

等离子喷涂 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层微观组织及抗热冲击性能研究

袁湖川, 孙登月, 孟庆栋, 田招刚, 孙振宇

(燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:为了探究 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层高温性能,利用等离子喷涂技术在 Q235 钢表面制备了 4 种不同混合比例的 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层(8YSZ 含量分别为 50%,30%,20%,0%)。通过热场发射扫描电镜对涂层的形貌进行 SEM 表征并对涂层的截面元素分布进行 EDS 线扫,采用 X 射线衍射仪分析复合涂层的物相组成,利用表面轮廓仪测量了复合涂层的表面粗糙度,使用全自动显微维氏硬度计对涂层的显微硬度进行测量,采用划痕仪对涂层的抗划伤性能进行对比,利用 Gleeble-3800 热物理实验模拟机对涂层的抗热冲击性能进行测试,并对热冲击之后的截面形貌进行观察分析。结果表明,当 Cr_2O_3 与 8YSZ 比例为 7:3 时,由于 8YSZ 对垂直裂纹的偏转作用以及涂层内部存在的孔隙和裂纹对热应力的释放作用,该样本涂层具有较好的抗热冲击性能。

关 键 词:等离子喷涂; Cr_2O_3 ;8YSZ;复合涂层;抗热冲击性能

中图分类号:TG174.4; TF341.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)04-0625-09

拉矫辊是连铸机的重要组成部分,其长期在 1 000℃左右高温以及内部冷却水的周期性循环作用下工作,承受着周期性的循环载荷,因此辊面磨损严重,常发生龟裂,并且伴随着较大的纵向和环状裂纹的产生,大大降低了拉矫辊的使用寿命^[1-4]。

等离子喷涂技术作为一种金属材料的表面强化技术,已经逐渐广泛应用于航空航天、汽车以及钢铁等领域^[5-6]。李军等^[7]利用等离子喷涂结合激光重熔技术在拉矫辊表面制备了纳米级 ZrO_2 涂层,提升了拉矫辊的抗热冲击性能及拉矫辊的隔热性能,从而提升拉矫辊寿命。孙登月等^[8]利用等离子喷涂技术在拉矫辊辊面制备 WC-20Cr-7Ni 涂层,发现其耐磨性是 ZrO_2 涂层拉矫辊的 6 倍以上,且涂层保持良好的抗热冲击性能。

Cr_2O_3 具有高硬度、较好的化学稳定性、抗高温稳定性等优点^[9-11]。程虎等^[12]通过超声速火焰喷

涂技术对氧化铬涂层的摩擦性能进行了研究,并得出在 500℃热处理条件下,涂层的综合耐磨减摩擦性能最好。YSZ 具有高熔点、低导热率、隔热、较好的抗冲击和抗氧化等特点,作为热障涂层被广泛应用于航空发动机及重型燃气轮机涡轮导向叶片上^[13-17]。朱东林等^[18]采用等离子喷涂技术制备了 WC/8YSZ 复合涂层,并对其摩擦性能进行了研究,表明当 8YSZ 含量达到 30%时,涂层的摩擦性能最好。刘新宇等^[19]研究了多层 GYYSZ/8YSZ 涂层的抗热冲击性能,将 8YSZ 作为过渡层延缓了涂层中垂直裂纹与横向裂纹相连,涂层的抗热冲击性能得到显著提升。Giovanni 等^[20]研究了 TiO_2 、 Al_2O_3 和 ZrO_2 的添加对 Cr_2O_3 摩擦性能的影响,发现 Cr_2O_3 -25% TiO_2 和 Cr_2O_3 -25% ZrO_2 在干摩擦条件下磨损损失相对较低。Grimm 等^[21]通过热喷涂技术制备了不同比例成分的 Al_2O_3 - Cr_2O_3 - TiO_2 涂层,并对其微观组织、孔隙率、硬度以及耐磨性等性能进行了研究,发现虽然 TiO_x 会导致低涂层孔隙率,但是可以通过添加 Cr_2O_3 提高其耐磨性。但是目前关于 Cr_2O_3 的抗热冲击性能研究较少,尤其关于 Cr_2O_3 和 YSZ 这两种材料制备的复合涂层研究更为少有。

收稿日期:2023-06-19

基金项目:河北省自然科学基金-钢铁联合研究基金(E2020203091)
资助

作者简介:袁湖川(1998—),硕士研究生

通信作者:孙登月(1964—),教授 e-mail:sdy@ysu.edu.cn

本文通过等离子喷涂技术制备了 4 种不同比例的 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层,分析了涂层的微观结构、表面粗糙度、显微硬度、抗划伤性能以及抗热冲击性能,以期为 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层在拉矫辊上的应用提供一定的参考。

1 实验及方法

1.1 实验材料及涂层制备

本实验采用等离子喷涂技术制备复合涂层,基体材料为 Q235 钢,其尺寸为 $25\text{ mm}\times15\text{ mm}\times3\text{ mm}$;黏结层材料为 NiCr 粉 ($\omega(\text{Ni})=80\%,\omega(\text{Cr})=20\%$),厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$;陶瓷层材料为 8YSZ ($\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$) 粉以及 Cr_2O_3 粉,厚度为 $300\text{ }\mu\text{m}$,3 种粉末的尺寸范围为 $15\sim45\text{ }\mu\text{m}$,总共制备 4 种试件,具体的成分比例如表 1 所示。复合涂层由江苏唯尔机械科技有限公司进行制备,采用的喷涂设备型号为 FH-80,采用氩气作为填充气体,喷涂前先对基体进行喷砂处理,表 2 为制备复合涂层的工艺参数。

