

基于微观结构的 WC-Co 硬质合金 硬度预报模型

Microstructure-level Modeling for Hardness
Prediction of WC-Co Cemented Carbides

王 东,赵 军,李安海,崔晓斌

(山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部
重点实验室,济南 250061)

WANG Dong,ZHAO Jun,LI An-hai,CUI Xiao-bin
(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical
Manufacture of MOE,School of Mechanical Engineering,
Shandong University,Jinan 250061,China)

摘要: 采用“随机法”构建了考虑 WC-Co 硬质合金的 Co 相体积分数、晶粒平均粒径分布、晶粒形心分布以及晶粒取向角分布的微观结构模型,结合显微压痕实验的有限元模拟,提出一种基于材料微观结构的硬度预报模型。结果表明:“随机法”构建的微观结构模型较好地反映了材料的真实微观结构特征;材料的硬度受微观结构的影响较大,其中以 Co 相体积分数和晶粒平均粒径分布最为显著。模拟结果与实验结果吻合较好,从而证明了提出的模型能够准确地预报 WC-Co 硬质合金的硬度。

关键词: WC-Co 硬质合金;微观结构;硬度;显微压痕实验;有限元仿真

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.09.005

中图分类号: TG135+.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)09-0022-05

Abstract: A model is proposed by taking the microstructure of the cemented carbides into consideration and combining with the finite element simulation of micro-indentation experiments, in order to predict the hardness of WC-Co cemented carbides. The “random method” is applied to construct the microstructure model, with Co volume fraction, average grain size distribution, grain centroid distribution and grain orientation angle distribution being considered. The results show that the actual microstructure characteristics of material can be reconstructed, and the hardness is greatly affected by the microstructural parameters, among which Co volume fraction and the average grain size distribution are the most significant ones. The simulation results agree well with the experimental ones, and the established model is proved to be effective to predict accurately the hardness of WC-Co cemented carbides.

Key words: WC-Co cemented carbide; microstructure; hardness; micro-indentation experiment; finite element simulation

随着计算机技术和数值仿真技术的发展,使用计算机仿真模型预报材料性能的技术也取得了飞速的发展^[1-6]。硬度是硬质合金材料具备的基本性能之一,它在很大程度上取决于显微结构,这不仅包括各相的硬度,而且包括各相的体积分数、晶粒形状及取向、粒径的分布规律,这些造成了其微观结构的不均匀性和复杂性,使得材料微观结构的建模具有很大难度,因而构建硬度预报模型成为材料科学工作者亟待解决的关键问题。

Lee H. C. 等^[7]认为 WC 相、Co 相和 WC-Co 硬质合金有相同的约束参数,从而给出了计算硬度的经验公式。但是,Xu Zhihui 等^[8]提出了不同的观点,认为 WC 相、Co 相和 WC-Co 硬质合金的约束参数是不同的,提出了改进后的模型。然而,这些模型都有一定的适用范围。Roebuck B.^[9]作了一些工作,把模型的使用范围扩展到了纳米水平。这些模型^[7-11]大都是通过实验得出的经验公式,有一定的局限性。首先适用性不强,只在一定的条件下符合;其次不能直观地反映

微观结构的变化与宏观性能间的关系。Doerner M. F. 等^[12]使用压痕实验得到的加载曲线计算硬度,同时使用卸载曲线的斜率计算弹性模量。此后,Oliver W. C. 等^[13]对使用压痕实验的载荷-压痕深度曲线计算硬度和弹性模量的方法提出了改进,他通过 6 组材料的实验给出了卸载曲线的非线性表达式,并且给出了计算压痕面积的方法。这些研究为后来使用有限元仿真压痕实验计算硬度和弹性模量奠定了基础。Pramanik A. 等^[14]使用显微压痕实验的 3D 有限元模拟研究金属基复合材料的性能。Culha O. 等^[15]采用有限元研究 FeB 的压痕实验从而获得其力学性能。但是,这些有限元模型^[12-20]都很少考虑材料的微观结构对材料宏观性能的影响。

