

冷喷涂制备颗粒增强钛基复合材料涂层研究

Investigation on Particles Reinforced
Titanium Matrix Composite Coating
Fabricated by Cold Spraying

黄春杰¹, 李文亚¹, 余敏^{1,2}, 廖汉林²

(1 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2 贝尔福-蒙贝利亚尔技术大学 LERMPS 实验室, 法国 贝尔福 90010)

HUANG Chun-jie¹, LI Wen-ya¹, YU Min^{1,2}, LIAO Han-lin²

(1 State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2 Laboratory for Study and Research into Materials, Processes and Surfaces, Technical University Belfort Montbeliard, Belfort 90010, France)

摘要: 以 Ti 粉为复合材料基体相, 不规则的 SiC 粉为增强相, 采用冷喷涂技术制备了 SiC 颗粒增强钛基复合材料涂层, 研究了硬质相对复合涂层的显微组织和显微硬度的影响。结果表明: 制备的复合涂层由两个明显的区域组成: 表层的多孔区和内部的致密区, 随距离涂层表面深度的增加, 涂层的气孔率迅速下降; 原始喷涂粉末中 SiC 的体积分数为 30%, 沉积后的复合涂层中 SiC 体积分数约为 10%; 此外, 增强相 SiC 颗粒的加入不仅可有效地降低涂层的气孔率, 还显著地提高了喷涂态涂层的显微硬度值, 由 $(72 \pm 28) \text{HV}_{0.1}$ 提高至 $(125 \pm 17.75) \text{HV}_{0.3}$ 。

关键词: 冷喷涂; PRTMC; SiC; 显微组织; 显微硬度

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.04.001

中图分类号: TB331; TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)04-0001-05

Abstract: SiC particles reinforced Ti matrix composite (PRTMC) was prepared by cold spraying, using titanium metallic matrix blended with reinforcement of irregular SiC powder as feedstock. The effect of SiC reinforcement on the microstructure and microhardness of the composite coating was studied. The results show that two distinguishable regions exist in the deposited composite coating: the outer region and the inner region. The outer region presents a porous microstructure, while the inner region has a dense microstructure. The porosity of the coating becomes smaller with the increasing of the depth from the surface towards the boundary. The volume fraction of SiC particles in the deposited coating is 10% compared to that of 30% in the feedstock. Furthermore, the addition of SiC particles can effectively reduce the coating porosity, and greatly increases the microhardness of cold-sprayed coating from $(72 \pm 28) \text{HV}_{0.1}$ to $(125 \pm 17.75) \text{HV}_{0.3}$.

Key words: cold spraying; PRTMC; SiC; microstructure; microhardness

由于 Ti 及 Ti 合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀、可焊性好等优点, 使其成为理想的复合材料基体相, 而 SiC 具有抗腐蚀性、高模量以及高温高强度等优良性能, 成为最具吸引力的增强体材料。颗粒增强钛基复合材料 (Particles Reinforced Titanium Matrix Composite, PRTMC) 不仅保持了金属基复合材料高的比强度、比刚度以及中等温度下的耐热性、抗蠕变性能等优点, 且具有各向同性、制造简单、成本低以及优良的二次加工等特点, 近年来已广泛应用在汽车发动机的

气门阀、连杆和导弹尾翼等领域^[1,2]。随着航空航天技术的发展, 特别是飞行器速度和有效载荷结构质量比提高, 先进复合材料成为最主要的航空航天结构新材料, 预计 PRTMC 的应用领域会更加广阔, 例如在航天航空中制造超高音速运输飞机的蒙皮以及工作温度为 650~1000℃ 的航空发动机部件^[3,4], 特别是使用钛基复合材料后可使飞机的高压压气机整体叶盘减重 70% 以上^[3,5]。另一方面, 由于陶瓷颗粒的加入使复合材料具备良好的耐磨性能, 结合钛耐蚀性的特点可

满足耐磨耐蚀环境的需求。然而 PRTMC 传统制备方法很难避免有害的界面反应,降低了性能。近年来发展了预处理熔炼技术^[6]、自蔓延高温合成工艺及原位反应热压技术等^[7],改善了复合材料性能,但增加了成本。因此,发展低成本高性能的 PRTMC 制备技术已成为当今研究的热点之一。

