度的降低，试验钢的屈服强度迅速增加，冲击韧性小幅下降。例如，在室温下，试验钢的屈服强度为 300 MPa，V 型缺口冲击韧性达 390 J/cm²，而在液氮温度下，试验钢的屈服强度达到 1250 MPa，其 V 型缺口冲击韧性仍高达 280 J/cm²。无论在室温、低温或极低温下，试验钢的拉伸和冲击断口均呈现韧窝特征，属于韧性断裂。该试验钢不仅制备工艺简单、生产成本低廉，而且具有超高的低温韧性和高强度，适用于制备低温关键结构件。

C17-03

奥氏体不锈钢焊缝超低温断裂韧性的研究

朱明亮¹、付阳¹、吕映宾²、张茂龙²、轩福贞^{*1}

1. 华东理工大学

2. 上海电气核电设备有限公司

中国聚变工程实验堆是国家重大科学技术研究计划，其 TF 线圈需要服役在 4.2K 温度下才能使 Nb₃Sn 实现超导，长度达 760 m，主要采用氩弧焊将多根不锈钢管进行焊接而成。本研究以气体钨极氩弧

焊 316LN-Mn 和 316LN 钢焊接结构为研究对象, 研究焊缝在 4.2K 超温下的断裂韧性性能, 分析微观组织与化学元素的影响机制。结果表明, 在 4.2K 时, 晶界处的微带和位错堆积阻碍了位错, 降低了焊缝的断裂韧性, 而嵌入的纳米孪晶束抑制了基体孔洞的形成, 并形成裂纹桥接韧带, 提高了断裂韧性, 发现平均晶粒尺寸为 30 μm 的等轴晶粒微结构具有最高的断裂韧性; 从化学元素角度来看, 锰含量的减少使得电子密度图的轮廓变模糊, 降低价电子浓度, 导致奥氏体不稳定, 表明在设计和选择焊接金属时控制锰含量的重要性。进一步研究了焊后热处理对 316LN 焊缝组织和超低温断裂韧性的影响, 发现当最大热输入量为 1.46 kJ/mm 时, 经过 400°C $\times$ 2 h 热处理的焊缝, 残余应力消除, 焊缝中孪晶数量显著增加, 触发了孪晶增韧机制, 断裂韧性比焊态最高提升了 45.81%。

C17-04

大型超导磁体结构材料可视化力学行为研究

Hengcheng Zhang*

Technical Institute of Physics and Chemistry CAS

Serrated yielding (discontinuous plastic flow, DPF) in metals at cryogenic temperatures has always been a focal point in the study of plastic deformation of cryogenic materials. In this study, 316LN was cooled to the temperature range (15K) where DPF occurs using GM cryocooler for tensile testing, with three thermometers placed within the gauge length of the 316LN specimen to monitor temperature variations. After entering the DPF stage during tensile testing, the temperature of the 316LN stainless steel specimen was controlled using heating elements on a flexible high-thermal-conductivity structure. Once the temperature reached 30K, the serrated yielding in the quasi-elastic stage, accompanied by a slight decrease in stress, immediately transitioned to smooth flow. After ceasing temperature control and allowing the temperature to drop back to 30K, the stress-strain curve of the specimen immediately shifted to the rising phase of serrated yielding. This demonstrates that the DPF of 316LN stainless steel is controlled by a temperature threshold switch, related to the reduction in stacking fault energy and the enhancement of dislocation movement, multiplication, and cross-slip at cryogenic temperatures.

C17-05

磁约束核聚变用低温 N50H 奥氏体不锈钢焊接研究进展

代晶晶^{1,2}、黄传军*¹、孙文涛¹、师莉¹、李来凤^{1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所
2. 中国科学院大学

改性 N50 (N50H) 奥氏体不锈钢具有较高的低温强度与低温韧性、良好的耐腐蚀性及可成型性等特点, 成为了中国聚变工程实验堆 (China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR) 中超导磁体支撑系统的线圈盒及 CICC 铠甲的候选材料, 而 N50H 焊接接头在成型环向场 (Toroidal Field, TF) 线圈及中心螺线管 (Central Solenoid, CS) 线圈的过程中出现了时效导致的强度及塑性退化等问题。本文主要总结了近年来 N50H 奥氏体不锈钢焊接研究领域的研究成果, 首先介绍了 CFETR 项目中用于超导线圈铠甲及线圈盒的 N50H 与 316LN 不锈钢基材及所对应同种与异种焊接工艺的研发历程, 随后重点阐明了各类不锈钢焊接接头的显微组织及性能表现, 最后讨论了 N50H/316LN 异种奥氏体不锈钢焊接当前研究的不足之处及未来可行的研究建议, 希望本文能够帮助相关科研工作者更好地了解磁约束核聚变用低温 N50H 奥氏体不锈钢焊接研究的发展近况。

C17-06

TiZrNbTa 难熔中熵合金变形机理的低温转变

张先兵*¹、王舒滨²、卢松³、何斌斌¹

1. 南方科技大学

2. 上海交通大学

3. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd.

