

高钒复合堆焊合金的耐磨性分析

宗琳^{1,2}, 刘政军², 高海亮², 李乐成²

(1. 沈阳化工大学 机械工程学院, 沈阳 110142; 2. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 为了研制一种高钒耐磨复合材料,通过调节钒含量制备多组 Fe-Cr-V-C 合金,对其进行等离子弧堆焊,通过硬度和磨损试验得出合金力学性能的变化规律,利用 XRD,OM 和 SEM 分析合金的物相组成、组织形态和分布情况. 结果表明,堆焊层的力学性能随着 V 元素含量的增加而提高,当 V 元素含量达到 26.2% 时,堆焊层的力学性能达到最佳值,其硬度为 64.9 HRC,磨损量为 0.078 4 g;堆焊层中碳化钒数量随 V 元素含量的增大而增多,并呈细小球状弥散分布在马氏体基体中,与晶界分布的断续网状的 (Fe,Cr,V)₇C₃ 复合物构成耐磨骨架,从而大大提高堆焊层的耐磨性能.

关键词: 堆焊合金; 等离子弧; 堆焊; 耐磨性

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)09-0041-04



宗琳

0 序 言

工业生产中,各种机械部件由于磨损失效降低了机械设备的寿命,并消耗了大量的维修时间,如果采用表面堆焊技术提高机械零部件的耐磨性,则可以提高机械设备的使用寿命,减少维修时间,从而大大降低了企业成本. 随着科技的发展,新型耐磨合金的研发受到社会的广泛关注,其中金属基复合材料是 21 世纪发展潜力最大的高性能结构材料之一^[1]. 目前,国内通常用 Fe-Cr-C 系合金作为耐磨堆焊材料,通过形成 Cr₇C₃ 等铬的碳化物硬质相提高堆焊层的耐磨性. 因为 Fe-Cr-C 系合金中形成的硬质相单一而且性能提升空间小,所以用其它元素替代部分 Cr 元素生成硬质相是解决此问题的办法之一. V 元素作为一种强碳化物生成元素,具有细化晶粒、提高淬透性的作用,其形成的碳化钒维氏硬度能达到 2 600 HV. 碳化钒和铁的润湿性好,且在强化自由碳化物硬质相的同时,还弥散析出硬化相,对提高合金整体硬度和抗磨性作用显著^[2]. 另外,钒在国内攀西地区资源丰富,因此,用碳化钒颗粒增强合金性能的研究有着良好的应用前景^[3].

目前,国内对 Fe-V-C 系复合材料的研究很少,且大部分集中于铸造法的原位合成方面,只有少部分是关于场辅助燃烧合成以及堆焊法原位合成的研

究,而且在堆焊法的研究中,V 元素的添加量很少,不足以形成弥散分布的碳化钒颗粒构成的耐磨骨架. 另外,关于等离子弧堆焊 Fe-V-C 系堆焊合金的研究几乎没有,所以有必要做一些关于等离子弧堆焊高钒铁基复合材料的探索. 基于以上的分析,在 Fe-Cr-C 系合金基础上添加大量 V 元素来取代 Cr 元素,设计了 5 种 Fe-Cr-V-C 系堆焊合金,并对堆焊后的堆焊层组织和性能进行分析和比较.

1 试验方法

试验的基体采用牌号为 20g 的低碳钢. 试验的合金粉末采用 V 元素含量为 50% (质量分数,下同)的钒铁粉(100 目)、Cr 元素含量 66.8% 的高碳铬铁(100 目)、纯度 ≥99% 的石墨和 Fe 元素含量 99% 的还原铁粉.

