

稀土耐蚀普碳钢原理与技术创新

从“廉价土”到“拒腐蚀钢”的蜕变之路

1 概述

2019年，我国粗钢产量近10亿吨，超过全球总产量的1/2，然而量大面广的普碳钢（占比约70%）都存在耐蚀性不足的严重问题。稀土（Rare Earth，简称RE）由于其特殊的物理化学性质，在传统钢铁材料中对于提高耐蚀性有着“点石成金”的作用。然而，一方面，我国虽然是稀土资源最丰富的国家，但开采重稀土伴生的大量低成本镧、铈、钇稀土积压严重；另一方面，尽管稀土加入钢中可显著提高耐蚀性是行业普遍认知，但稀土加入钢中收得率低的问题一直未得到根本解决。所谓“稀土稀土，稀里糊涂”，攻克稀土在钢中的收得率将不仅能为我国富余稀土找到出路，而且对提高我国耐大气腐蚀钢的质量及开发新钢种具有重要意义。上海大学董瀚教授团队正是针对上述问题，通过在钢中加入稀土提高稀土收得率的新工艺开发，深入研究稀土在钢中的赋存状态、稀土物理化学性质再分析、稀土多形合金化作用机理和耐蚀机理的新认识，形成了“稀土耐蚀普碳钢原理与技术创新”。

2 技术创新点

多形合金化原理是指合金元素的原子尺寸、电负性、外层电子等因素决定了其在铁晶体中的存在状态。当缺陷存在时，合金元素的原子可能会以多种形态存在，并影响钢的特性。伴随精细的表征技术进步，合金化认识持续深入精准。稀土耐蚀普碳钢是在钢中加入微量稀土元素从而显著改善钢的耐蚀性，特别是普碳钢，加入微量的高丰度镧铈稀土可达到含铜、磷、铬、镍耐蚀钢的水平，形成稀土耐蚀普碳钢技术。

创新点1：稀土夹杂物变性技术，降低钢铁材料发生点蚀的趋势

通过在钢中加入一定含量的稀土合金，显著改变了夹杂物性质及状态，夹杂物类型从MnS、Al₂O₃向稀土氧、硫化物或复合夹杂物转变，夹杂物发生了显著的细化和球化，有效降低了夹杂物与基体间的电极电位差，减小了点蚀倾向。如图1(a)所示。

创新点2：稀土界面偏聚降低界面能，避免局部腐蚀

稀土镧的原子半径为2.74Å，铈的原子半径为2.7Å，而铁原子半径为1.72Å。稀土

难以置换固溶体的形式在钢中稳定存在，更趋向于偏聚在能量更高、排列不稳定的缺陷更多的界面上。稀土大原子的界面偏聚能够显著降低界面能，在大气腐蚀条件下有效避免局部腐蚀的发生。如图1(b)所示。

创新点3：自由表面偏聚技术，促进钢表面形成稳定锈层

钢中加入的稀土会向锈层与基体界面偏聚，增加锈层与基体结合力及附着强度，提高锈层致密性。通过该技术生产的钢材包括建筑用螺纹钢、板材、型材和棒线材等多品种稀土耐蚀钢，形成了稳定锈层，可有效隔绝钢的基体和腐蚀环境的接触，“以锈防锈”减缓腐蚀速率。如图1(c)所示。

创新点4：稳定的高稀土收得率添加技术，保证了成果的工业化生产及应用推广

本技术可将钢中稀土含量精确控制在100-400ppm范围，稀土收得率保持在70%-90%。已成功生产多品种稀土钢（见图2），规模化生产近万吨，完成技术应用的生产企业已达14家，合同总额在1.04亿元。生产的稀土钢已广泛应

用在钢结构装配式建筑、耐蚀地螺丝、外挂装饰装修、厂房式标准建筑、可移动集装箱和彩涂板等领域，建立了多个政府典型示范项目，见图3。

3 相关标准的发布实施

低成本稀土合金化技术在钢中的推广和应用，对钢铁行业的更新换代、钢材高性能化和减量化应用、提高稀土资源利用率均有重要意义。稀土耐蚀钢具有显著的社会和经济效益，有利于企业、行业、国家绿色化的可持续发展。为了填补现行稀土耐蚀结构钢标准体系的空白，规范稀土耐蚀结构钢的通用技术要求，在中国金属学会新材料标准化技术委员会的组织下，上海大学作为主要起草单位经过近两年的调研和技术讨论，广泛征求了各方意见，形成了团体标准《稀土耐蚀结构钢》（T/CSM 12-2020）。本标准于2020年6月11日正式发布实施，满足生产企业的生产规范需要以及用户单位的使用需求。

