

## 单层钎焊立方氮化硼砂轮工作面磨粒包埋深度的确定

丁文锋, 徐九华, 傅玉灿, 苏宏华, 肖冰, 周来水

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 以 Ag-Cu-Ti 合金为钎料在真空炉中实现了 CBN 磨粒与 45 钢基体的钎焊连接, 运用红外光谱仪测试了钎焊磨粒内部的残余应力, 分析了最大残余拉应力对磨粒强度的影响, 据此优选了钎焊 CBN 砂轮工作面上磨粒的包埋深度。结果表明: 当包埋深度不同时, 尽管钎焊磨粒内部的残余应力分布差异较大, 但最大残余拉应力始终位于磨粒与钎料顶层截面的边缘位置, 并且最大残余拉应力与包埋深度不存在线性关系; 为提高钎焊 CBN 磨粒强度和确保砂轮容屑空间, 磨粒包埋深度应控制在其自身高度的 30%~40% 之间。

**关键词:** CBN 磨粒; 钎料层; 单层钎焊砂轮; 包埋深度; 残余应力

中图分类号: TG 743

文献标识码: A

## Determination of embedding depth of abrasive grains on working surface of single-layer brazed CBN grinding wheel

DING Wen-feng, XU Jiu-hua, FU Yu-can, SU Hong-hua, XIAO Bing, ZHOU Lai-shui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The joining of CBN abrasive grain and 0.45%C steel matrix was realized using Ag-Cu-Ti alloy as filler metal in the vacuum furnace. The residual stresses of the brazed CBN grains were measured by means of FTIR spectra. The influence of the maximum tensile stress on the grain strength was analyzed, and the embedding depth of grains on the working surface of the brazed single-layer grinding wheels was accordingly determined. The result shows that, though remarkable difference of stress distribution occurs in the brazed grains with different embedding depths, the maximum tensile stress always exists in the margin region of the section plane between CBN grain and filler top. Moreover, the maximum tensile stress is not influenced linearly by the embedding depth. In order to ensure the strength of the brazed grains and the enough space for holding chips, 30%–40% of the whole height of abrasive grain is the rational embedding depth for CBN grains.

**Key words:** CBN abrasive grain; filler metal layer; single-layer brazed grinding wheel; embedding depth; residual stress

新型单层钎焊立方氮化硼(CBN)超硬磨料砂轮凭借磨粒、钎料、基体之间高温界面反应形成的化学和冶金结合, 克服了电镀和烧结砂轮对磨粒把持强度较低的固有缺陷, 近年来它已在难加工材料的重负荷高效磨削过程中显示出比传统 CBN 固结磨料砂轮更加优异的加工性能<sup>[1-3]</sup>。但是, 单层 CBN 砂轮的磨削性

能不仅仅取决于砂轮结构特性, 如磨粒品质、粒度大小等, 而是更多地取决于砂轮工作面的形貌特征<sup>[4]</sup>。确切地说, 取决于砂轮工作面上 CBN 磨粒突出钎料结合剂层的高度。如果 CBN 磨粒突出结合剂很少, 则砂轮容屑空间不足, 砂轮切削性能较差。如果突出过多, 尽管凭借磨粒与钎料之间的强力化学与冶金结

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50475040); 中国博士后科学基金资助项目(20060400282); 江苏省博士后科研计划资助项目(0602039B); 江苏省自然科学基金重点资助项目(BK2006723)

收稿日期: 2006-03-26; 修订日期: 2007-01-16

通讯作者: 丁文锋, 博士; 电话: 025-84892901; E-mail: dingwf2000@vip.163.com

合,不会出现磨粒脱落现象,但是 CBN 磨粒可能破碎严重,导致砂轮磨损较快。

因此,在制作单层钎焊 CBN 砂轮过程中,如何确定钎料层对磨粒的包埋深度是一个极其复杂的问题,它需要从磨粒的把持强度、容屑空间和强度等多方面综合考虑。但其中最重要的一个因素在于,合金钎料与脆性磨粒的热物性不匹配会在钎焊 CBN 磨粒内部形成残余热应力,从而对磨粒强度产生显著影响。有关此方面的研究至今未见相关报道。本文作者将在测试分析不同包埋深度下钎焊 CBN 磨粒内部残余应力分布特征的基础上,优化确定单层钎焊砂轮工作表面上磨粒的包埋深度。