表 1 样品编号与成分配比 %

编号	Cr_2O_3	8YSZ
S1	50	50
S2	70	30
S3	80	20
S4	100	0

表 3 划痕实验参数

载荷类型	初始载荷/ N	结束载荷/ N	加载速率/ ($\text{N}\cdot\text{min}^{-1}$)	长度/mm	数据采集 速率/Hz	压头半径/ μm
线性	1	60	1.33	3.99	30	200

1.4 热冲击实验

采用 Gleeble-3800 热物理实验模拟机对涂层的抗热冲击性能进行测试,热冲击实验的样品尺寸为 $7.5\text{ mm}\times7.5\text{ mm}\times3\text{ mm}$,以 $10^\circ\text{C}/\text{s}$ 的升温速率将样品加热至 800°C ,保温 60 s ,之后迅速取出,水淬激冷,计为一个周期,温度变化曲线如图 1 所示。重复进行热冲击实验,观察涂层是否有剥落及开裂现象,待涂层的剥落面积大于 50% 时,视为涂层失效,停止热冲击实验,记录各样品的热冲击实验循环次数。

表 2 喷涂工艺参数

位置	电流/A	电压/V	距离/mm
黏结层	500	35	80
陶瓷层	650	45	70

1.2 微观结构表征

采用 Hitachi SU500 型热场发射扫描电镜对涂层的表面以及截面形貌进行表征,并对涂层截面的元素分布进行 EDS 线扫,同时对热冲击之后涂层的截面形貌进行观察。通过 X 射线衍射仪(型号为 D/MAX-2500/PC)分析涂层的物相组成,Cu 靶, $\text{K}\alpha$ 辐射工作电压为 40 kV ,电流为 200 mA ,扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$,扫描范围为 $20^\circ\sim80^\circ$ 。采用探针式表面轮廓仪(ContourSP 系列)测量涂层表面的粗糙度,探针曲率为 $2\text{ }\mu\text{m}$,探针力大小为 5 mg ,测量的范围为 $300\text{ }\mu\text{m}\times300\text{ }\mu\text{m}$,探针移动速度为 $60\text{ }\mu\text{m}/\text{s}$,两平行线的间隔为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.3 力学实验

使用全自动显微维氏硬度计(Qness Q10A+)对涂层陶瓷层截面显微硬度进行测量,施加载荷为 200 g ,加载时间为 15 s ,对每种样品涂层距离表面 $100\text{ }\mu\text{m}$ 横向等距取 5 个点进行测量,点与点的间隔也为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。采用划痕仪(CSM Revetest Xpress)对各样本涂层的抗划伤性能进行测试,实验参数如表 3 所示。

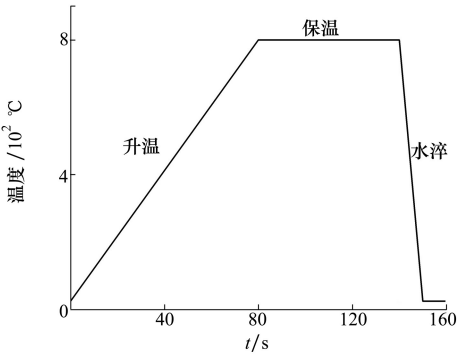


图 1 热冲击实验温度变化曲线

2 结果与讨论

2.1 涂层微观结构分析

各样本涂层的表面形貌如图 2 所示,涂层结构疏松,呈现层层堆叠的形貌,涂层表面存在裂纹以及孔隙,且有部分熔融与未熔融的颗粒,呈现等离子喷涂的显著特征。样品 S1~S4 的截面形貌以及元素线扫图如图 3 所示,涂层的陶瓷层、黏结层与基体分层明显,内部存在裂纹及孔洞,呈现等离子喷涂的显著特征,尤其在黏结层与基体之间出现显著的横向裂纹,这对涂层的结合性能具有较大影响。在基体上存在较大缺陷,此为等离子喷涂时高温焰流轰击基体所致。