冷喷涂作为新型的复合涂层制备技术,通过低温($<600^{\circ}\text{C}$)、高速($300\sim1200\text{m/s}$)固态金属粒子($5\sim50\mu\text{m}$)的塑性变形而沉积涂层^[8]。由于其相对高的沉积效率、生产率及低的生产成本,近年来得到了国际上广泛关注,已经成功制备大部分金属(如 Al, Cu, Ti, Ta 等)、合金(如 Al 合金、Cu 合金、不锈钢、高温合金等)、复合涂层(Cu/W, Ti/Al, WC-Co, Al/陶瓷等)以及一些功能涂层(如非晶涂层、 TiO_2 光催化涂层等)。与传统热喷涂的高温热源相比,冷喷涂的低温使其在制备金属基复合材料(Metal Matrix Composite, MMC)时可完全避免基体相和增强体之间的化学反应等,成为制备高性能 MMC 涂层非常有效的方法^[9]。实现相应块材的高效喷涂成形和高性能 PRTMC 的低成本制备。此外,还可通过调控硬质相的含量与分布获得高质量的复合涂层,预计可提高 Ti 或 Ti 合金汽车部件表面的耐磨性以及应用于破损零部件的高效修复。

至今,有关冷喷涂制备颗粒增强 Ti 或 Ti 合金基复合材料的研究报道较少,只有少量关于冷喷涂制备纯 Ti 或 Ti 合金涂层的研究。研究发现,冷喷涂制备的 Ti 涂层呈现不同程度的多孔特性,因此,冷喷涂可用于多孔 Ti 或 Ti 合金涂层及块材的制备^[10]。此外,通过优化参数,在极端条件下也可制备致密的 Ti 涂层,例如采用高成本氦气^[11,12],或者采用更先进的喷

涂系统(如 Kenetik-8000, 沉积效率可达 $80\%\sim90\%$ ^[13])。冷喷涂已成功制备了其他 MMC,如 Al/陶瓷^[14-17], Cu/ Al_2O_3 ^[18], NiCrAl/金刚石^[19]等复合涂层。硬质相的加入,不仅改善了涂层的沉积效率和涂层的致密性,同时还增加了涂层的硬度,基体相与涂层间的结合强度以及涂层的耐磨性^[20-22],这些性能取决于硬质相在涂层中的含量和分布。LI W. Y. 等^[16]早期研究表明,冷喷涂 Al5356/TiN 复合涂层摩擦因数比纯 Al5356 涂层低 50% ,而磨损率降低一个数量级^[16],通过引入球磨工艺制备 Al5356/TiN 复合粉末,进一步提高了复合涂层的耐磨性^[17]。因此,大量的研究关注如何提高硬质相在复合涂层中的含量。本工作采用冷喷涂制备了复合涂层 Ti/ SiC_p -67,研究了硬质相对冷喷涂复合涂层的组织和力学性能的影响,为后续制备高性能 PRTMC 涂层提供了依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验粉末

实验采用形状不规则 Ti 粉(LERMPS, 法国)为复合材料基体相,不规则 SiC 粉(H. C. Starck, USA)为增强相,其形貌如图 1 所示。采用 Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd., UK)测试了粉末的尺寸分布。Ti 粉末粒度范围为 $0\sim106\mu\text{m}$,平均粒径为 $19.6\mu\text{m}$; SiC 粉末粒度范围为 $48.3\sim92.6\mu\text{m}$,平均粒径为 $67\mu\text{m}$,为叙述方便标记为 SiC_p -67。原始混合粉末中增强相 SiC 粉末的含量为 30% (体积分数,下同)。Ti 粉和 SiC 粉通过简单机械混合的方式获得制备复合涂层的原始粉末。实验选取纯 Al 板作为基体,喷涂前用白刚玉砂粒进行表面清理与粗化。

