

# 焊接热输入对 X80 焊管焊缝组织与性能的影响

## Effects of Welding Heat Input on Microstructure and Properties of Welding Seam in X80 Grade Welded Pipe

张骁勇<sup>1</sup>, 高惠临<sup>1</sup>, 毕宗岳<sup>2</sup>, 徐学利<sup>1</sup>, 张莉莉<sup>1</sup>

(1 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

ZHANG Xiao-yong<sup>1</sup>, GAO Hui-lin<sup>1</sup>, BI Zong-yue<sup>2</sup>, XU Xue-li<sup>1</sup>, ZHANG Li-li<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an

710065, China; 2 Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

**摘要:** 针对双面螺旋埋弧焊管所具有的先内焊后外焊的焊接顺序特点, 以实际焊缝为研究对象, 采用焊接热循环理论, 利用焊接热模拟技术、现代材料力学性能检测技术和显微分析方法, 对 X80 管线钢内焊缝在不同热输入下的韧性分布规律以及组织特征进行了研究。结果表明: 当焊接线能量为 17~35kJ/cm 时, X80 管线钢焊缝粗晶热影响区 (WCGHAZ) 可获得较好的韧性水平, 其中线能量为 20kJ/cm 时, WCGHAZ 可获得最佳韧性水平。当焊接线能量小于 17kJ/cm 和大于 35kJ/cm 时, X80 管线钢 WCGHAZ 的韧性水平都有所下降。因此可将 17~35kJ/cm 的线能量作为 X80 管线钢外焊缝的推荐焊接工艺规范。

**关键词:** 焊接热输入; 埋弧焊管; 焊缝; 组织与性能

**中图分类号:** TG142.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2010)09-0066-05

**Abstract:** The effect of welding heat input on the toughness distribution and microstructure characterization of weld heat-affected zone (WHAZ) in the inside welding seam of X80 grade welded pipe was investigated by means of thermal simulation technique, microscopic analysis method and mechanical property testing. The results show that medium welding heat input (17-35kJ/cm) can produce good toughness in the weld coarse grained heat-affected zone (WCGHAZ) of welding seam of X80 pipeline steel. The toughness of WCGHAZ is the best when welding heat input is 20kJ/cm. But the toughness of WCGHAZ would become worse when welding energy input is less than 17kJ/cm and more than 35kJ/cm. Therefore, welding heat input at range of 17-35kJ/cm can be used as the recommended welding parameter in the outer welding process of X80 welded pipe.

**Key words:** welding heat input; submerged arc welded pipe; welding seam; microstructure and property

近年来,我国钢铁冶炼、轧制和制管技术已初步具备制造 X80 级管线钢管的能力<sup>[1]</sup>。目前, X80 管线钢已开始在西气东输二线管道工程建设中应用。与此同时,焊接热过程对管线钢的组织与性能的影响也愈来愈引起人们的重视。尤其是焊接热影响区粗晶区脆化问题已成为人们关注的焦点<sup>[2-4]</sup>。但在螺旋埋弧焊管双面焊接的热过程中,内焊缝受到外焊缝焊接热过程的影响而形成的内焊缝热影响区的相关研究甚少。本工作针对西气东输二线管道工程的施工特点和服役环境,基于西气东输二线管道工程用 X80 管线钢螺旋埋弧焊管实际生产焊接工艺规范,研究了焊接热输入对其焊缝粗晶热影响区 (Weld Coarse Grained Heat-Affected Zone, WCGHAZ) 力学性能和组织结构的影响规律,并提出西气东输二线管道工程用 X80 管线钢优

化的焊接工艺参数。

### 1 实验材料及方法

#### 1.1 X80 管线钢焊缝

实验钢板为国内某厂生产的 X80 管线钢,板厚为 18.4mm。实验用 X80 焊缝采用沿轧制方向埋弧焊接而成,所采用的焊接规范见表 1,焊缝的化学成分见表 2,焊缝常规力学性能见表 3。

表 1 实验焊缝焊接规范

Table 1 Welding parameters of test welding seam

Front wire current/A	Front wire voltage/V	Rear wire current/A	Rear wire voltage/V	v/ (m·min <sup>-1</sup> )
1500	32.5	550	39	1.6