Refractory high-entropy alloys (RHEAs) and medium-entropy alloys (RMEAs) are potential candidates for high-temperature applications, dislocations play crucial roles in plastic deformation of these alloys at both room and elevated temperatures. However, there is a significant deficiency in the understanding of their temperature-dependent “structure–property” correlations at low temperatures, which is crucial for assessing their performance under extreme conditions. This study investigated the mechanical properties and deformation mechanisms of the Ti_{48.9}Zr_{32.0}Nb_{12.6}Ta_{6.5} RMEA at ambient and cryogenic temperatures. Tensile testing revealed intriguing temperature-dependent behaviors: as the temperature decreased, the yield strength increased, whereas the uniform elongation (UE) exhibited a U-turn trend. The RMEA showed a good UE at 293 K, however, a limited UE was observed at 185 K, unlike the improved UE and ultimate tensile strength at 77 K. This indicated a transition in the deformation mechanisms. The microstructural analysis provided further insights. It revealed a strong strain hardening at 293 K owing to abundant dislocations and their interactions, which weakened at 185 K owing to dislocation deficiency and the formation of kink bands. The enhanced strength and ductility at 77 K are attributed to the {332}<113> deformation twins. These function as effective barriers to dislocation gliding. To summarize, this study illustrated the temperature-dependent mechanical behavior of RMEAs. Thereby, it has provided insights into the evolution of deformation mechanisms with temperature. This emphasizes the importance of dislocation slip and deformation twinning in strain hardening, which is crucial for understanding and optimizing performance of RH/MEAs in extreme environments.

C17-07

CRAFT TF 线圈盒制造进展

方超*

中国科学院合肥物质科学研究院

C17-08

聚变堆超导磁体用耐低温、高强韧不锈钢铠甲材料关键技术研究

王维俊*

中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所

在有限空间内提高磁场强度是获得高参数等离子体和高核聚变功率的有效途径。中国计划于 2030 建成中国聚变工程实验堆(CFETR)，最高磁场 15 T，最大电流 95 kA。不锈钢铠甲是管内电缆导体 (CICC) 的重要构成部分，起到承载电磁力和控制磁场构型的关键作用，直接决定了超导托卡马克的安全性和功能性。CFETR 超导磁体将激发超过 140 吨/米的巨大电磁力并直接作用在铠甲上，要求铠甲在 4.2 K 下，屈服强度大于 1500 MPa，断裂延伸率大于 25%，断裂韧性大于 130 MPa·m^{1/2}。适用于 ITER 的改进型 316LN 和 JK2LB 铠甲（屈服强度约 1000 MPa @ 4.2 K）已无法满足应用需求。超低温用高强高韧铠甲的研制已成为 CFETR 高场超导磁体应用的难题之一。

等离子体物理研究所联合国内金属材料研发优势单位，成立了超导磁体用超低温特种合金研发联盟。初步研制出了一种无磁、中氮、高强奥氏体不锈钢铠甲，实现屈服强度超过 1500 MPa @ 4.2 K 的世界领先水平。采用研制的中氮不锈钢铠甲模拟了 CICC 导体制备过程中的挤压、弯曲、矫直、时效全过程。经冷加工和 4.2 K 时效处理后，所制备的铠甲屈服强度大于 1500 MPa，断裂伸长率大于 30%，断裂韧性大于 200 MPa·m^{1/2}。本文将重点介绍高强不锈钢铠甲的制备和性能研究，并讨论其作为下一代聚变堆超导磁体铠甲材料的可行性。

C17-09

新一代聚变工程用高强韧无磁奥氏体不锈钢的研制

张梦醒、王长军*、马党参、梁剑雄、刘雨、褚韦涵
钢铁研究总院有限公司

开发了一种具有高强/塑性的新型无磁奥氏体不锈钢 Fe-21Cr-15Ni-5Mn-2Mo。研究了实验钢在 1090 °C 固溶处理后的头、尾试样的微观组织和液氮温度 (4.2 K) 拉伸性能。结果表明：尾部试样的平均晶粒尺寸 (47.96 μm) 小于头部试样的平均晶粒尺寸 (58.84 μm)。MX 沉淀物和 Z 相分布在头、尾样品的基体中。在低温拉伸试验之后，两个试样的奥氏体晶粒内部都产生了大量的变形孪晶。变形孪晶的形成可以提高材料的塑性，此外还会导致“动态 Hall-Petch”效应，有助于孪晶诱导的强化。头部样品的低温屈服强度较高可归因于变形过程中奥氏体晶粒中形成的较高密度的变形孪晶、层错和位错。在 4.2 K 下，头部样品具有优良的强度-塑性协同作用：极限抗拉强度 (UTS) 为 1881 MPa，屈服强度 (YS) 为 1465 MPa，伸长率 (EL) 为 35.5%。新开发的试验钢在深冷环境下的强度和塑性满足新一代聚变工程领域的要求，有望成为制造用于更强聚变反应装置中线圈盒结构件的候选材料。

