

## 纳米填料对环氧涂料防腐耐磨性能影响的研究

丛巍巍,周张健,宋书香,姚伟志,马焱,葛昌纯

(北京科技大学特种陶瓷与粉末冶金实验室,北京 100083)

**[摘要]** 环氧树脂由于其本身的附着力强,耐化学药品性和耐磨性也很好,所以被广泛应用于防腐涂料上。但是由于其自身脆性等缺点,在使用中通常需要对其进行改性处理。其中,各种纳米粉体对环氧树脂的改性得到了广泛的关注,对于提高环氧涂料的耐腐蚀性和耐磨性等性能发挥了重要作用。主要综述了纳米粉体在提高环氧树脂涂料的防腐性和耐磨性等方面的研究进展,介绍了纳米粉体分散改性的先进方法和表征手段,对纳米填料应用于重防腐耐磨环氧涂料的发展进行了展望。

**[关键词]** 纳米填料;分散;含量;环氧涂料;重防腐;耐磨

**[中图分类号]** TQ323.5; TQ316.6

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)01-0071-04

### Review of Research on the Effect of Nano-fillers on the Corrosion Resistance and Wear Resistance of Epoxy Coating

CONG Wei-wei, ZHOU Zhang-jian, SONG Shu-xiang, YAO Wei-zhi, MA Yao, GE Chang-chun

(Laboratory of Special Ceramics and Powders Metallurgy,

University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**[Abstract]** Epoxy is widely applied in anti-corrosion coatings because of its strong adhesion and well chemicals resistance and wear resistance. However, for the weakness such as brittleness, epoxy usually needs to be modified in the application. Especially the modification of epoxy by nano-powders became the focus and played an important role in improving the corrosion resistance and wear resistance of epoxy coatings. The progress on nano-filler epoxy coatings was reviewed, the advanced methods of dispersion and evaluation of nano powders in epoxy resin were introduced and the development of nano-fillers applying in heavy-duty and anti-wear epoxy coating was prospected.

**[Key words]** Nano-fillers; Dispersion; Content; Epoxy coating; Heavy-duty; Anti-wear

## 0 引言

环氧树脂涂料具有较高的机械强度和粘结力、尤其对金属的附着力强,耐化学药品性和耐油性也很好,特别是耐酸碱性非常好,同时具有易加工改性等特点成为防腐涂料中应用的主要树脂品种之一<sup>[1]</sup>。但是由于自身脆性等缺点,通常需要对其进行改性处理。王训道等人<sup>[2]</sup>认为环氧树脂通过环氧结构改性、橡胶改性、填充无机填料等高性能化后可制成防腐涂料。在大多数使用环境中,通常希望环氧树脂涂料同时具有强的防腐性和高的耐磨性以及其它性能,尤其是涂层的高耐磨性对保持涂层完整有重要作用,因而对其耐腐蚀性有非常大的影响,所以如何提高涂料的防腐性和耐磨性等性能成为涂料行业的研究热点之一。其中,添加改性纳米填料对综合提高环氧涂料重防腐能力和耐磨等性能上发挥了显著作用,因此,在众多对环氧树脂的改性的研究中,纳米无机填料改性环氧树脂更容易满足这一要求而备受关注。在纳米粉体改性环氧涂料的过程中,对纳米粉体进行预分散改性可以使其在涂料中达到良好的分散效果,是保

证其对环氧树脂起到纳米改性作用的重要环节。本文分析比较了各种纳米填料对环氧树脂复合材料的性能的影响,希望对提高环氧涂料的防腐性和耐磨性等性能有所启发,不断优化涂层性能。

