

异种材料焊接接头热应力缓冲中间层的研究现状

徐振钦, 杨宗辉

(南京工程学院 材料工程学院, 南京 211167)

摘要: 异种材料焊接接头固有的热应力会损害接头的连接强度、高温性能及抗热震性能, 选择或设计合适的中间层是降低异种材料焊接接头热应力的有效手段。概括介绍了异种材料接头热应力缓冲中间层的基本类型及其降应力原理; 重点综述了国内外对于复层中间层、吸能夹层中间层、复合材料中间层及功能梯度中间层等四种热应力缓冲中间层的研究现状, 并对各中间层的优缺点进行了评述。综合考虑异种材料焊接工艺的难易程度、经济性、连接质量及适应性, 认为复合材料中间层和含吸能夹层的复层中间层最具发展前景。

关键词: 异种材料; 热应力; 中间层; 复合材料

中图分类号: TG42

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2013)012-0006-05

Research Actuality of Thermal Stress Relaxation Interlayer for Dissimilar Materials Joints

XU Zheng-qin, YANG Zong-hui

(School of Material Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The dissimilar materials joint performances, such as strength, high-temperature performance and thermal shock resistance, are damaged by thermal stress seriously. Selecting or designing a suitable interlayer is an effective way to reduce the thermal stress of dissimilar materials joints. The stress relaxing principles and the basic structure types of dissimilar materials joints interlayer are introduced. The current research situation is summarized especially of multi-layer interlayer, energy absorption mezzanine interlayer, composites interlayer and functionally gradient interlayer. The advantages and disadvantages of each interlayer are also commented. Overall considering complexity, economy, connection quality and adaptiveness for material connection technology, composites interlayer and energy absorption mezzanine interlayer are of most future.

Key words: dissimilar materials; thermal stress; interlayer; composites

0 引言

异种材料的扩散焊或钎焊焊接能够最大限度地利用被连接材料的各自优点满足结构对材料性能的要求。但由于被焊接材料在弹性模量及线膨胀系数上的差异, 异种材料焊接接头会产生很大的热应力。热应力会大大降低接头的连接强度和抗热震性能, 当被连接材料一方为脆性材料时, 如各类陶瓷, 热应力往往造成接头直接开裂。因此, 对于异种材料接头, 特别是线膨胀系数相差很大的异种材料接头, 如何降低接头热应力是研究者关心的主要问题之一。

经过多年的研究与实践, 国内外研究者发展了常温结合法、中间层法、改变结合部位形状法、局部加热法、接合部位离散化、避免拉伸载荷法、相变释应力法、控制显微裂纹法等^[1-2]多种方法来降低扩散焊或钎焊焊接接头的热应力。综合降应力效果、工艺复杂程度、适应性等因素, 中间层法最具实用性。同时, 中间层法也是其它方法应用的基础, 其中热应力缓冲中间层的选择是此方法的关键。中间层置入扩散焊或钎焊接头有多种方法, 主要包括直接置入、电镀、化学、等离子喷涂、离子镀、离子注入等, 其中以直接置入薄片状或粉末态中间层法最为经济实用, 应用最广。为了给国内相关研究技术人员提供参考, 作者对近些年来异种材料焊接接头热应力缓冲中间层的研究成果进行了综述。

收稿日期: 2013-01-03; 修订日期: 2013-10-19

基金项目: 南京工程学院创新基金资助项目 (CKJ2010004)

作者简介: 徐振钦 (1973-), 男, 山东枣庄人, 副教授, 博士。

1 热应力缓冲中间层的基本类型

异种材料接头热应力缓冲中间层的类型很多,其降应力效果、制备方法、工艺难度均有很大区别^[3-4]。概括起来异种材料接头热应力缓冲中间层的常见类型有以下6种。

1.1 软质中间层

此中间层主要是采用一些软质金属材料。铝、铜、镍等纯金属因塑性好、屈服强度低,常用作此类中间层,它主要是依靠软中间层的微塑性变形来释放接头热应力。

1.2 硬质中间层

此中间层主要是采用一些硬质金属材料。钨、钼、钽等硬质金属因弹性模量大、线膨胀系数小,可以减小连接材料之间的物理性能失配,从而减小连接接头的热应力。

1.3 复层中间层

此中间层使用软硬不同的金属所组成,根据需要可选择二层或三层,相对于单一的软质或硬质中间层,复层中间层综合了软、硬中间层的优点,具有更好的接头热应力缓冲效果,尤其适合热膨胀系数相差较大的陶瓷与金属接头。

