

Cr₃C₂ 基金属陶瓷的研究进展*

李立鑫** 李一*** 柳学全 丁存光

(钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 本文从 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的性能特点、高性能 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的制备技术、Cr₃C₂ 基金属陶瓷的应用三个方面对 Cr₃C₂ 基金属陶瓷进行了详细的介绍, 综述了近年来学界关于 Cr₃C₂ 基金属陶瓷块体材料及涂层材料的研究成果, 指出随着科学技术的进步, 具有优异耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗氧化特点的 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的综合性能会不断提高, 在现代工业各个领域中的应用范围将更为宽广。

关键词: Cr₃C₂ 基金属陶瓷; 制备工艺; 摩擦磨损

Development of chromium carbide based cermets

Li Lixin, Li Yi, Liu Xuequan, Ding Cunguang

(Powder Metallurgical Research Department, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, chromium carbide based cermets are presented in detail from three abstracts: characteristic properties of chromium carbide based cermets, preparation technologies of high performance chromium carbide based cermets and applications of chromium carbide based cermets. The research achievements are summarized from bulk and coating materials for the past few years. With the development of science and technology, the combination properties of chromium carbide based cermets, owning the characteristics of wear resistance, oxidation resistance, corrosion resistance and thermostability, will be improved continually and its applications will be broadened.

Key words: chromium carbide based cermets; preparation technology; friction and wear

碳化物金属陶瓷, 由于兼具金属和陶瓷材料的特性, 具有强度高、耐磨性好等优良特点, 被誉为“工业牙齿”, 广泛应用于机械、冶金、矿山、石化、能源、电子、航天航空等领域, 已成为现代工业部门和新技术领域不可缺少的工具材料和结构材料。

碳化物金属陶瓷按照陶瓷相的不同主要分为三种, 即 WC 基金属陶瓷、TiC 或 Ti(CN) 基金属陶瓷及 Cr₃C₂ 基金属陶瓷, 其中, 以 Cr₃C₂ 作为硬质相, Ni 或 Ni 基合金作为粘结相制备的 Cr₃C₂ 基金属陶瓷材料, 由于其密度低、强度高, 具有良好的耐磨、耐腐蚀性及高温红硬性, 在密封、热加工、高性能热动力机械及高温传动设备等零部件上具有广泛的应用前

景^[1-2], 且随着制备技术的不断发展, Cr₃C₂ 基金属陶瓷力学性能不断提高, 其应用领域更加宽广。目前, 关于 Cr₃C₂ 基金属陶瓷性能和应用的论文不多, 本文综述了近年来 Cr₃C₂ 基金属陶瓷所取得的一些重要研究成果, 从 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的性能特点、Cr₃C₂ 基金属陶瓷高性能制备及 Cr₃C₂ 基金属陶瓷应用三个方面对其研究进展进行了较详细地介绍。

1 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的性能特点

Cr₃C₂ 基金属陶瓷是一种十分理想的耐磨、耐高温、耐腐蚀材料, 具有独特的性能优势^[3-7]。表 1 列举了两种典型 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的物理和力学性

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA031102); 中国钢研科技集团公司科技创新基金资助项目(12040860A)

** 李立鑫(1988-), 男, 硕士研究生。E-mail: lilixin0311@163.com

*** 通信作者: 李一(1968-), 男, 教授。E-mail: lyhost@sina.com

收稿日期: 2013-10-28

能,可以看出, Cr₃C₂ 基金属陶瓷具有以下特点:1) 密度低,仅为 WC-6% CO 金属陶瓷的一半左右,可有效降低高温传动设备的能耗,提高工作效率,能够满足航空航天等领域对材料轻质化的要求;2) 热导率高,其导热能力在金属陶瓷中较为突出,有利于释放因摩擦产生的热量,作为密封环使用时可以大幅改善抗热裂性;3) 硬度高,所制备零件耐磨性能好,可作为喷嘴、轴承、精轧辊导向环等耐磨材料使用;4) 力学性能优良,具有较高的抗压强度和抗弯

强度,且其高温力学性能良好,温度对其强度影响不大,如 88% Cr₃C₂-12% Ni 金属陶瓷在室温下和 1 000 °C 时的抗弯强度分别约为 730 MPa 和 680 MPa,是一种较为理想的高温材料;5) 线膨胀系数接近不锈钢,与不锈钢环座、转轴等部件焊接成一体可解决热镶装结构、热传动结构高温脱环或端面变形的问题;6) 高温红硬性优异,如 88% Cr₃C₂-12% Ni 金属陶瓷在 800 °C 时的硬度仍在 900 HV 左右,十分适合制成高温热挤压磨具、高温机械零件等。