## 1 纳米填料对环氧树脂性能的改善

由于腐蚀防护所涉及的表面材料的性质由微观结构所决定,纳米技术的出现与应用无疑将给腐蚀控制技术的发展带来巨大的机遇。研究表明,利用纳米技术对有机涂层防腐材料进行改性,可有效提高其综合性能,特别是增加材料的机械强度、硬度、附着力,提高耐光性、耐老化性、耐候性等<sup>[3]</sup>。目前研究主要集中在以  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、碳纳米管等纳米材料为填料的环氧涂料中。例如研究表明纳米  $\text{SiO}_2$  具有比表面积大、表面活性基团多等特点,能较好地与环氧树脂基体复合,改性作用明显优于普通  $\text{SiO}_2$ <sup>[4]</sup>。

纳米级颗粒与微米级颗粒相比对环氧树脂各项性能的作用效果有显著改善。由于纳米颗粒的小尺寸效应,其与基体界面粘接作用加强,使得涂层受力时有利于应力传递,且纳米材料表面严重的配位不足,表现出极强活性,进一步促进了树脂的交联反应,提高了分子间的键力,同时使涂层致密且耐磨性提高。微

**[收稿日期]** 2007-11-17

**[作者简介]** 丛巍巍(1981-),女,山东威海人,硕士,研究方向为重防腐耐磨纳米陶瓷环氧涂料的研究和制备。

米颗粒的粒径较大,可以阻碍复合涂层中高分子链段的运动,从而影响涂层的抗冲击性能<sup>[5]</sup>。环氧基团在界面上与纳米粒子产生远大于范德华力的作用力,形成非常理想的界面,能起到很好的引发微裂纹、吸收能量的作用。大量的研究结果可以证明这一结论。例如兰州化学物理研究所的杨保平等<sup>[6]</sup>比较了分析纯的普通  $\text{TiO}_2$  与纳米  $\text{TiO}_2$  在相同的工艺条件下制备涂料,测试结果显示,纳米  $\text{TiO}_2$  改性后涂层的结合力、耐盐雾性、硬度、柔韧性等明显提高。郑亚萍等<sup>[7]</sup>则发现环氧树脂在填充纳米  $\text{SiO}_2$  粒子后,冲击强度可提高 30%,拉伸强度提高 1 倍。

如上所述,纳米填料对改善环氧树脂性能有着重要的作用。但是在实现的过程中,有两大问题成为研究重点:一个是如何解决纳米颗粒在环氧树脂中的分散问题,另一个是如何选择纳米颗粒添加量的问题。

### 1.1 纳米粉体在环氧树脂中的分散

纳米技术是近年来出现的一门新兴技术,它带来了材料科学领域的重大革命。纳米粉体对提高环氧涂料的各项性能有着重要的作用,但是面临的一个重要问题是纳米粉体在环氧树脂中的分散问题。纳米粒子粒径小,表面能高,具有自发团聚的趋势,而团聚的存在又将大大限制其超细效应的充分发挥,在有机介质中难以润湿和分散。因此,如何改善纳米粉体在液相介质中的分散和稳定性是十分重要的研究课题。

纳米粉体分散在介质中,由于颗粒的尺寸在纳米级,所形成的悬浮液属于胶体的范畴。胶体的稳定性或聚沉决定于胶粒之间的排斥力和吸引力。排斥力使颗粒之间分散,增加微粒在介质中的稳定性,而吸引力则使微粒团聚。所以,根据这两种力产生的原因及相互作用,纳米粉体在介质中的分散性可以用胶体理论加以讨论。胶体分散有三大稳定理论<sup>[8]</sup>:DLVO 理论、空间位阻稳定理论、空缺稳定理论。1) DLVO 理论主要是通过粒子的双电层理论来解释分散体系稳定的机理及影响稳定性的因素。根据双电层模型,颗粒表面带电荷,颗粒被离子氛包围。当 2 个粒子趋近而离子氛尚未接触时,粒子间并无排斥作用;当粒子相互接近到离子氛发生重叠时,处于重叠区的粒子浓度显然较大,破坏了原来电荷的对称性,引起了离子氛的重新分布,即离子从浓度大区间向未重叠区间扩散,使带电荷粒子受到斥力而相互脱离。2) 空间位阻稳定理论是指为防止颗粒相互接近,使它们不能接近到有强大吸引力的范围。通过非离子性物质吸附在颗粒周围建立起一个物质屏障。吸附层越厚,颗粒中心距离越大,因此,分散体系也就越稳定。3) 空缺稳定理论是指由于颗粒对聚合物产生负吸附,在颗粒表面层,聚合物的浓度低于溶液的体相浓度。这种负吸附现象导致颗粒表面形成一种“空缺层”,发生重叠时就会产生斥力能或吸引能,使物系的位能曲线发生变化。在低浓度溶液中,吸引能占优势,胶体稳定性下降。在高浓度溶液中,斥力能占优势,使胶体稳定。

