DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.007

光学组织对焦炭综合热性能的影响研究

程　欢[1],刘连继[2],梁英华[1],肖　洪[2],陈　鹏[2],郭　瑞[1]

(1. 华北理工大学 化学工程学院,河北 唐山 063210;2. 河钢集团唐钢公司 总工办,河北 唐山 063016)

摘　要:分别采用偏光显微镜和自主研制的焦炭综合热性能检测装置,检测焦炭的光学组织含量和变温-恒温条件下的综合热性能指标。结果表明:代表光学组织综合性质的各向异性程度指数 OTI 与表征溶损行为的综合热性能指标起始反应温度 T_i、平均溶损速率 CRR_{25} 和等溶损反应后强度 CSR_{25} 之间是抛物线关系,各向异性程度适中的焦炭起始反应温度 T_i 和平均溶损速率 CRR_{25} 较低,等溶损反应后强度 CSR_{25} 较高。OTI 与 T_i 和 CRR_{25} 的抛物线关系存在奇异点(J4 焦炭),可能与光学组织测定方法自身的局限性有关。OTI 指数与表征耐高温特性的综合热性能指标——热处理性指数 CPHTI 和热处理后强度 CPHTS 分别呈抛物线关系和逐渐衰减的指数递增关系,但同样存在奇异点(J4 和 J5 焦炭),这可能与光学组织自身组成和气孔、矿物质等其它因素有关。

关键词:光学组织;焦炭;综合热性能;高炉

中图分类号:TF522.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1261-05

Study on the Influence of Optical Texture on the Comprehensive Thermal Properties of Coke

CHENG Huan[1], LIU Lianji[2], LIANG Yinghua[1], XIAO Hong[2], CHEN Peng[2], GUO Rui[1]

(1. School of Chemical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Chief Engineer Office, HBIS Group Tangsteel Company, Tangshan 063016, China)

Abstract: The content of optical texture and the comprehensive thermal properties of coke under the condition of variable temperature constant temperature were detected by polarizing microscope and the self-developed coke comprehensive thermal properties testing device, respectively. The results show that there is a parabolic relationship between OTI, which represents the comprehensive anisotropy degree index of optical texture, and T_i, the initial reaction temperature, CRR_{25}, the average dissolution rate, and CSR_{25}, which is the comprehensive thermal performance index characterizing the dissolution loss behavior. The initial reaction temperature T_i and the average dissolution rate CRR_{25} of coke with moderate anisotropy are lower, and the strength after iso-solution reaction CSR_{25} is higher. The parabolic relationship between OTI and T_i and CRR_{25} has a singularity (J4 coke), which may be related to the limitations of the optical tissue measurement method. OTI index has a parabolic relationship with CPHTI, a comprehensive thermal performance index characterizing high temperature resistance, and an exponential increasing relationship with the intensity CPHTS after heat treatment, respectively. However, there are also singularity points (J4 and J5 coke), which may be related to the composition of the optical tissue itself and other factors such as stomata and minerals.

Key words: optical texture; coke; comprehensive thermal properties; blast furnace

作为从微观角度认识焦炭基础结构的有力工具,光学组织一般被认为对焦炭的宏观热性能具有重要影响[1]。焦炭的光学组织按其光学特性和形貌可分为各向同性和各向异性组织结构,各向异性组织结构又可细分为细粒镶嵌、中粒镶嵌、粗粒镶嵌、纤维状和片状结构等。焦炭光学组织中各组分与 CO_2 的反应能力不同,即发生溶损的难易程度不同。已有研究结果表明,各种组织与 CO_2 的反应性从高到低顺序为,各向同性和丝质及破片>细粒镶嵌>粗粒镶嵌>纤维状>片状[2,3]。为了更简明直观地表征光学组织的各向异性程度,人为地赋予各组织代表数值,根据其含量加权得到焦炭光学组织的各向异性程度指数(英文缩写为 OTI)[4]。有研究结果表明,随着光学组织各向异性程度的增大,国标方法中焦炭的反应性指标(CRI)有降低趋势,而反应后强度指标(CSR)有上升趋势[5]。

