

重轨钢腐蚀的研究进展

吴世杰^a, 刘丽霞^{a,b}, 彭军^{a,b}

(内蒙古科技大学 a.材料与冶金学院,
b.内蒙古自治区先进陶瓷与器件重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 钢轨的腐蚀关乎铁路运营效益和运输系统的安全等重大问题, 重轨钢的耐腐蚀性同强度、硬度、耐磨性一样重要, 应高度重视对重轨钢耐腐蚀性能的研究。介绍了国内外重轨钢的研究, 主要概述在重轨钢加入 Cr、Nb、Cu、Si、Mn、Ti、Al、Cr 或 Ni 等不同合金元素, 对重轨钢耐腐蚀性能的影响。介绍不同组织(珠光体、贝氏体、马氏体、奥氏体)的重轨钢, 以及这些组织对重轨钢耐腐蚀性能的影响, 并说明了不同的热处理或加工工艺对重轨钢耐腐蚀性能好坏的影响。最后结合重轨钢腐蚀机理、锈层形成机理和电化学过程以及影响金属大气环境腐蚀的主要因素, 提出了几点提高重轨钢耐腐蚀性的研究方向。

关键词: 重轨钢; 大气腐蚀; 腐蚀机理; 电化学; 组织; 合金元素

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.008

中图分类号: TD123

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0051-07

Research Progress on Corrosion of Heavy Rail Steel

WU Shi-jie^a, LIU Li-xia^{a,b}, PENG Jun^{a,b}

(a. School of Materials and Metallurgy, b. Inner Mongolia Key Laboratory of Advanced Ceramic Materials and Devices, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

ABSTRACT: The corrosion of steel rails is related to many major problems such as railway operation efficiency and safety of transportation systems, so the corrosion resistance of heavy rail steel is as important as the strength, hardness and wear resistance. At present, there is little research on the corrosion of heavy rail steel, and the research on the corrosion resistance of heavy rail steel should be highly valued. The research on heavy rail steel at home and abroad was introduced and the effects of different alloying elements such as Cr, Nb, Cu, Si, Mn, Ti, Al, Cr or Ni on the corrosion resistance of heavy rail steel were summarized. The heavy rail steel with different microstructures (pearlite, Bayesian, martensite and austenite) was described and the influence of these microstructures on the corrosion resistance of the heavy rail steel was analyzed. Moreover, the influence of different heat treatment or processing technologies on the corrosion resistance of heavy rail steel was also clarified. Finally, combining the corrosion mechanism of heavy rail steel, the formation mechanism of rust layer and the electrochemical process, as well as the main factors affecting metal atmospheric corrosion, several research directions to improve the corrosion resistance of heavy rail steel were put forward.

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-03-20

Received: 2020-01-10; Revised: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51664046)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51664046)

作者简介: 吴世杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为重轨钢腐蚀。

Biography: WU Shi-jie (1993—), Male, Graduate student, Research focus: corrosion of heavy rail steel.

通讯作者: 彭军(1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为炼钢新工艺和二次资源利用。

Corresponding author: PENG Jun (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: new steelmaking technology and secondary resource utilization.

KEY WORDS: heavy rail steel; atmospheric corrosion; corrosion mechanism; electrochemical; microstructure; alloying elements

从1997年至2007年,我国铁路完成六次大提速。开行时速200 km/h以上的车组52对,出现中国品牌的CRH,形成一批快速客运通道,高速铁路进一步发展。京包、京九等铁路速度提升至200 km/h;京沪、京广最高时速达250 km/h,我国铁路已经进入高速发展时期。发展高速铁路有利于交通状况改善,欧美、亚洲等国和地区均计划进一步发展高速铁路。

据统计,全世界每年金属腐蚀是地震、水灾、台风等自然灾害造成损失总和的6倍。多年来,铁路腐蚀给铁路行业带来了巨大的经济损失和安全隐患。钢轨腐蚀会导致整个铁轨的损坏,给交通带来巨大的安全风险,造成人民财产的损失^[1]。钢轨腐蚀问题越来越受到人们的重视,大气腐蚀已成为影响钢轨使用寿命的重要因素。随着我国社会的发展,大气污染日益加重,钢轨腐蚀的问题必然会更加严重。因此,为了提高钢轨耐蚀性能,国内外相关科技工作者很早就开始在钢轨腐蚀机理、锈层成分、腐蚀电化学等方面进行了理论研究与技术探索,但实际应用却进展缓慢。国内对钢轨损伤的研究仅限于对钢轨的机械和疲劳分析,很少考虑各种腐蚀因素(如水分、大气污染、温差、杂散电流等)的影响。所以,研究钢轨的腐蚀原理,找出防止其腐蚀的措施十分必要。