针对上述问题,本文作者将材料微观结构和有限元仿真相结合,提出了基于 WC-Co 硬质合金微观结构的硬度预报有限元模型。通过实验验证,证明该方法能准确预报材料的硬度。它不仅减轻了实验的强度,节省了时间,更重要的是可以直观地研究材料微观结构的变化对宏观性能的影响,进一步加深了解微观结构和宏观性能间的关系。

1 硬度预报有限元模型

1.1 微观结构模型的建立

由多相组成的 WC-Co 硬质合金的微观结构在外观上呈现出很大的随机性,主要表现在以下方面:(1)晶粒形心位置的分布是随机的;(2)晶粒平均粒径是随机分布的;(3)晶粒的形状是不完全相同的;(4)晶粒取向角的分布是随机的。但是通过研究微观结构参数的统计结果发现,晶粒形心位置和取向角趋于均匀分布 $U(a, b)$,而晶粒平均粒径趋于正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。基于以上原因,提出了“随机法”构建微观结构模型的思路,使用 VC++ 和 MATLAB 开发平台,通过随机函数控制晶粒形心位置、晶粒平均粒径、晶粒取向角的分布以及晶粒形状,并且通过程序控制材料中 Co 黏结相的体积分数,从而构建了符合真实微观结构特征的模型,并开发了可视化的二维微观结构参数化建模系统。在模拟过程中,给出具体的晶粒尺寸分布的设计参数 μ, σ 后,将晶粒尺寸的上下限确定为 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$,这是因为观察其统计规律发现有超过 95% 的晶粒尺寸分布在这个区间内。图 1 所示为 WC 平均粒径 $1\mu\text{m}$, Co 体积分数 15% 的 WC-Co 硬质合金微观结构的扫描电镜 (SEM) 照片,明显可以看出它的特征具有随机性。图 2 是结合真实微观结构的特点使用“随机法”构建的微观结构模型。对比图 1 和图 2 可以看出,

基于“随机法”构建的 WC-Co 硬质合金微观结构模型符合材料真实微观结构所具有的随机性特征。

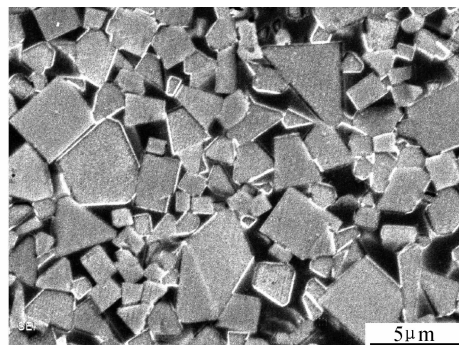


图 1 WC-Co 硬质合金材料微观结构 SEM 照片
(WC 平均粒径 $1\mu\text{m}$, 15%Co)

Fig. 1 SEM micrograph of the WC-Co cemented carbides material (WC average grain size $1\mu\text{m}$, 15%Co)

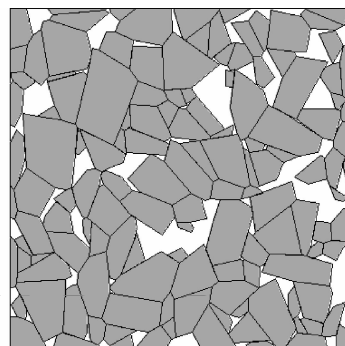


图 2 基于“随机法”生成的典型微观结构模型
(WC 平均粒径 $1\mu\text{m}$, 15%Co)

Fig. 2 Typical microstructure model based on “random method”
(WC average grain size $1\mu\text{m}$, 15%Co)

1.2 有限元仿真模型的建立

结合 WC-Co 硬质合金微观结构和显微压痕实验,构建 WC-Co 硬质合金硬度预报有限元模型。首先根据目标微观结构参数在自主开发的软件中构建出符合要求的微观结构,再导出 Python 语言编写的脚本文档,然后导入有限元软件 ABAQUS,生成仿真模型,设置材料属性和模拟过程,最后进行仿真计算。