表 2 实验焊缝的化学成分(质量分数/ %)

Table 2 Chemical composition of test welding seam ( mass fraction/ %)

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Nb	V	Ti	B	Al
0.061	1.79	0.31	0.0086	0.0034	0.14	0.025	0.093	0.32	0.045	0.00012	0.026	0.0004	0.033

表 3 实验焊缝力学性能

Table 3 Mechanical properties of test welding seam

$R_{10.5}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$R_{10.5}/R_m$
555	625	25	0.89

1.2 试样的制备

结合热模拟试验机的要求, 先沿焊缝横向截取 10.5mm×10.5mm×80mm 矩形试样进行热模拟实验<sup>[5]</sup>, 热模拟实验在 Gleeble 2800 型热模拟试验机上进行。热模拟实验后, 将热模拟试样加工成 10mm×10mm×55mm 标准夏比冲击试样, V 型缺口开在均温区并沿板厚方向。系列冲击实验按照 GB/T 229—1994 在 JB-500 试验机上进行。

硬度实验在 HSV-20 型维氏硬度计上进行, 使用载荷为 98N, 在试样上直接取点进行实验。

金相试样经机械抛光后以 3% 硝酸酒精溶液进行腐蚀, 在 JSM6390A 扫描电镜上进行观察。TEM 实验从 300μm 的试样上机械减薄至 50μm, 然后在双喷电解装置上以 10% 高氯酸+ 90% 醋酸溶液进行双喷, 在 JEM 200CX 透射电子显微镜上观察。

1.3 焊缝热模拟实验

螺旋埋弧焊管在双面焊接的热过程中, 内焊缝会

受到外焊缝焊接热过程的影响而形成内焊缝热影响区。如图 1 所示, 焊缝热影响区由焊缝粗晶区 (WCGHAZ)、焊缝细晶区 (Weld-Fine-Grained HAZ, WFGHAZ)、焊缝临界区 (Weld-Intercritical HAZ, WICHAZ) 和焊缝亚临界区 (Weld-Subcritical HAZ, WSCHAZ) 组成。

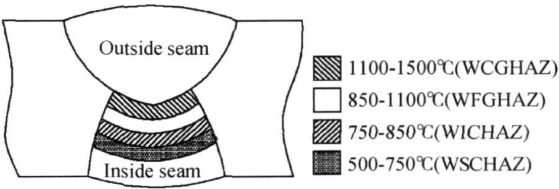


图 1 管线钢内外焊缝热影响区示意图

Fig. 1 Schematic diagram in the inside and outside welding seam HAZ of pipeline steels

为获取在不同焊接热输入条件下焊缝粗晶热影响区的组织和性能, 对由 1.1 节所形成的焊缝金属进行热模拟实验。热模拟参数如表 4 所示。其中, 热循环的  $t_{8/5}$  覆盖了石油、天然气输送钢管在制管焊接和野外施工焊接过程中所用到的各种不同的焊接热输入规范。

表 4 不同焊接热输入的焊接热模拟参数

Table 4 Welding thermal simulation parameters of different welding heat input

$E/(\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	Heating rate/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$	Peak temperature/ $^\circ\text{C}$	$t_{8/5}/\text{s}$	Holding time at high temperature/ $\text{s}$	
				900 $^\circ\text{C}$	1100 $^\circ\text{C}$
10	130	1300	5	5.18	2.39
17			10	5.57	2.45
20			15	6.45	2.76
25			20	8.37	3.45
35			40	13.45	5.30
45			70	20.28	7.77
55			100	28.72	10.84

2 实验结果及分析

2.1 硬度实验

在热模拟后的试样上取硬度试样, 不同焊接线能量下 X80 管线钢 WCGHAZ 硬度变化曲线如图 2 所示。

实验结果表明, 除线能量 10kJ/cm 外, X80 管线

钢焊缝的硬度与其在不同线能量下粗晶区硬度基本一致, 变化不大。在线能量为 10kJ/cm 时, X80 管线钢焊缝粗晶区的硬度值为 298, 比 X80 管线钢焊缝硬度值升高了 20%。