1.4 复合材料中间层

复合材料中间层设计的基本原理是在相对较软的基体相(或粘结相)中加入颗粒状、纤维状等硬质相,利用基体相(或粘结相)保证中间层良好的塑、韧性,利用硬质相实现中间层的高温强度和低线膨胀系数。硬质相多以混合粉末的形式直接加入,也可利用焊接过程的化学反应原位生成。此中间层可通过改变硬质相与软质相的配比来调节自身线膨胀系数,进一步减小连接材料之间的物理性能失配使接头降热应力效果进一步优化。

1.5 吸能夹层中间层

此中间层主要是采用一些多孔材料,如金属纤维滤网、金属泡沫、陶瓷纤维滤饼等,再配合合适的钎料形成。由于这种中间层具有特殊的吸能作用和止裂作用可取得较好的缓冲接头热应力的效果。

1.6 功能梯度中间层

此中间层采用功能梯度材料,其物理性能随之呈梯度变化,从而最大限度地减小因两种被连接材料的性能失配而引起的接头热应力。

单层的软质或硬质中间层降热应力原理明确,应用工艺相对简单,但降热应力效果有限,特别是对

于一些物理性能差异很大的异种材料焊接,采用单中间层的焊接接头难以达到使用要求。降热应力效果更好、具有更大设计空间的复层中间层、复合材料中间层、吸能夹层中间层及功能梯度中间层成为近年来的研究热点,作者主要以这4种类型中间层为对象,综述近年来扩散焊/钎焊用中间层的研究现状。

2 热应力缓冲中间层的研究现状

在各类异种材料焊接接头中,由于陶瓷/钢、钨/铜、钨/钢等接头属于典型的线膨胀系数和弹性模量均相差很大的异种材料接头,接头的热应力相当大。同时,陶瓷、钨等属于脆性材料,对接头热应力特别敏感,对热应力缓冲中间层的要求非常高。因此,下面主要以陶瓷/钢、钨/铜、钨/钢等接头作为对象对热应力缓冲中间层进行综述。

2.1 复层中间层

复层中间层应力缓冲效果明显,并且工艺简单。复层中间层组合形式很多,常见的有软层+硬层、软层+硬层+软层、硬层+硬层等三种,各层材料性能及厚度对热应力松弛效果有很大影响。

复层中间层研究最多的组合为硬层+软层模式,硬层多使用纯钨或纯钼,或是线膨胀系数小的镍合金、Kovar合金等,而软层可以是软质纯金属,也可以是合金钎料层。Travessaa^[5]等采用钛+铜中间层焊接 Al_2O_3 陶瓷与 304 不锈钢,有限元分析和试验发现此中间层相对于单一的钛、铜或钼中间层更有利于缓解接头热应力,接头强度达到 65 MPa。Zhou 等^[6]同样采用有限元分析和试验相结合的方法,发现 Si_3N_4 陶瓷/钢接头采用铜+钨中间层相对于采用单一的钛、铜、钨中间层,具有更小的接头热应力和最高的接头强度。为了进一步加强钨硬层与陶瓷的结合力,可采用两步法进行焊接。Zhong 等^[7]在采用钨+镍中间层焊接 SiC 陶瓷和铁素体不锈钢时,先在 1 600 °C 高温焊接 SiC 陶瓷和钨,然后在较低温度下焊接形成 SiC/钨/镍/钢接头,接头抗拉强度达到 55 MPa。同样采用两步法,Zhong 等还以钨+铜为中间层实现了 SiC 陶瓷和钢的焊接^[8]。