## 1 实验

受磨粒合成及分选水平的限制,CBN 磨粒的大小和形状通常各不相同,因此本实验挑选一批长轴和短轴均接近  $250\ \mu\text{m}$  的 YBN-65 型 CBN 磨粒进行实验。尽管 CBN 磨粒具有棱角,不失一般性,仍可将其近似看成球形,这样可将磨粒简化成轴对称结构<sup>[5]</sup>。钎料为 Ag-Cu-Ti 合金,基体为高 5 mm、直径 15 mm 的 45 钢圆柱。将磨粒与基体表面分别进行去油去污处理后,组合成基体、钎料、磨粒的 3 层结构,其中磨粒位于基体中心位置,如图 1 所示。通过控制钎料用量,可确保焊后钎料层对磨粒的包埋深度在 10%~60%之间变化。钎焊过程在真空辐射炉中进行,加热温度和保温时间分别为  $920\ ^\circ\text{C}$  和 5 min,随炉冷却,这是目前最常采用的 CBN 磨粒钎焊工艺<sup>[6]</sup>。由于真空辐射炉内升、降温比较缓慢,可确保整个钎焊试样的温度场均匀一致,从而减小了因试样内部温差引起的残余应力。

CBN 磨粒晶体具有特殊的  $\text{sp}^3$  杂化结构,并且体积较小,采用常规的应力测试技术,如电阻应变片法和 X 射线衍射法,都不适用于磨粒与钎料接头中残余应力测量所需的如此狭小区域,而采用测试 CBN 单晶红外光谱(FTIR)偏移量来反映钎焊磨粒内部残余应力分布是比较可靠的方法<sup>[7-12]</sup>。采用带显微镜的 IFS66V 型 FTIR 谱仪分别沿 3 个方向测量 CBN 磨粒晶体的红外光谱。其中:第一个方向为图 1 中的直线 I 方向,即磨粒球体的中心轴线;第二个方向为图 1 中的直线 II 方向,即与钎料顶层平行的磨粒中心平面沿 X 轴半径方向;第三个方向为图 1 中的直线 III 方向,即磨粒与钎料顶层圆形截面的沿 X 轴半径方向。此 3 个位置中, I 和 II 为磨粒球体结构的特殊位置, III 为

磨粒与钎料接触界面的边缘位置。依据钎焊过程中脆性材料残余应力的分布特点,这些位置通常应为磨粒内部应力值的最大处<sup>[13]</sup>。此外,由于基体和磨粒是中心轴对称结构,其内部残余应力场也可近似为关于中心轴对称,因而直线 II 和 III 的矢量方向对磨粒内部残余应力大小的影响可以忽略。

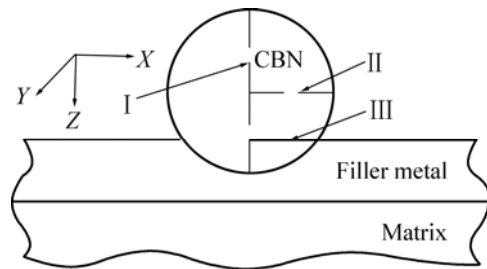


图 1 钎焊 CBN 磨粒试样结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of specimen of brazed CBN grain