4 新技术的应用成果及学术影响力

目前采用稀土合金化技术生产螺纹钢、棒线材、型钢和板材的企业已达14家，

产量近万吨。联鑫钢铁采用本稀土合金化技术生产的HRB400ERE螺纹钢821吨已应用于河北某企业重点工程项目；安阳钢铁生产的Q235BRE普碳钢330吨正在用于建造钢结构民居房；东北特钢生产的102吨抽油杆S22稀土耐蚀钢已运至胜利油田制造抽油杆；某型号轻武器用低合金钢CrNiMoRE累积应用已超100吨。以上海大学及多家钢厂共同牵头的稀土钢产业联盟正在建立中。鉴于此，2020年8月由中国稀土学会组织的科技成果评价会对《基于稀土合金化提高钢材耐腐蚀性能技术与产业化》项目进行了成果综合评价。以国家新材料产业发展专家咨询委员会主任干勇院士为组长的11位行业专家一致认为，上海大学董瀚教授领衔的高性能钢铁材料团队的科研成果发现并创新了稀土多形合金化耐蚀机理，开发了普碳钢稀土合金化耐蚀技术，形成了中国特色的新型稀土耐蚀钢生产与应用技术，低成本绿色化稀土耐蚀钢理论和总体达到国际领先水平。

董瀚教授团队多次受邀在第十届环太平洋先进材料与工艺国际会议（PRICM10）、第一届国际耐蚀钢会议、第八届内燃机可靠性技术国际研讨会、稀土元素镧铈钇应用研讨会、高丰度稀土高值化平衡利用国际高峰论坛等国内外颇具影响力的会议上做报告，大力推动稀土耐蚀普碳钢技术的发展和推广。2020年4月，在上海材料前沿国际论坛上，针对稀土钢的应用及产业化进行了新型耐蚀钢及配套材料技术应用研讨。在纪念合金钢诞辰200周年的《金属学报》合金钢专刊（2020年第4期）和《上海金属》专辑（预计2020年12月出版）中均对稀土耐蚀钢技术研究进行了专题介绍，受到了行业内外专家和企业的广泛关注。中国金属学会网站对团队成果《科技新进展：基于稀土合金化的提高钢材耐腐蚀性能技术》进行了专题报道（2020年4月17日报道）。《上海科技报》对干勇院士为组长的专家组一致认为已达到国际领先水平的“低成本绿色化稀土耐蚀钢技术”的科技成果鉴定会进行了重点报道（2020年8月12日）。（廉心桐）

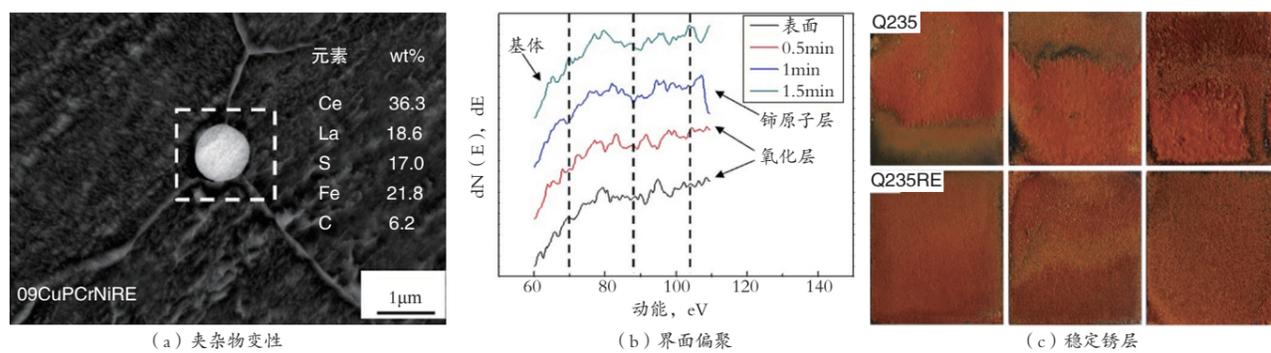


图1 稀土在钢中的作用

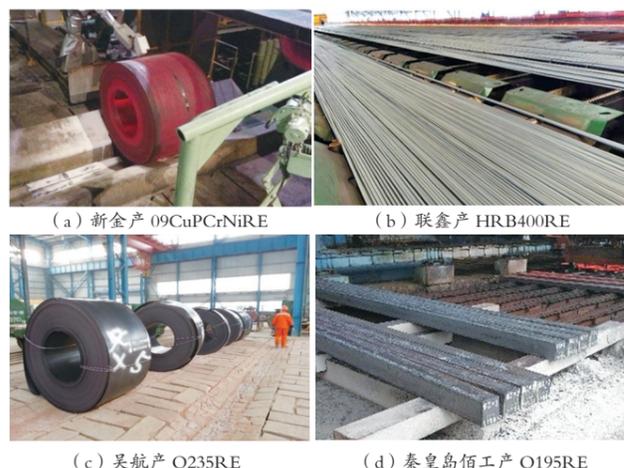


图2 稀土合金化技术生产多品种钢材



图3 稀土耐蚀钢在典型示范工程的应用