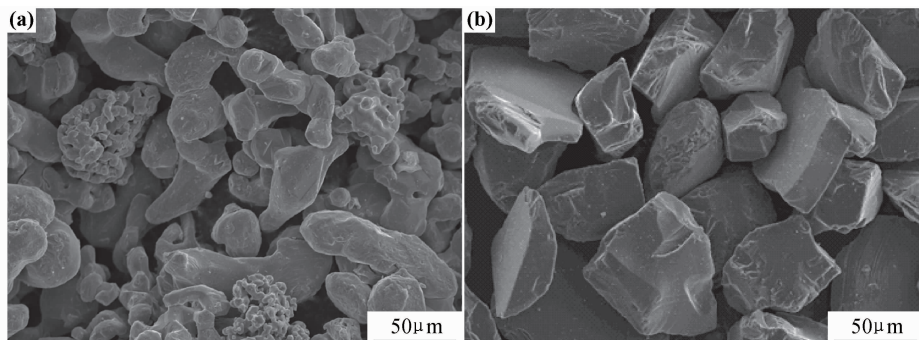


图 1 Ti(a)和 SiC(b)初始粉末表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of starting powders Ti(a) and SiC(b)

1.2 实验方法与表征

实验采用德国 CGT 公司的 Kinetic-3000 冷喷涂系统。所用喷嘴为法国 LERMPS 实验室自行设计,

扩张比约 4.9,下游长度 170mm 的方形喷嘴。高压压缩空气用做加速气体,氩气作为送粉气体。喷枪入口空气压力约为 2.6MPa,温度约为 590°C 。氩气压力和流

速分别为 3.1MPa 和 40L/min。喷涂距离为 30mm, 喷枪横向移动速率为 100mm/s, 共进行 3 道喷涂。

采用光镜(OM)对所制备的复合涂层组织结构进行分析; 硬质相含量采用 Scion Image 软件分析多张金相照片获得; 采用维式显微硬度仪(Leitz)测定涂层的显微硬度, 载荷 300g, 保载 15s。

2 结果与分析

2.1 涂层组织

图 2 所示为喷涂 1 道后的 Ti/SiC_p-67 复合涂层断面光镜组织图。可以看出, 复合涂层表现出了明显的多孔特性, 气孔分布较为均匀, 如图 2 中箭头所示。根据先前的研究结果, 此类涂层多孔的原因除了与喷涂条件有关外^[23,24], 基体粉末本身和增强相的性质影响也较大, 此外, 粉末的活性对沉积物多孔也有重要的影响^[25]。一般认为, 基体粉末碰撞基体前的速率是影响颗粒变形进而影响颗粒沉积特性的关键因素。然而, 在喷涂基体粉末的过程中, 粒子流呈现明显的亮流特点^[25], 这类似于热喷涂过程, 从而有利于粒子沉积。即使粒子的速率远低于材料喷涂中定义的临界速率, 粒子也可以由于活性粘接到一起而沉积^[25], 从而得到多孔的涂层。比如, 文献报道的 Ti 粉末临界速率约 750m/s^[23], 根据本实验条件及传统冷喷涂沉积观点, 所得喷涂沉积效率应该不超过 10%, 但是实际上由于活性的原因喷涂沉积效率却高于 50%。所以活性的影响能很好地解释这一矛盾, 喷涂的基体粉末得不到充分的变形, 进而形成了具有多孔特性的涂层。

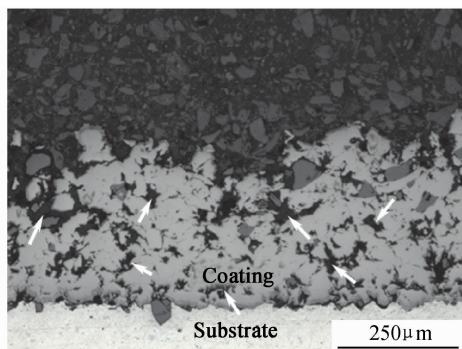


图 2 喷涂 1 道后的 Ti/SiC_p-67 复合涂层断面光镜照片
Fig. 2 OM micrograph of the as-cold-sprayed Ti/SiC_p-67 composite coating after one spray pass

图 3 是喷涂 3 道后垂直方向上的涂层断面组织, 根据标尺可计算出复合涂层的厚度约为 1.6mm。可以看出, 复合涂层 Ti/SiC_p-67 在垂直方向上的特性类似于先前研究的 Ti 涂层^[23], 同样由两个明显的区域