现有的报道大都是研究焦炭的光学组织对反应性 CRI 及反应后强度 CSR 的影响。而建立在日本新

收稿日期:2019-03-30

基金项目:国家自然科学基金(U1760111),唐山市科技计划应用基础研究项目(18130209a)

作者简介:程　欢(1989-),辽宁阜新人,博士,讲师.研究方向:高炉炼铁与配煤炼焦.电话:15100539106,Email:chenghuanfuxin@163.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

日铁公司基于高炉解剖结果形成的国标 CRI、CSR 方法是否能准确代表焦炭质量，一直饱受争议。从生产上来讲，存在 CRI、CSR 方法无法解释的现象。我国八钢 2 500 m^3 高炉采用的焦炭 CSR 指标只有 30%～50%，仍然可以保证高炉稳定顺行，利用系数稳定在 2 t/(m^3·d)左右[6]。从对焦炭在高炉中劣化行为的模拟性来讲，国标 CRI、CSR 方法采用的试验条件为恒反应时间 2 h，而 Goleczka 等[7]的研究结果表明焦炭由于与 CO_2 发生溶损导致的溶蚀量大概在 20%～30%，恒反应时间的检测结果可能对某些焦炭的质量评价产生误判，尤其是低估了某些高 CRI 焦炭的质量。日本学者 Nomura 等[8] 也采用 20%恒失重后的热强度来表征焦炭质量。汪琦等[9]认为国标方法只检测 1 100 ℃一个温度点，与焦炭在高炉中由低温到高温变温条件下的溶损行为相差较大，并提出了变温–恒温条件下的热性能指标来表征焦炭质量。

本文针对国内某重点钢铁企业高炉现行使用的焦炭进行研究，主要阐明光学组织对焦炭变温–恒温条件下的综合热性能指标的影响规律，为全面认识焦炭微观结构对宏观热性质的影响奠定基础。

1 试验材料与方法

本文选取了国内某企业高炉现行使用的 6 种高炉焦炭，分别为 J1、J2、J3、J4、J5 和 J6。

焦炭光学组织测定：焦炭光学组织的测定方法参照行业标准 YB/T 077-1995，将焦炭破碎至 1 mm 左右，混匀、缩分，按照标准 MT 116.1-86 和 MT 116.2-86 进行制片，其中胶结物所占体积小于 1/3。然后抛光，要求抛光后表面光洁、无明显麻点、无擦痕和污物，光学组织界面清晰、特征分明。采用蔡司偏光显微镜测定待测焦炭样的光学组织含量，测定的组织包括各向同性、细粒镶嵌、中粒镶嵌、粗粒镶嵌、不完全纤维状、完全纤维状、片状、丝质及破片、基础各向异性和热解碳。赋予不同光学组织不一样的权重(见表 1)，然后加和在一起得到光学各向异性指数 OTI[10]。

焦炭综合热性能测定：采用自主研制的焦炭综合热性能检测装置[9]检测焦炭变温–恒温条件下的综合热性能指标。具体的实验步骤为：将焦炭试样加工成 23～25 mm 左右的近似球形待测试样，缩分成两组，每组试样质量为 200±0.5 g。一组用于焦炭变温–恒温条件下的溶损行为检测，检测方法为：将焦炭试样置于反应炉内，在 CO_2 气氛下进行升温，升温速率为 5 ℃/min，检测焦炭的起始反应温度 T_i，

表1 焦炭光学组织中各光学组织各向异性程度的赋值权重
Tab.1 The anisotropic degree weight assignment of each texture in coke optical texture

光学组织名称	各向异性程度权重
各向同性	0.0
细粒镶嵌	1.0
中粒镶嵌	1.5
粗粒镶嵌	2.0
不完全纤维	2.5
完全纤维	3.0
片状	4.0
丝质及破片	0.0
基础各向异性	0.0
热解碳	0.0

