20CrMnTi钢表面稀土硼碳共渗层组织及性能

白公民
瓦房店轴承集团有限公司技工学校　辽宁瓦房店　116300

摘要：采用固体粉末包埋方法在20CrMnTi钢表面制备了稀土镧硼碳共渗层，利用光学显微镜、显微硬度计和X射线衍射仪研究了共渗温度和稀土镧含量对渗层组织及性能的影响。结果表明：温度和稀土含量对渗层组织及性能影响显著，稀土含量（质量分数）为0时，随着温度的增加，显微硬度先增加、后减小，850℃时显微硬度最大。850℃下，随着稀土含量的增加，显微硬度先增加、后减小，稀土含量5%时最大。试验中当温度850℃、时间8h、稀土含量5% La_2O_3时共渗层中渗硼组织致密，渗碳层组织细小，渗层硬度较高。

关键词：20CrMnTi钢；硼碳共渗；氧化镧；显微组织

1　序言

20CrMnTi钢作为一种低合金钢，常用于制造承受高速重载及耐冲击耐磨齿轮及轴类等零件。为了满足零件外硬内韧的使用性能要求，需要对20CrMnTi钢进行渗碳、渗硼等表面强化处理。渗碳是20CrMnTi钢常用的表面处理方法，但是渗碳层硬度有限，且渗碳后进行磨削加工会降低齿轮的弯曲疲劳强度[1]。渗硼因其渗层具有较高的硬度（Fe_2B相：1290~1680HV；FeB相：1890~2340HV）、良好的耐磨性能，尤其是其抗磨粒磨损性能优于渗碳和渗氮层，高的热硬性和抗高温氧化性能及较高的耐蚀性能，因此其广泛应用于各种耐磨件表面处理[2]。研究表明，同单一渗碳齿轮相比，碳硼复合渗齿轮具有较高的接触疲劳强度及良好的抗擦伤、抗胶合能力[3]。在保证渗碳层、渗硼层质量和深度的前提下，如果碳硼共渗层能承受足够的弯曲疲劳应力，则可以满足重载齿轮高性能要求。但是先渗碳、后渗硼的两步表面处理工艺容易引起零件的变形，故研究人员开始采用碳硼共渗处理方法[4]。稀土元素在钢中应用广泛。例如，高碳合金钢中添加稀土La能改善其高温抗氧化能力[5]。研究表明，渗硼或渗碳过程中加入稀土，可有效提高气体渗碳中碳的扩散系数，降低B的扩散激活能[6~8]。但是只有加入适量的稀土，才能在一定程度上对渗层组织性能起到改善作用。对于其他渗层制备条件，齐涛等人[9]研究了共渗温度及渗剂中Y_2O_3添加量对Si-Y_2O_3共渗涂层组织及裂纹的影响。目前，对于稀土合金渗氮研究的关注度较高[10]，但对于稀土碳硼共渗层组织结构的研究很少[11~13]。为此，本文对20CrMnTi钢在稀土硼碳共渗过程中不同温度、不同稀土含量条件下形成的渗层组织及性能进行了研究，为其应用提供理论参考和技术支持。

2　试验材料与方法

试验中硼碳共渗基体材料为20CrMnTi钢，尺寸为ϕ 25mm × 6mm。硼碳共渗剂成分为商用渗硼剂70%~80%（质量分数，下同），商用渗碳剂20%，稀土氧化物La_2O_3（0%、2.5%、5%、10%）。先将试样表面用砂纸打磨抛光后，再用乙醇超声波清洗并干燥，然后将试样埋入混合均匀的硼碳稀土共渗剂。将密封好的渗罐分别在800℃、850℃、900℃箱式电阻炉中加热保温8h，随炉冷却后将试样在840℃电阻炉中保温20min，油冷，然后在185℃烘箱中回火1.5h。具体硼碳共渗工艺参数见表1。

表1　硼碳共渗工艺参数

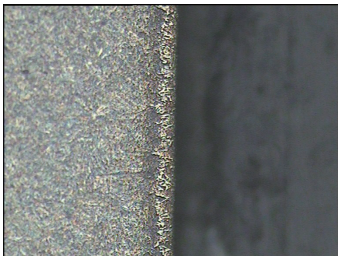
材料	稀土含量（质量分数，%）	加热温度/℃	保温时间/h
20CrMnTi	0	800	8
	0	850	8
	0	900	8
	2.5	850	8
	5	850	8
	10	850	8

