

# 隔磁片用304型奥氏体不锈钢

## 304 Type Austenitic Stainless Steel Used for Non-Magnetic Shim

供稿|强文江<sup>1</sup>, 李亚坤<sup>1</sup>, 兰银辉<sup>2</sup>, 束国刚<sup>2</sup>/QIANG Wen-jiang<sup>1</sup>, LI Ya-kun<sup>1</sup>, LAN Yin-hui<sup>2</sup>, SHU Guo-gang<sup>2</sup>

### 内 容 导 读

奥氏体不锈钢在核电站反应堆中有多种应用,其中之一是制作反应堆控制棒驱动机构中的隔磁片部件。制作隔磁片部件的奥氏体不锈钢,不仅要求材料具有良好的力学性能和抗腐蚀性能,还需要严格控制磁性能,使其尽量接近完全顺磁性。此外,还要求材料具有良好的热循环稳定性。隔磁片属于终身寿命性的构件,不允许因为发生任何的严重腐蚀而导致失效。针对这些性能要求,本课题组围绕优化材料制备工艺开展了研究工作。根据CRDM中的移动衔铁吸合及断开特性与隔磁片磁性关系的磁路计算及实验验证,明确了对隔磁片材料的磁性能要求。分析了用作隔磁片的奥氏体不锈钢合金弱铁磁性的原因并给出了成分及加工工艺方面的相应控制方法。在304型奥氏体不锈钢的允许成分范围内,研究了合金成分对力学性能的影响规律,并初步研究了合金抗腐蚀性能的变化规律。结合后续模拟工作环境条件下合金的抗腐蚀性能综合实验研究等工作,成功制备出一种综合性能优异的高性能304型奥氏体不锈钢隔磁片材料。

电力是当代社会不可或缺的主要能源。核电对改善人类生活有着重要意义。作为重要的清洁能源,核电在近50年内得到了大力发展。

核电站反应堆的安全运行始终是首要考虑因素。为此,大量使用非常成熟的金属材料制作各种构件。奥氏体不锈钢具有良好的塑性和韧性、突出的抗腐蚀性能,同时,制备工艺也非常成熟。关于这种材料的生产和应用,人们都已经积累了丰富的数据<sup>[1]</sup>。因此,这种工程材料在核电站中应用具有充足理由。核电站的核岛设备中广泛应用其制作多种不同功能的堆内构件,其中之一是控制棒驱动机构

(CRDM)中的不导磁片,又称隔磁片。

CRDM是核电站反应堆系统的重要机械部件,图1给出了其部分结构示意图。该结构中,通过励磁线圈电流变化产生的电磁力带动控制棒组件在堆芯内上下运动、保持和改变控制棒组件在堆芯内的高度,从而实现反应堆的功率调节、功率保持、正常停堆和紧急停堆等功能。我国某核电站CRDM在出厂验证实验时出现了移动衔铁临界释放电流低于验收标准的问题,304型奥氏体不锈钢材质的隔磁片具有弱磁性被列为可能的原因之一<sup>[2]</sup>。

CRDM运行过程中,隔磁片需要承受电磁铁和

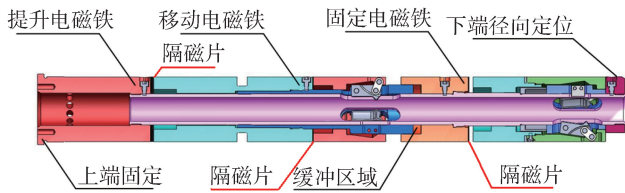


图1 隔磁片在CRDM中的位置

弹簧的压下应力和撞击力的作用。材料长期工作于反应堆内的高温高压条件下，浸泡于添加有硼酸等介质的水中。因此，需要满足规定的力学性能、抗腐蚀性能。鉴于其磁性对CRDM工作特性可能产生显著影响，还要求实现良好的磁性控制。因此，高性能的隔磁片材料应当具有良好的综合性能。