1 国内外重轨钢研究简介

钢轨是轨道结构的重要组成部分,承担着引导车轮、传递载荷的作用。我国早期使用的钢轨为碳素钢轨,随着经济的发展,开始使用微合金和合金钢轨,90年代又成功研发了Cr-Mn-Mo系贝氏体钢轨,近几年国内开发碳质量分数为0.90%~1.0%的过共析钢轨,目前正在进行使用考核^[2]。重轨钢在我国主要是指生产60~70 kg/m的重轨(含道岔)使用的钢种。国内重轨钢生产厂家包括包钢、武钢、鞍钢、攀钢、邯钢等钢铁企业。攀钢主要生产的钢种有U71Mn/U71MnG、U75V/U75VG、U78CrV等材质钢轨,道岔用50AT、60AT、60D40、60TY等品种钢轨。鞍钢主要生产的钢种有U71Mn/U71MnG、U75V/U75VG、U77MnCr等材质钢轨,道岔用50AT、60AT等品种钢轨。包钢和武钢生产百米定尺钢轨^[3]。目前关于高速重轨钢的研究主要集中在提高重轨钢的抗疲劳、抗磨损性能和纯净度方面。

国外大约有23家比较知名的重轨生产厂家,一直在研制高强重轨钢。日本新日铁公司^[4]研制出来的高强重轨钢是过共析钢轨钢,通过增加钢轨成分中的碳含量,达到增加珠光体组织中渗碳体片层厚度的目的,进而使重轨钢具有更高的强度和耐磨性。英钢联研究开发出硬度达445HB的低碳马氏体钢轨,该钢

轨的耐磨性和韧性均较高^[6]。德国Thyssenstarh研制出的高强重轨钢是贝氏体钢轨,轨头硬度达425HB,已经进行了铺设试验,证实其耐磨性比普通热处理钢轨好。贝氏体钢轨强度高、韧性和塑性好,是珠光体钢轨的2~5倍,同时还易于与珠光体钢轨焊接。美国铁路、日本NKK和Burlington Northern联合开发了“抗破损”的高强重轨钢,与普通钢轨相比,该种钢轨具有更强的抗破损能力^[5]。

国内通过在重轨钢中添加合金元素,改善钢轨性能,提高钢轨耐磨性方面的研究较多。攀钢通过添加V研制开发了PD3、PD4等合金重轨钢,包钢通过添加V、Nb、Cr、RE,研制开发了U75V、U76CrRE、BNbRE等合金重轨钢。铺设结果表明,添加了合金元素的重轨钢,其耐磨性能和使用寿命均比普通钢轨有所提高。

全世界的钢铁和金属设备每年因腐蚀造成的损失非常高,腐蚀带来的环境污染等问题在严重时甚至让人民的生命安全难以得到保障。按照产生腐蚀的环境状态,腐蚀可以分为大气腐蚀、土壤腐蚀、微生物腐蚀、淡水和海水腐蚀,铁路钢轨的腐蚀多数情况下属于大气腐蚀。根据机理的不同,可以将腐蚀分为化学腐蚀和电化学腐蚀,钢轨腐蚀属于电化学腐蚀。铁路轨道的腐蚀主要发生在海边、阴暗隧道和湿润的大气环境中,其失效的主要原因是大气腐蚀和应力损坏。钢轨腐蚀是以下因素的综合作用,首先,大气中的湿润空气、污染的气体、雨水和昼夜温差为轨道的电化学腐蚀提供了条件。其次,机车的频繁应力导致轨道变形和进一步加快电化学腐蚀。同时,由于轨道对地面的绝缘受限,机车牵引电流在电路回路中不可避免地泄漏,这使得电化学反应速度加快,铁路腐蚀加剧^[1]。

2 合金元素对重轨钢腐蚀的影响

目前重轨钢中加入的合金元素有C、Si、Mn、V、Nb、Ti、W、Cu、Al、Si、Cr或Ni等,其中C是添加最广的元素,可以提高屈服点及抗拉强度,但其对材料的塑性和冲击性的影响是消极的,当材料中C的质量分数超过0.23%时,钢材焊接性能急剧下降,大气腐蚀能力变差,已发生锈蚀现象。这是因为碳元素的氧化过电位较低,发生腐蚀现象的热力学趋势较大。Si通常在炼钢的过程中作为还原剂和氧化剂,所以钢材一般都含有Si,可以明显增强钢材的弹性极限值,屈服点和抗拉伸强度也会提高。Mn在钢铁炼制的过程中通常作为良好的脱氧、脱硫剂,锰钢较普通钢材具有许多优点,如机械强度高、韧性更强、硬度高、抗拉伸能力好,同时热处理及加工性能方面同样