将低碳钢钢板加工成 120 mm × 100 mm × 12 mm 的标准试板,用作合金粉末的基体. 将合金粉末按 V 元素含量为 13.1%,17.0%,19.7%,23.6% 和 26.2% 分别制备 5 组合金系统,其中 C 元素的含量按 Cr,V 元素形成碳化物和焊接过程中烧损所需量添加,用稀释的水玻璃将配制好的合金系统调匀并平铺到准备好的铁基试件上,粉末厚度为 3 mm. 堆焊前试板要在 MODEL ZYH-30 自控远红外电焊条烘干炉中进行烘干除水处理. 等离子弧堆焊机电源功率 50 kW,空载电压 90 V,电弧电压 20 ~ 30 V,焊机的焊接电流 140 ~ 150 A,电弧横摆宽度 25 mm,摆

收稿日期: 2010-07-20

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室项目(2008S164); 沈阳市科技攻关项目(10812299-1-00)

动频率 25 次/min, 电弧移动速度 20 mm/min, 电极距离工件表面距离 10 ~ 15 mm.

堆焊完成后, 利用电动砂轮对试件进行表面打磨, 将焊道表面打磨平整. 用线切割机将打磨好的试件切成磨损试样和金相试样, 用于后期试验的性能试验和组织观察. 利用 HRC-150 型洛氏硬度计测量金相试样表面的宏观硬度. 测试宏观硬度时, 在每个试样堆焊层表面上均匀的测三点硬度, 最后取算术平均值作为堆焊层的宏观硬度. 利用 MLS-23 型湿橡胶轮式磨损试验机测量磨损试样的失重量. 磨损试验参数如下: 胶轮转速 240 r/min, 胶轮直径 150 mm, 胶轮表面压力 1.5 MPa, 20 ~ 40 目的石英砂. 耐磨性以试样磨损前后质量之差来衡量, 而试样质量在精度为 0.1 mg 的 TG328A 型分析天平称量. 采用 PW3040/60 型 X 射线衍射 (XRD)、日立 S-3400N 型扫描电子显微镜对堆焊层的物相及组织进行分析.

2 试验分析

2.1 V 元素含量对堆焊层力学性能的影响

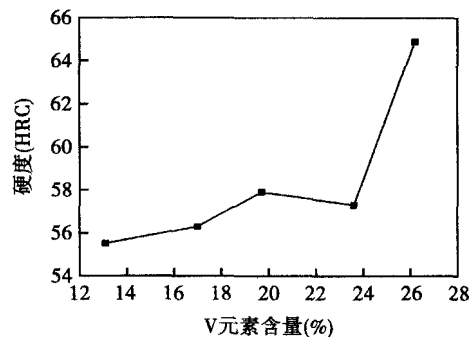
图 1 为 V 元素含量对 Fe-Cr-V-C 堆焊合金硬度和耐磨性能的影响. 由图 1a 可知, 随着 V 元素含量的增加, 堆焊层硬度逐渐提高, 只有在 V 元素含量为 23.6% 时硬度略有下降, 但是不影响硬度总体升高的趋势, 当 V 元素含量 26.2% 时, 最大平均硬度达到了 64.9 HRC, 单点硬度能达到 66.6 HRC, 提高幅度非常明显.

由图 1b 可以看出, 随着 V 元素含量的增加, 磨损失重量逐渐下降, 虽然在 V 元素含量为 17.0% 时略有升高, 但是磨损失重量总体呈下降趋势, V 元素含量为 26.2% 时磨损失重量大幅度下降到 0.078 4 g. 由此可见, 当合金系统中 V 元素含量为 26.2% 时, 该合金的力学性能得到了很大的改善.

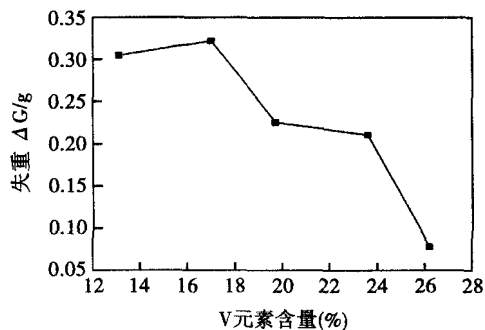
综合图 1 中的数据可以发现只有在 V 元素含量为 26.2% 时, 堆焊层的力学性能才发生突变, 而在其它参数下变化较平稳. 这是因为, 当 V 元素含量较小时, 钒与碳结合形成碳化物的机会较小, 其对提高堆焊层的性能的作用效果不是很明显, 当 V 元素含量达到一定程度 (26.2%) 时, 堆焊层中钒的碳化物显著增多, 使堆焊层的性能发生突变.