C17-10

低温 Ni 钢的组织性能调控

刘庆冬*、侯维、顾剑锋
上海交通大学

海洋资源、能源的开发、运输以及海军舰船的轻量化，需要高性能、低成本的结构钢作为材料基础。基于析出和相变理论的微观组织和纳米结构调控一直是先进钢铁材料强韧化的主要途径，也是开发新一代高强高韧低温用钢的理论基础。巧妙地利用热加工过程中“力”与“热”的耦合作用，可以调控出非常理想的显微组织和出色的力学性能。然而，对于厚板结构钢，大形变的热/冷加工及快速冷却工艺在工程上是难以或无法实现的，特别是由此而引入的位错组态、细晶界面、异质结构等处于热力学上的亚稳状态，即便获得十分优异的的材料性能，也难以保证长期服役过程中的疲劳和腐蚀（特别是应力腐蚀）性能。而在热处理过程中，合金元素的充分扩散使得微纳结构趋于热力学上的平衡态，只能“折中”平衡析出强化、相变和细晶强韧化作用，这给高强钢的低温应用增加了困难。本文介绍了研究团队在低温钢方面工作，重点引入一种设计理念：通过奥氏体逆相变处理，利用二次马氏体和纳米逆转变奥氏体的增韧、增塑作用，同时平衡纳米第二相复合析出强化与脆化的矛盾，“制造”出一种层状纳米结构，在保持高强度的同时，赋予 7Ni 低碳钢优越的低温韧性。本研究探索了低 Ni 钢代替常规 9Ni 钢用于 -196°C 环境的可行性，以达到相关部件减轻重量、降低成本的目的。

C17-11

用于 CFETR 高温超导体应用的 N50H 铠甲机械性能研究

吴逸飞、王维俊*
中国科学院等离子体物理研究所

中国聚变工程试验堆 (CFETR) 提出使用高温超导体作为下一代中央螺线管线圈 (CS) 来激发更强的磁场。目前，REBCO 和 Bi-2212 是高温超导体的两种候选材料。在未来一段时间内，核聚变反应堆超导磁体系统将继续采用管内电缆导体 (CICC) 结构。316L、316LN 和 JK2LB 等铠甲材料的强度已不能满足 CFETR 中央螺线管磁体在 4.2 K 下的力学性能要求。由 N50H 材料制备的铠甲在国内已研发完成，并开始进行了一些技术验证工作。然而，在 Bi-2212 磁体制造过程中，N50H 铠甲要经过一系列的工序，尤其是 893°C 的热处理工艺可能会使其力学性能下降。介绍了 N50H 铠甲在不同温度下时效热处理前后的力学性

能，并讨论了热处理对低温下 N50H 铠甲微观组织的影响。结果表明，在 4.2 K 时，热处理后，铠甲力学性能均有所下降，平均屈服强度大于 1500 MPa，断裂延伸率仅为 15% 左右，暂时不符合要求，N50H 目前不能用作 Bi2212 的铠甲材料，后续将对其组成成分进一步优化。

C17-12

4.2K 低温用高强高韧奥氏体不锈钢焊材及焊接工艺开发

原园、刘锟、牟淑坤、刘宏、邓素怀、王松涛*

首钢集团有限公司技术研究院

针对核聚变导体铠甲和线圈盒锻件，通过设计合金成分，以及采用真空感应冶炼、电渣、轧制和拉拔等配套工艺，并控制各过程中工艺参数，研制了几种低 C 高 N 高 Mn、添加适量 Mo 和微量 Nb、V 元素的 N50 不锈钢焊丝。基于制备的 N50 焊丝采用 TIG 焊焊接了一批导体铠甲用 N50 方圆管和线圈盒锻件试板，并对其焊接接头的微观组织和低温力学性能进行了表征。结果表明，所有焊接接头的焊缝与母材结合良好，未见气孔、裂纹、夹渣等焊接缺陷，焊缝区和母材区的微观组织分别为柱状和等轴状的奥氏体晶粒，且热影响区晶粒无明显粗化；焊接接头低温拉伸性能和断裂韧性性能优异，初步证实了研制的 N50 焊丝有望用作 CICC 导体铠甲和线圈盒锻件的焊接材料。

C17-13

离子辐照对聚变堆用高温超导带材电学性能的影响机理

高瑞*¹、赵珀¹、卢晨阳¹、洪智勇²、刘华军³、秦经刚³

1. 西安交通大学

2. 上海超导科技股份有限公司

3. 中科院等离子体物理研究所

针对第二代高温超导——稀土钡铜氧化物 REBa₂Cu₃O_{7-δ} 带材在未来紧凑型聚变装置中面临的辐照环境，本研究开展了国产化带材的轻/重离子室温辐照实验，利用拉曼光谱（Raman）、球差 TEM 和电子能量损失谱（EELS）等先进的原子尺度表征技术，直观清晰地分析辐照缺陷对超导晶格以及电子结构的影响、探究辐照缺陷影响带材超导特性的内在机理。研究结果表明低剂量的辐照缺陷作为超导层额外的磁通钉扎中心，有效地提升了两种带材的临界电流密度 J_c；而当辐照剂量过高时，高密度的辐照缺陷严重损伤了超导结构的均匀性，超导层含氧量降低，超导正交相发生向非超导四方相的转变，造成一定程度的非晶化和阳离子无序，同时大剂量辐照缺陷团簇使得超导晶格发生严重扭曲甚至局部“断裂”，团簇周围铜氧晶格的电子结构发生变化，使得带材载流能力大幅下降。值得注意的是掺杂带材由于其本身具备更优的磁通钉扎能力，在不同辐照剂量下载流能力的变化幅度较小，同时纳米颗粒掺杂形成的局域微观应变对辐照缺陷的演变产生一定影响。上述研究结果对评估超导带材在聚变工况下承受的临界辐照剂量以及耐辐照高温超导带材的研发具有重要意义。