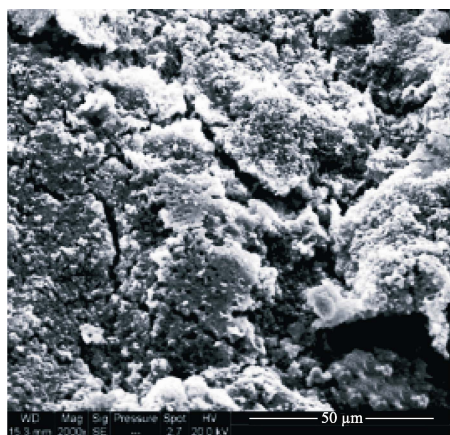
表现优异，淬性好，屈服点较普通钢提高 40%，耐磨性能优异，但高锰钢影响材料的抗腐蚀性能和焊接性能。在不同环境下合金元素对腐蚀速率的影响是不同的，Cr 可有效降低钢材在较高 Cl⁻ 浓度中的点蚀速率，相反，Cu、P 可以有效防止二氧化硫污染的影响^[7]。V 在钢铁生产过程中起到优良脱氧剂的作用，钢材中 V 的添加可以使材料的强度和韧性显著增加，并且在后续热处理的过程中对微观组织的晶粒有细化作用，并且在高温高压下抗氢腐蚀能力明显增强。

Nb 的添加主要作用于钢材微观组织，细化晶粒的同时可以使材料过热敏感性降低，回火脆性减弱，强度增强，抗大气腐蚀性能提高，高温高压下耐受氢、氮、氧的腐蚀，并且适当的添加可以使材料易于焊接。王晓丽等^[8-9]在 U76CrRE 重轨钢中添加合金元素 Nb，在模拟工业大气腐蚀中发现，Nb 的添加有利于锈层中物质的生成，因此加入适量的 Nb 有利于提高钢材的耐腐蚀性。通过研究表明，RE 在基体的局部富集促进了锈层中稳定性 α -FeOOH 的快速生成，改善了重轨钢在工业大气环境下的耐腐蚀性能。吴志峰等^[10]研究发现，La 可以使点蚀电位升高，添加 La 后腐蚀锈层更加连续、致密，腐蚀性粒子难以进入金属基体，从而使得重轨钢的耐腐蚀性能提高。窦为学等^[11]在 U75V 高速重轨钢中加入合金元素 Cr，通过电化学研究发现，适量的 Cr 有利于提高钢基体锈层的致密性，进而提高耐腐蚀性。加入质量分数 0.45%Cr 的试验钢自腐蚀电流密度比其他三种试验钢都低，耐腐蚀能最佳。

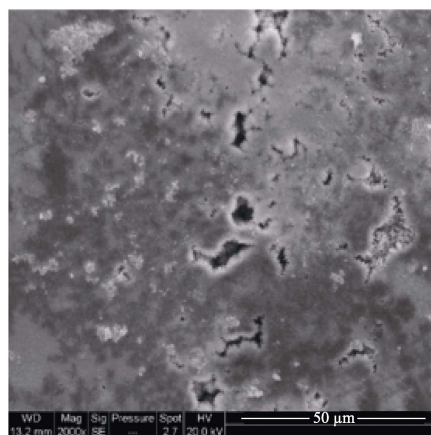
Y. H. Qian 等^[12]研究了 Cr 含量对钢轨耐腐蚀性能的影响，Cr 的加入提高了钢的钝化能力，除锈后，Cr 质量分数大于 7% 的钢的腐蚀电流密度明显降低。

T. Misawa 等^[13]的研究结果表明，合金元素在重轨钢的内层锈层中富集，使得钢轨的内层锈层明显比碳钢的内层锈层致密，增强了钢的耐蚀性。T. Kamimura^[14]研究了含 Cr 钢在湿/干循环过程中的腐蚀，发现在干燥过程中，含 Cr 钢的腐蚀速率低是由于在 Cr 掺杂的氧化物存在下，生锈层内的锈蚀减少，Fe²⁺ 的形成受到抑制，从而提高了 Cr 重轨钢的耐腐蚀性。同时通过电化学分析，也能了解到重轨钢腐蚀速率较低。