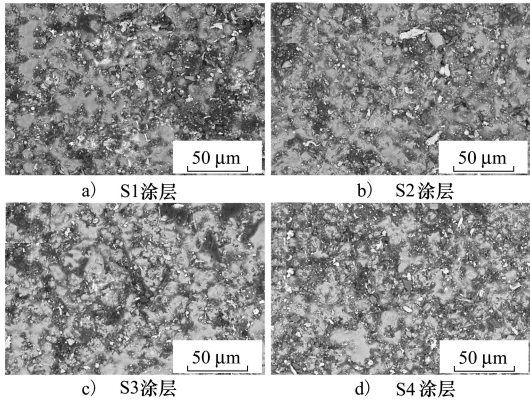


图 2 各样品涂层的表面形貌

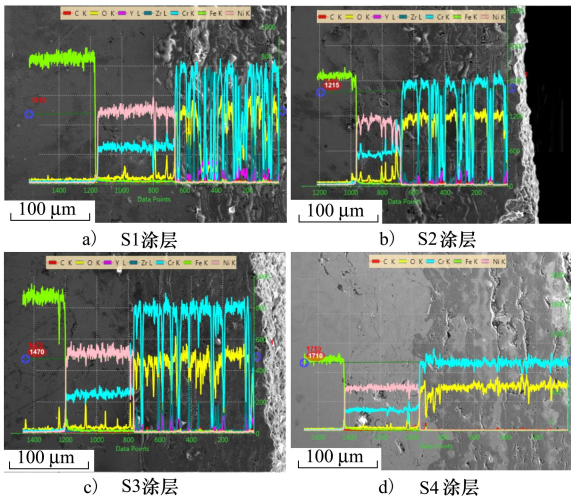


图 3 各样品涂层的横截面形貌及元素线扫

样品 S1~S3 陶瓷层有黑色相及白色相,黑色相以及白色相呈现条纹状交替分布,根据线扫结果可

知黑色相为 Cr_2O_3 ,白色相为 8YSZ,样品 S4 的陶瓷层中仅存在 Cr_2O_3 。裂纹以及孔隙的存在是由以下因素导致:①高温粒子与基体之间的巨大温差,使其在撞击基体之后以高速率冷却,急剧收缩产生体积变化及随之产生的应力使得涂层发生撕裂而产生裂纹和孔隙;②由于喷涂过程中不可避免地产生未完全熔化的颗粒,这些未完全熔化的颗粒会使得涂层结合不紧密,从而产生孔隙。裂纹和孔隙的存在会削弱涂层之间的结合力,影响涂层的力学性能;但裂纹与孔隙也可以释放热冲击过程产生的一部分热应力,从而对涂层的抗热冲击性能提升具有一定的促进作用。

从 EDS 线扫结果以及内部微观形貌来看,陶瓷层与黏结层、黏结层与基体之间的结合方式以机械结合为主,并伴有轻微的冶金结合。这是因为陶瓷粉末在等离子焰流中熔化并高速喷涂在基体上时,高速撞击使粒子变扁平,甚至飞溅,嵌入不平整的表面,形成机械结合;部分熔化颗粒在飞行和撞击过程中会以熔融的状态进行结合再嵌入到表面,形成冶金结合^[22]。

图 4 为各样本涂层的 X 射线衍射图,复合涂层的成分以 Cr_2O_3 和 ZrO_2 为主,其他物相,如 Y_2O_3 ,含量较低,不易检测。对比 4 组样本涂层的 X-ray 峰无偏移,随着涂层中添加的 8YSZ 含量减少, ZrO_2 的衍射峰强度逐渐降低, Cr_2O_3 的衍射峰强度无明显变化,涂层的物相组成并未因 8YSZ 含量的变化以及等离子喷涂产生的高温焰流的作用而改变其原有物质的相,说明等离子喷涂制备的 $\text{Cr}_2\text{O}_3/8\text{YSZ}$ 复合涂层的相结构比较稳定。

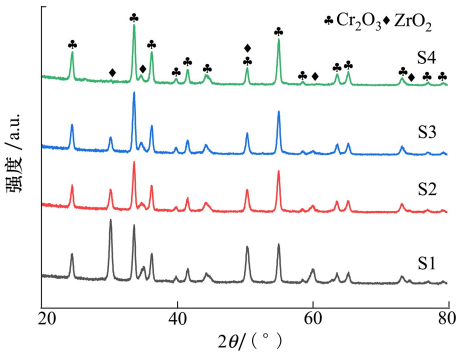


图 4 各样本涂层的 X 射线衍射图

采用探针式轮廓仪对涂层的表面粗糙度进行测量,得到 S1~S4 涂层的粗糙度分别为 4.616,4.113,

2.597,3.45 μm ,表明在 Cr_2O_3 中添加 50%以及 30% 的 8YSZ,粗糙度有所增大,当添加 20%的 8YSZ 时,涂层的表面粗糙度下降了 24.7%。说明添加少量的 8YSZ 可以降低 Cr_2O_3 涂层的表面粗糙度,并随着

8YSZ 含量的增加,涂层的粗糙度呈现增大趋势。同时得到了各样本涂层表面的三维形貌图如图 5 所示。

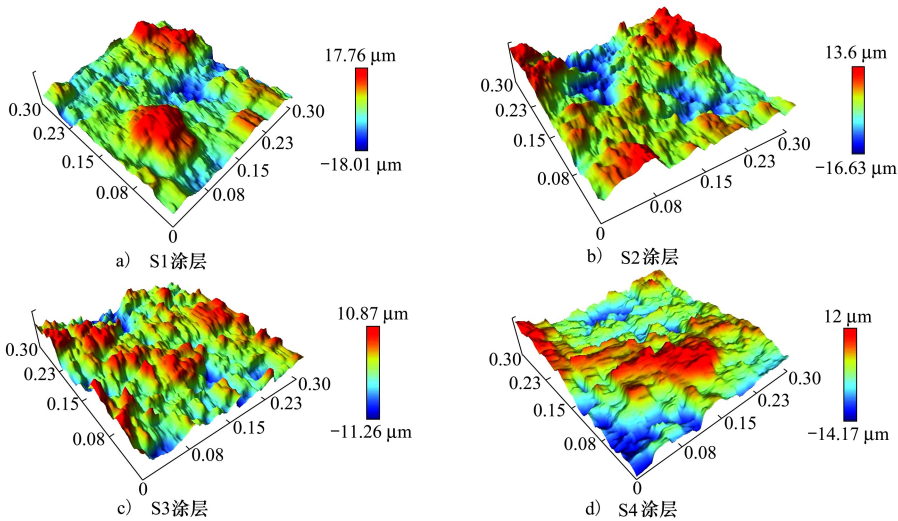


图 5 各样本涂层表面三维形貌图

2.2 涂层力学性能分析

表 4 展示了各涂层样品陶瓷层的截面硬度情况,各涂层样品的显微硬度差别不大,都在 995HV 左右,但仍然远远高于基体的硬度(普通 Q235 钢的硬度)。涂层中的 Cr_2O_3 含量较多,占据了涂层中的大多数区域,且涂层均是由 Cr_2O_3 与 8YSZ 组成,二