为了降低焊接温度,软层可采用合金钎料层,硬层以嵌在钎料层中的形式置入。张勇等^[9]以钨片作为硬层,以镍基高温钎料作为软层焊接 GH2907 合金与碳纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料,发现钨片厚度对接头强度有重要影响,当其厚 1.5 mm 时,接头

四点抗弯强度达到最大值 109 MPa。Hao 等^[10]以钼片作为硬层,以银铜钽钎料为软层焊接 Al_2O_3 陶瓷和 1Cr18Ni9Ti 钢时,也发现硬层钼片存在最佳厚度(0.1 mm),并从界面应力和界面组织两方面论述了硬层钼片促进接头强度提高的原因。Kalin 等^[11]焊接钨和钢时,在镍基非晶钎料(厚度 35~40 μm)接头中置入一块厚 0.5 mm、线膨胀系数只有 $6.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 的铁镍合金,焊后热震测试(加热 700 $^\circ\text{C}$ 保温 20 min,然后在水中激冷)100 次没有发现任何裂纹。文献[12]则主要利用金属钽的低线膨胀系数($6.6 \sim 8.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$),设计了钛基钎料+厚 100 μm 的金属钽+铁基钎料的软+硬+软中间层来焊接钨与钢。对钎焊接头热震(720 $^\circ\text{C}$ 空冷至 20 $^\circ\text{C}$)30 次,接头没有出现裂纹^[12]。

除上面软硬结合的复层中间层外,还有少量研究采用硬层+硬层结构形式,其目的是为了加强接头的耐高温性能。Travessaa 等^[5]采用钛+钼中间层焊接 Al_2O_3 陶瓷和 304 不锈钢,但应力缓冲效果不如钛+铜中间层,接头强度为 27 MPa。冀小强等^[13]采用钨+钼中间层焊接 SiC 陶瓷和镍基高温合金,其抗弯强度达到了陶瓷母材强度的 52%。

2.2 吸能夹层中间层

吸能夹层中间层一般采用钎料中间置入具有吸能特性夹层的方式组成复合中间层。由于夹层本身的强度一般较低,并且夹层与钎料的结合强度有限,导致该方法的研究并不多。朱定一等^[14]采用镍钽钎料+金属钼网中间层的形式焊接 Al_2O_3 陶瓷和钼,接头强度比不加钼网接头的提高 130%以上。并且,接头具有良好的热震抗力,700 $^\circ\text{C}$ 淬水后的剩余强度达到了不加网的焊后强度。该文献分析认为金属钼网的加入显著降低了钎焊界面的残余应力。Shirzadia 等^[15]研究以不锈钢金属泡沫+钎料作为 Al_2O_3 陶瓷/316L 不锈钢接头的吸能夹层中间层,其接头抗剪强度达到 33 MPa,且能经受超过 60 次 200~800 $^\circ\text{C}$ 的热震。任艳红^[16]认为金属泡沫具有显著的能量吸收特性,作为异种材料接头中间层具有很好的应力缓冲效果,但存在一个最佳的泡沫层厚度。

2.3 复合材料中间层

硬质相直接以混合粉末加入得到复合材料中间层的方法具有工艺简单和硬质相含量方便调节的优点。熊进辉等^[17]利用银铜钽钎料+钨颗粒相复合材料中间层焊接 SiC 陶瓷与 TC4 合金,由于钨相既强化了中间层,又缓解了接头的热应力,使其接头