B. Panda 等^[15]采用失重法、红外光谱、锈蚀形貌和 EIS 分析等方法，研究了添加铜、钼、铬、镍、硅合金的新型钢轨钢在潮湿干燥盐雾 49 a 后的腐蚀行为，所有钢轨的减重值相似。所有钢轨内层和外层铁锈层的鉴定相为非晶 γ -FeOOH (lepidocrocite)、Fe_{3-x}O₄ (磁铁矿)、非晶 α -FeOOH (goethite) 和非晶 δ -FeOOH。在所有钢轨中，Fe_{3-x}O₄ 被认为是主要的锈蚀相。与 C-Mn、Cu-Si 钢轨钢相比，Cu-Mo、Cr-Mn、Cu-Ni、Cr-Cu-Ni、Cr-Cu-Ni、Cr-Cu-Si 钢轨钢的 ZCP 要高，所有钢轨钢在没有任何外部电位情况下的自由腐蚀电位 (FCP) 均相似。由于氧在室温下的最大溶解度很低，阴极反应速率受氧从本体溶液扩散到钢表面的限制，因此所有钢轨钢的阴极反应均受到扩散的限制。在锈蚀 49 a 后，所有钢轨的阻抗谱中均出现了两个时间常数。通过对低频阻抗数据的比较发现，铬铜镍钢轨的扩散效应低于其他钢轨。曝露气体条件下中性溶液的主要还原反应是氧的还原 ($O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH^-$)，这与 CrCuNi 钢轨锈蚀大孔数减少有关。CrCuNi 和 CrCuNiSi 钢轨上形成的致密铁锈使得高频区域的阻抗较高，耐腐蚀性能更好。CrCuNi 和 CrCuNiSi 钢轨表面锈蚀的显微形貌如图 1 所示^[15]。



a CrCuNi



b CrCuNiSi

图 1 CrCuNi 和 CrCuNiSi 钢轨表面锈蚀的显微形貌

Fig.1 SEM micrograph of corrosion on CrCuNi and CrCuNiSi steel rails surface

3 组织结构对重轨钢腐蚀的影响

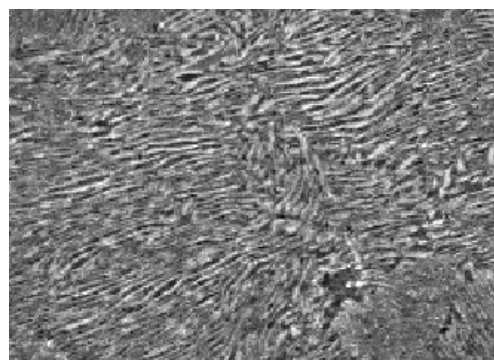
在很长时间内，国内外学者就合金元素和晶粒尺寸等对钢大气腐蚀性能的影响做了很多研究，却很少

研究金相组织对钢腐蚀的影响。由于钢轨的腐蚀日益严重，人们逐渐发现金相组织对钢的腐蚀也有较大程度的影响。有人曾对不同组织的耐候钢进行耐腐蚀分析，发现低碳贝氏体组织比其他组织类型的钢更耐腐蚀。在模拟大气腐蚀环境下，马氏体钢耐腐蚀性能大

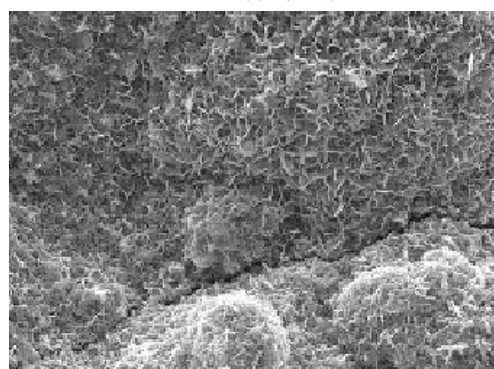
于针状铁素体钢和珠光体+铁素体钢。不同组织对钢的耐腐蚀性能有很大的影响,所以非常有必要研究组织对钢腐蚀的作用和机理^[16]。重轨钢通过热处理的方法来减少组织晶间间距,以提高其耐腐蚀性。郭佳等^[17]研究发现显微组织直接影响钢初期腐蚀,并间接影响长期腐蚀。在初期腐蚀时,铁素体钢中大角晶界易于优先腐蚀,而贝氏体内小角晶界择优腐蚀减弱,铁素体加珠光体的择优腐蚀集中于珠光体及其边界。铁素体裸钢有较强的耐腐蚀性,贝氏体与铁素体+珠光体裸钢初期耐腐蚀性差,长期腐蚀性能更优。贝氏体钢不仅具备优良的强韧性,也具备优良的耐腐蚀性能。铁素体+珠光体钢的长期耐腐蚀性能也较好的原因可能是由于珠光体中的渗碳体片对锈层与基体起铆接作用^[18]。

邵军^[19]研究了组织为马氏体、贝氏体+铁素体、珠光体+铁素体的低合金高强度船板钢在酸性氯离子环境下的耐蚀性,结果表明组织对钢的耐蚀性有明显的影响。马氏体结构单一以及碳化析出量少,结构之间没有明显的相位差,腐蚀反应均匀分布在钢材表面,易形成致密的锈层,对基体具有较好的保护效果。董杰吉^[20]等研究发现,由于碳浓度分布不均,加速了铁素体+珠光体组织钢中微电池的形成,降低了钢的耐蚀性。ULCB钢是一种均匀、细密的板条状贝氏体组织,不会产生明显的电化学效应,因而ULCB钢具有良好的耐蚀性,能够满足使用条件。Z. F. Wang等^[21]比较了加速循环腐蚀试验后的ULCB钢和09CuPCrNi钢的耐蚀性,并研究了微观结构对腐蚀的影响,发现采用均匀的组织、较低的碳含量、大量的低角度边界和随机分布的 $\Sigma 3$ 边界可以有效地提高ULCB钢的耐蚀性。