科研中的分散实验多是根据上述理论的一种或多种。Yan-gyang Sun 等人<sup>[9]</sup>为了减轻填料相互之间的反应从而达到纳米硅在树脂中的单分散,进行了填料-纳米硅的表面处理实验。在实验中考虑了处理的方法、偶联剂的种类、浓度以及处理周期等因素,经过激光粒度分析仪、透射电镜和傅立叶变换红外光谱等途径检测得出最优实验条件。在超声分散法进行预处理,相对较低的硅烷浓度以及较长的反应时间的条件下,纳米硅处理可

以实现在极性介质中的单分散,效果显著。

黄毅等<sup>[10]</sup>为了制备稳定分散的纳米  $\text{TiO}_2$  水悬浮液,研究了 SN5040 和 PEG 作分散剂对纳米  $\text{TiO}_2$  在水中分散稳定性的影响。试验结果表明:SN5040 能有效分散纳米  $\text{TiO}_2$ ,按照先 SN5040 后 PEG 的方式添加一定比例的混合分散剂,PEG 能在 SN5040 吸附层上嵌入式吸附,显著提高了纳米  $\text{TiO}_2$  的 Zeta 电位值,更有利于纳米  $\text{TiO}_2$  水悬浮液的分散稳定性。

硅烷改性剂被广泛用于环氧树脂和纳米颗粒的改性。经过偶联剂预处理和接枝聚合,最后获得 PAM-KH550-SiC 微粉即改性碳化硅。Si—O 键和酰胺基(—CONH<sub>2</sub>)特征峰表明粉体表面存在 KH-550 和 PAM。表面性质发生了很大变化,但其物相结构没有改变。改性 SiC 微粉无结团现象,分散性得到改善<sup>[11]</sup>。

在化学分散取得显著效果的同时,物理分散也显示了重要作用。物理分散包括超声波分散、机械分散等。聂鹏等人<sup>[12]</sup>为实现在不添加分散剂的情况下将纳米粒子均匀分散在液相物料中,提出了一种基于欠膨胀射流的液相物料纳米粉添加分散方法。该方法利用欠膨胀射流将纳米粒子以气-粉微气泡的形式分散到液相物料内部,并利用微气泡受高频挤压爆破释放的能量,以及气泡膨胀过程产生的超声波效应和高拉伸场效应来实现纳米粉在液相物料中以纳米尺度粒子分散。设计了相应的分散系统,进行了无分散剂下纳米  $\text{SiO}_2$ /环氧树脂添加分散实验。通过 TEM 和  $T_g$  测试对实验样品进行了表征,结果表明,分散相粒径在 15~30nm 之间, $\text{SiO}_2$  纳米颗粒均匀地分散在环氧树脂中。 $T_g$  温度比只经过一般高速机械搅拌得到的复合材料提高了约 18℃。该方法解决了  $\text{SiO}_2$  纳米粉颗粒在环氧树脂中的团聚问题。