组成: 表层的多孔区和内部的致密区, 喷涂涂层表面呈现出多孔特性。在所制备的涂层中, 气孔率随着涂层与涂层和基体界面距离的减小而迅速下降到较低的水平且保持基本不变, 这是由于后续颗粒的连续冲击夯实作用使先前沉积的颗粒发生了进一步变形来填充粒子间的气孔间隙^[23]。从而使先前沉积的内部涂层逐渐致密, 而所制备的复合涂层表面气孔率则较大。通过观察和分析涂层中的组织结构发现, 在机械混合过程中, 基体粉末和 SiC 颗粒并没有发生反应生成新相, 硬质相均匀地分散在基体粉末中, 因此, 喷涂过程中粉末的成分及组织结构完全保留到了涂层中, 且增强相 SiC 颗粒均匀地镶嵌在基体相当中, 改善了涂层的组织和性能, SiC 颗粒如图 3 箭头所示。

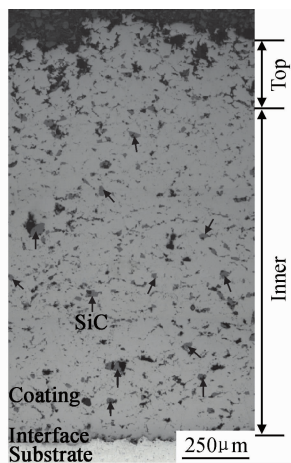


图 3 冷喷涂 3 道次的 Ti/SiC_p-67 复合涂层断面垂直方向的光镜照片

Fig. 3 Vertical OM micrograph of the as-cold-sprayed Ti/SiC_p-67 composite after three spray passes

本研究所采用的原始喷涂粉末中的 SiC 颗粒的体积分数约为 30%, 对图 3 中的颗粒分布进行统计可得, 涂层中实际的 SiC 颗粒的体积分数约为 10%。余敏等^[26]采用了 27μm 和 67μm 两种不同粒度的 SiC 颗粒制备 SiC 增强 Al5056 基复合涂层。结果表明, 复合涂层的气孔率随着 SiC 颗粒尺寸的减小而增加, SiC 颗粒的加入增加了涂层的硬度和涂层间的结合强度。此外, SiC 颗粒的加入略微提高了涂层的耐磨性能。因此, 如何调控复合涂层中硬质相的含量、尺寸与分布对复合涂层的性能(包括结合强度、耐磨性、耐蚀性和硬度等)起着重要作用。

图 4 为冷喷涂 Ti/SiC_p-67 复合涂层内部和界面的光镜照片。由图 4(a)可知, 增强相 SiC 颗粒和涂层中 Ti 基体相结合良好, 且涂层与 Al 基板的结合状态也基本良好。由图 4(b)可知, 部分 SiC 颗粒沉积后嵌

入到基板中,并出现颗粒破碎和脱落的现象,这可能是由于 SiC 颗粒在喷涂飞行过程和沉积过程中的相互碰撞以及颗粒自身形状的不规则性所致。这种嵌入作用形成一定的机械咬合,可能会增加基板和涂层间的结合力。但是,如果在涂层与基板间的结合界面处存在较多的脆性 SiC 颗粒,又容易造成基板和涂层之间界面结合弱化,反而会降低涂层与基板之间的结合强度。

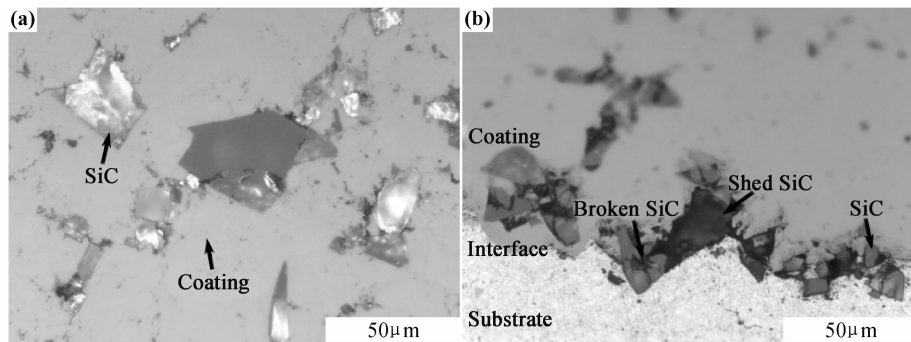


图 4 冷喷涂 Ti/SiC_p-67 复合涂层内部(a)和界面(b)的光镜照片

Fig. 4 OM micrographs of the as-cold-sprayed Ti/SiC_p-67 composite (a)inner coating;(b)coating/substrate interface