C17-14

铜导体及其在低温中的应用

高召顺*

中国科学院电工研究所

铜及其合金材料由于优良的导热和导电性能，被广泛地应用于各种低温与超导装置中。本报告首先介绍高纯铜、铜银合金和新型铜材料的主要物理特性和最新研究进展，在此基础上介绍高纯铜及其合金在低温和超导领域的重要应用。

C17-15

YBCO 超导带材的接头技术研究

王文涛*

西南交通大学

由于 YBCO 单带的长度限制和应用对磁场的不同需求, YBCO 带材的低阻接头研制成为超导磁体应用中不可避免的关键技术环节。本文采用纳米银烧结工艺连接 YBCO 银带, 系统研究了纳米银的热动力学特性, 探索了烧结温度、烧结时间、机械压力和搭接长度对接头临界电流 I_c 、电阻 R_j 和 n 值的影响, 并研究了接头的轴向拉伸性能。研究发现, 当烧结温度高于 205°C 时, 接头的 I_c 下降到原带的 84%, 且 R_j 明显增大, 但低于此温度时烧结温度主要影响接头的结合力。此外, I_c 和 R_j 对机械压力不敏感, 仅室温拉伸强度随着压力的增大而增强。同时, 带材可以在很短的烧结时间 (1~10 min) 内实现低阻连接。优化工艺制备的接头的最大轴向拉伸强度与母材接近, 且通过延长搭接长度至 8 cm 将接头比电阻降至 $\sim 10.56 \text{ n}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 是传统钎焊接头的 1/4, 且工艺远比银扩散简单。

C17-16

超导技术在加速器领域的应用及国产超导质子回旋加速器研发

邹春龙*

中国科学院等离子体物理研究所/合肥中科离子医学技术装备有限公司

质子治疗技术已经在肿瘤治疗领域获得了积极的肯定, 被公认为目前最尖端的放疗技术之一。随着超导技术的发展, 特别是超导回旋加速器的研发成功, 实现了加速器主机的小型化、紧凑化, 同时也降低了安装难度, 使其更适用于城市医院环境下的质子治疗。合肥质子治疗团队自主研发了 240 MeV 的超导质子回旋加速器, 实现了高能级超导质子回旋加速器的国产化。本文将主要对加速器的研发过程进行相关介绍, 特别是超导技术在加速器领域的应用进行详细介绍。

C17-17

超导磁体绝缘材料低温击穿特性及机理研究

赵玉强、颜吉祥、黄荣进*

中国科学院理化技术研究所

环氧树脂材料优良的电气绝缘性能是保证超导磁体稳定安全运行的关键。目前针对超导磁体运行温区的绝缘材料电气老化击穿研究仍然存在空白, 低温下的击穿理论尚不清晰。本研究围绕超导磁体用环氧树脂绝缘材料低温服役, 探讨环氧树脂及其纳米氧化铝复合材料在不同温度下的击穿特性, 通过加入一系列纳米氧化铝颗粒对环氧树脂基体进行改性。研究发现环氧树脂的击穿转变温度介于 77 K 和 150 K 之间, 高于和低于转变温度时绝缘性能显著下降。这一现象归因于碰撞电离和热击穿机制之间的相互作用。在环氧树脂基体中加入纳米氧化铝颗粒可改善低温下的绝缘性能, 最佳填充比例约为 2%。热刺激电流实验表明, 树脂中的陷阱电荷在低温下更容易被激发。本研究将完善绝缘材料国际低温区电气击穿数据, 在超导磁体安全运行服役领域具有重要的理论和应用价值。

C17-18

Incoloy 908 合金的强塑性匹配研究

程雨晨¹、王长军^{*2}

1. 燕山大学

2. 钢铁研究总院有限公司

Incoloy 908 合金有望成为中国核聚变实验堆(BEST)预应力板的结构材料之一。为了研究 Incoloy 908 合金的加工、显微组织和机械性能之间的关系,我们采用真空感应和真空自耗工艺制备了 Incoloy 908 合金。铸锭经均匀化、热轧和再结晶后获得平均晶粒尺寸约为 $83\mu\text{m}$ 的单相微观结构。然后在 4.2 K 至 293 K 的温度范围内进行了拉伸试验。令人惊讶的是,这种合金具有优异的低温力学性能。此外,屈服强度、极限拉伸强度和断裂伸长率随着温度的降低而显著增加,这与最近流行的面心立方中/高熵合金(M/HEAs)的行为相同。经 $700^\circ\text{C}/20\text{h}$ 空冷的时效处理样品具有优异的低温性能,包括在 4.2 K 时分别达到 1.02GPa 和 1.69GPa 的超高屈服强度和抗拉强度,以及 40.5% 的优异延展性,优于现有的 HEA 和其他先进工程合金。在 293 K 时,该合金还具有出色的机械性能,YS 值高达 833MPa, EL 值高达 30.5%。利用透射电子显微镜研究了 Incoloy 908 合金在 4.2 K、77 K 和 293 K 下的变形机制。在 4.2 K 和 77 K 下进行拉伸试验后,观察到了变形诱导的纳米孪晶,这激活了多种变形机制,包括显著的位错活动、丰富的堆垛层错和变形孪晶。然而,在 293K 下测试的样品中几乎观察不到这些现象,因为在 293K 下,塑性变形只通过位错滑移产生。