针对实际应用中出现的问题，北京科技大学与深圳中广核工程设计公司联合开展了高性能隔磁片材料的研制与试制工作。目标是对隔磁片材料的性能进行综合优化，尤其要实现对合金磁性的良好控制，避免其对CRDM工作特性产生不利影响，同时也完成材料的国产化。本文对用作隔磁片用304型奥氏体不锈钢材料的实验研究工作进行总结。

### 合金制备工艺选择

此前使用的隔磁片材料来自于国外，为大规模生产的工业产品。前面所述CRDM存在的问题，说明根据具体应用对304型奥氏体不锈钢材料进行特殊处理的必要性。采用适当规模的生产设备，建立独立的生产工艺，是实现性能综合优化、制备高性能隔磁片的前提。

CRDM中隔磁片是一个圆环部件，外径为127 mm，厚度为1.5 mm。制作隔磁片需要厚度为1.5 mm、边长为140 mm × 140 mm的方形片，其单片质量约为240 g。一台CPR1000机组中CRDM数量为61个，每个CRDM中使用3个隔磁片，合计使用合金原材料成品的质量约为45 kg。按照大约50%的成材率计算，一次投料量应不少于100 kg。也就是说，适合于单独生产隔磁片合金的设备为百公斤级的生产设备。奥氏体不锈钢的大工业生产一次投料为十吨至数十吨，显然不可能做到对隔磁片合金的专门化生产及优化。为此，高性能隔磁片合金研制工作采用了25 kg真空感应炉熔炼合金，试制工作则选择百

公斤级的合金熔炼及其配套的后续加工规模。这两种规模的合金制备工艺流程类似。图2所示为试制合金采用500 kg真空感应炉熔炼合金及其相应的主要生产工艺流程。采用上述工艺流程，制备厚度为1.5 mm、宽度为140 mm的带材，以用于加工隔磁片。

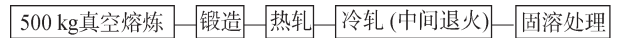


图2 隔磁片合金生产工艺流程图

### 合金弱铁磁性及控制方法

理想状态下，隔磁片合金应当是相对磁导率为1的材料。CPR1000机组中使用的国外隔磁片材料为X5CrNi18-8合金。奥氏体不锈钢的主要组成相为奥氏体相，为顺磁性，室温磁导率大约为1.003<sup>[3]</sup>。实际的奥氏体不锈钢呈现弱铁磁性，磁导率超过1.003，原因是合金中往往还存在少量的铁磁性相。

图3所示为一种典型的304型奥氏体不锈钢平衡相组成随着温度变化的热力学计算结果。室温下合金的平衡组织应当是铁素体为主，而实际合金中通常得到单相奥氏体组织。因此，室温下奥氏体不锈钢处于非平衡态，经过塑性变形容易转变成马氏体。

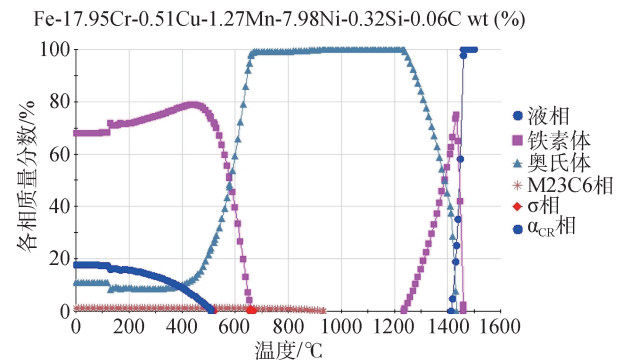


图3 典型的304型奥氏体不锈钢的平衡相组成随温度的变化

依据图3所示相图，合金从熔融态冷却凝固时，首先从液体中析出高温铁素体相(称作δ铁素体)。而304型奥氏体不锈钢在铸态下都存在残余的高温铁素体，表明通常铸造条件下从液体中先析出的δ铁素体不会完全通过包晶反应完全转变成奥氏体而残存下来<sup>[4-5]</sup>。奥氏体为顺磁性相，而铁素体为铁磁性相。δ铁素体相的含量对材料磁性具有决定性影响。