## 2 结果与讨论

### 2.1 包埋较深时钎焊 CBN 磨粒内部残余应力的分布特征

当磨粒被钎料层包埋较深,分别为 40%、50%和 60%,相当于磨粒被包埋深度为 100、125、150  $\mu\text{m}$  时,3 条特征线上 CBN 磨粒的残余应力分布如图 2 所示。由图可以看出:在图 1 中的直线 I 上,包埋深度对钎焊 CBN 磨粒顶部区域承受的拉应力值影响轻微,均不超过 60 MPa,但对残余应力的分布梯度却有一定影响,包埋深度越大,梯度越大。然而在底部区域,包埋深度对压应力值和应力分布梯度影响显著。随包埋深度增加,压应力值逐渐增大,如从包埋深度为 40% 时的 100 MPa 增长到了 60% 时的 180 MPa,并且梯度也愈加明显,如图 2(a)所示。同时还可看出,尽管包埋深度对 CBN 磨粒顶部和底部区域的应力分布具有不同影响,但在磨粒中心区域,包埋深度对残余压应力大小(约 50 MPa)的影响并不明显,却与稳定区域的宽度具有直接联系。例如,宽度从包埋深度为 40% 时的 30  $\mu\text{m}$  增长到了 60% 时的 100  $\mu\text{m}$ 。

在直线 II 上,当包埋深度不超过 50% 时,磨粒中心平面边缘区域会承受较大拉应力,并且包埋深度对拉应力值的影响并不大,均为 100 MPa 左右。当磨粒包埋深度超过中心平面一定程度后,拉应力就将转化为压应力,如包埋深度为 60% 时压应力已达到 100 MPa。不仅如此,虽然在钎焊 CBN 磨粒边缘区域 25  $\mu\text{m}$  范围内残余应力的分布梯度相当明显,但在磨粒中心

区域, 包埋深度不仅对残余压应力值影响不大, 而且对稳定区域的宽度也基本无影响, 如图 2(b)所示。

在图 1 中的直线 III 上, 包埋深度对截面中心区域残余压应力分布的影响并不大, 但对边缘区域拉应力的大小具有显著影响, 如包埋深度为 50% 和 60% 时, 拉应力分别接近 90 和 130 MPa。除此以外, 残余应力分布梯度也相当明显, 如包埋深度为 40% 时, 仅在 50  $\mu\text{m}$  范围内, 20 MPa 的压应力便迅速过渡为 110