的抗剪强度明显高于不添加钨相接头的。Rabin 等^[18]以 4.0 mm 厚的 40% Al_2O_3 -60% Ni(体积分数)复合材料作为中间层焊接 Al_2O_3 陶瓷与镍,通过实测接头应力状态,发现界面区应力在焊接冷却过程得到有效释放,而应力释放的重要原因在于中间层的损伤积累。Zhong 等^[19]采用钨钼镍混合粉作为中间层,焊接 SiC 陶瓷与钢,焊接分为两步,首先高温下实现 SiC 陶瓷与钨钼镍混合粉的焊接,然后在相对低温下焊接钨钼镍混合粉与钢。由于中间层与 SiC 的良好结合能力及降热应力作用,此接头平均抗剪强度达到了 33 MPa。Songa 等^[20]开发了一种银铜钽钎料+ Si_3N_4 颗粒的复合材料中间层,以焊接 Si_3N_4 陶瓷与 TiAl 合金。通过 Si_3N_4 颗粒强化及 Si_3N_4 调整中间层的线膨胀系数,提高了接头强度,在含 3% Si_3N_4 (质量分数)颗粒时,接头强度达到 115 MPa。Zhang 等^[21]在焊接 Si_3N_4 陶瓷和 42CrMo 时,设计了银铜钽+钼复合材料中间层。含 10% 钼粉(体积分数)中间层对应的接头强度最大值达到 587.3 MPa,相对于没有添加钼粉的银铜钽钎料的钎焊接头,强度提高了 414.3%。Greuner 等^[22]采用等离子喷涂法在不锈钢表面制备厚钨涂层,在喷涂纯钨前,先在不锈钢基体上喷涂一层钨与不锈钢的混合粉末涂层。该混合粉末涂层既加强了纯钨涂层与不锈钢基体的结合力,同时也成为纯钨涂层与不锈钢基体之间的热应力缓冲中间层。热载试验表明,钨涂层/不锈钢构件能经受的热静载达到 $2.5 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$,热动载达到 $2 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。田亮等^[23]利用 Ti50Cu+钨颗粒复合钎料焊接陶瓷与钢,当钨颗粒较少时,降热应力效果不明显,接头强度低,当钨颗粒含量达到 30%后接头强度达到 106 MPa。

通过焊接过程的化学反应生成硬质相来形成复合材料中间层,对中间层成分设计要求很高。由于生成大量化合物可能造成中间层的脆化,目前的研究主要还是以生成少量化合物为主。Yang 等^[24]利用 65.9Cu-24.4Ti-9.7TiB₂ (质量分数)复合钎料中间层焊接 Al_2O_3 陶瓷与钛合金。TiB₂ 与从母材扩散过来的钛元素反应,在 (Ti, Al)₂Cu 和 AlCu₂Ti 金属间化合物表面原位合成 TiB 晶须。TiB 晶须的形成降低了钎料中间层与 Al_2O_3 的线膨胀系数差,进而降低了接头热应力,接头的最大抗剪强度达到 143.3 MPa。Lina 等^[25]以同样的思路,利用铜镍钎料+TiB₂ 实现了碳-碳复合材料/钛基复合材料的高质量焊接。值得指出的是,邹贵生等在研究

Si₃N₄ 陶瓷的焊接时,发展了多种复合材料中间层设计思路与方法,其思路的核心是通过设计合适的钎料成分,在中间层中原位生成 Al₃Ti^[26-27]、AlCu₂Ti^[28]、Al₃Zr、Al₃V 及 Al₆V^[29] 等硬质金属间化合物层,在提高软质钎料中间层热强性的同时,也降低了中间层的线膨胀系数。作者在焊接钨与铜前,为了降低接头热应力,利用热浸镀方法,使钨表层生成一层类似于钨基高密度合金组织的小膨胀系数复合材料中间层^[30],但降热应力效果还有待试验验证。

2.4 功能梯度中间层

功能梯度中间层实际上是在复合材料中间层的基础上发展起来的,即通过复合材料中间层在两母材之间的成分梯度化,使中间层的线膨胀系数等物理性能随之呈现梯度变化。但功能梯度中间层相对普通的复合材料中间层,其设计因素、制备工艺、应用效果等方面有很大不同。