2.2 冲击韧性

不同焊接热输入下 X80 管线钢焊缝模拟粗晶热影响区夏比冲击韧性的变化规律如图 3 所示。

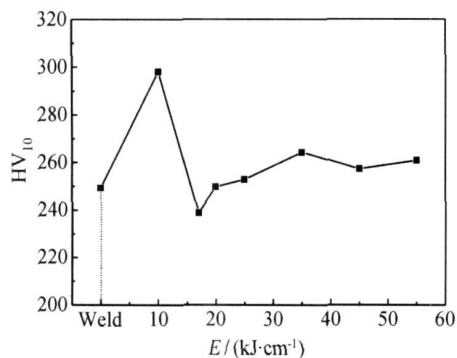


图 2 X80 管线钢 WCGHAZ 不同热输入下的硬度  
Fig. 2 The hardness of different welding heat input of X80 pipeline steel WCGHAZ

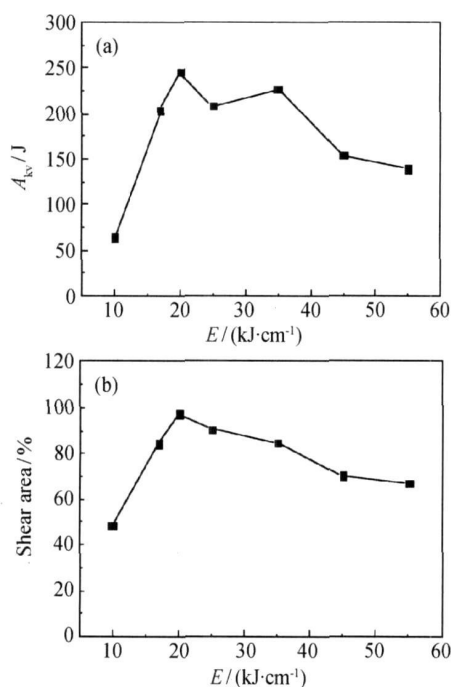


图 3 X80 管线钢 WCGHAZ 在不同热输入下的冲击功(a)和断口剪切面积(b)

Fig. 3 Impact absorption energy (a) and shear area (b) of different welding heat input of X80 pipeline steel WCGHAZ

上述实验结果表明, 焊接线能量对 X80 管线钢焊缝粗晶区的韧性有较大的影响。在 17~35 kJ/cm 焊接热输入规范下, WCGHAZ 可获得较好的韧性水平, 其中线能量参数为 20 kJ/cm 时, WCGHAZ 可获得最佳韧性水平。因此, 焊接线能量 17~35 kJ/cm 可作为 X80 制管焊的推荐焊接规范。而在 10~17 kJ/cm 和 35~55 kJ/cm 焊接热输入规范时, X80 管线钢焊缝粗晶区的韧性水平都有所下降, 不适宜于制管焊接施工。

为了研究 X80 管线钢焊缝粗晶区的韧脆转变能力, 测试了焊接线能量分别为 17, 20 kJ/cm 和 25 kJ/cm 三种工艺条件下焊缝粗晶区在系列温度下的冲击

韧性分布。三种不同焊接线能量下的 X80 管线钢焊缝粗晶区的冲击吸收功( $A_{kv}$ )—温度曲线和脆性断面率 (Brittle Fracture Ratio, BFR)—温度曲线如图 4 所示。实验结果表明, 三种不同焊接规范下 X80 管线钢焊缝粗晶热影响区在 -60℃ 以下韧性水平均不高。

采用能量评定法的弹性断裂转变温度 (Fracture Transition Elastic, FTE) 和断口形貌转变温度 50% (Fracture Appearance Transition Temperature, FATT) 评定的三种不同焊接线能量下的 X80 管线钢焊缝粗晶区的韧脆转变温度如表 5 所示。评定结果都是在焊接热输入为 20 kJ/cm 时韧脆转变温度为最低, 表现出较高的韧性水平。