MPa 左右的拉应力, 如图 2(c)所示。

### 2.2 包埋较浅时钎焊 CBN 磨粒内部残余应力的分布特征

图 3 显示了磨粒包埋深度较小, 分别为 10%、20% 和 30% 时, 钎焊 CBN 磨粒内部残余应力的分布特征。

在图 1 中的直线 I 上, 可以明显看出, 包埋深度较大时磨粒内部残余应力的稳定区域主要位于磨粒中

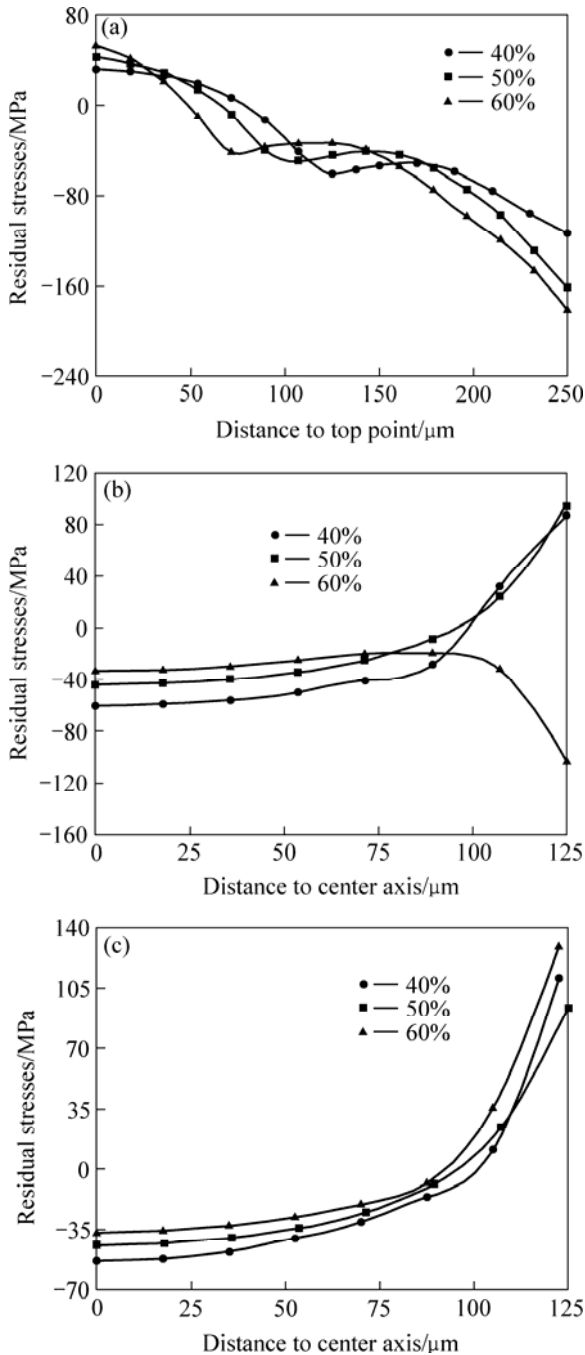


图 2 包埋深度较大时钎焊 CBN 磨粒残余应力  
Fig.2 Residual stresses in brazed CBN grains with large embedding depth: (a) Line I; (b) Line II; (c) Line III

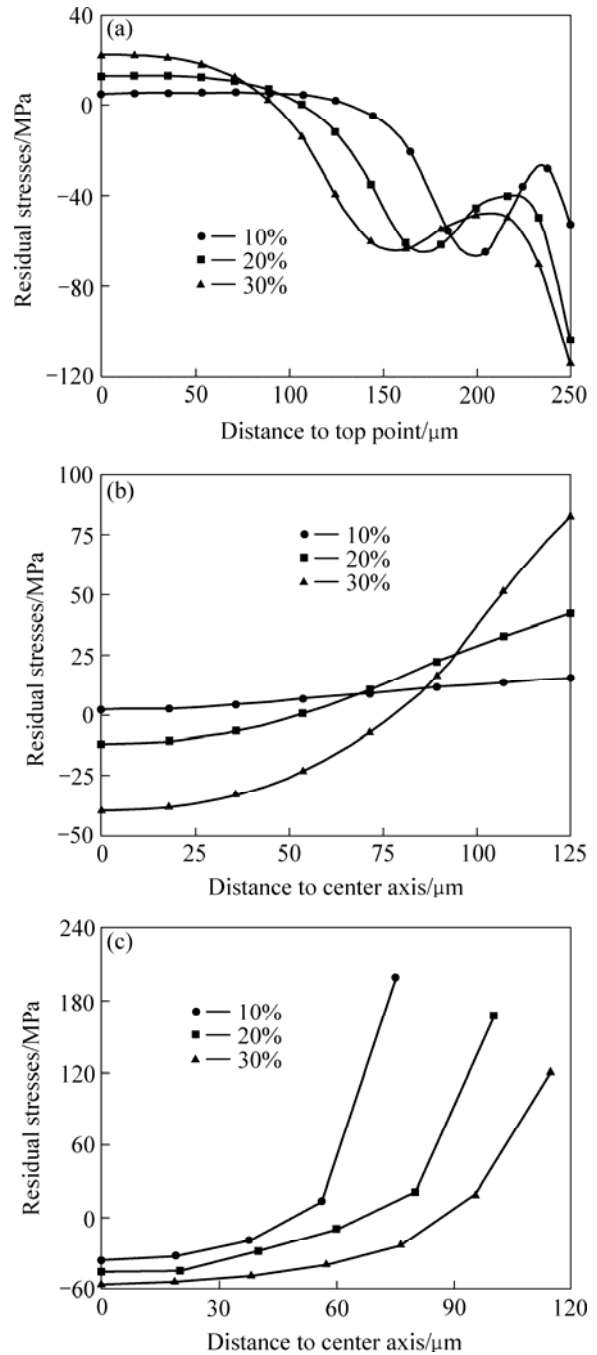


图 3 包埋深度小时钎焊 CBN 磨粒的残余应力  
Fig.3 Residual stresses in brazed CBN grains with small embedding depth: (a) Line I; (b) Line II; (c) Line III