2.2 涂层显微硬度

对 Ti/SiC_p-67 复合涂层的显微硬度分析表明,冷喷涂 Ti/SiC_p-67 复合涂层的显微硬度为 $(125 \pm 17.75) \text{HV}_{0.3}$,而纯 Ti 块材的实际显微硬度值为 $60 \text{HV}_{0.3}$ ^[27],本研究中 Ti/SiC_p-67 复合涂层的显微硬度 $\text{HV}_{0.3}$ 值高于李文亚等^[28]研究的喷涂态 Ti 涂层的显微硬度值 $(72 \pm 28) \text{HV}_{0.1}$,稍低于喷涂态 Ti 涂层在 850°C 下真空热处理 4h 的显微硬度值 $(43 \pm 13) \text{HV}_{0.1}$ 。上述结果表明,复合涂层除了受到加工硬化作用外,增强相 SiC 颗粒的加入也能明显地提高涂层的显微硬度。Wong W. 等^[11]采用工作气体氦气,利用冷喷涂技术制备了 $1172\mu\text{m}$ 厚的涂层,硬度值达到最大值 218HV 。S. H. Zahiri 等^[12]也采用氦气制备了冷喷 Ti 涂层,研究发现气孔率从 14%减小到 0.5%,涂层

硬度从 100HV 提高至 300HV 。J. C. Oh 等^[29]采用高能电子束制备了 $1.7 \sim 2.1 \text{mm}$ 厚均匀致密的 SiC/Ti-6Al-4V 复合涂层,涂层硬度值达到 415HV 。J. Ajaja 等^[30]利用微压痕实验测试了喷涂态 Ti 涂层的力学性能,并采用 Oliver&Pharr 方法对实验所得的载荷-深度曲线进行分析,得到涂层在不同压痕载荷下的硬度和弹性模量,喷涂态 Ti 涂层的硬度在 $2.76 \sim 2.97 \text{GPa}$ 之间。

图 5 是 Ti/SiC_p-67 复合涂层的内部在 300g 载荷下的显微硬度压痕面积。可见,图 5(a)中的压痕面积较图 5(b)的小且压痕形状规则。这表明图 5(a)压痕处的涂层能够承受较大的载荷,具有较高的抵抗变形的能力,而图 5(b)压痕处的涂层出现塌陷现象,还有少量裂纹,说明此处涂层的变形不足以抵抗压头的作用力,可能由于此处涂层不具有较高的致密性。

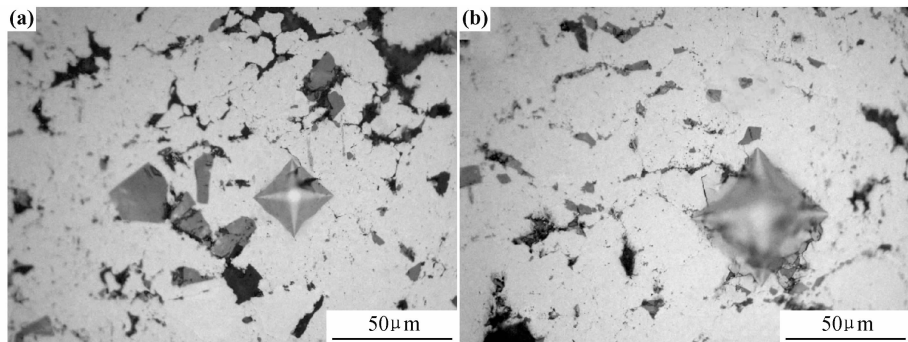


图 5 冷喷涂 Ti/SiC_p-67 复合涂层的压痕形貌图 (a)规则压痕;(b)不规则压痕

Fig. 5 Indentation micrographs of the as-cold-sprayed Ti/SiC_p-67 composite (a)regular indentation;(b)irregular indentation