C17-19

低温热电材料研究

周敏*

中国科学院理化技术研究所

热电制冷技术是一种基于佩尔捷效应(Peltier effect)的新型固体制冷技术,具有体积小、重量轻、可靠性高、无机械运动部件、无流体介质等特点,在 5G 光通讯芯片制冷、红外探测器制冷、高精度温控等高科技、航空航天、军用领域具有广阔的应用前景。近年来,对新型固态制冷技术的需求越来越迫切,低温热电材料及热电制冷技术的研究引起越来越多的关注。低温热电材料主要包括近室温区热电材料,如传统 Bi_2Te_3 基热电材料,新型 $\text{Mg}_3(\text{Bi,Sb})_2$ 基热电材料, 新型 SnSe 、 PbSe 基热电材料;低温区热电材料,如 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 热电材料, CsBi_4Te_6 热电材料等;以及深低温 FeSb_2 热电材料等。本文基于热电制冷基本原理,介绍了低温热电材料的研究进展和存在的问题,并对低温热电材料在热电制冷技术的应用进行了分析和展望。

C17-20

低温材料的反常热膨胀调控及局域结构研究

胡磊*、覃飞宇、丁向东、孙军

西安交通大学

极端服役环境中原子振动诱发了一系列材料热膨胀异常现象,对材料的服役性能和寿命带来重要的影响。具体表现为热膨胀不匹配导致材料热应变变大,造成动态温变下材料服役精度衰减。[1] 因此,如何解决极端服役温度中材料的热膨胀难题,实现性能的提升和突破,对发展新一代尖端先进装备具有重要意义。

传统方法通过创造晶体缺陷实现材料的性能改造,往往忽略缺陷之间的相互关联形态。而晶格中缺陷并非随机分布,互相之间存在关联耦合效应,其堆垛排列方式、三维分布形态和空间尺寸大小等因素会对材料的宏观性能起着重要影响作用。局域晶格畸变属于一种短程关联耦合缺陷,在离子/共价键主导的材料中,局域晶格畸变主要包括局部相互耦合作用的多面体间的平移、变形或者扭转,而多面体间的耦合作用会改变局部原子排布方式,产生埃米级别的局域对称性破缺单元,具有长程高对称结构不具备的优势,比如强声子散射和强晶格非谐性。[1] 本项研究工作提出在长程高对称结构基体中构建局域晶格畸变的研究思路,既保留了长程高对称性结构的优点(如各向同性和高简并能带),同时也发挥了局域低对称性结构的长处,在长程和短程维度实现了结构灵活调控和性能优势互补,在低温服役环境中实现了材料热膨胀的有效调控突破。[1,2] 本文以 $\text{Cd}_2\text{Re}_2\text{O}_7$ 和 Ca_2RuO_4 氧化物为研究对象,系统表征与研究了短程尺度局域

晶格畸变，揭示了局域晶格畸变与热膨胀的影响机制，实现了低温热膨胀精细调控。本项工作提出了调控极端服役温度中材料热膨胀新方法，为发展先进装备提供了有力的材料支撑。

关键词：X 射线对分布函数；局域晶格畸变；热膨胀

参考文献

[1] Feiyu Qin, Lei Hu*, Jun Sun, Xiangdong Ding, Masaki Azuma*. Acta Mater. 2024, 264, 119544.

[2] Lei Hu*, Yingcai Zhu, Yue-Wen Fang, Masaki Azuma*, Chem. Mater. 2021, 33,19, 7665.

国家自然科学基金优秀青年基金（海外）(GYKP027)、国家自然科学基金青年基金(22205171)

C17-21

面向高功率模块热管理的红外陶瓷辐射制冷新技术

李永*

中国科学院理化技术研究所

C17-22

低温极端环境下绝缘材料失效机理

刘浩梁*、杜伯学

天津大学

超导电力设备具有容量大、体积小、损耗低的优势，广泛应用于超导电缆、超导限流器、超导托卡马克装置等先进电工装备中。在工程应用中，超导电力设备绝缘失效故障频发，威胁电力设备安全稳定运行。超导电力设备绝缘长期运行于极端低温环境下，其介电参数、电场分布、局部放电特性均发生显著变化，导致电力设备绝缘加速失效。本课题组从电荷行为与电场分布演变视角，分析了低温极端环境下绝缘材料老化劣化特性与绝缘性能下降过程，提出了超导电力设备的绝缘失效机理。

C17-23

极端环境用材料辐射特性研究

沈福至*

中国科学院理化技术研究所

C17-23

超导线圈铠甲超低温用钢组织与性能调控技术研究

翟汝宗、徐斌*

中国科学院金属研究所

摘要：

传统低温钢已不能满足未来高磁场、大电流聚变堆对超导线圈铠甲材料低温高强度、高韧性的要求。因此，为保障中国聚变工程实验堆（China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR）的顺利建设，本工作针对新型超导线圈铠甲在 4.2K 服役过程中对材料无磁性，高强度，高韧性等性能要求，选取 Fe-Cr-Ni-Mn-N 系氮强化 N50 奥氏体不锈钢为基础材料，对其开展了微观组织及性能调控技术研究。研究发现 N50 原型钢凝固组织中存在约 5% 的 δ 铁素体，经高温扩散退火后 δ 铁素体数量明显下降，但无法完全消除。依据热力学相图计算，建议该钢 C_{req}/N_{ieq} 应小于 1.25，以改变其凝固模式，完全消除钢中 δ 铁素体。 δ 铁素体与奥氏体基体之间的不协调变形将导致 δ 铁素体优先断裂，进而导致两相界面处裂纹的萌生与快速扩展，