表 1 两种典型的 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的物理和力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of two typical chromium carbide based cermets

性能	83% Cr ₃ C ₂ -15% Ni-2% W	88% Cr ₃ C ₂ -12% Ni
密度/(g · cm ⁻³)	7.0	6.9
电阻率/μΩ · cm 25 °C	84	70
热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	10.88	12.55
热膨胀系数/(μm · m ⁻¹ · °C ⁻¹)	10.71	11.10
硬度/(HV 25 °C)	1230	1300
压缩弹性模量/(GPa 25 °C)	345	333
抗压强度/(MPa 25 °C)	3450	3725
抗弯强度/(MPa 25 °C)	780	735

在具备优良物理和力学性能的同时, Cr₃C₂ 基金属陶瓷具有优异的化学稳定性(如表 2 所示 83% Cr₃C₂-15% Ni-2% W 金属陶瓷的化学稳定性),在酸、碱、海水、石油及其他腐蚀性介质中展现出优异的耐腐蚀性,被誉为金属陶瓷材料中的“不锈钢”,可制成多种阀门部件,广泛应用于石油化工领域。Cr₃C₂ 基金属陶瓷还具有优异的高温抗氧化性能,在高温氧化性环境仅发生钝性氧化,能够在表面形成由 Cr₃C₂、NiO 及尖晶石型氧化物 NiCr₂O₄ 构成的致密氧化膜^[8],使其在 1 000 °C 空气中加热 2 小时几乎无任何变化。此外, Cr₃C₂ 基金属陶瓷还具有明亮、反射率高的表面,并且无磁性,可制成光学平面、微米尖端、计量工具、高级表链等。

由于上述性能特点,独特的 Cr₃C₂ 基金属陶瓷通常可用做耐磨材料、密封材料、高温材料及涂层材料等,制成套筒轴承、垫圈、阀门、端面密封件等产品^[9-10],也因此吸引着广大学者不断地对其进行研究,近年来取得了很多重要的研究成果,主要集中在高性能 Cr₃C₂ 基金属陶瓷制备技术的发展及 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的应用研究两个方面。

表 2 83% Cr₃C₂-15% Ni-2% W 金属陶瓷的化学稳定性

Table 2 Chemical stabilities of 83% Cr₃C₂-15% Ni-2% W cermet

名称	性能指标		
	最高服役温度/°C (热挤压模具工况)	短时	1 100
抗氧化性		长时	1 000
		50% H ₂ SO ₄	3.1
耐腐蚀性	质量损失 /(g · m ⁻² · d ⁻¹)	35% HNO ₃	1.9
		50% NaOH	0.1
		5% 乳酸	0.15

2 高性能 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的制备技术

作为一种重要的碳化物, Cr₃C₂ 同 WC、TiC 一样,具有高熔点、高硬度等特征(见表 3)。因此,在早期的研究报道中,有学者考虑到利用 WC-Co 金属陶瓷的制备方法,将其制成一种新型的金属陶瓷复合材料,如 N. Petersen 等通过传统粉末冶金的方法,以 Cr₃C₂ 为硬质相、Fe 作为粘接剂,分别在 1 120 °C 和 1 150 °C 的真空烧结 15 或 30 分钟制备了 Cr₃C₂-Fe 金属陶瓷。但是,通过这种工艺制得的材料致密化不充分,密度低、性能差^[11]。为了改善其性能,广大学者从传统制备工艺优化和新工艺开发的思路出发,以期能够制备出高性能的 Cr₃C₂ 基金属陶瓷。S. Eroglu 和 C. Duran 以 Ni、Fe 为粘接剂,利用预烧-烧结工艺,在 1 000 °C 的氢气气氛下预烧 2 h 消除了坯体表面的氧化皮,而后于 1 300 °C