显微压痕模拟过程中使用维氏压头,其中心线与锥面间的夹角为 70.3° ,由于压头在实际过程中变形很小,因此把压头等效为刚体。从文献[4]中获得 WC 相和 Co 相的材料属性参数,如表 1 所示。假设 WC 是弹性体,而 Co 为弹塑性体。在材料的制备过程中仅有 1%~2% 的偏析现象发生,因此在微观结构材料模型中可不考虑偏析引起的影响。同时由于模拟中的微观结构模型尺寸较大,在应力场中包含有数百晶粒,因此假设材料是各向同性的。

表 1 WC 和 Co 材料属性参数

Table 1 Material property parameters of WC and Co

Material	Density/ (g · cm ⁻³)	Elastic modulus/ GPa	Poisson's ratio
WC	15.6	714	0.19
Co	8.9	211	0.31

有限元模拟过程中压头和材料间的接触属性定义为无摩擦。模拟过程中限制微观结构材料下表面和右侧面的所有自由度,与压头接触的上表面定义为自由表面,而压头所在的左侧面定义为轴对称边界,限制其在 X 方向上的自由度,使其只能在 Y 方向上移动;并且限制压头的其他自由度,使它只能沿着 Y 方向运动平移。加-卸载过程中设定压头按照位移载荷沿 Y 方向作直线运动,即压入材料和退出材料。载荷加载位置为对称模型的对称轴处。位移载荷是时间的线性函数,加载载荷步是在压头上施加向下的位移载荷至 0.75μm 深度,卸载载荷步是给压头施加向上的位移载荷使其位移逐渐减少为 0。基于实际显微压痕实验过程构建的硬度仿真有限元模型,见图 3。

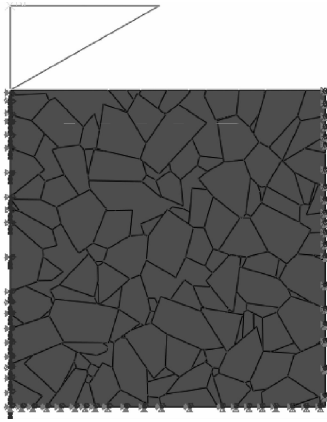


图 3 硬度仿真有限元模型

Fig. 3 Finite element model for the simulation of hardness

显微压痕实验可以看为一个准静态过程,压头缓慢压入被测材料。模拟过程中,压头也是逐渐被压入材料中,整个过程分为若干步来完成,卸载过程也是同样的。采用有限元仿真的方法,不仅可以看到加-卸载过程中材料微观结构内部的应力变化和分布,而且可获得载荷-压痕深度曲线。

2 硬度计算方法

首先,根据实际测量的材料微观结构参数为目标构建正确的微观结构模型,再导入有限元软件 ABAQUS,设置显微压痕实验的模拟过程,然后进行

仿真计算,得出载荷-压痕深度曲线,最后根据此曲线使用 OLIVER-PHARR 法^[7]和经典弹塑性力学中关于硬度的定义计算出材料的硬度。具体计算步骤如下:

$$p = B(h - h_f)^m \tag{1}$$

$$S = \left(\frac{dp}{dh}\right)(h_{\max}, P_{\max}) = Bm(h_{\max} - h_f)^{m-1} \tag{2}$$

$$h_c = h_{\max} - \epsilon \frac{P_{\max}}{S} \tag{3}$$

$$A = 24.5h_c^2 \tag{4}$$

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \tag{5}$$

式中: p 为载荷; B, m 为载荷拟合函数的系数; S 为弹性接触刚度; h_c 为接触深度; A 为接触表面的投影面积; H 为硬度; h 为压痕深度; h_f 为完全卸载后压痕深度; ϵ 是与压头形状有关的参数,对于维氏压头取 0.75。

以 WC-6Co 试样的硬度计算过程为例进行说明。测得试样的微观结构参数: Co 体积分数为 10.1%, 平均粒径为 1.1μm, 以此参数为目标在自主开发的软件中生成微观结构模型, 再导入有限元软件进行显微压痕实验的模拟, 模拟后得到材料的载荷-压痕深度曲线见图 4, 然后对材料的载荷-压痕深度曲线在 MATLAB 中进行拟合见图 5, 可以得出式(1)的参数 B ,