者重叠交替分布,所以导致硬度值相差不大。由于等离子喷涂存在较多孔隙,孔隙的存在对硬度值影响较大,尤其在有孔隙存在的位置,硬度值会急剧下降,所以测量过程中应该避免金刚石压头打在孔隙和裂纹等缺陷处。同时可以考虑改善喷涂工艺参数以降低孔隙率,进而提升涂层的显微硬度。

表 4 各涂层样本陶瓷层的截面显微硬度 (HV0.2)

样品编号	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	平均值
S1	998	999	998	998	998	998.2
S2	997	999	997	995	993	996.2
S3	997	996	997	997	996	996.6
S4	998	999	995	997	994	996.6

涂层的抗划伤性能反映了涂层内部的结合情况以及涂层抵抗划伤、划痕的能力。图 6 展示了 4 种涂层样品在线性递增载荷下的抗划伤性能。在低载荷下,4 种涂层样品均具有不错的抗划伤性能,随着载荷的增加,样品 S2 的曲线变化最为剧烈,说明随着载荷的增加其抗划伤性能有所削弱,涂层内部的结合不够紧密,可能存在较多孔隙,这些孔隙的存在也可能在后续的热冲击实验过程中释放一部分热应力,有利于其抗热冲击性能的提升。当金刚石压头划过孔隙或者涂层中结合较弱的位置,其穿透深度

急剧增加,S2 的最大穿透深度为 53 μm (远远小于陶瓷层厚度),表明涂层并未被穿透,相较于另外 3 个样品,S2 具有较差的抗划伤性能。S4 的曲线比较稳定,说明其内部结合较好,孔隙率比较低,其抗划伤性能较好,S1、S3 次之,也具有一定的抗划伤性能。综上所述,在 Cr_2O_3 中添加 8YSZ 其抗划伤性能有所下降,随着 8YSZ 含量达到 30%(样品 S2)其抗划伤性能最差,当 8YSZ 的含量增加至 50%时涂层的抗划伤性能较 8YSZ 的含量为 30%时有所提升。

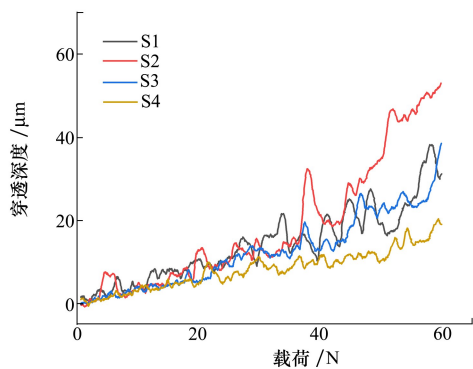


图 6 各涂层样本的抗划伤性能曲线

2.3 涂层热冲击性能分析

图 7 统计了 4 种涂层样品的抗热冲击实验循环次数,样品 S1~S4 分别经历了 5 次、4 次、1 次、1 次热冲击实验,从热冲击实验的次数来看,样品 S1 及 S2 的抗热冲击性能优于 S3 及 S4,说明随着 8YSZ 的添加,涂层的抗热冲击性能得到提升。样品 S1 经历第 1 次以及第 5 次热冲击实验之后的宏观形貌如图 8 所示,虽然在第 1 次热冲击实验之后涂层边缘便出现了翘起现象,但是在经历 5 次热冲击实验之后,相比前几次热冲击实验涂层仅仅是翘起现象更严重了一些,且涂层出现局部剥落。

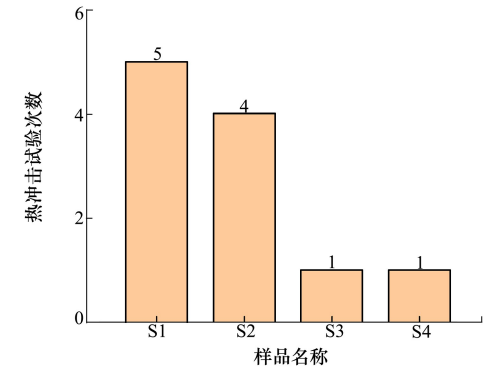
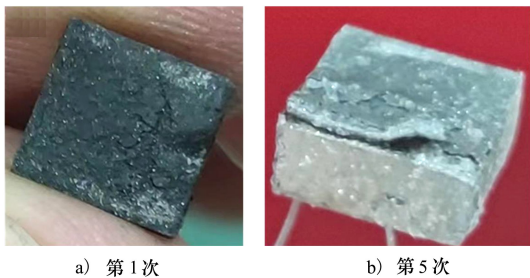