因此,根据纳米颗粒的表面特性选择合适的分散方法对改善环氧树脂的性能具有非常重要的作用。

### 1.2 纳米微粒的含量对环氧涂料性能的影响

纳米微粒对改善环氧树脂的性能有重要的作用,然而其含量也是一个不容忽视的影响因素。纳米微粒的含量对其在基质中的分散性是有影响的,通常纳米微粒的含量越高,其聚集倾向越严重,分散的难度也就越大<sup>[13]</sup>,必然会在一定程度上失去纳米颗粒的尺寸优势,从而影响改善环氧树脂的性能。因此,研究不同的纳米微粒在环氧树脂中的合适含量对提高环氧涂料各方面性能具有重要意义。

为了提高环氧涂料的耐腐蚀性能,Xiuzhi Zhang 等人<sup>[14]</sup>尝试将不同量的纳米 Ti 粉加入环氧树脂涂料中,在 3.5% 氯化钠水溶液中采用电化学阻抗谱分析,结果表明,加入纳米尺寸 Ti 粉末后环氧涂料的耐腐蚀性能得到提高。在高离子阻抗透过涂层及低特征频率的条件下,添加 10% 的纳米尺寸 Ti 粉的涂层跟其它不同含量的涂层相比具有最好的耐腐蚀性能。M. R. Bagherzadeh<sup>[15]</sup>分别将质量分数为 1%、3%、5% 的纳米粘土加入双酚 A 环氧树脂制备出环氧-粘土纳米复合涂料,盐雾试验结果证明粘土浓度的增加会引起涂层的剥蚀和起凸密度减小。盐雾和电化学阻抗试验结果表明,未添加粘土的涂层剥蚀比其它涂层严重,当粘土质量分数为 3% 和 5% 时,涂层获得最好的防腐性能。

纳米粒子的含量对环氧涂料的耐磨性能有着重要的影响。L. Chang 等人<sup>[16]</sup>以不同含量的短碳纤维、石墨、聚四氟乙烯和

纳米二氧化钛为填料,以环氧树脂为基制取了多种复合材料,比较了它们的摩擦因数、耐磨性和接触温度。试验结果表明,纳米二氧化钛的加入可以显著降低摩擦因数,从而降低纤维增强环氧复合材料的接触温度,最终使复合材料的耐磨性大大加强,尤其适用于比如高接触压力和滑行速度的极端摩擦条件下。Wetzel B 等<sup>[17]</sup>研究了纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子对环氧树脂磨损率的影响,发现在 2% (体积分数) 时,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子可使环氧树脂的磨损率降低 30%,而在其他含量时则对磨损率影响不大甚至使磨损率提高。纪秋龙等<sup>[18]</sup>选用耐磨性好、模量高的纳米 SiC 粒子与环氧树脂复合,同时研究了利用低填充量纳米粒子提高环氧树脂耐磨性的方法和机理。考虑到亲水性的纳米无机粒子与亲油性的环氧树脂之间相容性差的问题,对纳米 SiC 粒子进行表面大分子接枝预处理,通过在 SiC 粒子表面引入聚丙烯酰胺,一方面可以改善纳米粒子在基体中的分散性,另一方面由于接枝链上含有能够参与环氧树脂固化反应的酰胺基团<sup>[19]</sup>。

## 2 纳米填料改性环氧涂料的研究展望

### 2.1 碳纳米管对环氧树脂的改性作用

碳纳米管以其突出特征引起人们广泛的科学和工业利益。碳纳米管因为碳原子的二维排布具有很好的机械性能,而且还具有高的长径比和好的电学和物理性能,碳纳米管因为其极强的纳米增强性被广泛用于复合材料,可以赋予复合材料低重超高强度、适中的排静电性能<sup>[20]</sup>。而将碳纳米管用于改性环氧树脂以提高其防腐性能的研究比较少见。Anwar Aglan 等人研究了多壁碳纳米管加入环氧树脂与乙烯基醋酸盐共聚物对保护基材能力的作用,EIS 检测表明经过 5% 氯化钠溶液 70d 的浸泡,环氧系列的纳米涂料的电荷传送电阻比不加填料的涂料的要高;肉眼和显微观察表明,经过 20d 的 5% 氯化钠溶液浸泡纳米增强环氧树脂和 VYHH 树脂在最小化气孔形成方面要优于纯树脂<sup>[21]</sup>。