心附近,当磨粒包埋较浅时残余应力的稳定区域主要存在于距磨粒顶点附近的  $75\ \mu\text{m}$  区域内,并且包埋深度对磨粒此处拉应力值影响不大,均不超过  $40\ \text{MPa}$ 。然而在磨粒底部区域,由于狭小范围内受到侧面与底面钎料层的综合作用,应力呈现出明显起伏现象,如图 3(a)所示。

在直线 II 上,随包埋深度增加,磨粒中心平面边缘区域的拉应力逐渐增大,从包埋深度为 10% 时的  $5\ \text{MPa}$  增长到 30% 时的  $80\ \text{MPa}$  左右,如图 3(b)所示。同时可以看出,尽管包埋深度为 10%~20% 时,磨粒内部残余应力分布梯度不太明显,但当包埋深度增加到 30% 时,应力梯度已相当显著。

在直线 III 上,包埋深度越小,磨粒与钎料顶层截面边缘区域残余应力的梯度越明显,同时拉应力越大。当包埋深度为 10% 时,拉应力已接近  $200\ \text{MPa}$ ,如图 3(c)所示。

### 2.3 钎焊残余应力形成机理及其对 CBN 磨粒强度的影响

由图 2 和 3 可知,无论 CBN 磨粒包埋深度如何,在钎料层与磨粒截面的边缘区域,磨粒总是承受拉应力,其原因主要在于截面边缘是脆性材料(磨粒)和塑性材料(钎料)物理性能变化最明显的区域。尽管依靠磨粒与钎料结合界面新生  $\text{TiB}_2$ 、 $\text{TiB}$ 、 $\text{TiN}$  化合物的过渡作用,可在一定程度上弱化热膨胀系数差异的影响,但也不能完全消除磨粒与钎料这两种物理性质截然不同的材料在钎焊过程中产生的残余应力<sup>[6]</sup>。在 CBN 磨粒内部中心区域,除晶体缺陷外,材料物理性能理应完全相同。在这种情况下,磨粒因热膨胀系数差异产生应力的趋势极弱,残余应力主要是由于截面边缘区域晶格变化引起中心区域晶格发生微弱扭曲而造成的,因此应力值通常较小。

另一方面,由于 CBN 磨粒属于抗压强度较高,而抗拉强度相对较弱的脆性材料,因此钎焊过程在磨粒内部产生的残余拉应力对其强度具有显著影响<sup>[14-15]</sup>。如果钎焊后 CBN 磨粒内部某个区域承受的拉应力过大,则其强度将有一定程度下降,那么这个区域就是磨粒内部最危险的部分,在重负荷磨削过程中 CBN 磨粒极易发生大块破碎,甚至可能导致磨粒晶体在钎焊过程中萌生裂纹,严重影响单层钎焊 CBN 砂轮的寿命和磨削性能。图 4 和 5 分别显示了包埋深度为 40% 与 10% 时钎焊 CBN 磨粒未进行磨削加工的原始形貌。可以看出,当包埋深度为 40% 时,由于磨粒内部最大残余拉应力仅为  $100\ \text{MPa}$  左右,因而钎焊磨粒晶形完整,除磨粒自身棱角处的缺陷外,内部无

裂纹产生。但是当包埋深度为 10% 时,磨粒内部产生明显的破碎裂纹,如图 5 中白圈内部区域所示。这表明钎焊后 CBN 磨粒强度已一定程度下降,这与图 3 中的应力分布曲线显示此时磨粒内部最大拉应力接近  $200\ \text{MPa}$  的结论相一致。