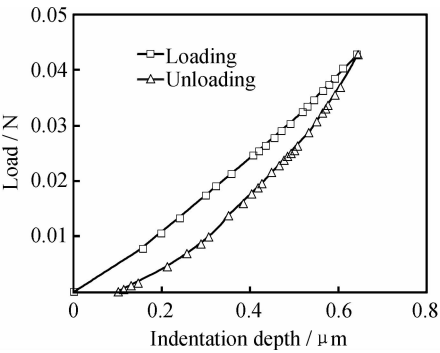


图 4 载荷-压痕深度曲线

Fig. 4 Variation of load with indentation depth

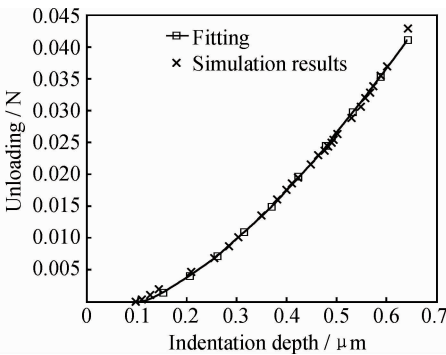


图 5 卸载载荷-压痕深度的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of unloading force vs indentation depth

m 分别为 0.1109 和 1.461,最后代入式(2)~(5)计算得到硬度 H 为 14.19GPa。

3 实验

选择 WC-6Co, WC-8Co, WC-10Co 和 WC-15Co 四种材料作为研究对象,其平均晶粒尺寸为 $1\sim2\mu\text{m}$,体积分数分别为 10.1%,13.2%,16.3%和 23.6%。选择抗弯强度条 B 型试样,其尺寸为 $20\text{mm}\times6.5\text{mm}\times5.25\text{mm}$,对试样表面进行抛光处理,处理后的表面粗糙度 $R_a\leq50\text{nm}$ 。实验使用显微维氏硬度计(401MVA),每种材料选取 5 个试样,采用单点法对每个试样进行硬度测试,测试载荷范围小于 1N。测试条件为室温(20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,加载保持时间为 5s,测量分辨率为 $25\mu\text{m}$,测试结果见表 2。

表 2 硬度测试结果				
Table 2 Experimental results of hardness				
Num	Hardness/GPa			
	WC-6Co	WC-8Co	WC-10Co	WC-15Co
1	15.57	12.95	14.34	9.60
2	15.28	14.34	12.28	8.25
3	14.96	15.90	13.49	10.47
4	15.56	14.15	11.60	12.95
5	12.70	13.47	14.30	9.11
Average	14.81	14.16	13.20	10.08

4 模拟结果与分析

4.1 微观结构对硬度的影响

对比各种微观结构参数模型的仿真结果可以得出,微观结构对硬度的仿真结果影响很大,其中以 Co 含量和晶粒平均粒径的影响最为显著。WC 含量越多,晶粒平均粒径越小,应力就越大,则硬度越高;Co 含量越高,晶粒平均粒径越大,应力越小,则硬度越低。图 6 所示为加载分析步完成后,材料的变形和内部 Mises 应力云图的分布。

4.2 硬度仿真结果分析及验证

分别以 WC-6Co,WC-8Co,WC-10Co 和 WC-15Co 四种材料的微观结构参数为目标设计微观结构模型,具体设计参数见表 3。每组参数分别随机生成 5 个模型,导入有限元软件 ABAQUS,进行显微压痕实验模拟,根据仿真结果计算得到硬度见表 4,实验结果和仿真结果的对比见图 7。