2.2 堆焊层的物相分析

图 2 为 V 元素含量为 26.2% 时的 XRD 分析图谱. 从图 2 可以看出, 堆焊层中的钒以 VC 和 V_6C_5 形式出现. 其原因为 V 元素与 C 元素结合能力很强, 一般在铁合金中和 C 元素反应生成碳化钒, 化



(a) V 元素含量对堆焊层硬度的影响



(b) 不同 V 元素含量下的磨损失重情况

图 1 V 元素含量对 Fe-Cr-V-C 堆焊合金力学性能的影响
Fig. 1 Effect of vanadium content on mechanical properties of Fe-Cr-V-C surfacing alloy

学式为 VC, 但有时 C 和 V 原子向晶核靠拢、堆砌, C 原子发生有序缺位, 于是就局部形成 V_8C_7 和 V_6C_5 等碳化钒相^[4-7]. 此外, 由 XRD 图谱可知, 堆焊层中还含有马氏体和 $(Fe, Cr, V)_7C_3$. 其中马氏体为基体, 而 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 为多元复合物, 属 M_7C_3 型碳化物, 同 Cr_7C_3 一样具有高硬度、高耐磨性.

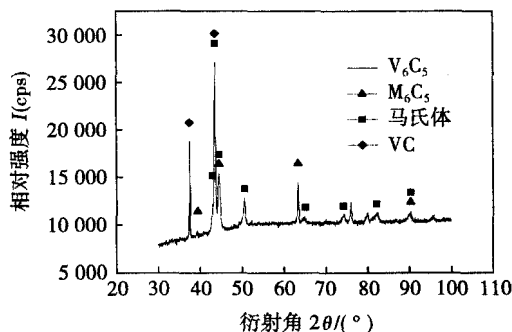


图 2 V 元素含量为 26.2% 的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD pattern of 26.2% V

2.3 堆焊层的组织分析

图 3 为 V 元素含量为 26.2% 时 Fe, C, Cr 和 V 四种元素在合成产物显微组织中的分布情况. 由图 3 可以看出, 黑色团球状组织上富集了 V 和 C 两

种元素,而Fe元素在该组织上基本没有分布,结合上面XRD分析得出黑色团球状碳化物即是碳化钒.由图3可以看出,Cr元素沿着晶界分布,晶界内也有大量的C元素分布,另外,晶界内还分布了少量的Fe和V元素,结合XRD分析,可以推断出图3中

晶界内断续网状组织为 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 复合物. Fe元素大量分布在灰色区域,而其它三种元素在灰色区域中分布很少,因此,灰色组织为马氏体,其中也固溶了少量的Cr和V元素,从而起到固溶强化的作用.

