

钢渣作船体喷砂除锈磨料的可行性研究

易承波^{1,2}, 欧阳东^{1,2}, 鲁刘磊^{1,2}

(1. 暨南大学 理工学院, 广州 510632; 2. “重大工程灾害与控制”教育部重点实验室, 广州 510632)

[摘要] 随着船舶工业的发展, 船体除锈技术越来越受到重视。喷砂除锈是当今世界上修船用得最为普遍的船体除锈工艺, 为了达到一定的除锈质量与标准, 要求选用合适的除锈磨料。从钢渣的来源、含尘量、游离 SiO_2 含量、粒度、棱角、硬度、除锈效果、价格等方面探讨了在船体喷砂除锈中采用钢渣磨料的可行性, 发现钢渣磨料具有良好的综合效益和广阔的应用前景。

[关键词] 船体; 钢渣; 喷砂; 除锈; 磨料

[中图分类号] TQ639.3; X756

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)04-0091-03

The Study on Feasibility of Steel Slag Abrasive Used in Shot Peening Derusting in Hull

YI Cheng-bo^{1,2}, OU Yang-dong^{1,2}, LU Liu-lei^{1,2}

(1. College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering, Guangzhou 510632, China)

[Abstract] With the development of shipbuilding industry, pay attention to the technology of hull rust. Shot peening derusting is the most widely used in derusting technology in hull in the world today. In order to achieve a certain degree of rust quality and standards, we must select the appropriate abrasive. The feasibility of use of steel slag abrasive in shot peening derusting in hull from the steel source, free silicon content, particle size, angularity, hardness, rust effects, price, etc. was studied. The test results show that steel slag abrasive has good comprehensive benefits and broad prospects.

[Key words] hull; steel slag; shot peening; derusting; abrasive

2003 年以来, 我国船舶工业进入了快速发展轨道, 造船产量快速增长, 2008 年达到 2 881 万载重吨, 占国际市场份额的 29.5%。但是, 一艘刚出厂的新船往往在海上航行不久, 船体就会出现涂层剥落、生锈的现象, 甚至在码头舾装阶段就发生锈蚀。因此, 需通过提高船体的除锈质量来获得更好的涂装性能, 以提高船体涂层的使用寿命。

船体表面的除锈处理效果直接影响船体的防锈防腐能力和涂装油漆用量, 因此需选择合适的喷砂磨料。目前, 用于喷砂除锈的磨料主要有人造磨料和炉渣磨料, 人造磨料包括钢丸、钢砂、钢丝段等, 炉渣磨料包括铜渣、钢渣、煤渣等。

1 船体除锈标准

为了评定船体表面钢材的除锈质量, 适应船体除

锈发展的需要, 许多国家先后制订了船体钢材除锈的质量等级标准, 例如: 瑞典工业标准 SIS055900《涂装前钢材表面除锈图谱标准》, 该标准长期以来为世界各国采用; 国际标准 ISO 8501-1:1988《涂装油漆和有关产品前钢材预处理》, 该标准是由国际标准化组织色漆和清漆技术委员会涂装前钢材表面除锈分会以瑞典标准 SIS055900-1967 为基础制订的^[1]; 日本标准 JSRA-SPSS, 是日本造船研究协会针对未处理过的钢材和涂过车间底漆的钢材制订的; 中国标准 GB 8923-88《涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级》和船舶专业标准 CB3230-85《船体二次除锈评定等级》。目前, 国内主要采用 GB 8923-88 标准, 即: 船体表面经喷砂清理后, 需达到 Sa 2.5 级(即钢材表面应无可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆涂层等附着物, 任何残留的痕迹应仅是点状或条纹状的轻微色斑), 粗糙度 Ra 应为 40~75 μm ^[2]。

[收稿日期] 2010-03-29; **[修回日期]** 2010-05-31

[基金项目] 广东省重大科技专项计划项目

[作者简介] 易承波(1986—), 男, 广东吴川人, 硕士生, 主攻固体废弃物及其资源化利用。

2 钢渣磨料的特点

钢渣是炼钢排出的熔渣,主要是粗炼和精炼的金属被氧化产生的氧化物、被侵蚀和冲刷下来的炉衬材料、金属炉料带入的杂质和为调整钢渣性质而特意加入的造渣材料^[4],其数量一般为粗钢产量的 15%~20%。钢渣的成分极其复杂,一般由 5 种以上的化合物组成,且其组成因冶炼方法不同而不同,表 1 列出了几种钢渣主要的化学组成^[5-6]。