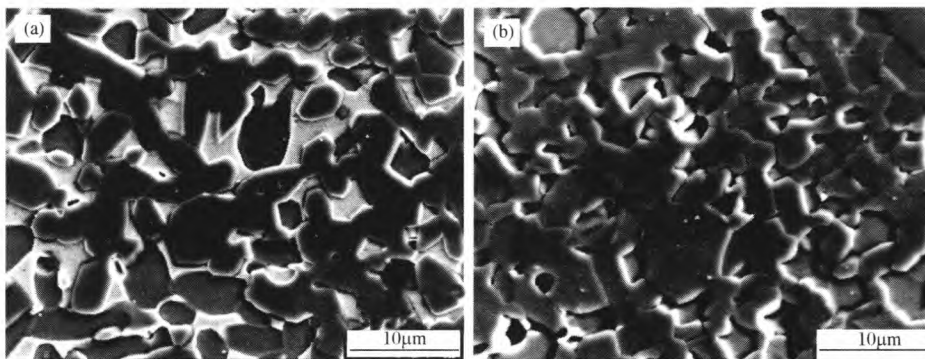
进行了 60 min 的真空烧结,制得了性能良好的 85% Cr_3C_2 -10.5% Ni-4.5% Fe 金属陶瓷^[12]。该烧结温度高于 Cr_3C_2 -Ni-Fe 的共晶温度 1 275 °C,属液相烧结工艺,所制备 Cr_3C_2 -Ni-Fe 金属陶瓷的密度较为接近理论密度,硬度达到 88HRA,抗弯强度 450 MPa,较 Petersen 制备 Cr_3C_2 基金属陶瓷的性能有了大幅度的提升。该研究表明液相烧结对 Cr_3C_2 基金属陶瓷的致密化具有良好的作用,在烧结温度保温 15 min 后,试样的密度就已经接近理论密度,再延长保温时间对液相烧结试样的影响不大,但温度过高会导致材料的组织出现异常长大,从而降低材料的综合力学性能。在此之后,两位学者又对 Cr_3C_2 -NiCr 金属陶瓷的制备工艺进行了研究,采用真空液相工艺,以 80% Ni-20% Cr 预合金为粘接剂,分别在 1 300 °C 烧结 15 min 和 30 min 的工艺条件下制得了性能更为

优异的 75% Cr_3C_2 -25% NiCr 金属陶瓷(金相组织照片见图 1),其抗弯强度分别达到 660 MPa 和 610 MPa。该研究还发现当 Cr_3C_2 含量超过 75% 后,在烧结完成致密化后,随着烧结时间的增加,复合材料的密度会有略微降低,由此会导致复合材料抗弯强度的下降^[13],但具体机理尚不明确,有待进一步研究。

表 3 三种碳化物的性能

Table 3 Properties of three carbides

名称	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	熔点 /°C	显微硬度 /GPa	弹性模量 /GPa
Cr_3C_2	6.68	1895	13.2	380
WC	15.7	2720	23.5	721
TiC	4.94	3160	31.4	321



(a)保温 15 min;(b)保温 30 min

图 1 液相烧结 Cr_3C_2 -Ni 金属陶瓷的金相组织照片Fig. 1 Metallographs of Cr_3C_2 -Ni cermets after liquid sintering

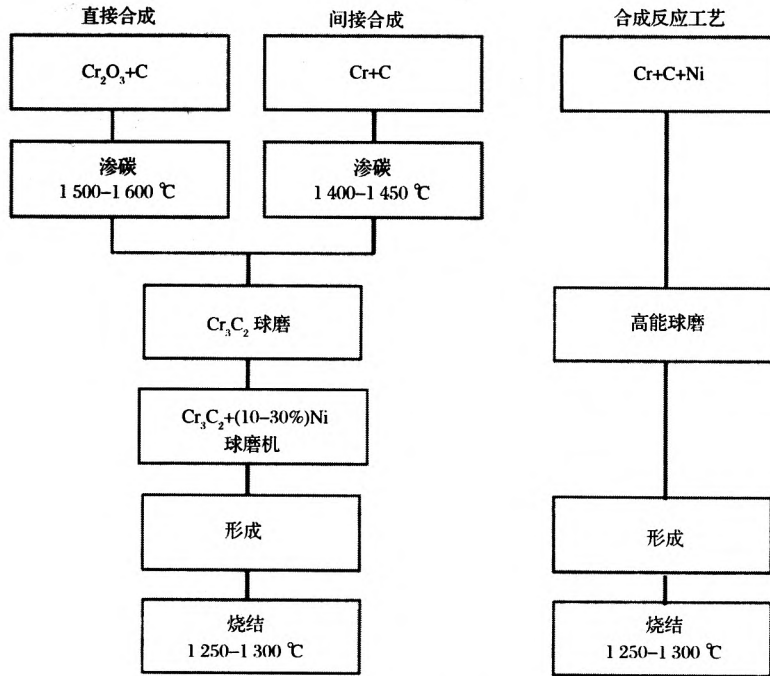
随着粉末冶金技术的不断发展,碳化反应烧结(Reactive Carburizing Sintering)的出现为 Cr_3C_2 基金属陶瓷的性能带来了新的提升。图 2 为 Cr_3C_2 -Ni 金属陶瓷生产的传统工艺及碳化反应烧结工艺,可以看出,碳化反应烧结工艺相对于传统工艺而言,其工序更为简单,尤其是简化了 Cr_3C_2 粉体的制备,避免了因此带来的能源消耗。利用这种工艺,J. Pirso 等以纯 Cr 粉、炭黑和 Ni 粉作为原料,经高能球磨后进行真空烧结,制备出了较传统真空烧结性能更为优异的 Cr_3C_2 -Ni 金属陶瓷^[14]。传统工艺制备的 85% Cr_3C_2 -15% Ni 金属的陶瓷硬度和抗弯强度分别约为 1 200 HV 和 950 MPa,而采用 1 250 °C 保温 60 min 的碳化反应烧结工艺时,其硬度约为 1 300 HV,抗弯强度约为 1 050 MPa,分别提升 8.3% 和 10.5%。