采用金相显微镜对硼碳共渗层断面组织形貌进行观察；采用HV-1000CCD型数显显微硬度计测量硼碳共渗层表面显微硬度；利用X射线衍射仪对硼碳共渗层进行物相分析。其中靶材为铜靶，管电压40kV，管电流100mA，衍射角度20°～90°，扫描速度4°/min。采用扫描电镜及能谱仪分析渗层表面成分及分布。

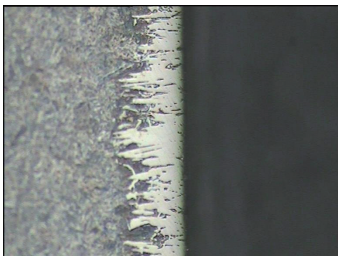
3　试验结果与分析

3.1　渗层断面显微组织

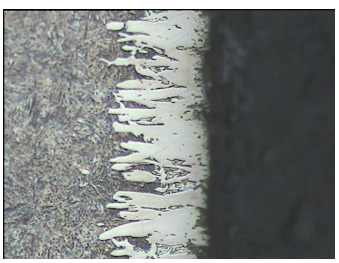
图1为不同共渗温度条件下20CrMnTi钢表面硼碳共渗层断面显微组织。由图中可以看出，其表面形成了一定厚度的渗碳+渗硼层。其中外层渗硼层颜色较光亮，呈锯齿状，并且渗硼层的厚度随共渗温度的升高而增加，从800℃时25μm左右增厚到900℃时的75μm左右。温度越高，渗硼层的齿状组织越粗大。渗硼层呈锯齿状嵌入基体组织中。800℃条件下，渗碳区未见形成明显的针状马氏体组织；900℃条件下，渗硼层外层比较疏松，而850℃共渗层中的渗硼层组织致密，渗碳层形成了针状马氏体组织。在850℃条件下，共渗层表面硬度较高，见表2。



a）800℃



b）850℃



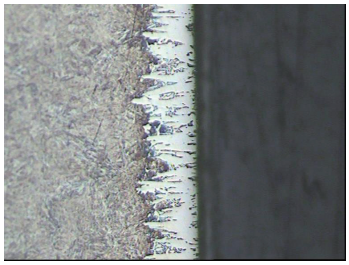
c）900℃

图1　20CrMnTi在共渗温度下渗层断面显微组织

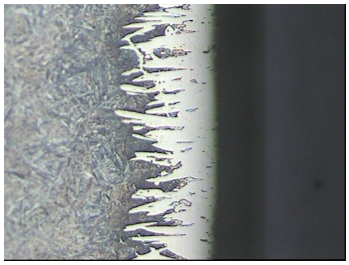
表2　共渗温度对渗层表面硬度的影响

共渗温度/℃	800	850	900
渗层表面平均硬度$HV_{0.2}$	1205	1680	1340

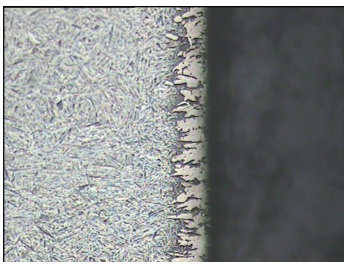
图2为不同稀土添加量条件下，20CrMnTi钢表面硼碳共渗层断面显微组织。加入稀土后，使得硼化物的齿形呈现尖针状楔入基体，与基体结合牢固。渗层连续性、均匀性提高，Fe_2B针齿趋于细密直长，齿尖碳化物弥散分布。当稀土含量为5%时，外层渗硼层锯齿状组织明显且致密；当稀土含量增加到10%时，渗硼层厚度减小且锯齿状组织嵌入基体较少。当稀土含量为5%时，共渗层表面硬度较高。渗碳层为细针状马氏体加弥散分布碳化物，稀土含量较低时，碳化物尺寸较大。当稀土含量达到10%时，渗碳层的细针状马氏体弥散分布，碳化物尺寸较小。稀土含量对共渗层表面硬度的影响见表3。



a）2.5%



b）5%



c）10%

图2　20CrMnTi钢在不同的La_2O_3含量下渗层断面显微组织

表3　稀土含量对共渗层表面硬度的影响

稀土加入量（质量分数，%）	0	2.5	5	10
渗层表面平均硬度$HV_{0.2}$	1210	1405	1686	1320

3.2　共渗层表面成分

图3为20CrMnTi钢表面渗硼层的X射线衍射谱结果，由图可以看出渗层主要含有Fe_2B和α-Fe相。在渗硼过程中，由于硼在20CrMnTi钢γ相中的溶解度很小，钢表面的奥氏体很快硼饱和，并形成Fe_2B化合物。Fe_2B沿[200]晶向的生长速度最快。一些晶粒生长方向不垂直于试样表面，则易与相邻晶粒相碰而停止生长。因此，只有那些生长速度快且与试样表面垂直的晶粒才能不断地向试样心部生长，使硼化物层形成择优取向的晶体结构。稀土的加入影响了Fe_2B相晶粒生长的择优取向。