碳纳米管经过酸处理、等离子氧化和胺处理,超声分散的方法与环氧树脂制成复合材料,通过 X 光电子波谱研究改性后引入的官能团,用场发射电子显微镜表征碳纳米管的分散状态。试验结果表明,表面改性的碳纳米管可以更均匀地分散于环氧树脂基体并且与聚合基体之间形成很强的相互作用,所以含有改性碳纳米管的纳米复合材料与未处理的碳纳米管相比具有更高的存储和更小的模量及剪切速率<sup>[22]</sup>。

Haiyan Chen<sup>[23]</sup>比较研究了不处理、硝酸活化处理和加硅烷偶联剂的硝酸活化处理 3 种碳纳米管对环氧树脂的不同影响。对于未处理的碳纳米管,超声分散对提高耐磨性有积极作用,而且若将超声分散与双非对称离心搅拌机结合,效果更好。预处理过的碳纳米管可以提高复合材料的耐磨性,而且不应该使用超声分散,它会破坏预处理的碳纳米管。结果证明随着碳纳米管分散性和完整性的改善,综合耐磨性不断提高。

我们课题组也做了这方面的尝试试验,将碳纳米管与纳米颗粒均匀加入环氧树脂涂料,检测结果显示其综合性能与仅增加纳米颗粒的效果相比有所提高。我们认为碳纳米管用于提高涂料的防腐性将会有比较好的前景。

### 2.2 纳米颗粒对环氧树脂固化的影响

我们在试验中使用聚酰胺固化环氧树脂。聚酰胺是由不饱和脂肪酸与多元脂胺为主要原料合成的。聚酰胺中能起固化反应的有伯、仲胺基和酰胺基,它们和环氧基的反应活性是不同的,再加上胺基上结了庞大的环体,所以在室温下它和环氧树脂的固化反应不完全,这可由红外分析其固化物来证实<sup>[24]</sup>。我们通过正交<sup>[25]</sup>实验发现,当环氧树脂和聚酰胺用量一定的条件下,加入纳米颗粒后固化效果良好,而不添加或者减少纳米颗粒的添加量后,固化结果会不理想。我们查阅了大量这方面的相关文献资料,关于纳米颗粒是否参与环氧树脂与聚酰胺的固化反应目前尚没有得出理想的解释。所以纳米颗粒对环氧树脂固化的影响问题有待进一步研究。

### 2.3 重防腐耐磨涂料的性能评价标准

为达到严酷环境下长效的目的,对重防腐涂料主要成膜物质合成树脂的要求是:对金属材料的良好附着力,有良好的物理机械性能,如低的收缩力、适当的硬度、韧性和耐磨性、耐温性等;对各种介质(化工气体、酸、碱、盐和其他溶剂)有优良的耐蚀性;能有效地抵制各种介质对涂层的渗透;能在各种条件下进行方便的施工,并达到对涂层厚度和涂层结构的设计要求<sup>[26]</sup>。目前重防腐涂料已经得到了很大的发展,但还不是很成熟<sup>[27]</sup>。所以重防腐涂料的性能评价希望有一套严格且具有指导性的标准,而这对重防腐耐磨涂料的研究以及该行业的发展都有着非常重要的意义。所以重防腐耐磨涂料的性能评价标准应该尽早地制作发行。