因此消除 δ 铁素体可使该钢 77K 冲击韧性提升约一倍。此外, 经 650°C 超导成相热处理后, N50 钢中大量析出沿晶 M23C6, 尺寸较大且连续析出的 M23C6 加速了沿晶裂纹的萌生和扩展, 大幅降低了 N50 钢的低温韧塑性。降低 N50 钢的碳含量后, 其沿晶析出相转变为尺寸较小的 Z 相。这主要由于降低碳含量显著降低 M23C6 的形核驱动力, 但对 Z 相的形核驱动力无明显影响, Z 相的形核和粗化主要受 Nb 等大尺寸原子的扩散控制。降低碳含量后, 细小的沿晶 Z 相虽对低温拉伸塑性影响较小, 但仍不可避免的显著降低了 N50 钢的低温冲击韧性。

墙报

C17-P01

无骨架超导磁体低温系统设计与热管理

王春栋^{*1}、信纪军¹、王维¹、方志春¹、吕秉坤¹、赵婉吟^{1,2}、李来风^{1,2}

1. 松山湖材料实验室

2. 中国科学院理化技术研究所

超导磁体因其零电阻特性广泛应用于强电和强磁场等领域, 维持其超导态需保持在低温环境中。本文提出了一种无骨架超导线圈结构, 其在完成线圈绕制和浸渍环氧树脂后将绕线骨架脱出, 磁体在使用时没有骨架, 避免了骨架对磁体带来的涡流损耗。为实现快速励磁, 本文提出了使用 GM 制冷机液化少量氦气并使用传导冷却的方法将磁体冷却至超导态。低温系统具有双腔结构, 制冷机和磁体分别处于两个真空腔体内, 制冷机可实现插拔式安装。降温和励磁后, 磁体最高可通入 84.7A 电流, 产生 6.34T 磁场。

C17-P02

Two-dimensional discrete dislocation dynamics simulation of 316LN discontinuous plastic flow under cryogenic tensile behavior

Liancheng Xie, mingyue jiang, zhen geng, zichun huang, di jiang, bixi li, fuzhi shen, hengcheng zhang*, laifeng li
Technical Institute of Physics and Chemistry CAS

Abstract: The serrated yielding (discontinuous plastic flow, DPF) of metallic materials at cryogenic temperatures has always been a research hotspot in the field of plastic deformation of cryogenic-temperature materials, with this topic typically confined to phenomenological theory. This study simulated the cryogenic-temperature dislocation glide and vacancy diffusion by establishing a two-dimensional polycrystalline structure of 316LN within the physical framework of discrete dislocation dynamics (DDD). The dependency relationship between dislocation glide velocity and temperature has been established. The model indicates that the accumulation of dislocations at static obstacles continues to increase below 35K with the decrease of stacking fault energy, which causes the continuous increase in local creep stress until the failure limit is reached. It contributes to the macroscopic stress-strain curve to exhibit discontinuous plastic flow, i.e., serrated yielding.

C17-P03

多层绝缘 (MLI) 在不同冷边界温度下的性能测量和分析

黄子淳、沈福至、谢连城、赵雨晨、李碧溪、张浩、张恒成*

中国科学院理化技术研究所

本文介绍了一种新型的多层绝缘 (MLI) 材料无制冷剂低温测量系统。该系统以 G-M 低温冷却器为基础, 利用稳态轴向热通量法进行热测量。该系统可测量 20 K 至 120 K 的冷边界温度, 用于评估由双

层镀铝聚酯薄膜和玻璃纤维纸组成的常用多层绝缘材料的隔热性能。以温度为变量,对多层隔热材料的传热系数进行了分析。分析结果显示了 MLI 在不同冷边界温度下的传热特性。根据测试和计算结果,论文提出了一些优化多层绝缘体性能的方法。

C17-P04

YBCO 高温超导材料超导转变温区远场辐射发射率的研究

李碧溪、沈福至、张恒成*、黄子淳、谢连城、张浩、赵雨晨
中国科学院理化技术研究所

超导材料在电力传输、能源储存等领域中具有重要的应用,尤其是以 YBCO 为代表的高温超导材料。在超导转变温区,超导材料的性能对温度极具敏感,而辐射作为三大传热方式之一,对超导材料工作温度的影响十分重大。然而,目前对高温超导材料在超导转变温区下远场辐射发射率的研究很少,所以研究高温超导材料的远场辐射性能对材料制备、性能优化以及设备开发具有重要的理论价值。本文采用以 YBCO 代表的高温超导材料作为实验研究,样品尺寸为直径 40mm,磁控溅射不同厚度在蓝宝石基底。以液氮作为稳态冷源,采用稳态量热法对 YBCO 在 10K~300K 的远场辐射发射率进行测量。实验结果与理论值进行比较,同时采用仿真模拟对其表面电磁波传输进行分析,进一步探索高温超导材料超导转变温区远场辐射的微观机理。