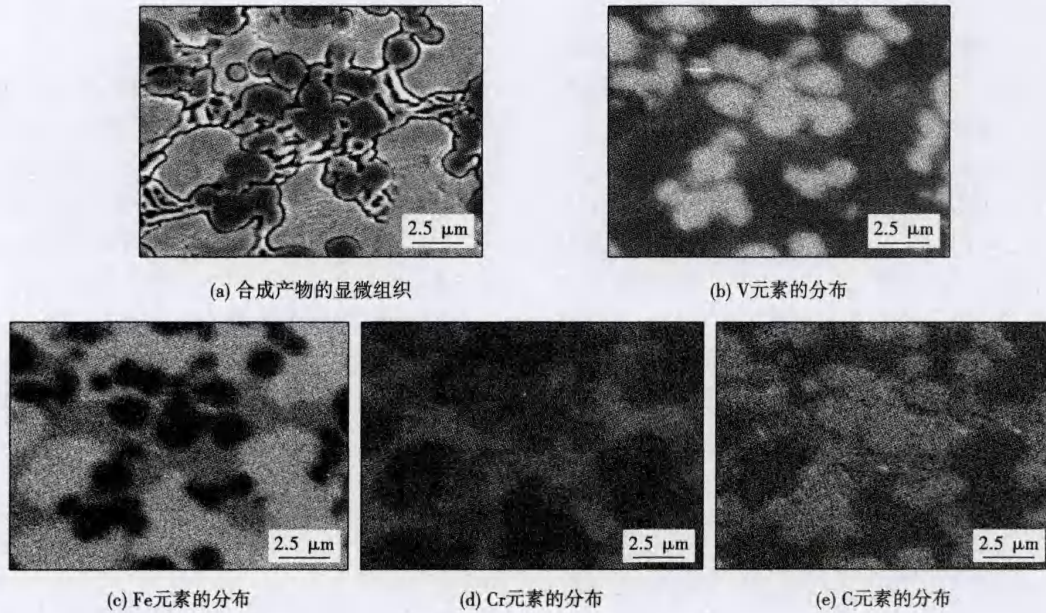


图3 元素在组织中的分布
Fig. 3 Distribution of element in microstructure of surfacing overlay

2.4 V元素含量对组织形态和分布的影响

Fe-Cr-V-C系等离子弧堆焊合金组织如图4所示,当V元素含量为13.1%时(图4a),碳化钒多呈开花状,且分布较少,基体为片状马氏体;当V元素含量为19.7%时(图4b),碳化钒呈团球状分布在马氏体基体中,碳化钒含量有所增加;当V元素含量增加到26.2%时(图4c),基体中形成了大量的碳化钒球状细小颗粒,且均匀分布在基体中. 碳化钒大都

作为形核中心存在,这是因为熔点高的碳化钒首先从液相中析出,并成为马氏体基体的异质核心,马氏体晶胚沉积到碳化钒核心周围依附碳化钒核心长大. 这些大量弥散分布的碳化钒是提高堆焊层力学性能的基础,也是图1中力学性能变化的根本原因.

V元素含量达到26.2%之后,全部生成板条状马氏体,这是由于马氏体的形态随C元素含量的变化而变化,当V元素含量少的时候,反应剩余的C

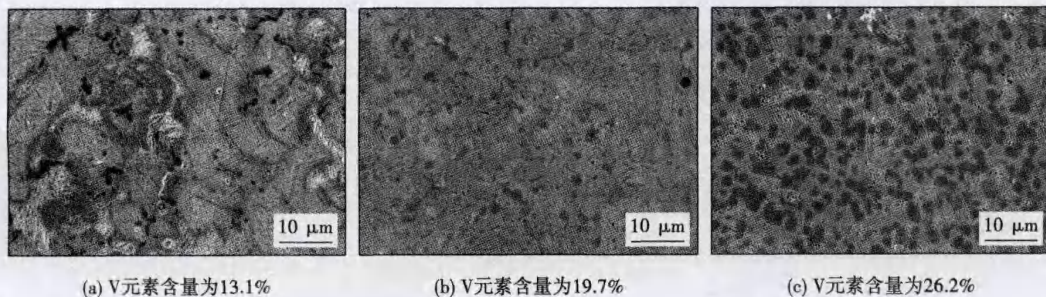


图4 堆焊金属组织
Fig. 4 Microstructure of surfacing metal

元素多,于是生成片状马氏体,当 V 元素含量达到一定量后,剩余的 C 元素变少,于是生成板条状马氏体。片状马氏体韧性差,而且容易在磨损中发生滑移变形,不利于提高磨损性能,板条状马氏体硬度高,韧性好,作为基体能增强合金的性能。

堆焊层组织中 M_7C_3 复合物均以网状断续结构分布在晶界中,并没有形成典型的六角形组织,这是由于合金元素的加入改变 M_7C_3 的微观结构^[8]。断续网状结构可以定扎基体及碳化钒的滑移,进而提高堆焊层的耐磨性。