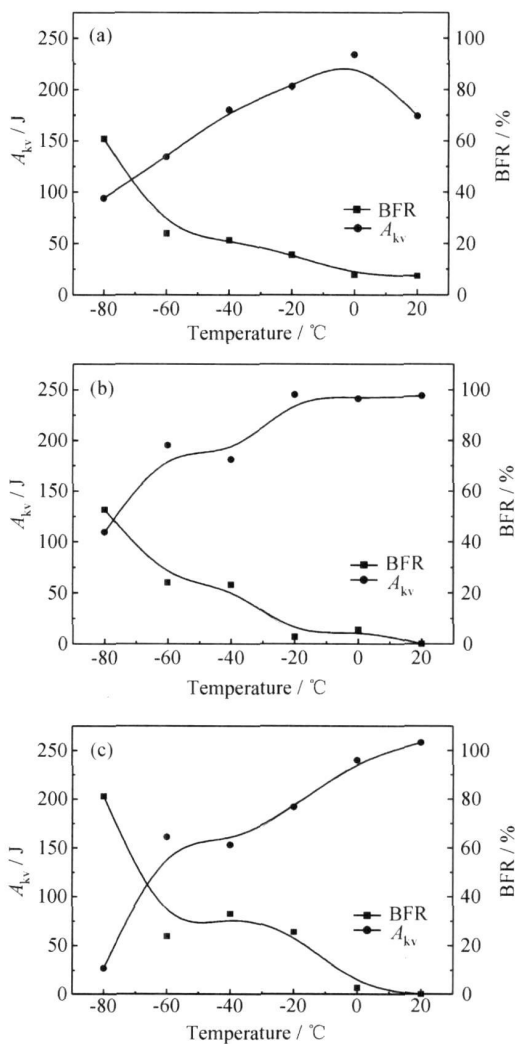


图 4 X80 管线钢 WCGHAZ 在系列温度下的冲击功和脆性断面率

(a)  $E = 17$  kJ/cm; (b)  $E = 20$  kJ/cm; (c)  $E = 25$  kJ/cm

Fig. 4  $A_{kv}$  and BFR at different temperatures of X80 pipeline steels WCGHAZ

(a)  $E = 17$  kJ/cm; (b)  $E = 20$  kJ/cm; (c)  $E = 25$  kJ/cm

表 5 X80 管线钢焊缝粗晶区不同热输入的韧脆转变温度

Table 5 The tough-brittle transition temperature of different welding heat input of X80 pipeline steels WCGHAZ

$E/(kJ \cdot cm^{-1})$	FTE/℃	50% FATT/℃
17	- 47	- 73
20	- 63	- 78
25	- 57	- 68

2.3 组织结构分析

图 5 为 X80 管线钢焊缝的原始组织, 主要为晶内针状铁素体、含少量多边形铁素体。与焊缝原始组织相比, 不同热输入下 X80 管线钢焊缝粗晶区的组织构成仍然以晶内针状铁素体和多边形铁素体为主。但焊缝在经历不同的焊接热循环后, 随着线能量的增大,  $t_{8/5}$  和高温停留时间发生变化, 致使针状铁素体和多边形铁素体的组分也发生变化。

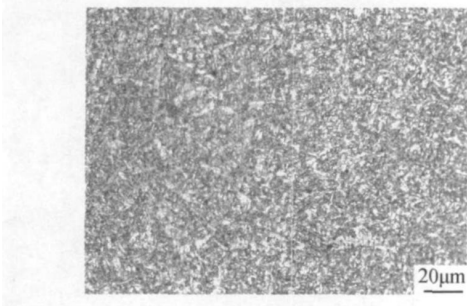


图 5 X80 管线钢焊缝原始组织

Fig. 5 OM of welding seam of X80 pipeline steels

图 6 为线能量 10kJ/cm 时的电子显微组织照片。由图 6 可见, 在低的焊接热输入下 ( $E = 10kJ/cm$ ), 由于冷却速率较大, 焊缝粗晶热影响区的组织形态多为从奥氏体晶界向晶内平行生长的细密板条。分析表明, 这种细密的板条组织为低碳马氏体 (Low Carbon Martensite, LM) 和贝氏体铁素体 (Bainitic Ferrite, BF)。图 6(b) 为低碳马氏体组织的 TEM 照片。马氏体板条内有高密度的位错缠结<sup>[6]</sup>, 因而具有较高的强度, 这与硬度实验结果相吻合。但由于在低的焊接热输入下, 快速冷却易造成晶格的畸变和内应力的增加, 因而对韧性造成影响。