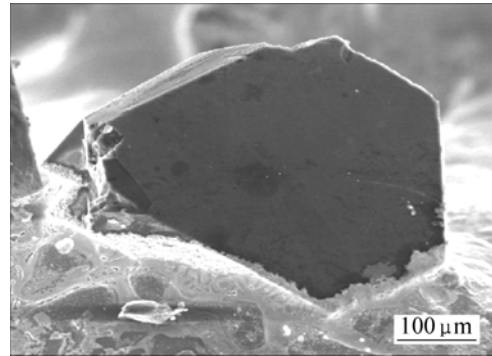


图 4 包埋深度为 40% 的钎焊 CBN 磨粒的 SEM 像

Fig.4 SEM image of brazed CBN grain with embedding depth of 40% of whole crystal

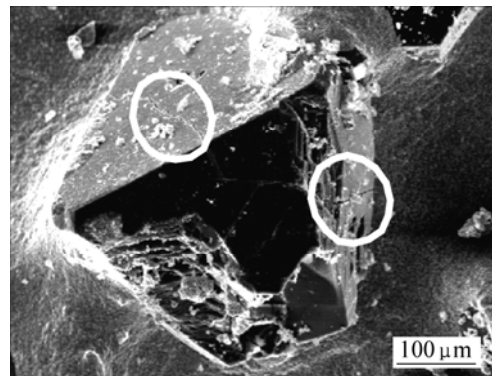


图 5 包埋深度为 10% 的钎焊 CBN 磨粒的 SEM 像

Fig.5 SEM image of brazed CBN grain with embedding depth of 10% of whole crystal

### 2.4 基于最大残余拉应力确定磨粒包埋深度

前面的分析已经指出,磨粒内部残余拉应力是影响钎焊 CBN 磨粒强度的重要因素,而钎料层对磨粒的包埋深度与磨粒内部最大残余拉应力具有直接关系。由此不难看出,根据钎焊磨粒内部中心轴线、磨粒中心平面径向、以及磨粒与钎料顶层截面径向等特殊位置上的最大残余拉应力来确定磨粒包埋深度是合理可靠的。

依据图 2 和 3,包埋深度对钎焊 CBN 磨粒内部 3 条特定直线上最大残余拉应力的影响可由图 6 所示的曲线族表示。可以看出,钎焊磨粒内部承受的最大残余拉应力与包埋深度并不是单纯的线性关系。当包埋深度大于 50%,即磨粒被钎料层包埋较深时,最大残

余拉应力随包埋深度增加而增大;但当包埋深度小于50%时,最大残余拉应力却随包埋深度增加而减小。原因主要在于,在一定程度下,钎料层对磨粒包埋深度的增加使得钎料对应力的松弛能力得到加强,从而有利于通过影响自身的塑性变形来减缓接头残余应力<sup>[14]</sup>。很明显,当磨粒包埋深度在30%~50%时,磨粒内部的最大残余拉应力相对较小,仅为100 MPa左右。因此,考虑到既要充分确保钎焊 CBN 磨粒的强度,又可为重负荷磨削难加工金属材料过程提供必需的容屑空间,单层钎焊 CBN 砂轮工作面上磨粒包埋深度以控制在其自身高度的30%~40%为宜,具体值可随磨削条件变化而适当调整。磨削实验表明,当磨粒包埋深度为30%时,单层钎焊 CBN 砂轮主要以磨耗磨损为主,而磨粒破碎现象极少出现,此时新型钎焊砂轮便可显示出更优的磨削质量和更长的工具寿命。

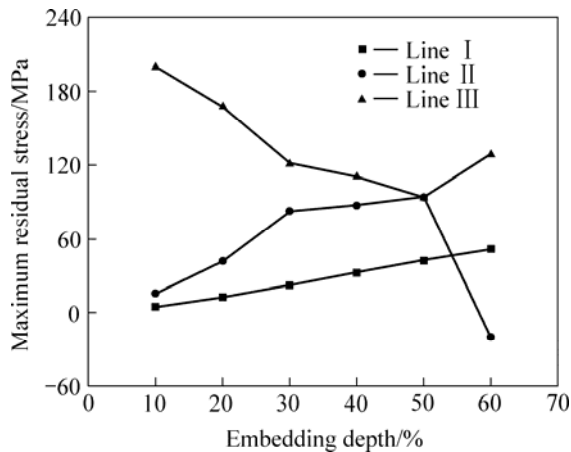


图6 包埋深度对磨粒内部最大残余拉应力的影响

Fig.6 Influence of embedding depth on maximum residual tensile stress in brazed grain