对表 3 的结果进行分析,发现相同参数随机生成的微观结构模型的仿真结果有一定的随机性,这是由

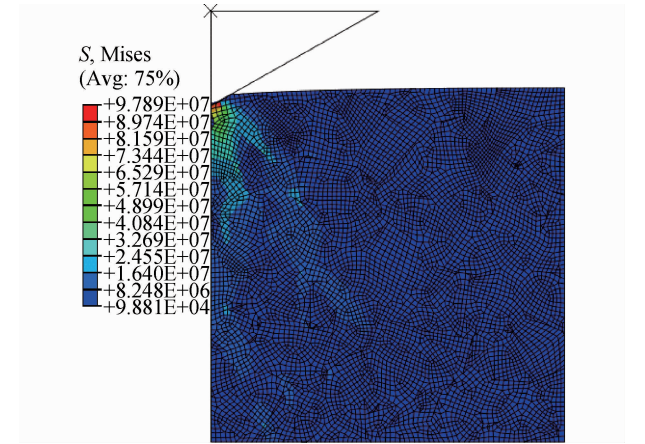


图 6 加载后模型的变形和 Mises 应力分布
Fig. 6 Deformation and Mises stress distribution of the model after loading

于在模拟过程中,与压头接触区域的微观结构对仿真结果的影响起主要作用,而此区域很小,所以就造成了仿真结果的离散性。通过多次生成微观结构模型的有限元模拟,对计算结果求平均值,这在一定程度上消除了其离散性。

表 3 微观结构模型的设计参数				
Table 3 Design parameters of microstructure model				
Design parameter	Microstructure model			
	WC-6Co	WC-8Co	WC-10Co	WC-15Co
Co volume fraction/%	10.1	13.2	16.3	23.6
Average grain size/ μm	1.1	1.3	1.3	2.2

表 4 硬度仿真结果				
Table 4 Simulation results of hardness				
Num	Hardness/GPa			
	WC-6Co	WC-8Co	WC-10Co	WC-15Co
1	16.66	13.14	12.17	10.76
2	12.96	13.73	11.78	9.68
3	14.87	11.56	14.64	10.36
4	13.24	12.48	10.54	7.14
5	15.53	15.08	12.94	12.57
Average	14.65	13.20	12.41	10.10

分析图 7 所示的材料硬度的实验和仿真结果可知,仿真和实验结果吻合较好,证明了该模型能准确地预报硬度。造成一定误差的主要原因如下:一是由于对 WC 晶粒作了弹性假设,对压头和材料间的接触作了无摩擦假设,对压头形状作了简化,这些就造成了仿真结果的偏低;二是由于制备工艺的差异,烧结出的材料不尽相同,使得材料硬度的测量值存在不确定性;三是材料的微观结构具有非均匀性,这就造成硬度的分布也具有一定的随机性。

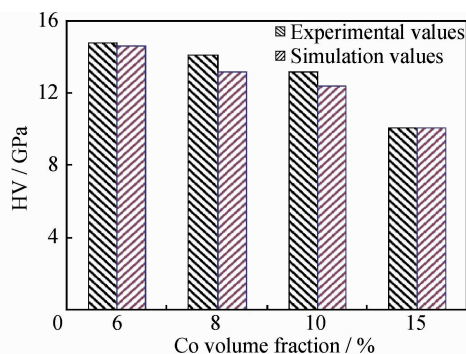


图 7 材料硬度的实验和仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of experimental and simulation results of hardness

5 结论

(1)使用“随机法”建立了控制晶粒平均粒径分布、晶粒形心分布、晶粒取向角分布和 Co 相体积分数等参数的微观结构模型,基本实现了 WC-Co 硬质合金微观结构的参数化建模和可视化。

(2)构建了基于 WC-Co 硬质合金微观结构的硬度预报有限元模型,实现了材料硬度的预报,为使用计算机进行材料设计奠定了基础;同时直观地反映了材料微观结构变化对其宏观性能的影响,进一步加深了对材料微观结构与宏观性能间关系的认识。