表 1 钢渣的主要化学组成

Tab.1 The chemical composition of steel slag

组分	质量分数/%			
	转炉渣	电炉渣	精炼渣	电渣重熔渣
SiO ₂	13~16	10~20	15~18	
Al ₂ O ₃	6~9	3~5	6~7	30
CaO	33~42	40~50	50~55	
FeO	11~23	8~15	<1.0	
MgO	2~7	7~12	0~10	
MnO	9~12	5~10	<0.5	
CaF ₂			8~10	70
P ₂ O ₅	1~2	0.5~1.5		

钢渣的主要结晶矿物为 A 矿、B 矿、C₂F 系列固溶体、以方铁石为主的 RO 相和 Ca(OH)₂,另有少量的 C₃A, C₄AF, f-CaO, Ca(CrO₂)₂ (方镁石) 和金属铁等^[7]。钢渣块松散不粘结,质地坚硬密实,孔隙较少,含铁量较高,较难磨(易磨指数为 0.7,而标准砂为 1),抗压性能好(压碎值为 20.4%~30.8%)。

钢渣作为船体喷砂除锈磨料,具有如下特点:

1) 数量大,废物利用。国际钢铁协会的统计数据表明,2009 年,全球所有国家粗钢产量累计为 12.197 亿吨,其中,中国粗钢产量 5.678 亿吨。钢渣产量约为粗钢产量的 15%~20%,即 2009 年中国钢渣产量达到 0.851 7~1.135 6 亿吨。但钢渣的实际利用率不足 10%,大量钢渣堆积如山,造成巨大的资源浪费和环境污染。可见,钢渣来源丰富,作为船体喷砂除锈磨料还可以实现废物利用。

2) 环保安全,对人体无害。钢渣是在高温熔融状态下,经过复杂的造渣反应,生成的稳定 2FeO·SiO₂·CaO·FeO·SiO₂·2CaO·SiO₂ 等盐类共熔体,没有游离 SiO₂,冷却后硬度高,含尘量低,对操作人员的健康和环境影响较小。

3) 粒度符合要求。磨料的粒度是影响除锈效果的重要因素,粒度大,则冲击力大,清除表面氧化皮的能力就强,但每公斤的颗粒数少,冲击点就少;粒度小,则每公斤的颗粒数多,冲击点就多。所以,在选择磨料

时,要大小混合使用,因为大粒度磨料可迅速除掉氧化皮,小粒度磨料则可清除黄锈和打磨大颗粒达不到的部位,除锈效果较好。此外,还要考虑粒度对表面粗糙度的影响。表面合理的粗糙度能增加表面积,还能提高涂层的附着力。但是,粗糙度不能太小,否则会造成涂层附着力不佳及耐冲击强度下降;也不能太大,否则会使波峰处因涂层覆盖不良而产生点蚀,还会由于锚纹深度太大易形成气泡,严重影响覆盖层的性能。磨料粒度大,则被清理钢材表面的粗糙度大;粒度小,则粗糙度小。从实际使用效果来看,用于船体钢材除锈,选用粒度 $\phi 0.5 \sim 1.5$ mm 的磨料即可满足涂装防护对钢材除锈后表面粗糙度 (40~75 μm) 的要求,宜取 $\phi 0.7 \sim 1.0$ mm^[8-9]。用钢渣作磨料时,粒度可控制为 8~36 目 (即 0.5~2.5 mm),完全满足要求。

4) 呈锐利棱角状,除锈效果好。磨料的形状对钢材表面清洁度和表面粗糙度有很重要的作用,有棱角的颗粒比丸状颗粒的除锈能力强。丸状磨料在猛烈冲击或连续打击金属表面时,也能击碎氧化皮,但因为它与钢材的接触面是球弧面,在它将接触面边缘的氧化皮击碎而脱离钢板表面的同时,可能将接触面中心处的氧化皮压进钢板内,要除掉这样的氧化皮较为困难;此外,由于丸状磨料不能在钢材表面产生棱角形的粗糙面,因而会影响涂层的附着能力,甚至很可能在涂层下面截留住气泡而影响涂装质量。钢渣颗粒为多棱角状,有锐利的棱角,在猛烈冲击或连续打击金属表面时,它细小锐利的棱角可强有力地击碎氧化皮,并在钢材表面产生棱角形痕迹。即使是反复使用过的钢渣磨料,也存在部分棱边,仍然可迅速除去氧化皮。