铸造的合金在接下来的锻造、热轧的加热过



程中,以及冷轧合金的中间退火处理中,在合金的单相奥氏体温度范围内保温,残余的铁素体逐渐转化为奥氏体。锻造、热轧和冷轧加工产生的塑性变形,会减小残存 $\delta$ 铁素体相颗粒的尺寸,促进这种转变的完成。合金的磁性因此随着合金的不断加工而逐渐降低<sup>[5]</sup>。显然,要确保隔磁片磁性很弱,必须将合金铸态下残存的铁素体在加工过程中比较彻底地消除。本课题组研究工作表明:合金中残存铁素体的消除过程可以通过磁性无损检测技术进行无损监测。

奥氏体不锈钢的相组成及其比例与其化学组成密切相关。合金的组成元素分成奥氏体形成元素和铁素体形成元素两类。它们的比例关系对合金磁性的影响不言而喻。Schaeffler和DeLong分别给出了合金的铬当量 $Cr_{eq}$ 和镍当量 $Ni_{eq}$ 的计算公式,用来定量估算不锈钢的相组成关系<sup>[6]</sup>。

304型奥氏体不锈钢的化学成分允许在一定范围内改变。工业产品也会存在一定的波动。从优化合金综合性能出发,制备了6种不同成分的合金,实验观察合金成分对性能的影响规律。这些合金中,C的质量分数在0.04%~0.06%,Cr质量分数在17.0%~19.0%,Ni质量分数在8.0%~10.0%。

实验结果表明:在各个加工阶段的中间产品中,包括铸锭、锻坯、热轧板等,合金中铁素体的含量都随着 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 比值的增高而增高,因而磁性越强。调整合金成分,使合金的 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ (铬镍当量比)值适当降低,有利于降低合金最终产品的磁性<sup>[6]</sup>。

另一方面,室温下亚稳态的奥氏体合金,冷轧过程中产生马氏体,其含量随着压下量增加而增加,合金的磁性因此显著增强。冷轧后的固溶处理,基本上消除形变马氏体。

### 隔磁片合金性能要求

CRDM中的隔磁片位于钩爪部件的磁极与衔铁之间,使用非铁磁性合金制成。很显然,位于电磁铁磁极与移动衔铁之间的隔磁片,如果具有磁性,会显著影响移动衔铁与磁极之间的吸合与断开特性,包括线圈断电后移动衔铁从电磁铁磁极上脱开时的释放临界电流。

奥氏体不锈钢弱铁磁性来源于其中所含的少

量铁磁性相。减少铁磁性相含量,需要强化合金加工制备过程的控制,甚至于采取特殊措施。对于合金的工业生产来说,意味着提高产品技术要求和成本,甚至造成技术上的不可行问题。因此,研究隔磁片磁性与CRDM工作特性、如临界释放电流之间的关系,将这种关系量化,是合理确定隔磁片磁性能要求的基本依据。目前隔磁片合金采购规范中缺少有关合金磁性能要求的内容。

针对磁力提升型CRDM的工作特性与隔磁片磁性的关系问题,采用了磁路理论计算分析方法。制作了CRDM中移动线圈附近机械及磁路结构的1:2简化模拟实验装置,实验测试研究了移动衔铁的运动特性<sup>[7]</sup>。对该模拟装置采用磁路解析公式计算和Ansys有限元计算理论分析了移动线圈临界电流的影响因素,结果汇总于图4中。Ansys有限元法给出的理论计算结果与实验测试吻合很好。依据该计算结果,降低隔磁片磁导率可提高临界释放电流。隔磁片磁导率与移动衔铁临界释放电流的关系呈连续渐变函数关系,而且比较平缓:当相对磁导率从1.00增加到1.01时,临界释放电流相对降低0.4%。