(3)对比实验结果和仿真结果,发现它们吻合较好,从而证明了提出的模型能够准确地预报 WC-Co 硬质合金的硬度。

参考文献

- [1] 任淮辉,李旭东. 二维材料微结构设计及数值模拟软件系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(6):861—868.
REN Huai-hui, LI Xu-dong. A design and numerical simulation system of 2D material microstructures[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(6):861—868.
- [2] 刘玉佳,燕瑛,苏玲. 双随机分布细观分析模型与复合材料性能预报[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2):206—210.
LIU Yu-jia, YAN Ying, SU Ling. Double-random distribution model and properties prediction of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(2):206—210.
- [3] 杨晓东,贺鹏飞,吴艾辉,等. 石墨烯纳米压痕实验的分子动力学模拟[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2010, 40(3):353—360.
YANG Xiao-dong, HE Peng-fei, WU Ai-hui, et al. Molecular dynamics simulation of nanoindentation for graphene[J]. Scientia Sinica Phys, Mech & Astron, 2010, 40(3):353—360.
- [4] SADOWSKI T, NOWICKI T. Numerical investigation of local mechanical properties of WC/Co composite[J]. Computational Materials Science, 2008, 43(1):235—241.
- [5] 卜肖冰,李落星,张立强,等. Al-Cu 合金凝固微观结构组织的

三维模拟及优化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9):2195—2201.

- BU Xiao-bing, LI Luo-xing, ZHANG Li-qiang, et al. Three-dimensional numerical simulation and optimization of solidification structure of Al-Cu alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9):2195—2201.
- [6] BERTOLINO G, BILGER N, CREPIN J. Modeling microstructures and microstructural effects on macroscopic and intragranular mechanical behavior[J]. Computational Materials Science, 2007, 40(3):408—416.
- [7] LEE H C, GURLAND J. Hardness and deformation of cemented tungsten carbide[J]. Materials Science and Engineering, 1978, 33(1): 125—133.
- [8] XU Z H, AGREN J. A modified hardness model for WC-Co cemented carbides[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 386 (1—2): 262—268.
- [9] ROEBUCK B. Extrapolating hardness-structure property maps in WC/Co hardmetals[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2006, 24(1—2):101—108.
- [10] FERREIRA J A M, PINA AMARAL M A, ANTUNES F V, et al. A study on the mechanical behavior of WC/Co hardmetals [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2009, 27(1):1—8.
- [11] RONALD W A. The hardness and strength properties of WC-Co composites[J]. Materials, 2011, 4(7):1287—1308.
- [12] DOERNER M F, NIX W D. A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments[J]. Journal of Materials Research, 1986, 1(4):601—609.
- [13] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6):1564—1583.
- [14] PRAMANIK A, ARSECULARATNE J A, ZHANG L C. Micro-indentation of metal matrix composites: a 3D finite element analysis[A]. 5th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACM2007)[C]. Brisbane: Engineers Australia, 2007. 246—251.
- [15] CULHA O, TOPARLI M, AKSOY T, et al. Calculation of the mechanical properties of FeB layer's by finite element method [J]. Mathematical and Computation Applications, 2011, 16(1): 113—124.
- [16] RAMESH KUMAR M V, NARASIMHAN R. Analysis of spherical indentation of linear viscoelastic materials[J]. Current Science, 2004, 87(8):1088—1095.
- [17] SILVA DIAS A M, MODENESI P J, GODOY G C. Computer simulation of stress distribution during Vickers hardness testing of WC-6Co[J]. Materials Research, 2006, 9(1):73—76.
- [18] CHA S I, LEE K H, RYU H J, et al. Analytical modeling to calculate the hardness of ultra-fine WC-Co cemented carbides [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(1—2): 234—244.
- [19] SHARMA K, BHASIN V, GHOSH A K. Property estimation