尽管碳化反应烧结制备的试样中含有部分杂质相 Cr_7C_3 ,但较之传统真空烧结制备的金属陶瓷而言,具有晶粒细小、组织分布均匀、孔隙度小的特点,如图 3 所示。

除了利用上述制备工艺外,高性能 Cr_3C_2 基金属陶瓷还可利用特殊的添加剂制得。Özer 等采取原位陷入的工艺,利用 3% Y_2O_3 稳定的四方 ZrO_2 颗粒(3Y-TZP)增强传统 Cr_3C_2 -NiCr 金属陶瓷^[15]。结果表明,添加 2% 3Y-TZP 可以有效地将 75% Cr_3C_2 -20% Ni-5% Cr 金属陶瓷的烧结温度由 1 350 °C 降至 1 300 °C,其相对密度、硬度、强度和断裂韧性分别由 97%、11.5 ± 0.5 GPa、810 ± 61 MPa、10.4 MPa $\text{m}^{1/2}$ 提高至 98.5%、11.5 ± 0.4 GPa、837 ± 73 MPa、12.1 ± 0.3 MPa $\text{m}^{1/2}$,效果十分显著。究其原因,由添加

相 3Y-TZP 纳米颗粒在烧结过程中形成的沿晶界分布的 ZrO₂ 气团(如图 4 所示),可明显提升复合材料的机械性能,尤其是能够显著提高材料的断裂韧性。

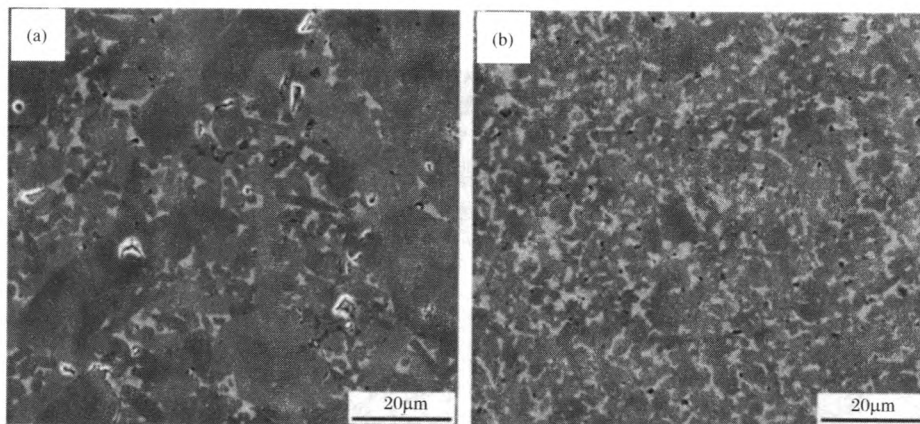
此外,由于弥散分布的 ZrO₂ 不与粘接金属发生固溶,可有效的阻止晶粒的长大,降低了材料的共晶温度,改善了材料的烧结性能。