## 3 结 语

改性环氧树脂涂料近几年已成为重防腐耐磨涂料的一个热点领域。通过纳米颗粒改性可赋予环氧树脂涂料较高的重防腐性能和耐磨性等。影响纳米颗粒改性环氧树脂涂料性能的因素目前主要集中在纳米颗粒在环氧树脂中的分散以及纳米颗粒的添加量。其中,解决纳米颗粒的分散问题有一定的难度,一方面从物理角度出发,多用不同的混合搅拌等处理工艺使纳米颗粒很好地分散于环氧树脂中;研究更多的是选择化学角度,尝试不同的分散剂、偶联剂等对纳米颗粒进行预处理,引入有效官能团防止或减轻纳米颗粒团聚,改善纳米颗粒与环氧树脂的结合从而达到提高涂料防腐耐磨性能的效果。此外,碳纳米管在提高环氧树脂涂料的防腐耐磨性方面也表现出可观的作用效果来。如何利用纳米颗粒对环氧树脂进行改性,我们还需要对其具体反应作进一步研究,同时需要比较规范的标准来指导。

### [参 考 文 献]

- [1] 宣兆龙,易建政,杜仕国. 防腐涂料用环氧树脂的改性及添加剂[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(4): 221-223
- [2] 王训道,李燕红,蒋登高,等. 纳米  $\text{CaCO}_3$  在环氧树脂中的分散及其复合涂料的制备[J]. 化工新型材料, 2005, 33(6): 66-68
- [3] 李远利,雍歧卫,刘志. 管道防腐涂层新发展[J]. 涂料工业, 2007, 37(2): 55-57
- [4] 张之圣,樊攀峰,李海燕. 纳米  $\text{SiO}_2$ /环氧树脂的制备与表征

- [J]. 材料工程, 2004, 10: 50-55

[5] 李齐方,于运花,杨庆泉,等.聚氨基酯/纳米复合涂料的红外特性及其力学性能的研究[J].高分子材料科学与工程,2002,18(3): 110-114

[6] 杨保平,崔锦峰,张应鹏,等.环氧改性氟碳纳米复合船舶涂料的研制[J].兰州理工大学学报,2005,31(5): 67-70

[7] 郑亚萍,宁荣昌.纳米SiO<sub>2</sub>-环氧树脂复合材料性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2001,(2): 34-36

[8] 高濂,孙静,刘阳桥.纳米粉体的分散及表面改性[M].北京:化学工业出版社,2003. 144-204

[9] Sun Yangyang, Zhang Zhuqing, Wong C P. Study on mono-dispersed nano-size silica by surface modification for underfill applications [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 292: 436-444

[10] 黄毅,彭兵,柴立元,等.聚合物分散剂对纳米TiO<sub>2</sub>水悬浮液分散稳定性的影响[J].中国粉体技术,2006,(2): 24-28

[11] 李亚萍,华勇,蒋登高,等.碳化硅微粉的接枝聚合改性[J].金刚石与磨料模具工程,2007,159(3): 80-84

[12] 聂鹏,赵学增,陈芳,等.基于欠膨胀射流的SiO<sub>2</sub>/环氧树脂纳米复合材料制备方法研究[J].高校化学工程学报,2005,19(6): 834-838

[13] 俞豪杰.环氧树脂的无机纳米微粒改性、功能和应用研究[D].浙江:浙江大学,2006. 46-47

[14] Zhang Xiuzhi, Wang Fuhui, Du Yuanlong. Effect of nano-sized titanium powder addition on corrosion performance of epoxy coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201: 7241-7245

[15] Bagherzadeh M R, Mahdavi F. Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anticorrosive behavior in epoxy coating [J]. Progress in Organic Coating, 2007, (7) : 11

[16] Chang L, Zhang Z, Breidt C, et al. Tribological properties of epoxy nanocomposites I. Enhancement of the wear resistance by nano-TiO<sub>2</sub> particles [J]. Wear, 2005 , 258: 141-148

[17] Wetzel B, Hauptert F, Zhang M Q. Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance [J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2055-2067

[18] 纪秋龙,章明秋,容敏智,等.纳米碳化硅填充环氧树脂复合材料的摩擦磨损特性[J].复合材料学,2004,21(6): 14-20

[19] Zhang M Q, Rong M Z, Yu S L,et al. Improvement of tribological performance of epoxy by the addition of irradiation grafted nano-inorganic particles [J]. Macromol Mater Eng, 2002, 287: 111-115