2.5 磨损形貌分析

图 5 为堆焊层磨损形貌。从图 5 可以看出, V 元素含量 13.1% 和 26.2% 的两个试样磨损表面很难发现粘着磨损的痕迹,这是由于高强度、高硬度的马氏体基体提高了合金的抗粘着磨损和抗疲劳磨损能力^[9]。V 元素含量为 13.1% 时,试样表面磨痕较深且犁沟较多,见图 5a 所示,此时磨损严重,这是由于基体为韧性差的片状马氏体,堆焊层中形成的硬质相少,耐磨骨架作用很小,开花状的碳化钒与基体结合不充分,且片状马氏体基体性能差,所以硬质相容易脱落,脱落后的硬质相被压入基体后继续推压产生显微切削,使堆焊层加快磨损。当 V 元素含量增加至 26.2% 时(图 5b),可以看出磨痕较浅且犁沟较少,磨损较轻,这是由于大量弥散分布的球形碳

化钒及断续网状的 M_7C_3 复合物构成坚实的耐磨骨架,当基体合金被磨掉时,硬质相组成的耐磨骨架凸显出来,作为摩擦力的承受者,而此耐磨骨架较基体有更高的硬度和耐磨性,因此在磨损过程中表现出更强的耐磨性,进而使堆焊层的耐磨性得到提高。

3 结 论

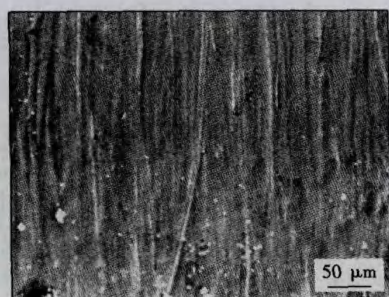
(1) 钒作为强碳化物形成元素,在 Fe 基体上形成弥散的碳化钒,显著提高了堆焊层的力学性能。

(2) 当 V 元素含量达到 26.2% 时,力学性能最佳,平均硬度达到 64.9 HRC,磨损失重降低到 0.078 4 g。

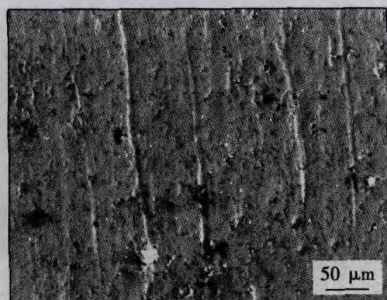
(3) 在 Fe-Cr-V-C 系合金中,由于钒的加入而原位自生为碳化钒,使堆焊层由碳化钒、 M_7C_3 和马氏体基体组成,在 V 元素含量达到 26.2% 时,马氏体基体中形成了大量的细小弥散的球状碳化钒颗粒,碳化钒与断续网状 M_7C_3 碳化物构成坚实的耐磨骨架结构,大大提高了堆焊层的耐磨性。

参考文献:

- [1] 陶杰,赵玉涛,潘蕾,等. 金属基复合合金制备新技术导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 刘政军,张桂清,尹奕君,等. 合金元素对铁基耐磨堆焊合金性能的影响[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 69-72.
Liu Zhengjun, Zhang Guiqing, Yin Yijun, et al. Effect of alloy elements on properties of iron-base hardfacing alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 69-72.
- [3] 赖丽,王一三,丁义超,等. 碳化钒颗粒增强钢结硬质合金的研究[J]. 工具技术, 2007, 41(12): 25-28.
Lai Li, Wang Yisan, Ding Yichao, et al. Study on VC particulates reinforced steel-bonded cemented carbide[J]. Tool Engineering, 2007, 41(12): 25-28.
- [4] 雍歧龙,阎生贡,裴和中,等. 钒在钢中的物理冶金学基础数据[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(5): 63-66.
Yong Qilong, Yan Shengong, Pei Hezhong, et al. Physical metallurgical data of vanadium in steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(5): 63-66.
- [5] Hollox G E, Edington J W, Scarlin R B. Identity of vanadium carbide precipitates in Fe-1V-0.02Nb-0.2C and Ni-4V-0.4C alloys[J]. Journal of the Iron Steel Institute, 1971, 209(10): 839-841.
- [6] Billingham J, Bell P S, Lewis M H. Vacancy short-range order in substoichiometric transition metal carbides and nitrides with the NaCl structure[J]. Acta Cryst., 1972, A28(6): 802-806.
- [7] Dunlop G L, Carlsson C J, Frimodig G. Precipitation of VC in ferrite and pearlite during direct transformation of a medium carbon microalloyed steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9A, 261-266.



