

文章编号: 1001-1455(2007)01-0091-06

高速切削锯齿形切屑内绝热剪切带微观特征研究*

段春争, 王敏杰, 李国和, 蔡玉俊

(大连理工大学机械工程学院精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 使用光学显微镜、显微硬度计、X 射线衍射、SEM、TEM 等方法对高速切削 30CrNi₃MoV 高强度钢锯齿形切屑中第一和第二变形区内形成绝热剪切带和白层进行了观察和研究。结果表明, 形成了两种形式的绝热剪切带, 即低速下形成的形变带和高速下形成的转变带。转变带内的硬度高于形变带和切屑基体。X 射线衍射表明白层内发生了马氏体相变。TEM 观察发现, 形变带内为经历了大塑性变形的回火马氏体组织。转变带是由尺寸为 50~100 nm 的等轴晶组成, 绝热剪切带形成过程中发生了动态再结晶。

关键词: 固体力学; 绝热剪切带; 显微分析; 高速切削; 锯齿形切屑

中图分类号: O347; TG 501.1

国标学科代码: 130·15

文献标志码: A

1 引言

绝热剪切带是材料在高速变形如高速冲击、高速切削、爆炸、穿甲等条件下产生的一种特殊现象, 是材料在变形局部化发生后形成的宽约 10~100 μm 的局部化剪切带。研究绝热剪切带形成的过程可以弄清动态载荷和冲击载荷下材料的变形和破坏机理。早期的研究将绝热剪切带分为形变带和转变带两类。一些国外的研究者^[1]认为转变带是由于带内的绝热温升超过了相变点而形成的一种相变带, 带内的高硬度是马氏体相变硬度。而 C. L. Wittman 等^[2]认为它是一种高度细化的变形组织, 其硬度来源于变形硬化。我国学者报道^[3-4]: 随着应变和应变率的增加, 剪切带会从形变带向转变带转化, 形变带和转变带仅仅是剪切带发展演化过程中的不同阶段。近年来, 许多学者^[5-10]经研究认为绝热剪切带内发生了动态再结晶。很多难加工的金属材料如钛合金及高强度合金钢等在高速切削条件下会产生锯齿形切屑, 在锯齿形切屑的剪切区内经常会观察到白带或白层, 这就是高速切削条件下形成的绝热剪切带。研究切屑内绝热剪切带形成机理对于确定切屑类型, 切屑断裂机理以及切削过程的数值模拟都具有重要意义。由于切屑尺寸很小, 给微观组织观察造成较大困难, 目前还不能确定高速切削条件下绝热剪切带的微观本质和形成机理。

本文中使用的显微镜、显微硬度计、X 射线衍射、SEM、TEM 等方法对高速切削 30CrNi₃MoV 高强度合金钢过程中形成的锯齿形切屑内绝热剪切带的显微组织、硬度及微结构等进行了详细研究, 并探讨了高速切削条件下绝热剪切带的形成机理。

2 实验方法

研究材料为 30CrNi₃MoV 低合金高强度钢, 其化学成分的质量分数为: C 0.3%, Cr 0.90%, Si 0.27%, Mn 0.45%, Mo 0.30%, V 0.20%, Ni 3.15%。将材料加工成 $\varnothing 95 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的圆盘工件。热处理工艺为: 890 $^{\circ}\text{C}$ 油淬, 600 $^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ h}$ 回火, 硬度 (HRC) 为 41。将工件放在高速车床上进行正交切削, 并用压电式测力仪测量切削力。切削厚度 $a_c = 0.215 \text{ mm}$, 切削宽度 $a_w = 3.5 \text{ mm}$, 刀具前角 $\gamma_0 = -10^{\circ}$, 切削速度 $v = 6.2 \sim 298.5 \text{ m/min}$ 。随着切削速度的增加, 在一定临界速度下, 切屑形状由带状屑转变为锯齿形切屑。将锯齿形切屑收集起来, 制成金相试样, 观察面选择切屑的中截面, 观察绝热剪

* 收稿日期: 2005-09-28; 修回日期: 2006-05-30

作者简介: 段春争(1970—), 男, 博士, 讲师。

切带和白层的显微组织特征。将切屑放在显微硬度计下,沿切屑的横向测量基体和绝热剪切带内的硬度分布。选择不同切削速度下两种类型的绝热剪切带,使用 JSM-5 600LV 型扫描电镜(SEM)观察,研究两种绝热剪切带微观组织的差别。使用 X 射线衍射仪研究对未切削试样和切屑底边上白层进行金相分析。将切屑制成薄膜试样,使用 H-800 型分析透射电镜观察绝热剪切带的微细结构,根据形貌特征探讨其形成机理。