(a) 传统制备工艺;(b) 碳化反应烧结工艺

图 2 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷的制备工艺

Fig. 2 Preparation technologies of Cr₃C₂-Ni cermets



(a) 传统制备工艺;(b) 碳化反应烧结工艺

图 3 两种不同工艺制备的 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷的金相组织照片

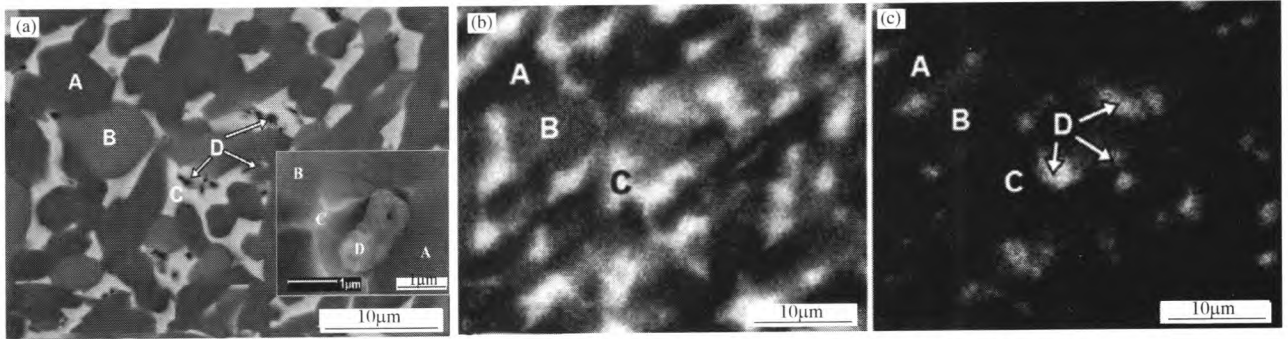
Fig. 3 Metallographs of Cr₃C₂-Ni cermets prepared by different technologies

3 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的应用

随着科技的快速发展,对材料综合性能的要求越来越高,尤其对于在极端环境服役的材料而言,由于 Cr₃C₂ 基金属陶瓷硬度高、耐磨性好,又具有优异

的耐蚀性、耐高温抗氧化性及良好的力学性能,可作为一种理想的候选材料,且用其制成阀门、套筒轴承、垫圈、热镶环等耐腐蚀、耐高温零部件已取得了成熟的应用。近年来,关于 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的应

用研究主要集中在块体材料及涂层材料上,取得了 很多重要的研究成果。



(a) SEM-BSE 照片,插图为箭头所示由纳米 ZrO₂ 颗粒聚集而成的气团;(b) Ni 富集区;(c) Zr 富集区

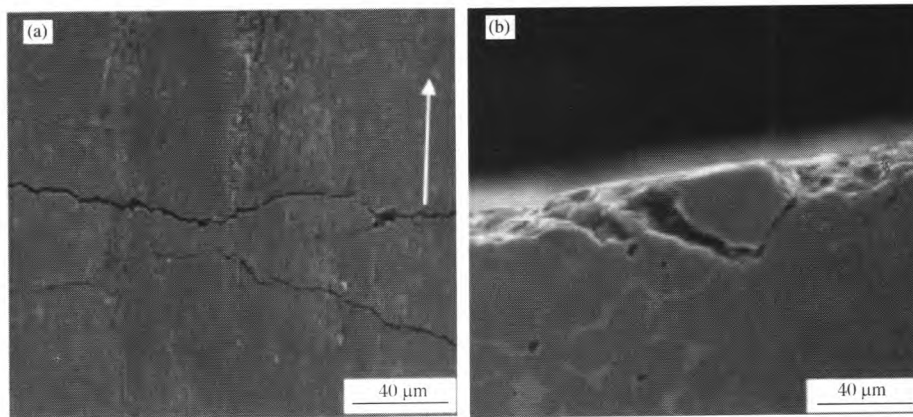
图4 3Y-TZP 增强 Cr₃C₂-NiCr 金属陶瓷的 SEM 照片

Fig. 4 SEM micrographs of 3Y-TZP strengthened Cr₃C₂-NiCr cermet

3.1 Cr₃C₂ 基金属陶瓷块体材料

Cr₃C₂ 基金属陶瓷块体材料的应用主要以耐磨材料为主,对其摩擦学行为的研究较为集中。Antonov 等以粒径 0.2 ~ 0.4mm 的 SiO₂ 为磨料,以不锈钢为对磨副,研究了温度和载荷对 1 320 °C 真空烧结制得的 Cr₃C₂-10% Ni 金属陶瓷三体摩擦行为的影响,并与 WC-Co 金属陶瓷进行了对比。结果表明, Cr₃C₂-10% Ni 金属陶瓷较 WC-Co 金属陶瓷拥有更低的摩擦系数,但磨损率很高,不适合应用于以 SiO₂ 为磨料的三体磨损^[16],但更低的摩擦系数对于精密机械的运行稳定性意义重大,可避免因摩擦波