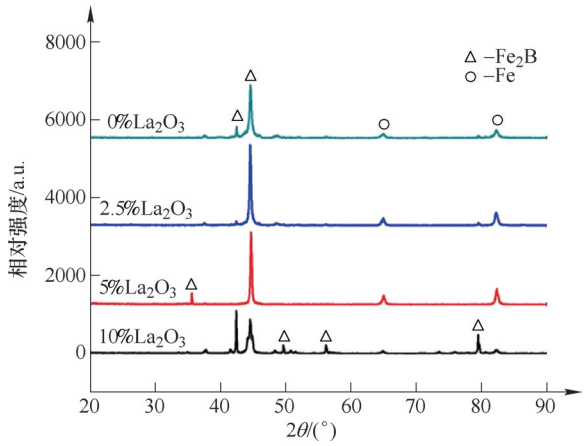


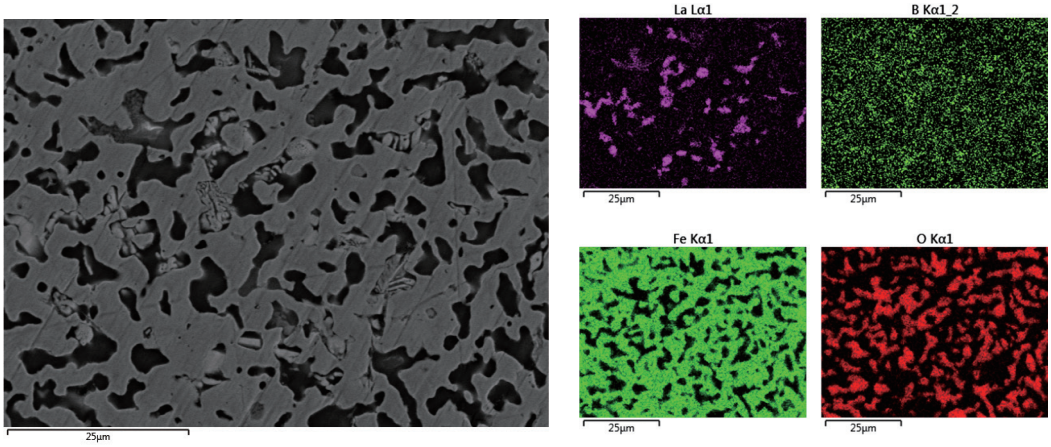
图3　20CrMnTi钢不同稀土含量下渗层表面XRD

850℃×8h、5% La_2O_3条件下硼碳共渗层表面电镜形貌及能谱分析如图4所示。稀土硼碳共渗层表面主要含有Fe、B、La、O、C等元素。对图中标记处进行点分析发现含有较多的O、La等元素，推断其为含La的氧化物。这表明稀土进入渗硼层并分布其中，但是XRD未检测出La及其氧化物或其他化合物谱峰，这可能是由于稀土化合物含量较少，未达到XRD检出限。

同稀土渗碳时的组织一样，稀土元素的加入，改善了渗碳层碳化物形貌，降低了碳化物的尺寸，使碳化物在渗碳层中弥散均匀分布。渗碳过程中，稀土渗入表面后，以其为形核中心，增加了碳化物的形核位置，抑制了网状碳化物的形成，改善了碳化物的形态。试验中硼碳共渗时，稀土的添加有助于形成细小针状的渗碳组织，但是形成渗硼层齿状组织不明显，深入基体较浅且渗层较薄，渗硼层与渗碳层结合差。因此，试验中最佳的稀土硼碳共渗工艺为850℃×8h、5% La_2O_3。

3.3　稀土硼碳共渗机理

在渗硼剂中加入稀土La_2O_3，可以改善渗硼层的质量，通过提高扩散系数和扩散元素的浓度，从而提高渗速，起到催渗作用[14]。在渗硼剂中加入La_2O_3进行渗硼后，渗硼层的形貌特征变化不明显，但能改善材料的渗硼层厚度、硬度等性能。同时，稀土在渗碳过程中能够降低温度，减少变形，使渗层组织晶粒细化，起到催渗和微合金化作用[15]。在渗碳过程中，稀土氧化物能够提高界面反应。在硼碳共渗的过程中，与硼原子相比，碳元素在奥氏体中的扩散系数较大，不溶于硼化物中，被其他原子