C17-P05

用于氦同位素分离的熵过滤器的制备研究

王利国、屈千喜、陈欢、代念念、赵婉吟、贾朋、徐冬*、李来凤
中国科学院理化技术研究所

An entropy filter used for the helium isotope separation was constructed in this paper. Al_2O_3 powder with different diameter size were pressed by special tools. The helium leak rate of these entropy filter was tested at room temperature and pressure by Helium Mass Spectrometer Leak Detector. The results illustrated that with smaller pore size powder, the helium leak rate was lower. The average pore size was measured by mercury intrusion, as well as the porosity, permeability, tortuosity and porosity. In order to better understand the internal features of the entropy filter, scanning electron microscope (SEM) was used to observe the internal topography features. The results showed that the pore size distribution of the entropy filter prepared by this method was relatively uniform. And the particle size could be less than 0.1 microns, which could be used as an entropy filter to separate helium isotopes. A 50nm powder-pressed entropy filter was selected and installed in a cryostat entropy for helium isotope separation experiments, and the results showed that the entropy filter could increase the purity of He-4 by two orders of magnitude.

C17-P06

奥氏体不锈钢焊缝的超低温断裂韧性研究

付阳¹、吕映宾²、张茂龙²、朱明亮¹、轩福贞*¹

1. 华东理工大学
2. 上海电气核电设备有限公司

本研究采用气体钨极氩弧焊焊接了 316LN-Mn 和 316LN 钢板。首先通过研究微观结构和化学元素的影响,评估了 316LN-Mn 和 316LN 钢焊缝在 4.2K 超温下的断裂韧性。结果表明,在 4.2K 时,晶界处的微带和位错堆积阻碍了位错,从而降低了焊缝的断裂韧性。嵌入的纳米孪晶束抑制了基体中空洞的形成,并在裂纹后形成裂纹桥接韧带,从而提高了断裂韧性。研究发现,平均晶粒尺寸为 30 μm 的等轴晶粒微结构具有最高的断裂韧性。另外,从化学元素角度来看,锰含量的减少使得电子密度图的轮廓变模糊,降低

价电子浓度, 导致奥氏体不稳定, 这说明了在设计和选择焊接金属时控制锰含量的重要性。其次研究了焊后热处理对 ER317L 不锈钢丝填充 ITER 级 316LN 奥氏体不锈钢(ASS)焊缝组织和超低温(4.2K)断裂韧性的影响。分别在 400°C 和 920°C 时效 2 h 和 1 h。结果表明: 焊缝在 400°C 时效 2 h 晶粒尺寸减小, 在 920°C 时效 1 h 晶界基本不存在。两种焊后热处理均减弱了熔合线上 Mn、Ni 和 Mo 元素的偏析程度。当最大热输入量为 1.46 kJ/mm 时, 经过 400°C×2 h 热处理的焊缝的断裂韧性分别比焊态提高了 41.34% 和 45.81%。当最大热输入量为 1.2 kJ/mm 时, 焊缝的断裂韧性比焊态下降了 27.35%。920°C 时效后焊缝的断裂韧性也比焊态降低了 10.0%。经过 400°C×2 h 热处理后, 残余应力得以消除, 导致焊缝中孪晶数量显著增加, 触发孪晶增韧机制。

C17-P07

核聚变用 Nb₃Sn 导体热处理温度均匀性实验研究

吕秉坤¹、信纪军¹、王维*¹、俞小伍²、杜双松²、赵婉吟³、李来风^{1,3}

1. 松山湖材料实验室
2. 中国科学院等离子体研究所
3. 中国科学院理化技术研究所

BEST 的 TF 和 PF 线圈 Nb₃Sn 导体采用气氛保护热处理炉进行热处理。由于线圈截面尺寸较大, 线圈截面内温度均匀性成为至关重要的问题。本研究对 Nb₃Sn 线圈进行温度均匀性表征实验, 模拟实际线圈热处理工况。试验结果表明, 热处理过程中线圈截面温度梯度在 3°C 以内, 为进一步优化 BEST 线圈的热处理提供参数。

C17-P08

低温精馏塔内高效散堆填料流动特性及传质特性的 CFD 模拟研究

陈欢、贾朋、徐冬*、李来风
中国科学院理化技术研究所

用于低温下同位素精馏塔中的高效散堆填料通常有西塔环填料、三角螺旋填料以及海里派克填料。填料结构尺寸、材质的不同将会直接影响填料床中的水力学性能、传热性能以及传质性能。在本研究中, 利用计算流体力学(CFD)模拟了三种填料下的精馏塔内的流体力学性能以及传质性能。利用多孔介质模型来描述不同孔隙率的散堆填料。本文主要目的在于获得不同填料对塔内壁流效应、持液量以及传质效率的影响。模拟结果显示西塔环填料塔中的流体分布最均匀, 壁流效应相对较弱, 但传质效果最差。三角螺旋与海里派克填料的传质性能都优于西塔环填料, 其增加的流阻都在可接受范围内。通过改变填料床的高径比(h/d), 单独对海里派克填料进行了流体力学性能和传质性能的模拟。以上数值分析提供了选择高效散堆填料的数据, 可用于改善低温填料床的性能。