动而产生的不利影响。Pirso 等在研究 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷的干摩擦性能时发现,其摩擦性能与成分密切相关,并呈现出较 WC-Co、TiC-NiMo 金属陶瓷更为复杂的摩擦机理,如图 5 所示。在 Ni 含量较低的 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷中,由于其较低的热导率和较高的热膨胀系数的综合作用,导致表面产生近乎垂直于滑动方向的热裂纹,而在 Ni 含量较高时,合金中粗大碳化物晶粒的断裂伴随着粘着磨损成为高粘接相合金摩擦磨损的主要特征。此外,该研究还发现 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷的接触表面摩擦热与摩擦系数不存在直接地对应关系^[17]。



(a) Cr₃C₂-10% Ni 金属陶瓷;(b) Cr₃C₂-20% Ni 金属陶瓷

图5 Cr₃C₂-Ni 金属陶瓷摩擦表面裂纹 SEM 照片

Fig. 5 SEM cracks on Cr₃C₂-Ni cermets friction surfaces

在此之后, Hussainova 等利用碳化反应烧结工艺对传统 Cr₃C₂ 基金属陶瓷的摩擦磨损性能进行了改善,研究了不同制备工艺对金属陶瓷侵蚀磨损性

能和磨粒磨损性能的影响,并对其摩擦磨损机制进行了探索。实验采用传统粉末冶金工艺和反应烧结工艺分别制备了含 Ni 质量分数为 10%、20%、30%

的 Cr_3C_2 -Ni 金属陶瓷,在表 4 所示的实验条件下进行了侵蚀磨损实验和磨粒磨损实验。结果表明,采用反应烧结工艺制备的试样具有更为优异的侵蚀磨损性能和磨粒磨损性能,其中反应烧结工艺制备的

Cr_3C_2 -30% Ni 金属陶瓷较之传统工艺所制试样,侵蚀磨损性能和磨粒磨损性能分别提升 25% 和 40%, 原因为反应烧结工艺制备的试样具有更强的界面结合强度和更为均匀的硬质颗粒分布^[18]。

表 4 Hussainova I 侵蚀磨损和磨粒磨损实验参数
Table 4 Erosion data and abrasion data of Hussainova I test

侵蚀磨损		磨粒磨损	
试样尺寸/mm	28 × 18 × 6	试样尺寸/mm	23 × 14 × 5
冲击角/(°)	30, 45, 60, 75, 90	垂直载荷/N	20
冲击颗粒初速度/(m · s ⁻¹)	60, 80	线速度/(m · s ⁻¹)	2.8
磨粒	SiO ₂	滑动距离/m	50
温度/°C	23	磨粒	Al ₂ O ₃

3.2 Cr_3C_2 基金属陶瓷涂层材料

Cr_3C_2 基金属陶瓷不仅可以作为块体材料使用,其还可作为涂层材料应用磨煤机、球磨机、颚板、铲斗等机械设备上,提高使用寿命几倍以上。常见的制备 Cr_3C_2 基金属陶瓷涂层的传统方法有激光熔覆、等离子喷涂(焊)等,在此基础上又发展了一些新的方法,诸如超音速火焰喷涂(HVOF)、真空熔敷等,所制涂层组织缺陷较少,解决了界面结合强度低、涂层易于剥落的问题,大幅提升了材料的力学性能^[19-20]。

Ji 等利用 HVOF 的新工艺制备了 Cr_3C_2 -NiCr 复合涂层,研究了不同工艺参数对涂层组织性能和摩擦磨损性能的影响^[21]。实验表明,在靠近基体的涂层部分,会出现非晶态的组织,而在基体内部,晶粒的大小在几纳米到几十纳米, Cr_3C_2 经 HVOF 后会明显减少,转化为环绕 Cr_3C_2 晶粒分布的 Cr_7C_3 和弥散分布于 NiCr 粘接相中的纳米晶 Cr_{23}C_6 。在同干砂橡胶轮进行磨损试验时,其主要磨损机制为碳化物剥落所造成的对金属粘接相 NiCr 的犁沟和切削效应,碳化物颗粒的大小和含量是影响涂层摩擦磨损性能最为主要的因素,磨损失重大体同碳化物颗粒大小的平方根成正比,并反比于碳化物的体积分数。因此,高体积分数的细颗粒碳化物与粘接相具有更好的结合强度,也具有更加优异的摩擦磨损性能。此外, Cr_7C_3 的形成和沉淀也能够有效防止犁沟效应的发生,从而改善摩擦性能。