升温至 1 100 ℃恒温，直至焦炭溶损至 25%停止加热，计算出整个过程中焦炭的平均溶损反应速率 CRR_{25}(%/min)，用来代表焦炭的反应性；取出焦炭采用与国标 CSR 相同的 I 型转鼓测定焦炭的等溶损反应后强度 CSR_{25}(%)；另一组用于焦炭的变温–恒温条件下溶损之后的耐高温热性能检测，检测方法为：将按照上述方法溶损后的焦炭在 N_2 气氛保护下继续升温，升温至 1 500 ℃恒温 30 min 停止加热，将该过程的失重量作为热处理性指数 CPHTI (%)；取出焦炭，同样采用 I 型转鼓测定焦炭的热处理后强度 CPHTS(%)。

2 试验结果及讨论

2.1 焦炭的光学组织和综合热性能

6 种焦炭的工业分析结果见表 2，光学组织含量见表 3。由表 2 可见，6 种焦炭的基本组成比较接近，水分 M_{ad} 含量为 0.80%～1.20%，灰分 A_d 含量为 12.30%～13.27%，挥发分 V_{daf} 含量为 1.02%～1.45%。

表 2 6 种焦炭的工业分析结果(%)
Tab.2 The proximate analysis of the six coke samples

焦炭种类	M_{ad}	A_d	V_{daf}
J1	0.80	12.62	1.14
J2	0.98	13.25	1.22
J3	0.81	12.30	1.27
J4	1.20	13.27	1.02
J5	0.82	12.68	1.45
J6	0.98	12.83	1.17

由表 3 可知，各向同性组织的含量中，J4 焦炭含量最高(4.6%)，J5 焦炭含量最低(1.4%)。镶嵌状组织含量中，从总体含量 (细粒镶嵌 + 中粒镶嵌 + 粗粒镶嵌)来讲，J5 焦炭的含量最高(60.5%)，J1、J3、J4 三种焦炭含量居中，分别为 55.4%、56.0%、56.0%；J2 和 J6 含量较低，分别为 49.6%和 45.0%。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　6 种焦炭的光学组织含量(%)
Tab.3　The optical texture contents of the six coke samples

焦炭	各光学组织含量 (%)										OTI
	各向同性	细粒镶嵌	中粒镶嵌	粗粒镶嵌	不完全纤维	完全纤维	片状	丝质及破片	基础各向异性	热解碳	
J1	3.0	31.5	16.7	7.2	5.7	0.2	3.9	31.7	0.0	0.0	101.4
J2	3.8	24.5	21.8	3.3	9.1	1.8	2.7	33.0	0.0	0.0	103.0
J3	3.2	31.3	16.3	8.4	10.2	2.9	1.8	25.9	0.0	0.0	114.0
J4	4.6	23.6	23.2	9.2	7.4	4.1	2.8	25.1	0.0	0.0	118.9
J5	1.4	28.2	20.1	12.2	11.5	2.0	1.6	23.0	0.0	0.0	123.9
J6	2.4	21.3	16.6	7.1	12.7	4.9	4.9	30.1	0.0	0.0	126.5

其中 J1 和 J3 焦炭细粒镶嵌组织含量较高，分别为 31.5%和 31.3%。中粒镶嵌组织含量呈现两极分化，J2、J4、J5 焦炭含量较高，分别为 21.8%、23.2%、20.1%；J1、J3、J6 焦炭含量较低，分别为 16.7%、16.3%、16.6%。粗粒镶嵌组织含量中，J5 焦炭含量较高(12.2%)，而 J1 和 J6 焦炭含量较低，分别为 7.2%和 7.1%。纤维状组织含量中，从总体含量来讲，J6 焦炭的含量最高 (17.6%)，J1 焦炭的含量最低(5.9%)。分析具体的纤维状组织含量可知，J5 和 J6 焦炭不完全纤维状组织含量较多，分别为 11.5%和 12.7%；而完全纤维状组织含量中，J4 和 J6 焦炭含量较高，分别为 4.1%和 4.9%；J6 焦炭的片状组织含量最高，为 4.9%，而 J3 和 J5 焦炭含量较低，分别为 1.8%和 1.6%。从代表惰性组分的丝质及破片组织含量来讲，也呈现两极分化情况，J1、J2、J6 焦炭的含量较高，分别为 31.7%、33.0%、30.1%；J3、J4、J5 含量较低，分别为 25.9%、25.1%、23.0%。从综合性的各向异性程度指数 OTI 来看，J1～J6 焦炭的光学组织各向异性程度逐渐升高。