任安超等^[22]通过扫描电镜观察和测量U75V和U68CrCu钢轨钢的珠光体,研究这两种钢早期的腐蚀机理。研究结果表明,热轧后U68CrCu钢轨钢珠光体片层间距明显减少,表面形成更多的微电池,更容易形成均匀腐蚀,锈层更加致密。相对于U68CrCu, U75V钢轨珠光体片层间距大且比较粗糙,形成微电池相对较少,更容易发生点腐蚀,从而导致腐蚀速度相对较快。珠光体钢容易被腐蚀主要与珠光体片层间距有关,如图2所示。微观组织为珠光体复相组织的U71Mn钢样,经过周期性浸润腐蚀,自腐蚀电位随着时间的增加而降低,腐蚀倾向较大,腐蚀电流的增加表明,随着腐蚀的进一步发展,钢材的抗腐蚀能力降低。通过对腐蚀产物的观察可知,锈层形貌较为粗糙,且分布均匀性差,其中包含的渗碳体会在U71Mn内部产生腐蚀微电池,进而使得钢中铁素体组织的腐蚀速率增加。



a U68CrCu 钢轨珠光体组织



b U68CrCu 钢轨腐蚀形貌

图2 U68CrCu 钢轨钢珠光体腐蚀

Fig.2 Pearlite corrosion of U68CrCu steel rail

D. Clover^[23]研究表明,腐蚀/渗透速率的变化部分是由微观结构的差异而造成的。研究发现,具有带状铁素体/珠光体结构的钢在局部腐蚀方面表现不佳,这归因于碳化铁相渗碳体(Fe_3C)的分离分布。相比之下,观察到的所有其他微观结构为均匀的渗碳体。钢的细化铁素体、铁素体/粗粒、点针状珠光体/珠光体或回火马氏体微观组织的腐蚀性能存在微不足道的差异。无论如何,铁素体/粗粒和少量珠光体/珠光体材料在平均腐蚀和渗透性方面表现得更好。D. Clover推测,在富碳相和大块钢之间形成了电偶,注意到渗碳体相对于铁是阴极的。同样,与铁相比,锰的阳极性更强,这可能有利于在锰和大块材料之间形成一对电偶。显然,这两种效应将相互竞争。锰还影响钢中含碳相的形成,富含锰的区域有优先形成珠光体的趋势。T. Perez^[24]等研究表明,铁素体在珠光体晶粒中的优先腐蚀,珠光体钢表面形成层状或片状渗碳体(珠光体为渗碳体的层状结构, Fe_3C 、铁氧化物和铁)。随后,碳酸铁垢被困在片层珠光体之间,进而形成电解质和钢之间的物理屏障,然而,表面不均匀的鳞片覆盖可能有利于局部腐蚀。

4 热处理工艺或加工工艺对重轨钢腐蚀的影响

通过不同热处理工艺获取不同细小程度的珠光

体组织, 研究珠光体组织对抗大气腐蚀的影响。研究不同的热处理工艺, 以获取不同程度的晶粒, 达到不同的耐腐蚀效果, 从而研究不同的重轨钢耐腐蚀性能。周丽等^[25]对含 Cr 重轨钢进行不同加工工艺处理, 以模拟其在工业大气环境下的腐蚀, 研究表明, 经轧制处理的含 Cr 重轨钢的耐腐蚀性明显比经锻造处理的高。含 Cr 重轨钢经轧制处理后能促进保护性锈层增加, 提高了锈层阻止侵蚀性介质穿透的能力。另外, 轧制处理可提高重轨钢的耐工业性大气腐蚀性。随着时间的增加, 轧制钢比铸造钢更容易生成均匀的锈层。