种法力等^[31]则先采用真空等离子喷涂法在铜上制备钨+铜功能梯度中间层,然后把钨与功能梯度中间层通过电子束焊焊接实现铜与钨的焊接。该工艺虽然复杂,但结果表明,钨+铜功能梯度中间层对钨/铜接头具有良好的降热应力效果,在 4.5 MW·m⁻²、25 s 辐照、100 周热疲劳的热负荷条件下,接头仍然完好,没有出现破裂现象。为了省去后续钨与中间层的焊接步骤,可在喷涂完中间层后,继续喷涂一层纯钨来作为高温工作层。如 Montanari 等^[32]在铜铬合金基体上等离子喷涂制备厚钨涂层时,先在基体上等离子喷涂制备出 800 μm 厚、但具有 20 层的复杂梯度中间层,基本实现由钨至铜的物理性能渐变。Riccardi^[33]和 Pintsuk^[34]也以同样的思路,真空等离子喷涂制备了带功能梯度中间层的钨/铜复合结构,并且系统研究了该钨/铜复合结构的热机械性能、热物理性能、应力缓和性能等技术参数。结果表明,采用钨含量从 75% 开始,以每层 5% 递增至 100% 纯钨的功能梯度中间层具有最好的应力缓和效果。

Lia 等^[35]为了提高 YSZ 陶瓷/Ni-20Cr 钢接头的热疲劳性能,采用了 YSZ+NiCr 功能梯度中间层,相应接头经受 30 次室温~1 000 °C 严酷热循环后的强度达到 207.0 MPa。为了提高陶瓷与不锈钢的焊接质量, Gillia^[4]等采用热等静压烧结的方法制备了氧化锆陶瓷与多种不锈钢材料的功能梯度中间层。研究发现,氧化锆陶瓷粉与奥氏体不锈钢粉烧结的中间层容易出现微裂纹,而氧化锆陶瓷粉与

马氏体不锈钢粉与烧结的中间层不易出现微裂纹。刘红兵等^[36]在焊接 Al₂O₃ 陶瓷与 316L 不锈钢时,设计了四层结构的由 Al₂O₃+316L 粉等离子喷涂制备的功能梯度中间层,厚度约 0.4 mm。该文献还运用有限元软件分析梯度层层数、成分分布指数、梯度中间层厚度等参数对 Al₂O₃/316L 接头热应力的影响。试验和数值模拟结果均表明,功能梯度层在很大程度上缓和了 Al₂O₃/316L 接头的热应力,且各应力分量最大值均明显降低。林严资等^[37]则研究了 Al₂O₃/功能梯度中间层/CLAM 钢接头界面区的残余应力分布特征,当梯度中间层的成分分布指数取 0.8、层数为 6、厚度为 0.6 mm 时,接头界面各向应力分布可以达到最优。李云凯等^[38]采用热压法制备由 PSZ 陶瓷粉与和钼粉组成的功能梯度中间层来焊接 PSZ 陶瓷与钼,并利用有限元分析方法设计出具有最优降热应力效果的功能梯度中间层(1 mm 厚、6 层、形状分布因子 1.6),用该功能梯度中间层焊接的 PSZ 陶瓷/钼接头能经受超过 120 次的风冷热震循环。为了降低接头应力并缩短实验时间,徐金富等^[39]采用放电等离子烧结(SPS)技术制备功能梯度中间层焊接 MoSi₂ 陶瓷与 316L 不锈钢,经过有限元优化设计后的接头能经受 1 200 °C 空冷至室温的苛刻热循环。

3 结束语

选择或设计合适的中间层是缓解异种材料接头热应力的有效手段。复层中间层工艺简单,热应力缓冲效果受中间层材料本身的限制,难以通过优化设计达到一个很高的水平。吸能夹层中间层为缓冲接头热应力拓展了一条新思路,如能解决好夹层与钎料层的结合强度问题,随着金属泡沫材料等吸能材料技术的进步,吸能夹层中间层对于异种材料焊接很有应用前景。复合材料中间层能方便调节自身的线膨胀系数,通过选择合适的复合材料类型,并对其成分配比优化设计,复合材料中间层能取得很好的应力缓冲效果。同时,采用复合材料中间层的焊接过程实际上为钎焊过程,具有焊接压力要求小、对焊接端面加工要求低等优点。因此,复合材料中间层对异种材料焊接具有明显优势。在复合材料中间层的基础上发展起来的功能梯度中间层具有焊接工艺相对复杂的缺点,但从理论上讲,功能梯度中间层是解决异种材料接头力学性能适配、最大限度降低接头热应力的最佳解决方案,值得从梯度层结构优