6 种焦炭的综合热性能指标见表 4。由表 4 可知，J4 焦炭的起始反应温度 T_i 最高，为 980 ℃；J3 和 J5 焦炭较低，分别为 930 ℃和 932 ℃。J2 焦炭的平均溶损速率 CRR_{25} 最高，为 0.1 953%/min；J4 焦炭的平均溶损速率 CRR_{25} 最低，为 0.1 344%/min。J4 焦炭的等溶损反应后强度 CSR_{25} 最高，为 66.20%；而 J2 焦炭的 CSR_{25} 最低，为 62.17%。从耐高温热性能来看，J1、J4、J6 三种焦炭的热处理性指数 CPHTI 达到了 6%以上；J2、J3、J5 三种焦炭的热处理性指数 CPHTI 在 5%～6%。J3 和 J6 焦炭的热处理后强度 CPHTS 较高，分别为 62.41%和 62.59%；而 J4 和 J5 焦炭的热处理后强度 CPHTS 较低，分别为 59.54%和 59.61%。

表4　6种焦炭的综合热性能指标
Tab.4　The comprehensive thermal property indexes of the six coke samples

焦炭	T_i/℃	CRR_{25}/(%·min^{-1})	CSR_{25}(%)	CPHTI(%)	CPHTS(%)
J1	958	0.1 852	63.85	6.00	60.99
J2	945	0.1 953	62.17	5.75	61.35
J3	930	0.1 712	65.66	5.65	62.41
J4	980	0.1 344	66.20	6.20	59.54
J5	932	0.1 736	64.23	5.45	59.61
J6	948	0.1 812	64.79	6.55	62.59

2.2　光学组织对表征溶损行为的综合热性能指标的影响

表征焦炭溶损行为的综合热性能指标分别为起始反应温度 T_i、平均溶损速率 CRR_{25} 和等溶损反应后强度 CSR_{25}。各向异性程度指数 OTI 一般被认为是代表光学组织性质的综合性指标。起始反应温度 T_i、平均溶损速率 CRR_{25} 和等溶损反应后强度 CSR_{25} 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系分别如图 1、图 2 和图 3。

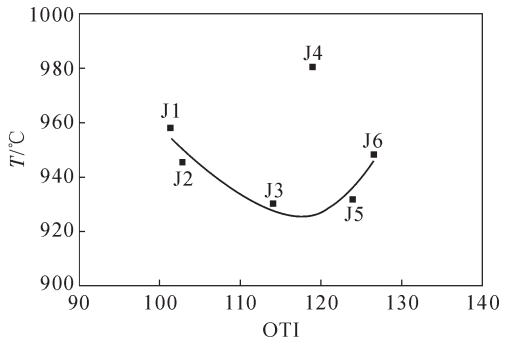


图 1　起始反应温度 T_i 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系
Fig.1　The relationship between initial reaction temperature T_i and anisotropic degree index OTI

由图 1 可知，起始反应温度 T_i 与光学各向异性程度指数 OTI 大致呈抛物线规律，起始反应温度 T_i 随着焦炭光学组织各向异性程度的升高呈现先降低后升高的趋势。但存在奇异点，如 J4 焦炭并不符合这一规律。J4 焦炭的各向异性程度指数 OTI 处于中间位置，但起始反应温度 T_i 很高。