- ing high temperature deformation of magnesium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490(1-2): 411-420.
- [2] 李成倡, 潘清林, 刘晓艳, 等. 2124 铝合金的热压缩变形和加工图[J]. 材料工程, 2010, (4): 10-14.
LI C L, PAN Q L, LIU X Y, et al. Hot compression deformation and processing maps of 2124 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (4): 10-14.
- [3] PRASAD Y V R K, GEGEL H L, DORAIVELU S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation; forging of Ti-6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10): 1883-1892.
- [4] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300-950°C[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 391(1-2): 141-150.
- [5] PRASAD Y V R K, RAO K P. Processing maps for hot deformation of rolled AZ31 magnesium alloy plate; anisotropy of hot workability[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 487(1-2): 316-327.
- [6] GANESAN G, RAGHUKANDAN K, KARTHIKEYAN R, et al. Development of processing map for 6061 Al-15% SiC_p through neural networks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3): 423-429.
- [7] 张凯锋, 尹德良, 王国峰, 等. 热轧 AZ31 镁合金超塑变形中的微观组织演变及断裂行为[J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 5-10.
ZHANG K F, YIN D L, WANG G F, et al. Microstructure evolution and fracture behavior in superplastic deformation of hot-rolled AZ31 Mg Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(1): 5-10.
- [8] LEE S, CHEN Y H, WANG J Y. Isothermal sheet metal formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1-2): 19-24.
- [9] 余琨, 蔡志勇, 王晓艳, 等. 半连续铸造 AZ31B 镁合金连续热轧变形行为的数值模拟[J]. 材料工程, 2010, (9): 33-39.
YU K, CAI Z Y, WANG X Y, et al. Simulation of multi-pass hot rolling process of direct-chilled AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (9): 33-39.
- [10] KIM H Y, KWON H C, LEE H W, et al. Processing map approach for surface defect prediction in the hot bar rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 70-80.
- [11] NARAYANA MURTY S V S, NAGESWARA RAO B. On the development of instability criteria during hotworking with reference to IN718[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 254(1-2): 76-82.
- [12] SRINIVASAN N, PRASAD Y V R K, RAO P R. Hot deformation behavior of Mg-3Al alloy—a study using processing map[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 476(1-2): 146-156.
- [13] PRASAD Y V R K, SASIDHARA S. Hot Working Guide; a Compendium of Processing Maps[M]. OH: ASM International, Metals Park, 1997.
- [14] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 39-48.
- [15] CAVALIERE P. Flow curve prediction of an Al-MMC under hot working conditions using neural networks[J]. Comput Mater Sci, 2007, 38(4): 722-726.
- [16] REDDY N S, LEE Y H, PARK C H, et al. Prediction of flow stress in Ti-6Al-4V alloy with an equiaxed $\alpha + \beta$ microstructure by artificial neural networks[J]. Mater Sci Eng: A, 2008, 492(1-2): 276-282.
- [17] LIN Y C, ZHANG J, ZHONG J. Application of neural networks to predict the elevated temperature flow behavior of a low alloy steel[J]. Comput Mater Sci, 2008, 43(4): 752-758.
- [18] 赖静. 含氢 BT20 合金热变形流变应力和组织演变的 ANN 模型[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [19] 王春水, 彭志方, 于洋洋. 人工神经网络预测变形高温合金的持久强度[J]. 金属学报, 2003, 39(12): 1251-1254.
WANG C S, PENG Z F, YU Y Y. Prediction of creep-rupture strength of wrought Ni base superalloys using artificial neural network[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(12): 1251-1254.

基金项目: 科技部重大专项项目(2012ZX0401-081)

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2012-11-16

作者简介: 于建明(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属塑性成形工艺与模具设计, 联系地址: 重庆市沙坪坝区重庆大学 B 区 3 舍 512 室 (400044), E-mail: jianmingyu@126.com

(上接第 26 页)

- with automated ball indentation using artificial neural network and finite element simulation[J]. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2010, 4(4): 503-506.
- [20] TVERGAARD V, LEMAN A. Polymer indentation; numerical analysis and comparison with a spherical cavity model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011, 59(9): 1669-1684.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724402); 国家自然科学基金资助项目(51175310); 山东大学优秀研究生科研创新基

金资助项目(yyx10012); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2011ZZ010)

收稿日期: 2012-04-10; 修订日期: 2013-03-14

作者简介: 王东(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事刀具材料性能预报及微观结构优化的研究, 联系地址: 山东省济南市经十路 17923 号山东大学机械工程学院 2011 机制博(250061), E-mail: wangdong110104@163.com

通讯作者: 赵军(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高效加工与数控刀具(材料)技术的研究, 联系地址: 山东省济南市经十路 17923 号山东大学机械工程学院(250061), E-mail: zhaojun@sdu.edu.cn