5) 硬度适中。磨料的硬度可根据船体的表面状态而定,一般来说,硬度值应高于钢板表面硬度 5~30HRC。磨料硬度越大,其除锈能力越强,但同时会对船体表面的侵入性越强,不仅会增加涂装成本,还会降低船体的使用寿命。钢渣的硬度适中,为 600~800HV (55.2~64HRC),对船体表面起到刮削作用,可提高涂层的附着力,又不至于刮伤船体表面。

6) 损耗率低。钢渣硬度较高,较易破碎,但用过的钢渣经过简单处理,仍有 60%~70% 可以继续使用,其回收再利用次数可达 7 次^[10]。

7) 除锈质量好。用钢渣对船体表面进行除锈,能够达到第 1 章所述国内标准的要求。

8) 价格低廉。钢渣价格仅为 180 元/吨 (上海宝冶钢渣开发公司提供的价格),而普通棱角钢砂价格为 4 900 元/吨 (上海彩地建材有限公司提供的价格)。船体除锈用磨料的量很大,价格低廉的钢渣优势更加明显。

- 9) 被喷砂面锚固纹理稳定^[11]。
- 10) 钢渣呈弱碱性,具有一定的防腐蚀效果,晒红显像慢^[11]。

3 钢渣磨料与钢砂磨料的对比

目前磨料使用较多的是钢砂,因此对比了钢渣与钢砂的优缺点,见表 2。

表 2 钢渣与钢砂的对比
Tab.2 The comparison of steel slag and grit

材料	产量	含尘量	粒度/mm	形状	硬度	损耗	价格	喷砂质量
钢渣	高	较少	0.5~2.5	有锐利的棱角	55.2~64HRC	除锈后有 60%~70%可以再用	低廉	粗糙度满足涂装要求;除锈等级 Sa 2.5 级
钢砂	低	极少	0.2~2.5	圆形或有棱角	45~65HRC	破碎率低于 5%,回收利用可达 500 次	昂贵,约为钢渣的 30 倍	

板表面锈蚀和旧涂层的污染不利于磨料循环利用,而价格低廉的钢渣可以作为一次性使用的磨料。

不过,相对于钢砂,钢渣也有它自身的缺点:一是使用中破碎率较高,会产生一定的粉尘污染;二是循环利用次数不多,提高了单位喷砂面积的施工费用;三是施工后产生的固体废弃物较多。

综合考虑,钢渣磨料的综合效益比钢砂磨料好,是较为理想的喷砂除锈磨料。

4 钢渣的喷砂除锈实例

有文献报道,日本钢管公司把风碎转炉钢渣开发成船用喷砂磨料,发现钢渣用作除锈磨料可以取得很好的效果^[11]。

沈阳冶炼厂很早就对钢渣作除锈磨料进行了研究,并根据山海关造船厂的试验,认定钢渣磨料可取代石英砂磨料。

目前,上海浦东船厂、南通通城船厂、舟山船厂等都利用了钢渣磨料进行船体除锈。钢渣磨料不仅可以用于船体除锈,还可用于钢结构表面除锈工程,例如上海海军剑机电、南京宸宇工程公司的南京长江引水工程管道喷砂除锈工程、车辆除锈等。

上海宝冶钢渣开发公司对钢渣磨料用于喷砂除锈进行了研究,结果表明:1)钢渣中氧化铁的质量分数高于 35%,其粒度分布见表 3;2)硬度高于 600HV,比石英砂高,喷砂后不易破碎;3)含粉量不高于 5%(质量分数),作为除锈、喷砂等的材料对环境污染小,不会产生游离的 SiO₂ 等粉尘危害操作人员身体健康;4)循环利用率高(可以循环利用 7 次),1 t 钢渣能够对 35 m² 的钢板进行喷砂除锈;5)除锈效果好,除锈后钢材表面除锈等级可以达到 Sa 2 或 Sa 2.5 级;6)除锈后的钢