E. Robert^[26]研究了低水平的拉伸应变应用于先前腐蚀的钢试样, 结果表明低水平拉伸应变对金属表面的附着锈蚀损失的影响相对较小, Songbo Yin^[27]研究了预变形对碳钢磨损腐蚀协同效应的影响, 结果表明总的磨损和腐蚀磨损协同作用均随应变率的增加而增强。预变形对腐蚀磨损有两个影响。一方面, 之前的应变硬化可能或多或少有利于耐磨性^[28-29], 因为随着材料硬度的增加, 磨损损失降低, 尽管这种好处会受到位错构型的影响。另一方面, 预变形引起的位错密度的增加会增大腐蚀速率^[30], 从而增强磨损腐蚀的协同作用, 进而导致更大的材料损失。更重要的是, 其他缺陷, 特别是之前的高应变率变形所产生的高密度微裂纹, 可能会在腐蚀磨损过程中显著恶化目标材料的力学性能。腐蚀辅助裂纹扩展已被广泛研究^[31], 裂纹主要通过溶解作用扩展, 残余韧带在外加应力的作用下因机械断裂而失效^[32]。朱晔^[33]研究了 U74 钢轨, 获得超细珠光体, 结果表明变形温度控制在 850~900 °C、变形程度控制在 50% 时珠光体片层间距最小, 并且随冷却速度增加而减小。变形温度在 850~900 °C 时, 球团最小, 并随变形程度、冷却速度的增大而减小。通过多道次热轧变形工艺模拟试验测定获得超细珠光体组织的最佳变形工艺为 850 °C 终轧、5~10 °C/s。细化珠光体晶粒有利于提高耐腐蚀性。

吴庆辉等^[34]通过在热模拟机上对耐腐蚀钢进行单道次压缩试验, 测定在变形温度和变形量一定的情况下, 降低变形速率有利于原奥氏体动态再结晶行为, 空冷后获得的珠光体间距减少。刘天模等^[35]研究了不同冷却速度对珠光体重轨钢组织和性能的影响, 发现冷却速度主要影响钢的珠光体片间距, 但对珠光体的大小没有明显影响。细化珠光体片间距可以提高钢的耐腐蚀性。钢材腐蚀是一个严重的问题, 因此研究钢的腐蚀机理和腐蚀性能, 目的是提出保护措施和防腐办法。吴红艳^[36]采用多道次轧制, 用 TEM 观察试验钢组织为针状铁素体和板条贝氏体, 析出物为 Ti 和 Nb 的复合碳氮化物。在热连轧生产线上采用两阶段轧制, 生产了 09CuPTi 系耐候钢。结果表明, 在腐蚀初期, 腐蚀速度随干湿循环次数的增加而增大, 在后期腐蚀速度逐渐降低, 09CuPTi 钢的腐蚀速率与 SPA-H 钢相当, 但低于 Q345 钢。09CuPTi 钢锈层分

为内外两层, 内锈层致密, 主要由 α -FeOOH 和少量 γ -Fe₂O₃ 组成; Q345 钢锈层主要由 α -FeOOH、 γ -Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 组成。电化学试验表明, 腐蚀产物促进阴极过程, 抑制阳极过程。

5 结语

随着中国铁路建设和铁路运输的发展, 应该加快耐腐蚀铁路的研发, 以满足我国多样化的气候。虽然研究耐腐蚀钢轨多年, 但还有许多亟待解决的课题, 例如合金元素含量与非晶态锈物质之间的关系、工业大气气氛中 β -FeOOH 和 SO₄²⁺ 的关系、锈层稳定化技术的开发、新型经济耐候钢种的研发、缺乏对重轨钢腐蚀数据标准化等等。应该结合自身特点, 借鉴外国先进研究成果, 开发适合我国的耐腐蚀的重轨钢, 在重轨钢中加入合金元素、不同组织、热处理等加工工艺来研究钢轨腐蚀。重轨钢腐蚀过程是一个非常复杂的过程, 包含物理领域、化学领域、电化学领域等多个学科领域。对大气腐蚀的机理研究, 应该在不同阶段采用不同的研究方法进行机理、锈层产物探索。在原有的基础上, 结合一些新的研究手段, 能使我们更清楚地了解重轨钢腐蚀产物结构及演变作用机理。

参考文献:

- [1] 王晓丽, 安胜利, 曹峥. 耐腐蚀重轨钢研究进展[J]. 内蒙古科技大学学报, 2016, 35(3): 205-208.
WANG Xiao-li, AN Sheng-li, CAO Zheng. Research Progress of Corrosion-resistant Heavy Rail Steel[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2016, 35(3): 205-208.
- [2] 周清跃, 张银花, 刘丰收, 等. 高速铁路钢轨技术发展历程回顾[J]. 中国铁路, 2018, 3: 1-8.
ZHOU Qing-yue, ZHANG Yin-hua, LIU Feng-shou, et al. The Review of the Development History of High Speed Railway Rail Technology[J]. China Railway Science, 2018, 3: 1-8.
- [3] 张银花, 周清跃, 陈朝阳, 等. 我国钢轨生产企业的现状与发展[C]//中国科协年会综合轨道交通体系学术沙龙论文集. 广州: [出版者不详], 2015.
ZHANG Yin-hua, ZHOU Qing-yue, CHEN Chao-yang, et al. Situation and Development of China Rail Manufacturer [C]//Proceedings of Comprehensive Rail Transit System Academic Salon of China Association for Science and Technology Annual Conference. Guangzhou: [s. n.], 2015.
- [4] 徐涌, 贾国平, 周清跃. 法国、德国高速铁路钢轨的生产和使用技术[J]. 中国铁路, 2001, 40(4): 49-51.
XU Yong, JIA Guo-ping, ZHOU Qing-yue. Production and Use Technology of High-speed Railway Rails in France and Germany[J]. China Railway, 2001, 40(4):