为解决摩擦偶件材料磨损率较高的问题,并改善机械部件的运行稳定性, Cr_3C_2 基金属陶瓷减摩涂层逐渐成为了研究热点,其减摩性能主要通过添加固体润滑剂实现。林峰等利用镍铬合金润湿碳化

铬、银包覆氟化物共晶体的方法改善传统等离子喷涂工艺,有效的降低了传统等离子喷涂过程中脱碳、烧损的问题,获得了组织均匀、孔隙率低的自润滑涂层,其摩擦因数仅有 0.18 ~ 0.2,收效显著^[22]。张佳平等利用超音速火焰喷涂技术制备了含有氟化物的 Cr_3C_2 -NiCr 复合涂层,获得较好的自润滑性能,且界面结合牢固,在 20 ~ 700 °C 的温度区间内可承受风冷热震循环实验 1 000 次以上^[23]。

Yang 等利用 WS_2 为自润滑相,利用激光熔覆技术在 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢基体上制备了 Cr_3C_2 -NiCr-30% WS_2 自润滑涂层,并研究了其相组成、微观结构和摩擦磨损性能^[24]。结果表明,涂层由 Cr_7C_3 、 γ -(Fe, Ni)、(Cr, W)C 三种主体相和 WS_2 、CrS 两种润滑相组成,在同 Si_3N_4 球对摩时具有较 Cr_3C_2 /NiCr 更低的摩擦因数,随温度的上升,其摩擦因数逐渐下降,但磨损率却随之上升。添加 WS_2 后,涂层在室温、300 °C、600 °C 时的磨损机理分别为轻微磨粒磨损和黏着磨损、中度磨粒磨损和黏着磨损以及严重的塑性变形和氧化磨损依次转变为微观剥落和脆性相拉出、转移膜的产生破坏以及严重的磨粒磨损,涂层在室温到 300 °C 的温区内具有良好的自润滑减摩性能。以 Yang 的研究基础上, Liu 等以 1Cr18Ni9Ti 不锈钢为基体,制备出含有 WS_2 和 CaF_2 自润滑剂的 Cr_3C_2 -NiCr 涂层材料,获得了良好的高温自润滑减摩性能^[25]。结果表明,在激光熔覆的过程中, Cr_3C_2 -NiCr-15wt% WS_2 -15% CaF_2 混合粉体中的减摩组元 WS_2 和 CaF_2 均发生了分解,形成了新的自润滑相 CrS,在同 Si_3N_4 球对摩的过程中,与摩擦表面的摩擦转移膜共同起到减摩润滑作用,在室温和 300 °C、600 °C 的条件下均获得了更低

的摩擦因数,且在 300 °C 时磨损率很低。

4 结语

Cr_3C_2 基金属陶瓷由最初以 Fe 为粘结剂发展到以 Ni、Ni-Fe、Ni-Cr 为粘结剂,制备方法由传统的粉末冶金工艺发展到碳化反应烧结工艺,由传统的激光熔覆、等离子喷涂(焊)发展到超音速火焰喷涂(HVOF)、真空熔敷等, Cr_3C_2 基金属陶瓷块体材料及涂层的综合性能有了大幅度的提升,其应用范围也逐渐扩大。不过, Cr_3C_2 基金属陶瓷同 WC 基、TiC 或 Ti(CN)基金属陶瓷相比,其强度仍有一定差距,因此对其强度的提升仍是 Cr_3C_2 基金属陶瓷研究的重大课题,此外,由于 Cr_3C_2 基金属陶瓷作为耐磨材料及减摩涂层的应用增加,对其摩擦磨损机理的深入研究也具有重要意义。相信随着科学技术的进步, Cr_3C_2 基金属陶瓷性能的不断提,具有优异耐磨损、耐高温、耐腐蚀、抗氧化性能的 Cr_3C_2 基金属陶瓷将在机械、冶金、矿山、石化、能源、电子、航天航空等领域拥有更为广阔的应用。