(a) V元素含量为13.1%



(b) V元素含量为26.2%

图 5 堆焊层金属磨损形貌

Fig. 5 Wear track morphology of welding metal

性能强。即使待测线条上有小的扰动、断裂,甚至是虚线,经 Hough 变换后,仍可得到明显的峰点。

5 结 论

(1) 激光视觉水下焊缝图像在不同水环境下有不同的特点,干扰噪声差异也大。

(2) 水下焊缝图像的预处理方法为依次经幂次变换、对比度受限直方图均衡、Top-hat 运算以及全方位结构元素层叠运算,达到了满意的结果。

(3) 经与 C 均值聚类图像分割效果比较,Mean Shift 图像分割算法对水下焊缝图像有明显的优越性。

(4) 直线 Hough 变换提取 V 形水下焊缝特征点,结果具有唯一性,且抗干扰能力强。

参考文献:

- [1] 梁亚军, 薛 龙, 吕 涛, 等. 水下焊接技术及其在我国海洋工程中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2009(4): 17-20.
Liang Yajun, Xue Long, Lv Tao, et al. Underwater welding and application in China ocean engineering[J]. MW Metal Forming, 2009(4): 17-20.
- [2] Ahmad B, Jalal J M. Simulation and tracking control based on-neural-network strategy and sliding-mode control for underwater remotely operated vehicle[J]. 16th European Symposium on Artificial Neural Networks 2008, 2009, 72(7-9): 1934-1950.
- [3] 邹春华. 激光视觉传感器水下焊缝识别与跟踪技术研究

[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.

- [4] 李 冰. 水下机器人焊缝图像识别算法的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [5] 关新平, 赵立兴. 图像去噪混合滤波方法[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(3): 332-337.
Guan Xinping, Zhao Lixing. Mixed filter for image denoising [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 332-337.
- [6] Yoshihiro H, Hidefumi K. A fast morphological filtering algorithm[J]. Systems and Computers in Japan, 2003, 34(14): 23-33.
- [7] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] Sudhir R, Allan de M M, José C P. Mean shift: an information theoretic perspective[J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(3): 222-230.
- [9] Zheng Liying, Zhang Jingtao, Wang Qianyu. Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 93-98.
- [10] 郭斯羽, 孔亚广, 张煦芳. 基于 Hough 变换的角点检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2424-2429.
Guo Siyu, Kong Yaguang, Zhang Xufang. Corner detection algorithm based on Hough transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2424-2429.
- [11] 腾今朝, 邱 杰. 利用 Hough 变换实现直线的快速精确检测[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 234-237.
Teng Jinzhao, Qiu Jie. Fast and precise detection of straight line with hough transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(2): 234-237.

作者简介: 刘苏宜,女,1974 年出生,博士,副教授。主要研究方向为焊接自动化、图像处理、视觉传感等方面。发表论文 10 余篇。
Email: Liusuyi@ncu.edu.cn

[上接第 44 页]

- [8] 刘政军, 郝雪枫, 季 杰, 等. 铬硼钨钼铌钽系高温抗磨料磨损堆焊条的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 1995, 17(4): 73-76.
Liu Zhengjun, Hao Xuefeng, Ji Jie, et al. Study on temperature wear resisting electrodes of iron base of Cr-B-W-V-Mo-Nb system [J]. Journal of Shenyang Polytechnic University, 1995, 17(4): 73-76.

- [9] 高彩桥. 摩擦金属学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.

作者简介: 宗 琳,女,1979 年出生,博士研究生,讲师。研究方向为材料表面强化。发表论文 10 余篇。Email: su_yunhai@yahoo.com.cn

通讯作者: 苏允海,男,讲师。Email: suyunhai800307@163.com