- 49-51.
- [5] 齐殿威. 日本新日铁焊接工艺新进展和未来前景[J]. 焊管, 2009, 32(8): 67-72.
QI Dian-wei. The Latest Progress and Future Prospects of Welding Technologies Developed by Nippon Steel Corporation[J]. Welded Pipe and Tube, 2009, 32(8): 67-72.
- [6] DAVIS D D, SAWLEY K. Track Steels: Past, Present and Future[J]. Railway Track & Structures, 1998, 11: 14-17.
- [7] KAMIMURA T, STRATMANN M. The Influence of Chromium on the Atmospheric Corrosion of Steel[J]. Corrosion Science, 2001, 43: 429-447.
- [8] 王晓丽, 宋波, 安胜利, 等. 含 Nb 重轨钢在模拟工业大气环境下的腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2014, 43(4): 1-4.
WANG Xiao-li, SONG Bo, AN Sheng-li, et al. Corrosion Behavior of Nb Heavy Rail in Simulated Industrial Atmosphere[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(4): 1-4.
- [9] 王晓丽, 宋波, 安胜利, 等. RE 重轨钢在模拟工业大气环境下的腐蚀行为[J]. 工程科学学报, 2014, 36(1): 72-76.
WANG XIAO-LI, SONG Bo, AN Sheng-li, et al. Corrosion Behaviors of RE Heavy Rail in Simulated Industrial Atmosphere[J]. Chinese Journal of Engineering, 2014, 36(1): 72-76.
- [10] 吴志锋, 宋义全. 07MnVTiNb 耐候钢在模拟沿海大气环境中的腐蚀行为的研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2017, 36(1): 13-18.
WU Zhi-feng, SONG Yi-quan. Study on Corrosion Behavior of 07MnVTiNb Weathering Steel in Simulated Coastal Atmospheric Environment[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2017, 36(1): 13-18.
- [11] 窦为学, 国栋, 冯捷, 等. Cr 微合金化 U75V 重轨钢电化学腐蚀行为研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(11): 2601-2604.
DOU Wei-xue, GUO Dong, FENG Jie, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Cr Microalloyed U75V Heavy Rail Steels[J]. Foundry Technology, 2018, 39(11): 2601-2604.
- [12] QIAN Y H, NIU D, XU J J, et al. The Influence of Chromium Content on the Electrochemical Behavior of Weathering Steels[J]. Corrosion Science, 2013, 71: 72-77.
- [13] MISAWA T, KYUNO T, SUETAKA W, et al. The Mechanism of Atmospheric Rusting and the Effect of Cu and P on the Rust Formation of Low Alloy Steels[J]. Corrosion Science, 1971, 11(1): 35-48.
- [14] KAMIMGI T, NASU S, SEG T, et al. Corrosion Behavior of Steel under Wet and Dry Cycles Containing Cr^{3+} [J]. Corrosion Science, 2003, 45: 1863-1879.
- [15] PANDA B, BALASUBRAMANIAM R, DWIVEDI G, et al. Corrosion of Novel Rail Steels in 3.5%NaCl Solution[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2008, 61: 177-181.
- [16] 李祥兵. 模拟大气环境下重轨钢腐蚀性能的研究[D]. 内蒙古: 内蒙古科技大学, 2013.
LI Xiang-bing. Research on the Corrosion Performance of Heavy Rail Steel under Simulated Atmospheric Environment[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2013.
- [17] 郭佳, 杨善武, 尚成嘉, 等. 大气腐蚀在低合金钢显微组织中的发生与发展[J]. 工程科学学报, 2009, 31(7): 848-854.
GUO Jia, YANG Shan-wu, SHANG Cheng-jia, et al. Incubation and Development of Atmospheric Corrosion in the Microstructures of Low Alloy Steels[J]. Chinese Journal of Engineering, 2009, 31(7): 848-854.
- [18] LOPEZ D A, SCHREINER W H, DE SANCHEZ S R, et al. The Influence of Carbon Steel Microstructure on Corrosion Layers an XPS and SEM Characterization[J]. Applied Surface Science, 2003, 207: 69.
- [19] 邵军. 显微组织对低合金钢耐蚀性的影响[J]. 物理测试, 2013, 31(3): 14-17.
SHAO jun. Effect of Microstructure on Corrosion Resistance of Low Alloy Steel[J]. Physics Examination and Testing, 2013, 31(3): 14-17.
- [20] 董杰吉, 张思勋, 王慧玉, 等. 超低碳贝氏体高强度钢的腐蚀性能研究[J]. 武汉科技大学学报, 2008, 31(2): 127-131.
DONG Jie-ji, ZHANG Si-xun, WANG Hui-yu, et al. Corrosion-resistant Property of High Strength ULCB Steel[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2008, 31(2): 127-131.
- [21] WANG Z F, LI P H, GUAN Y, et al. The Corrosion Resistance of Ultra-low Carbon Bainitic Steel[J]. Corrosion Science, 2009, 51: 954-961.
- [22] 任安超, 朱敏, 费俊杰, 等. U75V 和 U68CrCu 钢轨钢早期腐蚀机理研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 7-11.
REN An-chao, ZHU Min, FEI Jun-jie, et al. Early Corrosion Mechanism of U75V and U68CrCu rail Steel[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 7-12.
- [23] CLOVER D, KINSELLA B, PEJCIC B, et al. The Influence of Microstructure on the Corrosion Rate of Various Carbon Steels[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2005, 35: 139-149.
- [24] PEREZ T, FITZSIMONS G, VIDEM K. Proceeding of the 13th International Corrosion Conference[C]. Melbourne: [s. n.], 1996.
- [25] 周丽, 王晓丽, 彭军, 等. 加工工艺对含 Cr 重轨钢在模拟工业大气环境下腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 70-74.
ZHOU Li, WANG Xiao-li, PENG Jun, et al. Influence of Processing Technology on Corrosion Behavior of Heavy Rail Steel with Cr in Simulated Industrial Atmosphere Environment[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(24): 70-74.
- [26] MELCHERS R E, PAIK J K. Effect of Tensile Strain on