由图 2 可知，平均溶损反应速率 CRR_{25} 与光学各向异性程度指数 OTI 也大致呈抛物线规律，平均溶损反应速率 CRR_{25} 随着光学组织各向异性程度的升高，呈现先降低后增高的趋势。但同样存在奇异点，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

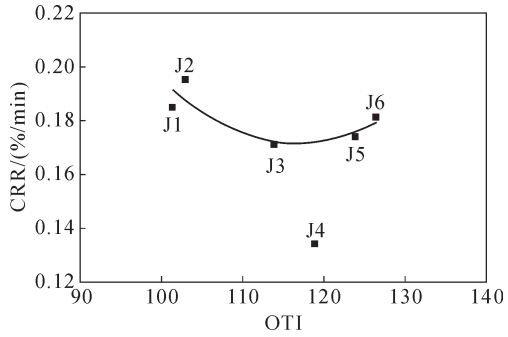


图 2 平均溶损反应速率 CRR_{25} 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系

Fig.2 The relationship between average solution reaction rate CRR_{25} and anisotropic degree index OTI

仍然是 J4 焦炭。J4 焦炭的光学各向异性程度居中，虽然平均溶损速率也较小，但远低于其它焦炭。

由图 3 可知，等溶损反应后强度 CSR_{25} 与光学各向异性程度指数 OTI 同样大致呈抛物线规律。各向异性程度指数 OTI 居中的 J3 和 J4 焦炭 CSR_{25} 较高，各向异性程度指数 OTI 偏低或偏高的焦炭 CSR_{25} 其指标均较低。

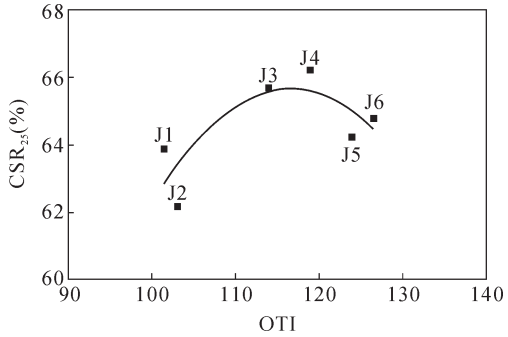


图 3 等溶损反应后强度 CSR_{25} 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系

Fig.3 The relationship between thermal strength after iso-solution reaction CSR_{25} and anisotropic degree index OTI

由于焦炭与 CO_2 发生的溶损反应为强吸热过程，起始反应温度 T_i 对高炉热储备区的温度具有重要影响，进而影响到高炉中的热平衡。光学组织各向异性程度适中的焦炭起始反应温度较低（图 1），有利于间接还原的发展，从而有利于高炉操作[8]。但是有个别焦炭（J4）并不符合这一规律，这可能与光学组织无法准确描述所有焦炭的基质结构有关。众所周知，光学组织是在微米尺度下，根据焦炭碳质的光学特性和形貌对基质结构进行表征的，存在一定局限性，无法揭示出形貌相似碳质的大分子结构差异，可能是导致存在个别奇异点的重要原因。这点同样可以从图 2 中平均溶损速率 CRR_{25} 与光学组织的关系得到验证。图 3 中 J4 焦炭并非奇异点，说明光学组织对热强度的描述相对准确。代表焦炭反应性的 CRR_{25} 指标和代表焦炭反应后强度的 CSR_{25} 指标与光学各向异性指数 OTI 均呈抛物线关系，这与吕庆等[5]的研究结果显示出的 CRI 和 CSR 指标与 OTI 是线性关系具有较大不同，这可能与选取的表征焦炭热性能的指标不同有关。但显然抛物线规律更具说服力，即过低或过高的各向异性程度对焦炭热性能均不利，这也从侧面印证了新指标相对 CRI 和 CSR 指标表征焦炭热性能的优势。

2.3 光学组织对表征耐高温特性的综合热性能指标的影响

表征焦炭耐高温特性的综合热性能指标分别为热处理性指数 CPHTI 和热处理后强度 CPHTS。热处理性指数 CPHTI 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系如图 4 所示，热处理后强度 CPHTS 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系如图 5。