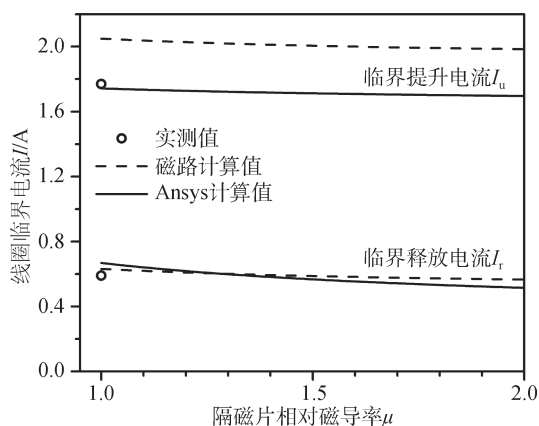


图4 隔磁片相对磁导率 $\mu$ 对临界电流的影响

鉴于隔磁片合金磁导率对于CRDM工作特性的影响规律,对合金磁性能加以控制是必要的。综合考虑合金加工制备过程的控制难度,建议合金的相对磁导率控制在1.02以下。

### 合金的力学性能

隔磁片为固溶态的奥氏体不锈钢。这种状态的合金,硬度和强度主要取决于固溶强化和晶界强

化。固溶强化受合金中固溶原子类型和浓度影响，晶界强化效果则取决于晶粒尺寸。所制备的6种不同成分的304型奥氏体不锈钢，产生固溶强化作用的合金元素类型相同，含量没有特别显著的差别，所产生的固溶强化效果基本相同。另外，实验发现：在相似的固溶处理条件下，各合金的晶粒大小接近，晶粒度基本上都在6级左右。因此，合金的强度和硬度基本相同，没有显示明显差别<sup>[6]</sup>。

冷轧合金的固溶处理工艺对于合金的强度具有显著影响。在1000~1200℃的固溶保温温度范围内，随着固溶温度的升高，屈服强度和抗拉强度均下降，断后伸长率相应地增加。延长固溶保温时间会产生类似的效果。

### 合金的抗腐蚀性能

为了比较不同成分的奥氏体不锈钢的抗腐蚀性，实验测试了不同成分的奥氏体不锈钢80℃下耐30% $H_2SO_4$ 溶液腐蚀的性能。实验发现<sup>[6]</sup>：国外隔磁片材料及与其化学成分相近的研制合金，按失重法测定的均匀腐蚀速率几乎恒定不变，不存在明显钝化。图5中给出了不同化学成分的合金腐蚀速率与合金中Ni含量的关系。该结果表明：提高合金中Ni含量可显著降低热硫酸中均匀腐蚀速率，其他合金元素的影响相对较弱。同一种合金的均匀腐蚀速率，依照锻造态、热轧态、固溶态的合金加工顺序逐渐降低，失重速率分别为0.0385、0.0157和0.0104  $g/(cm^2 \cdot h)$ 。与之对应的是合金中残存高温铁素体相逐渐减少。

隔磁片属于终身寿命性的构件，不允许因为发

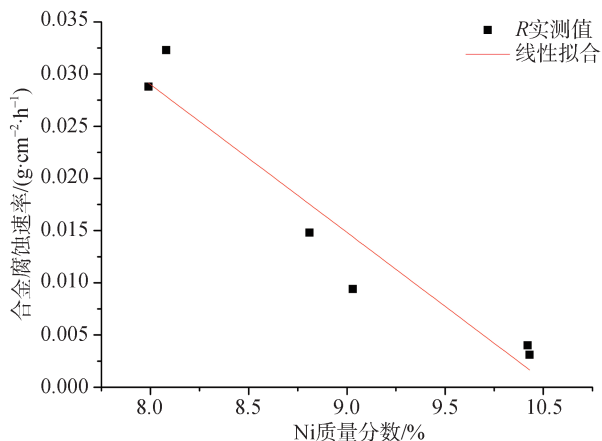


图5 奥氏体不锈钢均匀腐蚀速率与合金中Ni含量的关系

生任何的严重腐蚀而导致失效。在反应堆停堆时，隔磁片的主要腐蚀风险有点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀以及应力腐蚀；在核电站运行工况下，隔磁片处于高温高压水中，主要的腐蚀风险是高温均匀腐蚀，同时存在着一定的高温应力腐蚀、高温缝隙腐蚀的危险。因此，全面衡量隔磁片材料的抗腐蚀能力，需要对这些可能的腐蚀方式分别进行针对性的实验评估。这些实验研究工作将后续展开。