## REFERENCES

- [1] 苏宏华, 徐鸿钧, 傅玉灿. 多层烧结超硬磨料工具现状综述与未来发展构想[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 12-17.  
SU Hong-hua, XU Hong-jun, FU Yu-can. Review the current questions and strategies about multiplayer sintering superabrasive tools and conceive the development of future tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 12-17.
- [2] Xiao B, Xu H J, Wu Z B. Investigation on brazing of single-layer superabrasive wheel[J]. Key Engineering Materials, 2001, 202: 155-158.
- [3] Pobol I L, Nesteruk I G. Electron beam brazing of CBN to steel[J]. Journal of Chemical Vapor Deposition, 1996, 3(4): 302-310.
- [4] Chattopadhyay A K, Hintermann H E. On performance of brazed single-layer CBN wheel[J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 313-317.
- [5] Zhou Y, Funkenbusch P D, Quesnel D J. Stress distribution at the abrasive-matrix interface during tool wear in bound abrasive grinding — a finite element analysis[J]. Wear, 1997, 209: 247-254.
- [6] Ding W F, Xu J H, Shen M, Fu Y C, Xiao B. Thermodynamic and kinetic analysis of interfacial reaction between CBN grain and Ag-Cu-Ti filler alloy[J]. Mater Sci Technol, 2006, 22(1): 105-109.
- [7] Zhang X W, Zou Y J, Yan H, Wang B, Chen G H, Wong S P. Electrical properties and annealing effects on the stress of RF-sputtered c-BN films[J]. Materials Letters, 2000, 45: 111-115.
- [8] Klett A, Freudenstein R, Plass M F. Stress of c-BN thin films: a parameter investigation[J]. Surface and Coating Technology, 1999, 86/92: 116-119.
- [9] Ilias S, Stambouli V, Bouchier D. Study of stress and infra-red absorption line of BN films containing various fractions of cubic phase[J]. Diamond and Related Materials, 2000, 9: 1867-1875.
- [10] Klotzbucher T, Kreutz E W. Extended model for stress-induced formation of c-BN in ion-assisted deposition[J]. Diamond and Related Materials, 1998, 7: 1219-1226.
- [11] 赵永年, 邹广田, 王波. 氮化硼薄膜内应力的红外光谱研究[J]. 高等学校化学学报, 1998, 19(7): 1136-1139.  
ZHAO Yong-nian, ZOU Guang-tian, WANG Bo. Studies on the stress in cubic boron nitride films by infrared spectroscopy[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 1998, 19(7): 1136-1139.
- [12] 楚建新, 林晨光, 陈序. 陶瓷-金属连接应力 X 射线衍射测量方法[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 82-85.  
CHU Jian-xin, LIN Chen-guang, CHEN Xu. Determination of method residual stresses in ceramic-metal joint by X-ray diffraction[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(2): 82-85.
- [13] 雷永平, 韩丰娟, 夏志东. 陶瓷/金属钎焊接头残余应力的测量及数值计算[J]. 中国机械工程, 2004, 15(9): 768-771.  
LEI Yong-ping, HAN Feng-juan, XIA Zhi-dong. Measurement and numerical simulation of residual stresses in ceramic/metal brazed joints[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(9): 768-771.
- [14] 张德库, 邹贵生, 吴爱萍. 钎缝厚度对陶瓷连接接头强度的影响[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(3): 228-230.  
ZHANG De-ku, ZOU Gui-sheng, WU Ai-ping. Effects of weld thickness on the strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> joints[J]. Materials Science and Technology, 2005, 13(3): 228-230.
- [15] CHEN Zheng, ZHAO Qi-zhang, FANG Fang. Interfacial reactions and diffusion path in partial transient liquid-phase bonding of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ti/Ni/Ti/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(4): 831-837.

(编辑 龙怀中)