化设计、制备工艺以及接头的应力缓冲效果表征等方面开展深入研究。

综合考虑异种材料焊接工艺的难易程度、经济性、焊接质量及适应性,作者认为复合材料中间层和含吸能夹层的复层中间层最有发展前景,原因在于大多数异种材料接头,不但存在接头降热应力问题,并且存在界面冶金焊接质量问题,而采用这两种中间层正好能从软质相方面灵活地解决界面冶金焊接质量问题,从硬质相方面有效地解决接头应力问题。同时,采用上述两种中间层,多数情况下可一次完成焊接,不需要复杂的方法与工艺,降低了生产成本。而结合机械合金化、金属间化合物的原位生成,泡沫材料、纳米材料等现代技术,还能使复合材料中间层和含吸能夹层的复层中间层得到进一步的发展。

参考文献:

- [1] 方洪渊,冯吉才.材料连接过程中的界面行为[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [2] 许并社.材料界面的物理与化学[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [3] HSUEH C H, DE JONGHE L C, LEE C S. Modeling of thermal stresses in joining two layers with multi-and graded interlayers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89 (1): 251-257.
- [4] GILLIA O, GAILLENS B. Fabrication of a material with composition gradient for metal/ceramic assembly [J]. Powder Technology, 2011, 208(2): 355-366.
- [5] TRAYESSAA D, FERRANTEA M, QUDENB G D. Diffusion bonding of aluminium oxide to stainless steel using stress relief interlayers[J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 337(1/2): 287-296.
- [6] ZHOU Y, BAO F H, REN J L, *et al.* Interlayer selection and thermal stresses in brazed Si_3N_4 -steel joints[J]. Materials Science and Technology, 1991, 7(9): 863-868.
- [7] ZHONG Z H, HINOKI T, YUNG H C. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded SiC/steel joint using W/Ni interlayer[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1070-1076.
- [8] ZHONG Zhi-hong, TATSUYA H, KOHYAMA A. Microstructure and mechanical strength of diffusion bonded joints between silicon carbide and F82H steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417: 395-399.
- [9] 张勇. C_f/SiC 陶瓷基复合材料与高温合金的高温钎焊研究[D].北京:钢铁研究总院,2006.
- [10] HAO Hong-qi, WANG Yong-lan, JIN Zhi-zhao, *et al.* The effect of interlayer metals on the strength of alumina ceramic and 1Cr18Ni9Ti stainless steel bonding[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(16): 4107-4111.
- [11] KALIN B A, FEDOTOV V T, SEVEJUKOV O N, *et al.* Development of rapidly quenched brazing foils to join tungsten alloys with ferritic steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329/333: 1544-1548.
- [12] KALIN B A, FEDOTOV V T, SEVEJUKOV O N, *et al.* Development of brazing foils to join monocrystalline tungsten alloys with ODS-EUROFER steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367/370: 1218-1222.
- [13] 冀小强,李树杰,马天宇,等.用 Zr/Nb 复合中间层连接 SiC 陶瓷与 Ni 基高温合金[J].硅酸盐学报,2002,30(3): 305-310.
- [14] 朱定一,金志浩,王永兰.中间层 Mo 网对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ 钎焊接头热震抗力的影响[J].复合材料学报,1999,16(2): 81-84.
- [15] SHIRZADIA A A, ZHUB Y, BHADSHIAA H K D H. Joining ceramics to metals using metallic foam[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1/2): 501-506.
- [16] 任艳红,朱颖,曲平,等.缓解陶瓷与金属钎焊接头残余应力的新方法研究[J].新技术新工艺,2012(3): 71-74.
- [17] 熊进辉,黄继华,薛行雁,等. C_f/SiC 复合材料与 Ti 合金的 AgCuTi-W 复合钎焊[J].航空材料学报,2009,29(6): 48-51.
- [18] RABIN B H, WILLIAMSON R L, BRUCK H A, *et al.* Residual strains in an Al_2O_3 -Ni Joint bonded with a composite interlayer: experimental measurements and FEM analyses [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(6): 1541-1549.
- [19] ZHONG Z, HINOKI T, KOHYAMA. Joining of silicon carbide to ferritic stainless steel using a W-Pd-Ni interlayer for high-temperature applications[J]. Journal of Applied Ceramic Technology, 2010, 7(3): 338-347.
- [20] SONG X G, CAO J, WANG Y F, *et al.* Effect of Si_3N_4 -particles addition in Ag-Cu-Ti filler alloy on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{TiAl}$ brazed joint [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (15): 5135-5140.
- [21] ZHANG J, SUN Y. Microstructure and mechanical properties of the $\text{Si}_3\text{N}_4/42\text{CrMo}$ steel joints brazed with Ag-Cu-Ti+Mo composite filler[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(15): 3245-3251.
- [22] GREUNER H, BOLT H, BOSWIRTH B, *et al.* Vacuum plasma-sprayed tungsten on EUROFER and 316L: Results of characterisation and thermal loading tests[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 75/79: 333-338.
- [23] 田亮,黄继华,张志远,等.用 $\text{Ti50Cu}+\text{W}$ 钎料连接 Si/SiC 复相陶瓷与殷钢的研究[J].材料工程,2008(9): 71-74.
- [24] YANG Min-xuan, LIN Tie-song, HE Peng, *et al.* Brazing of Al_2O_3 to Ti-6Al-4V alloy with in situ synthesized TiB-whisker-reinforced active brazing alloy[J]. Ceramics International, 2011, 37(8): 3029-3035.
- [25] LIN Tie-song, YANG Min-xuan, HE Peng, *et al.* Effect of in situ synthesized TiB whisker on microstructure and mechanical properties of carbon-carbon composite and TiBw/Ti-6Al-4V composite joint[J]. Materials & Design, 2011, 32(8/9): 4553-4558.