在中等焊接热输入下 ( $E = 20kJ/cm$ ), 焊缝粗晶区的组织形态有所不同。图 7 为线能量 20kJ/cm 时的电子显微组织照片。由图 7 可以看出, 由于冷速有所降低, 焊接粗晶热影响区的组织主要为针状铁素体 (Acicular Ferrite, AF)。这种针状铁素体不同于管线钢中的铁素体, 组织形态为针片状形态<sup>[7]</sup>。同时, 高密度的位

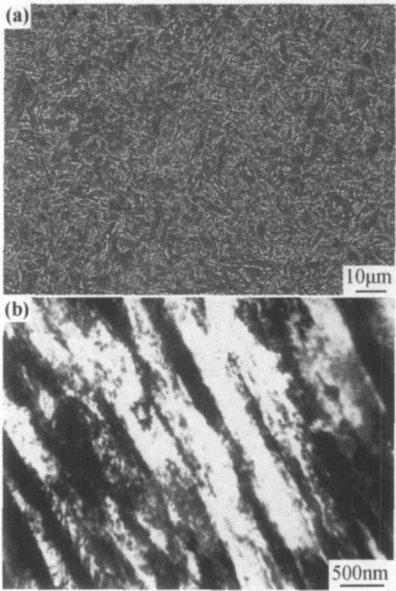


图 6  $E=10kJ/cm$  时 WCGHAZ 的组织形态

(a) 扫描电子显微组织; (b) 透射电子显微组织

Fig. 6 Microstructure of WCGHAZ at  $E=10kJ/cm$

(a) SEM; (b) TEM

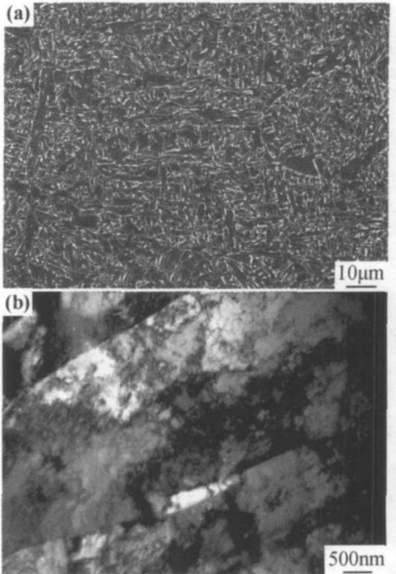


图 7  $E=20kJ/cm$  时 WCGHAZ 的组织形态

(a) 扫描电子显微组织; (b) 透射电子显微组织

Fig. 7 Microstructure of WCGHAZ at  $E=20kJ/cm$

(a) SEM; (b) TEM

错亚结构和弥散分布的微合金碳、氮化合物的沉淀析出等组织结构因素, 赋予材料优良的强韧特性<sup>[6]</sup>。

在高的焊接热输入下 ( $E = 55kJ/cm$ ), 由于冷却速率的降低, 焊缝粗晶区的组织形态发生明显的变化。晶粒粗化的倾向比较明显; 枝状晶的尺寸增大, 数量减少, 多边形铁素体 (Polygonal Ferrite, PF) 的比例显著增大 (图 8)。一般认为, 多边形铁素体不是管线钢的理想状态<sup>[7]</sup>。随着多边形铁素体含量的增加, 材料韧性水平降低。

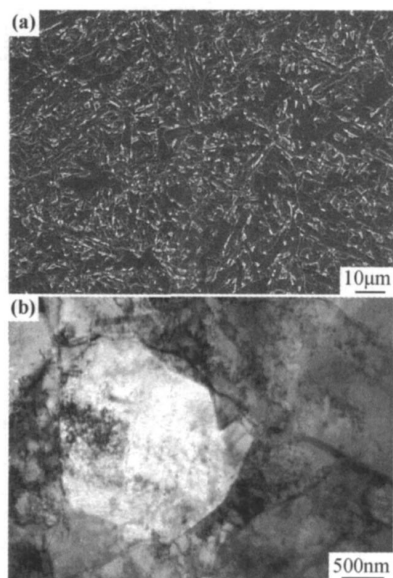


图 8  $E = 55 \text{ kJ/cm}$  时 WCGHAZ 的组织形态

(a) 扫描电子显微组织; (b) 透射电子显微组织

Fig. 8 Microstructure of WCGHAZ at  $E = 55 \text{ kJ/cm}$

(a) SEM; (b) TEM

### 3 结论

(1) 随着焊接热输入的增加, X80 管线钢焊缝粗晶热影响区的韧性发生变化。当焊接线能量为  $17 \sim 35 \text{ kJ/cm}$  时, X80 焊缝粗晶热影响区有较好的韧性, 可作为 X80 管线钢埋弧焊外焊时的推荐焊接工艺参数。