参考文献

- [1] 国外硬质合金编写组. 国外硬质合金. 北京:北京冶金工业出版社, 1976
- [2] Romero J, Lousa A, Mart'inez E, et al. Nanometric chromium/chromium carbide multilayers for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 163: 392 - 397
- [3] 吴月天. 碳化铬硬质合金密封环的研制. *流体工程*, 1987(11): 32 - 35
- [4] Ralph W, Stevenson. *Cemented Carbides*. ASM handbook, 1998, 7:773 - 783
- [5] Tracey V A. Nickel in hardmetals. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 1992, 24(1): 7 - 13
- [6] 张立. 碳化铬基硬质合金中的异常梯度结构. *粉末冶金材料科学与工*, 2001(1):19 - 23
- [7] 吴月天. 碳化铬硬质合金的研制及其在机械密封中的应用. *硬质合金*, 1988(3):11 - 15
- [8] 赵能伟, 郑勇, 刘林艳. Cr_3C_2 基金属陶瓷高温抗氧化性能的研究. *硬质合金*, 2008, 25(2):67 - 72
- [9] Kaur M, Singh H, Prakash S. Surface engineering analysis of detonation-gun sprayed Cr_3C_2 -NiCr coating under high-temperature oxidation and oxidation-erosion environments. *Surface & Coating Technology*, 2011, 206: 530 - 541
- [10] Pirso J, Viljus M, Juhani K, et al. Two-body dry abrasive wear of cermets. *Wear*, 2009, 26: 21 - 29
- [11] Petersen N. *Modern Developments in Powder Metallurgy Metal Powder Industries Federation*. N J: Princeton, 1988, 20:377 - 382
- [12] Eroglu S, Duran C. Processing and properties of a 85% Cr_3C_2 -10.5%Ni-4.5% Fe cermet. *Scripta Materialia*, 1997, 37(7): 991 - 997
- [13] Duran C, Eroglu S. Liquid-phase sintering and properties of Cr_3C_2 /NiCr cermets. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 74: 69 - 73
- [14] Pirso J, Viljus M, Letunovits S, et al. Reactive carburizing sintering—A novel production method for high quality chromium carbide-nickel cermets. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2006, 24:263 - 270
- [15] Özer A, Kriven W M, Tür Y K. The effect of 3mol% Y_2O_3 stabilized ZrO_2 produced by a steric entrapment method on the mechanical and sintering properties of Cr_3C_2 based cermets. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 556: 878 - 884
- [16] Antonov M, Hussainova I, Veinthal R, et al. Effect of temperature and load on three-body abrasion of cermets and steel. *Tribology International*, 2012, 46: 261 - 268
- [17] Pirso J, Viljus M, Letunovits S. Friction and dry sliding wear behaviour of cermets. *Wear*, 2006, 260: 815 - 824
- [18] Hussainova I, Pirso J, Antonov M, et al. Erosion and abrasion of chromium carbide based cermets produced by different methods. *Wear*, 2007, 263(7): 905 - 911
- [19] 林化春, 丁润刚. 镍基金属—碳化铬复合涂层固体界面的结合问题. *钢铁研究学报*, 1996, 8(1):33 - 36
- [20] 林化春, 丁润刚, 姜建平. 镍基金属碳化铬复合涂层显微组织和相结构分析. *金属热处理学报*, 1996, 17(2):55 - 58
- [21] Ji G C, Li C J, Wang Y Y, et al. Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr_3C_2 -NiCr coating. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200: 6749 - 6757
- [22] 林峰, 任先京, 李振铎, 等. 碳化铬基自润滑耐磨涂层材料的制备及表征. *有色金属(冶炼部分)*, 2006(增刊):68 - 70
- [23] 张佳平, 王璐, 杨中元, 等. 超音速火焰喷涂含氟化物的碳化铬/镍铬涂层结构及性能. *中国表面工程*, 2011, 24(2):46 - 50
- [24] Yang M S, Liu X B, Fan J W, et al. Microstructure and wear behaviors of laser clad NiCr/ Cr_3C_2 - WS_2 high temperature self-lubricating wear-resistant composite coating. *Applied Surface Science*, 2012, 258: 3757 - 3762
- [25] Liu X B, Liu H Q, Liu Y F, et al. Effects of temperature and normal load on tribological behavior of nickel-based high temperature self-lubricating wear-resistant composite coating. *Composites: Part B*, 2013, 53: 347 - 354