[20] Lau K T, Hui D. Effectiveness of using carbon nanotubes as nanoreinforcements for advanced composite structures [J]. Carbon, 2002, 40: 1605-1606

[21] Anwar Aglan, Aldinton Allie, Adriane Ludwick, et al. Formulation and evaluation of nano-structured polymeric coatings for corrosion protection [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(2): 370-378

[22] Jin Ah Kim, Dong Gi Seong, Tae Jin Kang, et al. Effects of surface modification on rheological and mechanical properties of CNT/epoxy composites [J]. Carbon, 2006, 44: 1898-1905

[23] Chen Haiyan, Jacobs Olaf, Wu Wei, et al. Effect of dispersion method on tribological properties of carbon nanotube reinforced epoxy resin composites [J]. Polymer Testing, 2007, 26: 351-360

[24] 胡高平,肖卫东.酚醛胺与低分子聚酰胺协同对环氧树脂固化的研究[J].化学与粘合,2000,4: 163-165

[25] 邱华,张宗明,冉洪武,等.正交实验方法在防腐涂料研究中的应用[J].表面技术,2006,35(6): 67-81

[26] 吴跃焕,杨卓如.重防腐涂料用环氧树脂的改性特点[J].化学建材,2002,(3): 8-12

[27] 郭清泉,陈焕钦.重防腐涂料的发展展望[J].化工进展,2003,22(9): 947-950
- (上接第41页)
- 母材原始硬度还要低。
- ### 3 结 论
- 1)铸态高铬铸钢晶粒较粗大、组织不均匀,原始组织以奥氏体为基体,还存在大量网状断续共晶碳化物和莱氏体。
- 2)激光熔凝后,高铬铸钢显微组织明显细化,剖面组织区域分为激光熔凝区(细小奥氏体+少量细小未熔碳化物)、激光相变区(奥氏体+少量晶界碳化物)、过渡区和母材4个区域。熔凝区和相变硬化区的淬硬深度依工艺参数不同,可达0.2~0.3mm。
- 3)由于形成了奥氏体组织,高铬铸钢表面硬度增加不明显,硬度最大值出现在相变硬化区。
- #### [参 考 文 献]
- [1] Guan Y H, Chen T L, Wang H G, et al. The prediction of the mechanical properties of metal during laser quenching[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63: 614-618

[2] 李会山,杨洗陈,于滨.铸铁凸轮轴激光熔凝工艺和性能研究[J].表面技术,2003,32(6): 48-50

[3] 徐子文,黄正,阮中建.激光熔凝过程中低碳钢组织的形成及熔凝组织加热转变规律[J].金属热处理,2003,28(10): 22-25

[4] 高传玉,周明.激光快速熔凝40Cr钢表面硬度与残余应力研究[J].应用激光,2002,22(1): 19-22

[5] 陈静,杨海欧,杨健,等.TC4钛合金的激光快速成形特性及熔凝组织[J].稀有金属快报,2004,(4): 33-37

[6] 王贵,周新初,麻永林,等.激光熔凝处理对轧辊钢组织及性能的影响[J].包头钢铁学院学报,2000,19(4): 305-308

[7] 赵海信,莫易敏,余先涛.铝合金表面激光熔凝Ni基金属粉末的特性研究[J].表面技术,2005,34(5): 46-48

[8] 赵玉珍,王维斌,史耀武,等.高碳高合金钢的激光表面熔凝处理的耐磨性研究[J].材料工程,2003,(2): 37-40

## 喜 讯

在第七届重庆市期刊好作品评选中,作者邹洪庆在《表面技术》2006 年 5 期上发表的文章《钢铁材料含氟聚合物协合涂层技术研究》荣获一等奖;作者陈贻炽在《表面技术》2006 年 1 期上发表的文章《聚硅氧烷水基乳溶液处理的 A3 钢的耐蚀性研究》荣获二等奖。