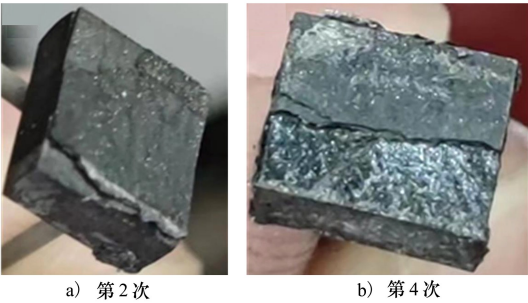
图 7 涂层样品的热冲击实验循环次数



a) 第 1 次 b) 第 5 次

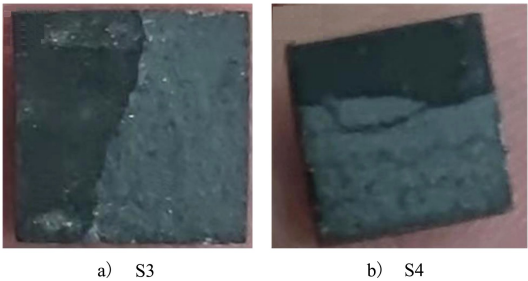
图 8 样品 S1 经历热冲击之后的宏观形貌图

这主要是因为经历第 1 次热冲击之后,涂层内部便出现较大的裂纹以及孔隙等缺陷,这些缺陷的存在可以在后续的热冲击过程释放一部分热应力,使得涂层第 1 次热冲击之后形貌变化剧烈,而经历多次之后变化不大。样品 S2 总共进行 4 次热冲击实验,在第 2 次之后涂层便出现局部脱落,第 4 次热冲击之后涂层已经脱落了近 50%,其第 2 次以及第 4 次热冲击之后的宏观形貌如图 9 所示。样品 S3、S4 仅经历了一次热冲击实验便出现了 50% 以上的剥落,图 10 展示了其热冲击之后的宏观形貌。



a) 第 2 次 b) 第 4 次

图 9 样品 S2 经历热冲击之后的宏观形貌图



a) S3 b) S4

图 10 样品 S3 和 S4 经历第 1 次热冲击之后的宏观形貌图

首先,在加热以及冷却过程中,涂层内部存在热量的传递,某一点处的热量会往其四周传递,而在边缘处的热量难以向外传递,会积累较多的热量,从而引起边缘处的应力集中;其次,试件切割以及打磨过程中会使试件四周存在缺陷,从而导致四周应力集中;最后,边缘位置是加热过程的夹持固定位置,同时在加热-冷却过程中,水汽等极容易沿着涂层侧面的缺陷渗透至涂层内部。综上所述,边缘位置应力变化剧烈,因此涂层的剥落以及翘起是从边缘开始,并随着热冲击实验的进行向中心位置逐渐扩展。

图 11 为样品 S1 热冲击实验失效之后的截面形貌图,其陶瓷层已经接近于完全剥落,可认为样品 S1 已经失效,未剥落的陶瓷层与黏结层之间出现较大的横向裂纹,陶瓷层内部出现垂直裂纹,且垂直裂

纹与横向裂纹相连接贯通,如图 11a) 所示。图 11b) 为样品 S1 剥落区域的形貌图,黏结层沿着基体-黏结层界面翘起,黏结层与基体发生分离,陶瓷层已完全剥落,且右侧区域的黏结层已经完全剥落。根据图 12 样品 S2 热冲击实验失效后的截面形貌可知,其陶瓷层与黏结层、黏结层与基体之间出现较大的横向裂纹,且陶瓷层内部存在大裂纹,陶瓷层与黏结层均发生一定程度剥落,陶瓷层剩余厚度约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,其陶瓷层剥落厚度小于样品 S1 陶瓷层剥落的厚度。

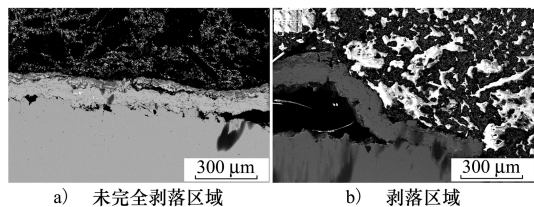


图 11 样品 S1 热冲击实验之后的截面形貌

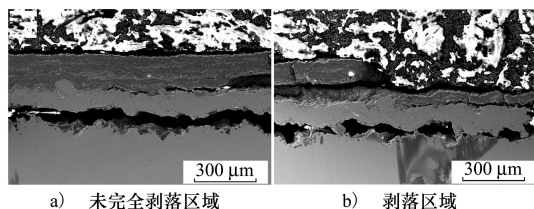


图 12 样品 S2 热冲击实验之后的截面形貌

样品 S1、S2 分别是 Cr_2O_3 与 8YSZ 含量比为 1:1 与 7:3 的复合涂层,二者的抗热冲击性能相当,且失效模式存在一定的相似之处。陶瓷层成分 Cr_2O_3 与 8YSZ 热膨胀系数的差异导致在反复的加热-冷却循环过程中,陶瓷层内部出现较大的热失配应力,从而导致陶瓷层内部的剥落;同时由于陶瓷层与黏结层、黏结层与基体之间材料热膨胀系数的差别,亦会产生较大的热失配应力,导致陶瓷层-黏结层、黏结层-基体之间产生裂纹以及出现涂层剥落。等离子喷涂技术制备的涂层内部存在的裂纹以及孔隙等缺陷虽然会在一定程度上释放热冲击过程的热应力,但是随着热冲击实验的进行,热应力会在裂纹和孔隙等处积累,并逐渐扩展,从微观缺陷演变为宏观的裂纹,并出现剥落。