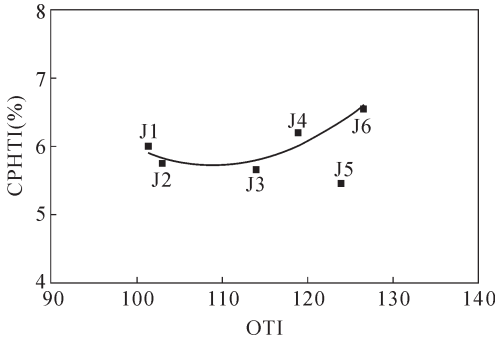


图 4 热处理性指数 CPHTI 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系

Fig.4 The relationship between heat treatment index CPHTI and anisotropic degree index OTI

由图 4 可知，焦炭的热处理性指数 CPHTI 与光学组织各向异性程度指数 OTI 大致呈抛物线规律。随着 OTI 指数的升高，热处理性指数 CPHTI 先小幅降低再大幅升高，这说明适当的提高光学组织的各向异性程度，有利于降低焦炭在热处理阶段的损失；但光学组织各向异性程度过高，焦炭由于热应力作用导致的损失大幅上升。但 J5 焦炭并不符合这一规律，属于奇异点。J5 焦炭的光学各向异性程度指数 OTI 较高，但热处理性指数 CPHTI 较低。这可能与 J5 焦炭中镶嵌状组织含量较高（见表 3）有关。镶嵌状组织结构单元随机定向，热应力产生的裂纹沿片层方向曲折发展，破坏焦炭需要更多的能量[11]，因此由热应力导致的焦炭损失量较少，热处理性指数 CPHTI 较低。

由图 5 可知，焦炭的热处理后强度 CPHTS 与光学组织各向异性程度指数 OTI 大致呈逐渐衰减的指数递增趋势。随着 OTI 指数的升高，热处理后强度 CPHTS 逐渐升高，但升高的幅度逐渐放缓。然而，J4 和 J5 焦炭并不符合这一规律，两者光学组织各向异性程度均较高，但热处理后强度 CPHTS 偏低。这说明焦炭的耐高温热强度不仅与光学组织有

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

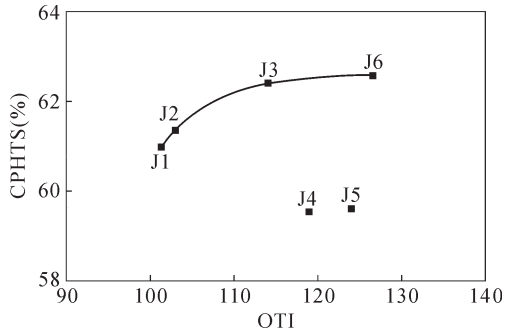


图 5　热处理后强度 CPHTS 与光学各向异性程度指数 OTI 的关系

Fig.5　The relationship between thermal strength after heat treatment CPHTS and anisotropic degree index OTI

关，还与气孔结构和灰分中矿物质结构有关。热处理阶段产生的高温热应力可能导致气孔结构变形，或导致灰分中矿物质由于膨胀系数与焦质不同进而产生裂纹，两者均使焦炭的耐高温热强度变低。

3　结论

（1）光学组织对表征溶损行为的焦炭综合热性能指标（起始反应温度 T_i、平均溶损速率 CRR_{25} 和等溶损反应后强度 CSR_{25}）具有重要影响，关系均大致呈抛物线规律。但有个别焦炭的起始反应温度 T_i 和平均溶损速率 CRR_{25} 并不符合这一规律，可能与光学组织测定方法自身的局限性有关。光学组织对热强度的描述相对准确。

（2）光学组织对表征耐高温特性的焦炭综合热性能指标（热处理性指数 CPHTI 和热处理后强度 CPHTS）具有重要影响，与热处理性指数 CPHTI 大致呈抛物线规律。但个别焦炭存在奇异点，可能与其镶嵌状组织含量较高有关。光学组织与热处理后强度 CPHTS 呈逐渐衰减的指数递增趋势，但部分焦炭并不符合这一规律，这可能是由于耐高温热强度不仅受光学组织影响、还与气孔结构变形和矿物质膨胀系数与焦质不同等因素有关。

参考文献：

[1] 傅永宁. 高炉焦炭[M]. 北京：冶金工业出版社，1995.