此外，模拟隔磁片在核电站服役期间启停堆过程，对隔磁片在室温至300℃温度区间内进行了60个周期的“加热—保温—冷却”热循环实验，观察对比热循环前后的磁性和微观组织的变化。实验结果表明：奥氏体不锈钢合金的磁性能和微观组织均未发生显著变化。

### 结束语

隔磁片在核电站反应堆中处于复杂的工作环境条件下，需要具备良好的力学性能、抗腐蚀性能，以及特殊的磁性能。为了制备一种综合性能优异的304型奥氏体不锈钢隔磁片材料，开展了CRDM中的移动衔铁吸合及断开特性与隔磁片磁性关系的磁路计算及实验验证，由此明确了对隔磁片材料的磁性能要求。分析了用作隔磁片的奥氏体不锈钢合金弱铁磁性的原因并给出了成分及加工工艺方面的相应控制方法。在304型奥氏体不锈钢的允许成分范围内，研究了合金成分对力学性能的影响规律，并初步研究了合金抗腐蚀性能的变化规律。结合后续模拟工作环境条件下合金的抗腐蚀性能综合实验研究等工作，成功制备出一种综合性能优异的高性能304型奥氏体不锈钢隔磁片材料。

### 参考文献

- [1] 干勇, 田志凌, 董瀚. 钢铁材料手册(下). 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 路燕, 马若群, 初起宝, 等. 控制棒驱动机构移动衔铁临界释放电流超差不符合项审评反馈//北京力学会. 北京力学会第19届学术年会论文集. 北京, 2013
- [3] 宋春临. 奥氏体不锈钢“磁性”的探讨. 川化, 1996(3): 16
- [4] Padilha A F, Tavares C F, Martorano M A. Delta ferrite formation in austenitic stainless steel castings. *Materials Science Forum*, 2012, 730-732: 733
- [5] 金光秀, 黄弋力, 强文江. 304不锈钢板材制备过程中的磁性变化

(下转第66页)



口的通钢量提高到500 t, 达到行业先进水平。

#### 参考文献

- [1] 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [2] 任茂勇. 转炉炼钢脱磷影响因素的分析. 天津冶金, 2012(4): 1
- [3] 熊磊, 杨明, 邓勇. 马钢300t转炉单渣脱磷工艺研究与实践//华东

五省炼钢学术交流会论文集, 2011

- [4] 曹东, 李德刚, 廖相巍, 等. 造渣制度影响转炉深脱磷实验研究. 炼钢, 2009, 25(6): 43

**作者简介:** 田伟(1984—), 男, 河北省保定市人, 河北钢铁集团唐山钢铁公司工程师。2008年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业。E-mail: tianweitzj@163.com。

#### (上接第 28 页)

及其控制. 金属热处理, 2016, 41(4): 59

- [6] 李亚坤. 反应堆控制棒驱动机构用高性能隔磁片研制[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015
- [7] 段远刚, 强文江, 兰银辉, 等. 基于模拟实验装置的控制棒驱动机构移动线圈临界电流研究. 核动力工程, 2016, 37(1): 72

**作者简介:** 强文江(1964—), 男, 教授, 北京科技大学材料科学与工程学院。科研方向: 磁性材料及材料磁性应用技术, 核电站用金属材料老化损伤机理。E-mail: Wjqiang@mater.ustb.edu.cn。



摄影 韩宇宏