图 13 为样品 S3、S4 热冲击实验失效后的截面形貌图,二者抗热冲击能力相当,仅经历了 1 次热冲击实验,且二者失效后的形貌图类似,涂层均是陶瓷层沿着其与黏结层的界面发生剥落,且未剥落的陶瓷层内部存在横向裂纹。由于样品 S3、S4 陶瓷层中

的 Cr_2O_3 含量分别为 80% 以及 100%,说明陶瓷层内部的热失配应力相对较小,所以未发生陶瓷层内部的剥落与分离;黏结层与陶瓷层之间热膨胀系数的差异会产生热失配应力,当其超过陶瓷层与黏结层之间的结合力时就会产生横向裂纹,当横向裂纹扩展过程中遇到垂直裂纹,便会相互连接贯通,进而发生剥落。这也说明了陶瓷层与黏结层的结合能力有待提升,后续可以考虑优化喷涂的工艺参数。

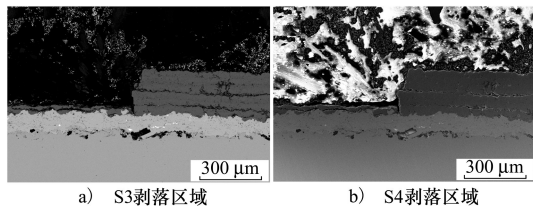


图 13 样品 S3 和 S4 热冲击实验之后的截面形貌

涂层的剥落是横向裂纹与垂直裂纹扩展并相互连接贯穿导致的,样品 S1 与 S2 的抗热冲击性能优于 S3 与 S4,可能是由于 S1 与 S2 陶瓷层含有较多的 8YSZ。 Cr_2O_3 属于陶瓷材料,脆性大、韧性低,加之等离子喷涂技术自身存在的裂纹缺陷,在受到热冲击时,极易在裂纹以及残余应力集中处引起断裂,即在热冲击时会表现为大片剥落。YSZ 有着较高的断裂韧性,裂纹在韧性较低的材料中传播遇到 YSZ 会发生偏转^[23-24],从而在一定程度上抑制裂纹的扩展,表现出相对较高的寿命。当水平裂纹在传播的过程中遇到垂直裂纹时,热应力得到一定释放,同时裂纹的传播方向沿垂直方向进行扩展,当传播至 8YSZ 处时会发生偏转,垂直裂纹的传播得到一定的抑制,沿着 8YSZ 与 Cr_2O_3 的界面处转变为横向裂纹,并逐渐演变成陶瓷层内部的剥落。根据抗划伤曲线,样品 S1、S2 内部可能分布着较多的孔隙以及裂纹,可以释放热冲击过程产生的热应力。而对于样品 S3、S4,内部含有的 8YSZ 含量较少,难以使垂直裂纹的传播发生偏转,从而表现为陶瓷层整体剥落。

为进一步阐述热冲击过程中裂纹的扩展情况,现结合所绘制的裂纹扩展模拟示意图(见图 14)进一步说明 8YSZ 的添加对涂层抗热冲击性能的影响。首先,涂层中可能存在初始裂纹缺陷(图 14 I 阶段),在热冲击过程中裂纹逐渐扩展至图 14 所示 II 阶段,由于 8YSZ 较高的韧性对裂纹的偏转作用,裂纹沿着不同成分的交界处或者垂直裂纹进行

传播,并穿透韧性较低的 Cr_2O_3 ,扩展至如图 14 所示Ⅲ阶段。此时,再一次遇到 8YSZ 的偏转作用,垂直裂纹可能转变为横向裂纹继续传播至如图 14 所示Ⅳ阶段,进一步穿透韧性低的 Cr_2O_3 (图 14Ⅴ阶段),之后水平裂纹沿着垂直裂纹扩展(图 14Ⅵ阶段),最终表现为涂层右上侧发生整体剥落。

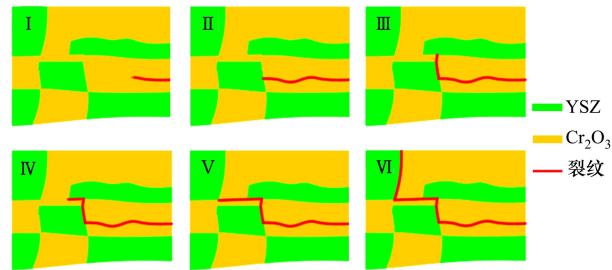


图 14 裂纹扩展模拟示意图

因此,在 Cr_2O_3 中加入 8YSZ 可以在一定程度上提升其抗热冲击的能力,当 8YSZ 含量为 30%(样品 S2)时,涂层的抗热冲击性能较好。

3 结 论

本文通过等离子喷涂技术制备了 4 种不同比例

的 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层,对其微观形貌、表面粗糙度、显微硬度、抗划伤性能以及抗热冲击性能进行了研究,得出了以下主要结论:

1) 通过对涂层进行 EDS 线扫可知,涂层之间的结合方式以机械结合为主并伴随着轻微的冶金结合,等离子喷涂的 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层的物相比较稳定;复合涂层的表面粗糙度随着 8YSZ 含量的增加呈现先减小后增大的趋势,当 8YSZ 含量为 20%时复合涂层的表面粗糙度最小。