通过对比,钢渣与钢砂在粒度、硬度、喷砂质量(粗糙度与除锈等级)方面均满足要求,差别不大,但钢渣来源丰富,可以实现废物利用,锐利的棱角使其除锈效果更好,又不会因长期循环使用造成磨料自身污染而导致钢材表面的二次污染。此外,钢渣密度为 3.1~3.6 g/cm³,而钢砂密度大于 7.0 g/cm³,用钢砂进行喷砂时需要消耗更多的压缩空气,并且清理磨料时劳动强度大。另外,修船为室外作业,易受天气影响,钢

板不易产生二次锈蚀;7)钢渣除锈磨料可代替钢丸、钢丝段、铜矿渣、石英砂等用做喷砂除锈的材料。

表 3 钢渣磨料颗粒分布
Tab.3 Distribution of steel slag grain

粒径/mm	<0.8	0.8	1	1.5	2
质量分数/%	13.70	18.16	36.34	21.08	10.72

5 结语

随着我国造船业的发展,船厂对船体除锈效果和成本的要求越来越高。钢渣作为一种除锈效果好、价格低廉的磨料,引起了造船界的高度关注。目前,各大船厂在船体喷砂除锈中对钢渣磨料的需求越来越大,因此,钢渣磨料具有巨大的应用前景。

但是,钢渣磨料应用在喷砂除锈工艺中还存在很多缺点,如破碎率高、粉尘污染等等,因此建议今后的研究重点放在以下 2 个方面:

1) 将除锈破碎并不能再循环使用的钢渣磨料进行处理,回收其中的金属铁并制成钢砂磨料,再次用于船体除锈。

2) 针对钢渣磨料和钢砂磨料的优缺点,可以按一定比例将两者混合后作为除锈磨料。这样,既可以弥补仅使用钢砂磨料进行除锈的高成本缺点,又可以减轻仅使用钢渣磨料除锈时产生的粉尘污染和降低除锈后的破碎率,取得较好的综合效益。

[参 考 文 献]

[1] 刘道忠. 集装箱涂装技术[J]. 涂料工业,1994(1):27-30.
[2] 姚冠新. 钢管外壁喷砂除锈作业线的设计与研制[J]. 表面技术,2000,29(3):22-23.

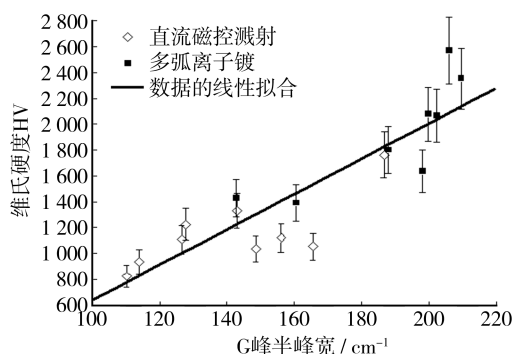


图 3 维氏硬度与 G 峰半峰宽的关系

Fig. 3 Vicker hardness versus FWHM of G peak

可以看出,硬度与 G 峰半峰宽相关度良好,较大的 G 峰半峰宽对应较高的硬度值。对图中的相关数据进行线性拟合,拟合结果表明,硬度与 G 峰半峰宽具有近似的线性关系。在 DLC 薄膜的拉曼谱中,G 峰半峰宽总是随着薄膜无序度的增加而增加^[9]。无氢 DLC 膜中的 sp^2 键总体上是无序连接的,随着 sp^3 组分的增加, sp^2 组分降低,使得 sp^2 团簇尺寸减小,膜内应力增加,键角混乱度增加,从而 G 峰不断宽化^[10]。因此,G 峰半峰宽与 sp^3 含量,进而与 DLC 膜硬度有可能存在较强的相关度。笔者的实验结果证明,G 峰半峰宽与 DLC 膜硬度之间的相关度很高,因而可以通过测量 G 峰半峰宽来定量测量无氢 DLC 膜中 sp^3 的含量。