(2) 在  $10 \text{ kJ/cm}$  左右的较低的焊接线能量下, X80 焊缝粗晶热影响区的显微组织为板条状 BF 和 LM。

(3) 在中等焊接热输入 ( $E$  为  $17 \sim 35 \text{ kJ/cm}$ ) 时,

X80 管线钢焊缝粗晶热影响区的显微组织主要为晶内针状铁素体, 可获得较好的韧性, 其中线能量为  $20 \text{ kJ/cm}$  时, 焊缝粗晶热影响区可获得最佳韧性。当焊接线能量小于  $17 \text{ kJ/cm}$  和大于  $35 \text{ kJ/cm}$  时, X80 管线钢焊缝粗晶热影响区的韧性都有所下降。

### 参考文献

- [1] 高珊, 郑磊. 高强度高韧性 X80 管线钢的研制与应用[J]. 宝钢技术, 2007, (2): 1-4.
- [2] TUM A J, GU BELJAK N, SU STARSIC B. Fracture toughness of a high strength low-alloy steel weldment [J]. Materiali in Tehnologije, 2006, 40(6): 263-268.
- [3] OHYA K, KIM J. Microstructures relevant to brittle fracture initiation at the heat-affected zone of weldment of a low carbon steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A(9): 2574-2582.
- [4] DAVIS C L, KING J E. Cleavage initiation in the intercritically reheated coarse grained heat-affected zone: Part II. Failure criteria and statistical effects[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A(10): 3019-3029.
- [5] 陈楚, 张月娥. 焊接热模拟技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [6] 冯耀荣, 高惠临, 霍春勇, 等. 管线钢显微组织的分析与鉴别[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008.
- [7] 高惠临. 管线钢—组织性能焊接行为[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874090)

收稿日期: 2009-05-22; 修订日期: 2010-03-15

作者简介: 张骁勇(1971—), 男, 博士生, 副教授, 从事管线钢的研究和教学工作. 联系地址: 西安市电子二路 18 号西安石油大学材料科学与工程学院(710065), E-mail: xyzhang@xsyu.edu.cn

(上接第 65 页)

- [5] MEYERS M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [6] 马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
- [7] RAISER G, CLIFTON R J. High strain rate deformation and damage in ceramic materials[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1993, 115(3): 292-299.
- [8] LUO H. Experimental and analytical investigation of dynamic compressive behavior of intact and damaged ceramics[D]. Tucson: The University of Arizona, 2005.
- [9] 胡欣. 动态硬度表征装甲材料动态性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [10] KOEPEL B J, SUBHASH G. A novel technique to determine dynamic indentation hardness of metals[J]. Experimental Techniques, 1997, 21(3): 16-18.
- [11] SUBHASH G, KOEPEL B J, CHANDRA A. Dynamic indentation hardness and rate sensitivity in metals[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1999, 121: 257-263.

- [12] LU J, SURESH S, RAVICHANDRAN R. Dynamic indentation for determining the strain rate sensitivity of metals [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2003, 51: 1923-1938.
- [13] SUBHASH G, ZHANG H. Dynamic indentation response of ZrHf-based bulk metallic glasses[J]. Journal of Materials Research, 2007, 22(2): 478-485.
- [14] NEMAT-NASSER S, ISAACS J B, STARRETT J E. Hopkinson techniques for dynamic recovery experiments[J]. Mathematical and Physical Sciences, 1991, 435: 371-391.
- [15] HAN C, SUN C T. A study of pre-stress effect on static and dynamic contact failure of brittle materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6-7): 597-611.

收稿日期: 2009-08-26; 修订日期: 2009-12-15

作者简介: 王扬卫(1977—), 男, 博士, 讲师, 从事材料动力学性能测试表征、复合材料制备工作. 联系地址: 北京市海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学材料学院(100081), E-mail: wangyangwei@bit.edu.cn