2) 各样本涂层的显微硬度差别不明显;不添加 8YSZ 涂层的抗划伤性能较稳定,随着 8YSZ 的添加,涂层的抗划伤性能出现一定的波动,当 8YSZ 含量为 30%时,高载荷下涂层的抗划伤曲线波动较大,涂层内部可能存在较多的孔隙及裂纹。

3) 随着 8YSZ 含量的添加,涂层的抗热冲击性能得到提升,当 8YSZ 含量为 30%时,涂层的抗热冲击性能较好,这可能是因为 8YSZ 的断裂韧性较好,同时涂层内部裂纹和孔隙的存在释放了一部分热应力。需要指出的是,本文采用的热冲击试件尺寸较小,后续研究中可以考虑使用尺寸更大的样品进行涂层的抗热冲击性能研究。

参考文献:

[1] 何琴琴. 薄板坯连铸连轧流程专利分析[J]. 轧钢, 2019, 36(3): 51-58
HE Qinqin. Patent analysis of continuous casting and rolling process of thin slab[J]. Steel Rolling, 2019, 36(3): 51-58 (in Chinese)

[2] 赵秀玲,王健. 连铸机堆焊拉矫辊的焊接工艺[J]. 金属加工(热加工), 2009(20): 45-47
ZHAO Xiuling, WANG Jian. Welding technology of overlay welding pull roller of continuous casting machine[J]. Metal Processing(Hot Working), 2009(20): 45-47 (in Chinese)

[3] 付宇明,张金森,郑丽娟,等. 拉矫辊传热机理及激光熔覆强化[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 96-101
FU Yuming, ZHANG Jinsen, ZHENG Lijuan, et al. Heat transfer mechanism and laser cladding strengthening of tensile rollers[J]. Chinese Journal of Plastic Engineering, 2012, 19(2): 96-101 (in Chinese)

[4] 李生存,陈景辉,王浩宇. 拉矫机工作辊异常磨损和轴头烧损的对策[J]. 中国冶金, 2018, 28(10): 51-56
LI Shengcun, CHEN Jinghui, WANG Haoyu. Countermeasures for abnormal wear and burnout of shaft head of pull-leveling machine[J]. China Metallurgy, 2018, 28(10): 51-56 (in Chinese)

[5] ELENA Kornienko, IGOR Gulyaev, ALEXANDER Smirnova, et al. Microstructure and properties of Ni-Al coatings obtained by conventional and high-velocity atmospheric plasma spraying[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2022, 6: 100038

[6] 陈炜,孙培鑫,曹鹏,等. 金属表面涂层高温摩擦磨损性能研究[J]. 锻压技术, 2021, 46(6): 1-7
CHEN Wei, SUN Peixin, CAO Peng, et al. Study on high temperature friction and wear properties of metal surface coating[J]. Forging Technology, 2021, 46(6): 1-7 (in Chinese)

[7] 李军,孙登月,张锋,等. 连铸机拉矫辊辊面激光重熔纳米 ZrO_2 基涂层性能[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 104-111