a）表面形貌　　b）元素成分面分布

图4　850℃×8h、5% La_2O_3条件下硼碳共渗层

排挤从而向基体内扩散，所以在共渗初期先进行渗碳。在20CrMnTi钢表面，硼元素的浓度随碳元素的扩散而增加，并形核长大直至彼此接触，完全覆盖于工件表面，此时渗碳结束。而碳元素以碳化物的形式存在于硼化物与基体之间，形成渗碳层，利于基体与共渗层之间的结合。而稀土元素在整个硼碳共渗过程中起到催渗作用[16]。渗层的相组成主要为Fe_2B，稀土在硼碳共渗过程中，不但提高了硼原子的扩散，而且能够促进共渗剂的分解，同时能够促进活性硼原子的吸附，析出更多的活性B原子，提高Fe_2B相与Fe相界面处硼原子的吸附浓度，增加共渗层的深度。对20CrMnTi钢进行稀土硼碳共渗处理，增加共渗过程中的硼、碳势和硼、碳通量，稀土元素主要富集于晶界上或其他晶体缺陷处，与其他元素发生反应形成第二相，并影响其他元素原子的扩散及生长，最终使共渗层的马氏体组织呈针状，碳化物呈弥散分布，从而改变渗层组织及性能，导致显微硬度的增加。

4　结束语

本文主要研究了共渗温度及稀土含量对20CrMnTi钢表面硼碳共渗层组织及性能的影响，试验发现随着共渗温度的升高，硼碳共渗层厚度逐渐增加，硬度先增加后减小，尤其是渗硼层厚度增加明显，Fe_2B取向性显著；850℃条件下，随着稀土含量增加，共渗层表面硬度先增加后减小，当稀土含量为5%时，共渗层厚度为189μm，其中渗硼层厚度近60μm，硬度最大。试验中硼碳共渗层的最佳制备工艺为850℃×8h、5%La_2O_3。

参考文献：

[1] 齐宝森，陈路宝，王忠诚.化学热处理技术[M].北京：化学工业出版社，2006.

[2] 周芳，刘凯，罗宏，等.20钢包埋粉末渗硼层的组织及耐蚀性能研究[J].热加工工艺，2017，46（2）：164-168.

[3] 胡斌梁，唐果宁，李颂文.采煤机截齿复合渗硼替代焊接硬质合金[J].金属热处理，2000，25（2）：50-51.

[4] 赵程，陈乃录，罗昆，等.20CrMnTi钢压辊深层稀土硼碳氮共渗[J].金属热处理，2005，30（9）：49-51.

[5] 陈伟鹏，王强，江梦清，等.稀土La对高碳合金工具钢高温氧化性的影响[J].稀有金属与硬质合金，2018，46（2）：21-26.

[6] 刘湘，哈丽毕努·艾合买提.稀土在渗硼中渗入机制和作用机理的讨论[J].热加工工艺，2006，35（14）：40-42.

[7] Yan M F, Liu Z R, Bell T.Effect of rare earths on diffusion coefficient and transfer coefficient of carbon during carburizing [J].Journal of Rare Earths，2001，19（2）：122-127.

[8] Yan M F. Study on absorption and transport of carbon in steel during gas carburizing with rare earth addition [J].Materials Chemistry and Physics，2001，70（2）：241-246.

[9] 齐涛，郭喜平.铌硅化物基超高温合金Si-Y_2O_3共渗涂层的组织及裂纹形成[J].稀有金属与硬质合金，2009，37（4）：7-10.

[10] 胡利光，宋春燕，王书桓，等.稀土合金渗氮处理研究进展[J].稀有金属与硬质合金，2019，47（2）：36-38.

[11] 童锡勇，李凤华，李长业，等.稀土元素对45钢固体渗硼的催渗作用[J].金属热处理，2007，32（4）：43-46.

[12] 王亚男，韩立影，张传庆.CeO_2对碳硼共渗层组织及耐磨性的影响[J].金属热处理，2011，36（5）：50-53.

[13] 陶小克，董桂霞，彭日升，等.固体法稀土硼共渗的研究[J].中国稀土学报，2001，19（2）：178-181.

[14] 王兰，吴奕明，卞国阳，等.稀土La_2O_3对45钢渗硼层性能的影响[J].表面技术，2019，48（2）：94-99.

[15] 王兰兰，黄福祥，高恩强，等.稀土元素用于化学热处理的研究现状[J].材料导报A：综述篇，2015，29（5）：81-85.

[16] 袁兴栋.碳钢表面预处理对硼铬稀土低温共渗的影响及其作用机理研究[D].济南：山东大学，2016.

MW 20201101