3 结论

(1)复合涂层由两个明显区域组成:表层的多孔区

和内部的致密区,喷涂涂层表面呈现出多孔特性;随距离涂层表面深度的增加,涂层的气孔率迅速下降,涂层内部逐渐致密化。

(2)增强相 SiC 颗粒均匀地镶嵌在基体相当中, SiC 颗粒和基体相结合良好, 部分 SiC 颗粒在涂层/基板的界面处出现破碎和脱落的现象。

(3)复合涂层的显微硬度高于喷涂态 Ti 涂层和纯 Ti 块材, 表明涂层除了受到加工硬化作用, 增强相 SiC 颗粒的加入也明显地提高了涂层的显微硬度。

参考文献

- [1] MAO X N, ZHOU L, ZHOU Y G, et al. Characteristic of principle properties and microstructure of TP-650 particles reinforced titanium matrix composites[J]. *Rare Metal Mat Eng*, 2004, 33(6): 620—623.
- [2] BAO G, LIN Z. High strain rate deformation in particle reinforced metal matrix composites[J]. *Acta Mater*, 1996, 44(3): 1011—1019.
- [3] 张和善. 国外航空结构材料发展概况——先进复合材料(II)[J]. *航空制造工程*, 1998, (1): 12—14.
- [4] SANDHU S, TSAKIROPOULOS P, WOOD M J, et al. Interfacial studies in titanium aluminide/SiC composites[J]. *Key Eng Mater*, 1997, 127—131: 671—678.
- [5] 刘大响. 航空发动机技术的发展和建设[J]. *中国工程科学*, 1999, (2): 24—29.
LIU D X. The development and proposals of the aeroengine technology[J]. *Eng Sci*, 1999, (2): 24—29.
- [6] 毛小南, 于兰兰. 非连续增强钛基复合材料研究新进展[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(5): 18—24.
MAO X N, YU L L. New development in research of discontinuously reinforced titanium matrix composites[J]. *Mater China*, 2010, 29(5): 18—24.
- [7] 吕维洁. 原位自生钛基复合材料研究综述[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(4): 41—48.
LU W J. An overview on the research of in-situ titanium matrix composites[J]. *Mater China*, 2010, 29(4): 41—48.
- [8] PAPYRIN A. Cold spray technology[J]. *Adv Mater Process*, 2001, 159(9): 49—51.
- [9] LI W Y, LIAO H L, WANG H T. Cold spraying of light alloys [A]. DONG H. *Surface Engineering of Light Alloys-Al, Mg and Ti Alloys*[C]. UK: Woodhead Publishing, 2010. 242—293.
- [10] BLOSE R E, WALKER B H, WALKER R M, et al. New opportunities to use cold spray process for applying additive features to titanium alloys[J]. *Met Powder Rep*, 2006, 61(9): 30—37.
- [11] WONG W, IRISSOU E, RYABININ A N, et al. Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings[J]. *J Therm Spray Techn*, 2011, 20(1—2): 213—226.
- [12] ZAHIRI S H, ANTONIO C I, JAHEDI M. Elimination of porosity in directly fabricated titanium via cold gas dynamic spraying[J]. *J Mater Process Tech*, 2009, 209(2): 922—929.
- [13] BINDER K, GÄRTNER F, KLASSEN T. Cold spraying of titanium using enhanced conditions and optimized nozzles [A]. *Thermal Spray 2011: Proceeding of the International Thermal Spray Conference*[C]. Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2011. 879—884.
- [14] IRISSOU E, LEGOUX J G, ARSENAULT B, et al. Investigation of Al-Al₂O₃ cold spray coating formation and properties[J]. *J Therm Spray Techn*, 2007, 16(5—6): 661—668.