- LI Jun, SUN Dengyue, ZHANG Feng, et al. Laser remelting of nano-ZrO₂-based coating properties of continuous casting machine[J]. Iron and Steel, 2017, 52(10): 104-111 (in Chinese)
- [8] 孙登月, 王朋鹤, 许石民, 等. 连铸机拉矫辊等离子喷涂 WC-20Cr-7Ni 涂层性能[J]. 钢铁, 2020, 55(9): 111-117
SUN Dengyue, WANG Penghe, XU Shimin, et al. Properties of WC-20Cr-7Ni coating by plasma spraying on the straightening roller of continuous casting machine[J]. Iron and Steel, 2020, 55(9): 111-117 (in Chinese)
- [9] 张锋. 连铸机拉矫辊表面 Cr₂O₃ 涂层隔热效果与热冲击破坏机理研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2018
ZHANG Feng. Study on thermal insulation effect and thermal shock failure mechanism of Cr₂O₃ coating on the surface of continuous casting machine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018 (in Chinese)
- [10] 陈平虎, 邱长军, 陈勇, 等. 热喷涂玻璃-Cr₂O₃ 陶瓷涂层的性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(6): 761-766
CHEN Pinghu, QIU Changjun, CHEN Yong, et al. Properties of thermal spray glass-Cr₂O₃ ceramic coating[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2012, 17(6): 761-766 (in Chinese)
- [11] 庞晓露, 罗飞, 高克玮, 等. 热处理对磁控溅射制备氧化铬涂层的结构及力学性能的影响[J]. 真空, 2007(6): 43-47
PANG Xiaolu, LUO Fei, GAO Kewei, et al. Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of chromium oxide coating prepared by magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2007(6): 43-47 (in Chinese)
- [12] 程虎, 戴品强, 易剑. 超音速火焰喷涂氧化铬陶瓷涂层的干滑动摩擦磨损性能[J]. 功能材料, 2014, 45(3): 3130-3134
CHENG Hu, DAI Pinqiang, YI Jian. Dry sliding friction wear properties of chromium oxide ceramic coating coated with supersonic flame spraying[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(3): 3130-3134 (in Chinese)
- [13] OSIKO V V, BORIK M A, LOMONOVA E E. Synthesis of refractory materials by skull melting technique[M]//Springer Handbook of Crystal Growth, Berlin: Springer, 2010: 433-477
- [14] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. Materials Research Society Bulletin, 2012, 37: 891-898
- [15] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(增刊2): 18-26
GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Research progress of thermal barrier coating technology for advanced aero-engines [J]. China Materials Progress, 2009, 28(suppl 2): 18-26 (in Chinese)
- [16] 张莎莎, 霍攀杰, 邓龙辉, 等. 超音速火焰喷涂含铝或锌中间层的 YSZ 热障涂层[J]. 中国稀土学报 2020, 38(1): 53-59
ZHANG Shasha, HUO Panjie, DENG Longhui, et al. YSZ thermal barrier coating containing aluminum or zinc intermediate layer by supersonic flame spraying[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2020, 38(1): 53-59 (in Chinese)
- [17] JIANG T, XIE M, GUAN L L, et al. Effect of Nb⁵⁺ and Cu²⁺ codoping on thermal properties of Gd₂Zr₂O₇ ceramic[J]. Journal of Rare Earths, 2021, 39(2): 180-185
- [18] 朱东林, 孙登月, 杨家辉, 等. 等离子喷涂 WC-20Cr₃C₂-7Ni/8YSZ 复合涂层的组织及摩擦学性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 256-262
ZHU Donglin, SUN Dengyue, YANG Jiahui, et al. Microstructure and tribological properties of WC-20Cr₃C₂-7Ni/8YSZ composite coating by plasma spraying[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(2): 256-262 (in Chinese)
- [19] 刘新宇, 周武平, 张保红, 等. YSZ 层孔隙率对 GYYSZ/YSZ 热障涂层热冲击寿命的影响[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(4): 122-130
LIU Xinyu, ZHOU Wuping, ZHANG Baohong, et al. Effect of porosity of YSZ layer on thermal shock life of GYYSZ/YSZ thermal barrier coating[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(4): 122-130 (in Chinese)
- [20] GIOVANNI Bolelli, DANIEL Steduto, JARKKO Kilakoski, et al. Tribological properties of plasma sprayed Cr₂O₃, Cr₂O₃-TiO₂, Cr₂O₃-Al₂O₃ and Cr₂O₃-ZrO₂ coatings[J]. Wear, 2021, 480/481: 203931
- [21] GRIMM Maximilian, SUSAN Conze, LUTZ-MICHAEL Berger, et al. Microstructure and sliding wear resistance of plasma sprayed Al₂O₃-Cr₂O₃-TiO₂ ternary coatings from blends of single oxides[J]. Coatings 2020, 10: 42
- [22] 吴硕. 等离子喷涂 Gd₂O₃-Yb₂O₃-YSZ 复合热障涂层的制备及性能优化研究[D]. 上海:上海海事大学, 2022
WU Shuo. Preparation and performance optimization of plasma spraying Gd₂O₃-Yb₂O₃-YSZ composite thermal barrier coating [D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2022 (in Chinese)
- [23] ZHANG L, BAI Y, HE T, et al. Performance of plasma-sprayed thermal barrier coating with engineered unmelted nano-particle contents[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 368: 67-78
- [24] 范薇, 白宇, 王玉. 纳米结构 (Gd_{0.9}Yb_{0.1})₂Zr₂O₇/YSZ 热障涂层热冲击性能研究[J]. 中国稀土学报, 2023, 41(4):

757-764

FAN Wei, BAI Yu, WANG Yu. Thermal shock performance of nanostructure $(\text{Gd}_{0.9}\text{Yb}_{0.1})_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\text{YSZ}$ thermal barrier coating [J]. Journal of Chinese Rare Earth Society, 2023, 41(4): 757-764 (in Chinese)

Study on microstructure and thermal shock resistance of plasma sprayed $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ composite coating

YUAN Huchuan, SUN Dengyue, MENG Qingdong, TIAN Zhaogang, SUN Zhenyu
(National Cold Rolled Strip Equipment and Process Engineering Technology Research Center,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to explore the high temperature performance of $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ composite coating, four kinds of $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ composite coatings were prepared on the surface of Q235 steel by using the plasma spraying technology (the content of 8YSZ is 50%, 30%, 20% and 0%, respectively). The morphology of the coating was characterized through thermal field emission scanning electron microscopy, and the distribution of elements in the section of the coating was scanned by using EDS line. The phase composition of the composite coating was analyzed by using X-ray diffractometer, and the surface roughness of the composite coating was measured by using surface profilometer. The microhardness of the coating was measured by using automatic micro-Vickers hardness tester, and the scratch resistance of the coating was compared by using scratch tester. The thermal shock resistance of the coating was tested in Gleeble-3800 thermal physical simulator, and the cross section morphology after thermal shock was observed and analyzed. The results show that when the ratio of Cr_2O_3 to 8YSZ is 7 : 3, the sample coating has good thermal shock resistance due to the deflection effect of 8YSZ on the vertical cracks and the thermal stress release effect of the pores and cracks in the coating.

Keywords: plasma spray; Cr_2O_3 ; 8YSZ; composite coating; thermal shock resistance

引用格式:袁湖川, 孙登月, 孟庆栋, 等. 等离子喷涂 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ 复合涂层微观组织及抗热冲击性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(4): 625-633

YUAN Huchuan, SUN Dengyue, MENG Qingdong, et al. Study on microstructure and thermal shock resistance of plasma sprayed $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{8YSZ}$ composite coating[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(4): 625-633 (in Chinese)