(下转第 15 页)

连铸连轧试样的耐候性能优于传统热轧试样的。

3 结 论

(1)采用连铸连轧工艺生产的 SPA-H 耐候钢在显微组织上要比传统热轧工艺生产的耐候钢更为均匀,且拥有较小的晶粒度。

(2)在模拟的海洋大气环境中,即有 Cl^- 存在的环境下,采用连铸连轧工艺生产的 SPA-H 耐候钢的耐蚀性能要优于传统热轧工艺生产的。

参考文献:

- [1] 董瑞峰,王雪莲. 集装箱用热轧钢带的研制[J]. 包钢科技, 2004,30(2):27-29.
- [2] 李湘凡,孙华,郜书忠. 高强度耐候钢 SPA-H 的试制[J]. 特殊钢,2006,27(1):53-54.
- [3] KEISER J T, BROWN C W, HEIDERSHACH R H. Characterization of the passive film on weathering steels[J]. Corrosion Science, 1983,23(3):251-259.
- [4] YAMASHITA M, MIYUKI H, MATSUDA Y, *et al.* The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century[J]. Corrosion Science, 1994,36(2):283-289.
- [5] 王义芳,侯金海,刘国庆. 采用 CSP 工艺开发集装箱用高耐候钢的生产实践[J]. 钢铁,2003,38(8):54-57.
- [6] MIZOGUCHI T, ISHIIA Y, OKADA T, *et al.* Magnetic property based characterization of rust on weathering steels[J]. Corrosion Science, 2005,47(10):2477-2481.
- [7] YUE L J, WANG L M, PIAO X Y, *et al.* Weather resistance and its mechanism for 10PCuRE steel[J]. J Iron Steel Res, 2006,18(1):34-37.
- [8] 郝献超. 碳钢和耐候钢在西沙大气环境下的腐蚀行为及机制[D]. 北京:北京科技大学,2005.
- [9] 刘国超,董俊华,韩恩厚,等. Cu、Mn 的协同作用对低合金钢在模拟海洋海洋大气环境中腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术,2008,20(4):235-238.
- [10] 岳丽杰. Cu-P-RE 耐候钢中稀土行为作用及机理的研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.
- [11] 张春玲,蔡大勇,廖波,等. 双相化处理对 09CuPCrNi 耐候钢腐蚀性能的影响[J]. 钢铁,2008,43(12):79-82.
- [12] ZHANG Chun-ling, CAI Da-yong, LIAO Bo, *et al.* A study on the dual-phase treatment of weathering steel 09CuPCrNi[J]. Materials Letters, 2004,58(8):1524-1529.
- [13] 郭佳,杨善武,尚成嘉,等. 碳含量和组织类型对低合金钢耐蚀性的影响[J]. 钢铁,2008,43(9):58-62.
- [14] 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和发展[J]. 北京科技大学学报,2009,31(7):849-854.
- [15] 宋春晖,周学俊,李具中,等. 合金元素调整对耐候钢海洋大气环境下耐蚀性的影响[J]. 机械工程材料,2012,36(4):62-66.
- [16] 岳丽杰,陈为公,王龙妹. Cu-P-RE 耐候钢的耐腐蚀性能[J]. 北京科技大学学报,2009,31(5):568-572.
- [17] 王博,郑春玉,郑艳,等. 高铬耐候钢的电化学行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2009,21(4):363-364.