- [15] TAO Y S, XIONG T Y, SUN C, et al. Effect of α -Al₂O₃ on the properties of cold sprayed Al/ α -Al₂O₃ composite coatings on AZ91D magnesium alloy[J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 256(1): 261—266.
- [16] LI W Y, ZHANG G, GUO X P, et al. Characterizations of cold-sprayed TiN particle-reinforced Al alloy-based composites—from structures to tribological behaviour[J]. *Adv Eng Mater*, 2007, 9(7): 577—583.
- [17] LI W Y, ZHANG G, ZHANG C, et al. Effect of ball milling of feedstock powder on microstructure and properties of TiN particle-reinforced Al alloy-based composites fabricated by cold spraying[J]. *J Therm Spray Techn*, 2008, 17(3): 316—322.
- [18] 王锋, 漆波, 陈清华, 等. 超音速冷喷涂 Cu-Al₂O₃ 复合涂层特性[J]. *材料导报*, 2009, 23(6): 47—50.
WANG F, QI B, CHEN Q H, et al. Properties of Cu-Al₂O₃ composite coating in supersonic cold gas dynamic spraying[J]. *Mat Rev*, 2009, 23(6): 47—50.
- [19] 所新坤, 杨冠军, 李长久. 镍基金刚石复合涂层的冷喷涂制备[J]. *材料研究与应用*, 2009, 3(1): 32—36.
SUO X K, YANG G J, LI C J. Preparation of Ni-based alloy diamond composite coatings by cold spray[J]. *Mate Res Appl*, 2009, 3(1): 32—36.
- [20] SANSOUCY E, MARCOUX P, AJDELSZTAJN L, et al. Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process[J]. *Surf Coat Tech*, 2008, 202(16): 3988—3996.
- [21] SPENCER K, FABIJANIC D M, ZHANG M X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys[J]. *Surf Coat Tech*, 2009, 204: 336—344.
- [22] SHEN L, KONG L Y, XIONG T Y, et al. Preparation of TiAl₃-Al composite coating by cold spraying[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2009, 19(4): 879—882.
- [23] LI C J, LI W Y. Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying[J]. *Surf Coat Tech*, 2003, 167(2—3): 278—283.
- [24] BLOSE R E. Spray forming titanium alloys using the cold spray process[A]. LUGSCHEIDER E. *Thermal Spray Connects: Explore its Surfacing Potential*[C]. Düsseldorf: DVS, 2005.
- [25] LI W Y, ZHANG C, WANG H T, et al. Significant influences of metal reactivity and oxide film of powder particles on coating deposition characteristics in cold spraying [J]. *Appl Surf Sci*, 2007, 253(7): 3557—3562.
- [26] YU M, LI W Y, SUO X K, et al. Effect of ceramic particles size on the microstructure and properties of cold sprayed Al5056/SiCp composite coatings[A]. *Thermal Spray 2012: Proceedings from the International Thermal Spray Conference and Exposition*[C]. Ohio: ASM International, 2012. 298—304.
- [27] MatWeb for Property Information, <http://www.matweb.com> (accessed May14, 2007).