- the Rate of Marine Corrosion of Steel Plates[J]. Corrosion Science, 2009, 51: 2298-2303.
- [27] YIN S, LI D Y, BOUCHARD R. Effects of the Strain Rate of Prior Deformation on the Wear-Corrosion Synergy of Carbon Steel[J]. Wear, 2007, 263: 801-807.
- [28] YIN S, LI D Y. Corrosion and Corrosive Wear of Annealed, Impact-fractured and Slow Bending-fractured Surface Layers of AISI 1045 Steel in a 3.5%NaCl Solution[J]. Wear, 2005, 259: 383-390.
- [29] SONG bo, YIN S, LI D Y, et al. Effects of Strain Rate of Prior Deformation on Corrosion and Corrosive Wear of AISI 1045 Steel in a 3.5%NaCl Solution[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2007, 135: 201-216.
- [30] YIN S, LI D Y. Effects of Prior Cold Work on Corrosion and Corrosive Wear of Copper in HNO₃ and NaCl Solutions[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 394(1-2): 266-276.
- [31] SWANN P R, EMBURY J D. Electron Metallography of Chemical Attack Upon Some Alloys Susceptible to Stress Corrosion Cracking[J]. Corrosion-Houston, 1963, 19(11): 373-389.
- [32] ROBERTSON W D . Stress, Corrosion Cracking and Embrittlement[M]. Washington: Wiley, 1956.
- [33] 朱晔, 孙本荣, 赵林春. 超细珠光体组织轨轧制工艺的探讨[J]. 钢铁研究总院学报, 1988(S1): 150-156.
- ZHU Ye, SUN Ben-rong, ZHAO Lin-chun. Rolling Process For Heavy Rails With Supper Fine Pearlite Microstructure[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1988(S1): 150-156.
- [34] 吴庆辉, 杨忠民, 王慧敏, 等. 热变形对耐蚀重轨钢动态再结晶及组织的影响[J]. 热加工加工工艺, 2013, 42(2): 72-78.
- WU Qing-hui, YANG Zhong-min, WANG Hui-min, et al. Influence of Heat Deformation on Dynamic Recrystallization and Microstructure of Corrosion Resistant Resistant Rail Steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(2): 72-78.
- [35] 刘天模, 左汝林. 热处理工艺对珠光体重轨钢组织和性能的影响[C]. 全国热处理大会论文集. 天津: [出版者不详], 2011.
- LIU Tian-mo, ZUO Ru-lin. The Effect of Heat Treatment Process on the Structure and Properties of Pearlescent Heavy Rail Steel[C]//Proceedings of the National Heat Treatment Conference. Tianjin: [s. n.], 2011.
- [36] 吴红艳, 杜林秀, 刘相华. 09CuPTi 系耐候钢组织性能及耐腐蚀行为[J]. 钢铁, 2012, 10(42): 76-82.
- WU Hong-yan, DU Lin-xiu, LIU Xiang-hua. Microstructure, Mechanical Property and Corrosion Behavior of 09CuPTi Series Weathering Steel[J]. Iron and Steel, 2012, 10(42): 76-82.