- [18] 郝献超,苏鹏,肖葵,等. 不同 NaCl 浓度对耐候钢腐蚀产物的影响[J]. 腐蚀与防护,2009,30(5):297-299.
- [19] 查春和,李龙,丁桦,等. 晶粒尺寸对超细晶耐候钢耐大气腐蚀性能的影响[J]. 首钢科技,2009(6):19-22.
- [26] 邹贵生,吴爱萍,任家烈. Al/Ti/Al 复合层原位生成金属间化合物连接陶瓷[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(12):981-984.
- [27] 邹贵生,吴爱萍,任家烈,等. 用 Al-Ti 合金加压钎焊 Si_3N_4 陶瓷及接头高温性能[J]. 航空材料学报,1999,19(2):48-52.
- [28] 张德库,吴爱萍,邹贵生,等. 原位生成法半固态连接 Si_3N_4 复相陶瓷的接头组织[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(5):613-619.
- [29] 邹贵生,吴爱萍,任家烈,等. 用 Al-Zr 和 Al-V 合金加压钎焊 Si_3N_4 陶瓷[J]. 焊接技术,2000,29(2):1-3.
- [30] 杨宗辉,沈以赴,孟氢钡. 浸渗法合金化纯钨表层的研究[J]. 材料工程,2012(7):86-91.
- [31] 种法力,陈俊凌,李建刚. VPS-EBW 法制备 W/Cu 功能梯度材料及热负荷实验研究[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(9):1509-1512.
- [32] MONTANARI R, RICCARDI B, VOLTERRI R, *et al.* Characterisation of plasma spray W coatings on a CuCrZr alloy for nuclear fusion reactor applications[J]. Materials Letters, 2002,52:100-105.
- [33] RICCARDI B, MONTANARI R, CASADEI M, *et al.* Optimisation and characterization of tungsten thick coatings on copper based alloy substrates[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006,352:29-35.
- [34] PINSTISUK G, SMID I, DÖRING J E, *et al.* Fabrication and characterization of vacuum plasma sprayed W/Cu-composites for extreme thermal conditions[J]. J Mater Sci, 2007, 42(1):30-39.
- [35] LI J Q, ZENG X R, TANG J N, *et al.* Fabrication and thermal properties of a YSZ-NiCr joint with an interlayer of YSZ-NiCr functionally graded material[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003,23(11):1847-1853.
- [36] 刘红兵,陶杰,张平则,等. 功能梯度 Al_2O_3 涂层残余热应力分析[J]. 机械工程学报,2008,44(8):26-31.
- [37] 林严资,宋勇,郭智慧,等. CLAM 钢基体表面 Al_2O_3 功能梯度涂层残余应力模拟分析[J]. 核科学与工程,2008,28(4):65-69.
- [38] 李云凯,王勇,李树奎,等. PSZ / Mo 功能梯度材料[J]. 复合材料学报,2003,20(6):42-46.
- [39] 徐金富,张学彬,费有静,等. MoSi_2 /不锈钢连接梯度过渡层的残余应力[J]. 中国有色金属学报,2007(6):65-69.

(上接第 10 页)