- [9] KANG Y L, HAN Q H, ZHAO X M, et al. Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanisms of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium[J]. *Materials & Design*, 2013, 44: 331–339.
- [10] ZUO X R, CHEN Y B, WANG M H. Study on microstructures and work hardening behavior of ferrite-martensite dual-phase steels with high-content martensite[J]. *Materials Research*, 2012, 15(6): 915–921.
- [11] WANG Z G, ZHAO A M, ZHAO Z Z, et al. Microstructures and mechanical properties of C-Mn-Cr-Nb and C-Mn-Si-Nb ultra-high strength dual-phase steels[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2012, 19(10): 915–922.
- [12] CURTZE S, KUOKKALA V T, HOKKA M, et al. Deformation behavior of TRIP and DP steels in tension at different temperatures over a wide range of strain rates[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 507(1): 124–131.
- [13] HUH H, KANG W J, HAN S S. A tension split Hopkinson bar for investigating the dynamic behavior of sheet metals[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 8–17.
- [14] PEIXINHO N, PINHO A. Study of viscoplasticity models for the impact behavior of high-strength steels[J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2007, 2(2): 114–123.
- [15] SINGH N K, CADONI E, SINGHA M K, et al. Dynamic tensile behavior of multi phase high yield strength steel[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(10): 5091–5098.
- [16] KAPOOR R, SIA N N. Determination of temperature rise during high strain rate deformation[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 27(1): 1–12.
- [17] 陈贵江, 康永林, 朱国明, 等. 汽车用合金化镀锌深冲钢板动态变形行为试验研究及仿真分析[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(24): 10–15.
- CHENG G J, KANG Y L, ZHU G M, et al. Dynamic deformation behavior experiments of alloy galvanized deep drawing steel sheet for automobile and simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(24): 10–15.
- [18] 周元鑫, 夏源明, 杨报昌. 双相钢冲击拉伸变形行为本构方程的建立[J]. *材料科学与工艺*, 1997, 5(1): 72–76.
- ZHOU Y X, XIA Y M, YANG B C. Study of mechanical behavior of dual phase steels under tensile impact[J]. *Materials Science and Technology*, 1997, 5(1): 72–76.
- [19] SUNG J H, KIM J H, WAGONER R H. A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature[J]. *International Journal of Plasticity*, 2010, 26(12): 1746–1771.
- [20] 田晶晶, 李玉龙, 胡广立, 等. 两种超高强度钢的拉伸力学性能研究及断口分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2009, 32(4): 31–34.
- TIAN J J, LI Y L, HU G L, et al. Tensile behavior and fractography of two kinds of ultra-high strength steels[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(4): 31–34.
- [21] OLIVER S, JONES T B, FOURLARIS G. Dual phase versus TRIP strip steels: microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing[J]. *Materials Characterization*, 2007, 58(4): 390–400.
- [22] BEYNON N D, JONES T B, FOURLARIS G. Effect of high strain rate deformation on microstructure of strip steels tested under dynamic tensile conditions[J]. *Materials Science and Technology*, 2005, 21(1): 103–112.
- [23] QU J B, DABBOUSS W, HASSANI F, et al. Effect of microstructure on the dynamic deformation behavior of dual phase steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 479(1): 93–104.
- [24] KIM S, LEE S. Effects of martensite morphology and volume fraction on quasi-static and dynamic deformation behavior of dual-phase steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(7): 1753–1760.
- [25] SAHU P, CURTZE S, DAS A. Stability of austenite and quasi-adiabatic heating during high-strain-rate deformation of twinning-induced plasticity steels[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(1): 5–8.
- 基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA03Z518); 北京科技大学冶金工程研究院基础理论研究基金资助项目(YJ2010-006)
- 收稿日期:** 2012-04-10; **修订日期:** 2012-11-25
- 作者简介:** 代启锋(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为先进汽车钢板生产与应用, 联系地址: 北京市海淀区学院路30号北京科技大学材料科学与工程学院(100083), E-mail: qifeng.dai@qq.com
- 通讯作者:** 宋仁伯(1970—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为先进钢铁材料工艺与组织性能, 联系地址: 北京市海淀区学院路30号北京科技大学材料学院材料加工与控制工程系(100083), E-mail: songrb@mater.ustb.edu.cn
- *****
- (上接第5页)
- [28] LI W Y, ZHANG C, LIAO H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold sprayed Ti coatings with relatively large powder particles[J]. *J Coat Technol Res*, 2009, 6(3): 401–406.
- [29] OH J C, YUN E, GOLKOVSKI M G, et al. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti-6Al-4V surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation[J]. *Mat Sci Eng: A*, 2003, 351(1–2): 98–108.
- [30] AJAJA J, GOLDBAUM D, CHROMIK R R. Characterization of Ti cold spray coatings by indentation methods[J]. *Acta Astro-*
- naut, 2011, 69(11–12): 923–928.
- 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51005180); 霍英东教育基金青年教师基金资助(131052); “111”引智计划资助(B08040)
- 收稿日期:** 2012-10-15; **修订日期:** 2013-01-17
- 作者简介:** 黄春杰(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事冷喷涂和摩擦焊技术的研究, E-mail: hcj@mail.nwpu.edu.cn
- 通讯作者:** 李文亚(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事摩擦焊及热喷涂技术的研究, 联系地址: 陕西省西安市友谊西路127号西北工业大学材料学院公字楼413室(710072), E-mail: liwy@nwpu.edu.cn