C17-P09

不同保温材料低温导热系数实验研究

赵鹏飞、王金萍、李岸然、王倩*
中山先进低温技术研究院

文章设计了一种可拆卸型低温恒温器, 利用 GM 制冷机获取冷量, 并通过铜冷链将二级冷头冷量传递至测试腔, 测试腔内部充满低温氦气, 样品安装在测试腔内部, 最终通过控制氦气氛围的温度来实现样品温度的控制。然后将该低温恒温器与瞬态平面热源法相结合, 在 20K-300K 温度区间测量了三种保温材料(泥炭土、珍珠岩、空心玻璃微珠)的导热系数。得出结论: 随着温度升高, 不同保温材料的导热系数逐渐增大; 对于泥炭土, 其堆积密度越小, 导热系数越低。

C17-P10**Low-temperature deformation behavior and acoustic emission analysis of austenitic stainless steel at 20K to 300K**

Rong Bao, Wentao Sun*, Chuanjun Huang, Jingjing Dai, Yining Huang, Li Shi, Laifeng Li, Yuan Zhou
Institute of Physical and Chemical Technology, Chinese Academy of Sciences

Austenitic stainless steel, renowned for its exceptional low-temperature strength and toughness, is a crucial structural material for the magnet support in the International Thermonuclear Fusion Experiment Reactor (ITER). Acoustic emission (AE) detection, a nondestructive testing technique, allows real-time monitoring of damage evolution in materials and structures, providing valuable insights into material damage mechanisms. This study pioneers the application of AE technology to characterize and evaluate the mechanical properties of austenitic stainless steel at temperatures as low as 20 K. We conducted real-time monitoring of the static load axial tensile damage process of austenitic stainless steel in a low-temperature environment. Analysis of the experimental data revealed the peak frequency (PF) ranges corresponding to different damage stages, and the tensile damage characteristics of austenitic stainless steel were examined using AE characteristic parameters.

C17-P11**烧结金属多孔材料用于氦同位素低温分离的可行性验证**

屈千喜^{1,2}、贾朋²、王利国^{1,2}、陈欢^{1,2}、代念念^{1,2}、徐冬*²、李来风²

1. 中国科学院大学未来技术学院
2. 中国科学院理化技术研究所

He-3 是一种宝贵的战略资源，在国家安全、医学、工业和科学等多个领域都有广泛的应用。然而，它的天然丰度仅为 1.37ppm，导致全球各国普遍面临 He-3 严重短缺的困境。天然气作为商业氦气的主要来源，从中提取 He-3 被认为是一种具有巨大发展潜力的途径。但是，从天然气中提取的氦通常是 He-3 和 He-4 的混合物，将这两种同位素有效分离仍面临着挑战。本文利用 He-3 和 He-4 超流转变温度不同的原理，通过多孔材料制成的筛过滤器来初步实现两者的分离。为达到氦的超流转变温度，搭建了一套以制冷机为冷源的 1.8K 的低温分离实验平台，对筛过滤器的具体结构及加热方式进行了合理设计。此外，尝试采用烧结金属多孔材料制作筛过滤器，并通过实验验证了其用于氦同位素分离的可行性。

C17-P12**Dynamic separation of helium isotope mixtures using cryogenic adsorption**

Niannian Dai^{1,2}, Peng Jia¹, Qianxi Qu^{1,2}, Huan Chen^{1,2}, Liguang Wang^{1,2}, Dong Xu*¹, Laifeng Li^{1,2}

1. Technical Institute of Physics and Chemistry
2. University of Chinese academy and science

Cryogenic adsorption is one of the main methods for separating helium isotope mixtures from nuclear exhaust or natural gas, but its existing experimental information is insufficient. In this paper, a device for the dynamic separation of helium isotope mixtures by cryogenic adsorption was proposed, including a vacuum cryogenic unit, a pressure-flow control unit and switching control unit for adsorption and desorption. The design mechanism of the device and the experimental procedure were described in detail, in which the pressure-swing adsorption (PSA) method was utilized to avoid periodic heating and cooling. Matching relationship between mixture concentration, adsorbent amount, and flow rate would be given.

仅发表论文

C17-PO01**绝缘系统用环氧树脂成型过程的应变演化研究**赵婉吟^{1,2,3}、信纪军^{*3}、黄传军¹、王维³、方志春³、周远¹、孙文涛¹、李来风^{1,2,3}

1. 中国科学院理化技术研究所

2. 中国科学院大学

3. 松山湖材料实验室

在超导领域，大多使用环氧树脂作为超导磁体的绝缘封装材料，其主要作用是固定超导材料并提供力学支撑，以承受运行过程中产生的强电磁力，避免失超事故发生。而在这些绝缘材料的成型过程中，会由于固化及降温产生残余应力，这些内部应力可能会对后续磁体的运行造成风险。本文选取了几种超导磁体中应用较多的几种环氧树脂，利用埋入式光纤光栅传感器，对其纯胶本体以及玻纤增强复合材料的固化和冷却过程进行了应变监测，获得了其应变演化规律。选取的环氧树脂分别是双酚 F 型、双酚 A 型国产 IR-3、双酚 A 型美国 CTD-101K 和 MY750。测得其应变演化过程与残余应变各不相同，而在加入玻璃纤维布后，由于玻纤布占比较大，复合材料的应变演化具有相似的规律。通过这项工作，我们能够更好的评估各种环氧树脂的性能，并预测管理超导线圈的潜在失超风险。