但该方法仅适用于无氢 DLC 薄膜。对于含氢的 DLC 薄膜(a-C:H),由于 C—H 键的存在,使得 DLC 薄膜的内应力大大下降^[11], sp^2 团簇受应力影响而发生的键角无序效应得到缓解,因此, sp^2 的无序度和 G 峰的半峰宽受 DLC 薄膜中氢含量的影响严重。所以,在含氢的 DLC 薄膜中,G 峰的半峰宽与 sp^3 含量的相关性无法得到保证,故此方法不适用。

3 结论

对于 sp^3 所占百分比高于 20% 的 DLC 薄膜,D 峰

和 G 峰的强度比值(I_D/I_G)对 sp^3 含量的变化不敏感,因此采用 I_D/I_G 表征方法测量 sp^3 含量会失去准确性。文中证实 G 峰半峰宽与 DLC 的硬度具有良好的线性关系,进而推断出 G 峰半峰宽与 sp^3 含量具有良好的线性关系。因此,可以通过 G 峰半峰宽在大范围内测量 sp^3 的含量。该方法只适用于无氢 DLC 薄膜。

[参 考 文 献]

- [1] Robertson J. Diamond-like Amorphous Carbon[J]. Materials Science and Engineering R, 2002, 37: 129—281.
- [2] 邓新绿,马国佳. 类金刚石膜的应用及制备[J]. 真空, 2002(5):27—31.
- [3] Wang F M, Chen M W, Lai Q B. Metallic Contacts to Nitrogen and Boron Doped Diamond-like Carbon Films [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(12):3332—3336.
- [4] 程翔. 类金刚石薄膜光电性质研究与 MSM 光电器件探索[D]. 厦门:厦门大学, 2004.
- [5] Kawai S, Shinagawa T, Noda M, et al. Photoconductivity of DLC Film Deposited by Pulsed Discharge Plasma CVD [J]. Diamond & Related Materials, 2008,17:676—679.
- [6] 齐海成,冯克成,杨思泽. 射频输入功率对类金刚石薄膜性能的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(3):41—43.
- [7] 陈莲华,车晓舟,王平,等. FCVA 法沉积的超薄类金刚石薄膜的结构与热稳定性[J]. 真空科学与技术学报,2009, 29(3): 318—323.
- [8] Ferrari A C, Robertson J. Interpretation of Raman Spectra of Disordered and Amorphous Carbon [J]. Physical Review B, 2000, 61(20):14095—14107.
- [9] Ferrari A C, Rodil S E, Robertson J. Interpretation of Infrared and Raman Spectra of Amorphous Carbon Nitrides[J]. Physical Review B, 2003,67: 1—20.
- [10] Schwan J, Ulrich S, Batori V, et al. Raman Spectroscopy on Amorphous Carbon Films [J]. Appl Phys, 1996, 80: 440—447.
- [11] Ferrari A C, Robertson J. 碳材料的拉曼光谱——从纳米管到金刚石[M]. 谭平恒,李峰,成会明译. 北京:化学工业出版社, 2007: 194.

(上接第 93 页)

- [3] 费振义,刘如伟,王东江,等. 船舶与集装箱用钢板预处理过程中所用磨料的对比[J]. 材料开发与应用,1996, 11(6):13—14.
- [4] 舒型武. 钢渣特性及其综合利用技术[J]. 钢铁技术,2007(6):48—49.
- [5] 赵俊学. 冶金原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2002.
- [6] 欧阳东,谢宇平,何俊元. 转炉钢渣的组成、矿物形貌及胶凝特性[J]. 硅酸盐学报,1991,19(6):489—494.
- [7] 欧阳东. 转炉钢渣粉磨性能的实验研究[J]. 水泥工程,

1997(2):36—38.

- [8] 胡长春. 船体除锈高效磨料[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),1983(S1):159—170.
- [9] 都昌林,易春龙. 钢桥面无尘喷砂除锈设备及施工工艺[J]. 表面技术,2004,33(2):46—49.
- [10] 王志升. 矿渣除锈在车辆检修中的应用[J]. 铁道车辆, 1995,33(9):58—59.
- [11] 胡东风,仵增瑞. 转炉钢渣风碎技术在石钢 30t 转炉的应用[J]. 河北冶金,1997,9(33):35—39.