[2] 陈洪博，白向飞，王大力，等. 焦炭光学组织与煤、焦质量关系研究[J]. 洁净煤技术，2009，15(6)：78-81.

[3] 高亚芳，杨伯威，韩正国. 焦炭光学组织与热反应性的相关性研究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2017，37(1)：71-75.

[4] 王忠乐. 煤中矿物质的特性及其对焦炭结构和性质的影响研究[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2014.

[5] 吕庆，王岩，谢海深，等. 灰成分及光学组织对焦炭热性能的影响[J]. 中国冶金，2016，26(8)：8-11.

[6] 刘文壮. 八钢 2 500 m^3 高炉使用高 CRI、低 CSR 焦炭炼铁实践[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2015.

[7] Goleczka J, Tucker J. Coke quality and its assessment in the CRE laboratory [C]. Proc. 44 th Ironmaking Conf., ISS-AIME, 1985：217-232.

[8] Nomura S, Naito M, Yamaguchi K. Post-reaction strength of catalyst-added highly reactive coke[J]. ISIJ International , 2007,47 (6): 831-839.

[9] Wang Q, Guo R, Zhao X F, et al. A new testing and evaluating method of cokes with greatly varied CRI and CSR [J]. Fuel, 2016,182: 879-885.

[10] 周师庸. 应用煤岩学[M]. 北京：冶金工业出版社，1985.

[11] 蔡皓宇，程树森，赵宏博，等. 碱金属对焦炭光学组织的影响[J]. 钢铁，2013，48(12)：9-15.

（上接第 1257 页）

熔覆层，为 H13 热作模具钢表面改性和再制造提供了一种思路和参考。

参考文献：

[1] Jhavar S, Paul C P, Jain N K. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review [J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34(8):519-535.

[2] 刘元伟，亓翔，魏训青. 热作模具的堆焊修复技术[J]. 精密成形工程，2016,8(3):68-73.

[3] Shen L, Zhou J, Ma X, et al. Microstructure and mechanical properties of hot forging die manufactured by bimetal-layer surfacing technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239:147-159.

[4] 赵雪阳. H13 钢表面激光熔覆制备金属基陶瓷复合涂层及其耐磨性的研究[D]. 广州：暨南大学，2016.

[5] Kattire P, Paul S, Singh R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20:492-499.

[6] 叶宏，雷临卒，喻文新，等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层组织及热疲劳性能[J]. 强激光与粒子束，2017, 29(2):136-140.

[7] Tran, Van Nghia; YANG, Sen; PHUNG, Tuan Anh. Microstructure and properties of Cu/TiB2 wear resistance composite coating on H13 steel prepared by in-situ laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 480-486.

[8] 张德强，考锡俊，李金华. H13 钢表面激光熔覆铁基合金粉末的工艺研究[J]. 机械设计与制造，2016, 10:41-43.

[9] 严凯，陈长军，张敏，等. 增材制造 H13 钢表面熔覆 Ni/WC 涂层组织及性能研究[J]. 应用激光，2017, 37(2):175-180.

[10] Ahn D G, Lee H J, Cho J R, et al. Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 257-260.

[11] 钱绍祥. 激光熔覆铁基合金涂层的组织及耐蚀性能 [J]. 铸造技术，2019, 40(6):613-616.

[12] 毕彦，邵振江，段文利，等. C12MoV 模具钢激光熔覆复合超硬层的耐磨性研究[J]. 锻压技术，2019, 44(8):146-149.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net