3 实验结果与讨论

3.1 绝热剪切带的显微组织特征

高速切削过程中会形成锯齿形切屑,切屑中第一、二变形区的位置如图 1 所示。在锯齿形切屑形成以后,随着切削速度继续提高,切屑的第一变形区内会形成两种类型的绝热剪切带即形变带和转变带,如图 2 所示。图 2 为光学显微镜下观察到的切屑和绝热剪切带的组织形貌。图中绝热剪切带位于切屑的第一变形区,位置呈周期性排列。图 3(a)和图 3(b)为图 2(a)和图 2(b)放大后的照片,其中形变带内的组织发生严重变形且具有较大的宽度,而转变带为白亮带,呈细长形,具有明显的边界且宽度很小。图 4 为使用 SEM 观察到的形变带和转变带

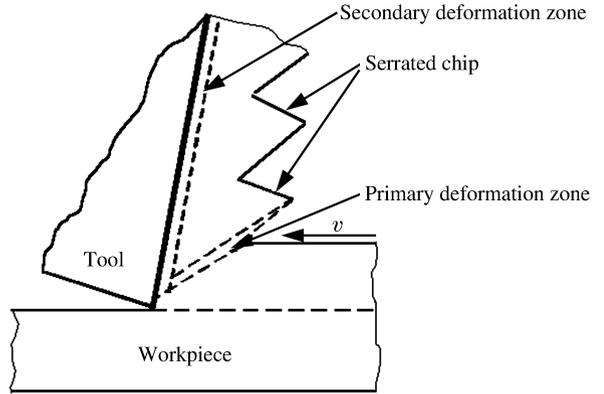
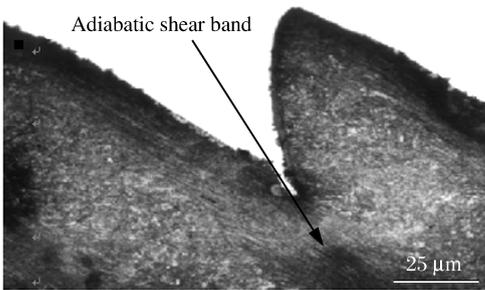


图 1 高速切削过程中的第一和第二变形区
Fig. 1 Primary and secondary deformation zones in high speed machining process

(a) $v=177.3$ m/min



(b) $v=298.5$ m/min

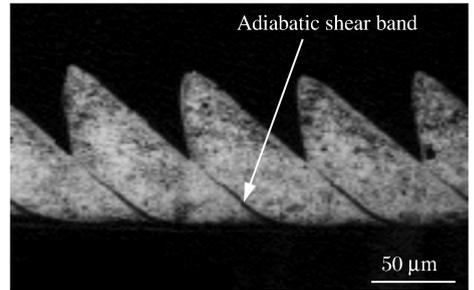
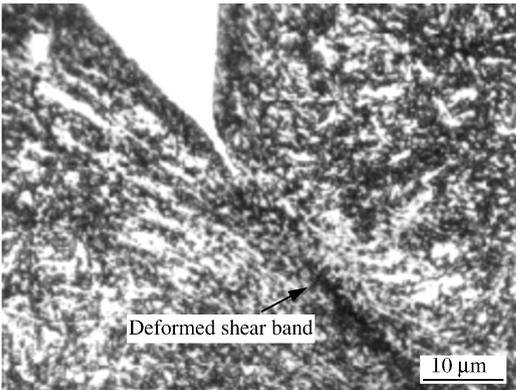


图 2 锯齿形切屑内绝热剪切带的分布

Fig. 2 Distribution of adiabatic shear bands in the serrated chips

(a) Deformed shear band



(b) Transformed shear band

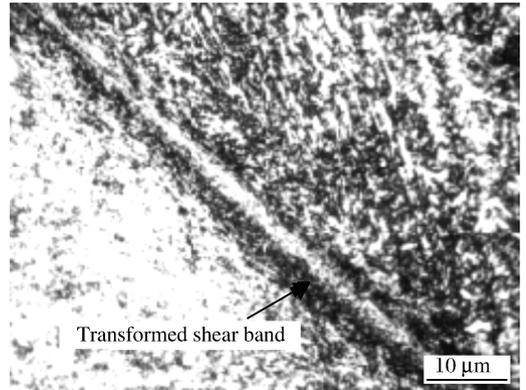


图 3 锯齿形切屑内绝热剪切带的显微组织

Fig. 3 Microstructure of adiabatic shear bands in the serrated chips

的组织形貌。在形变带内可以组织沿剪切区被拉长成细条状,整个剪切带区域都呈现出经历了大塑性变形的迹象。转变带内组织比周边变形组织和基体组织细小,隐约可见细小的点状形态,并且呈现出非变形组织形貌,而由基体到转变带中心,存在明显的变形过渡区。由此可见,图 4(b)所示的转变带实质上是一种由形变带和转变带组成的混合带。根据对锯齿形切屑内绝热剪切带的显微观察可知,随着切削速度的提高,变形区内的应变和应变率的随之增加,绝热剪切带的微观形态也逐渐发生变化,由具有明显变形特征的形变带向具有相变特征的转变带转化。

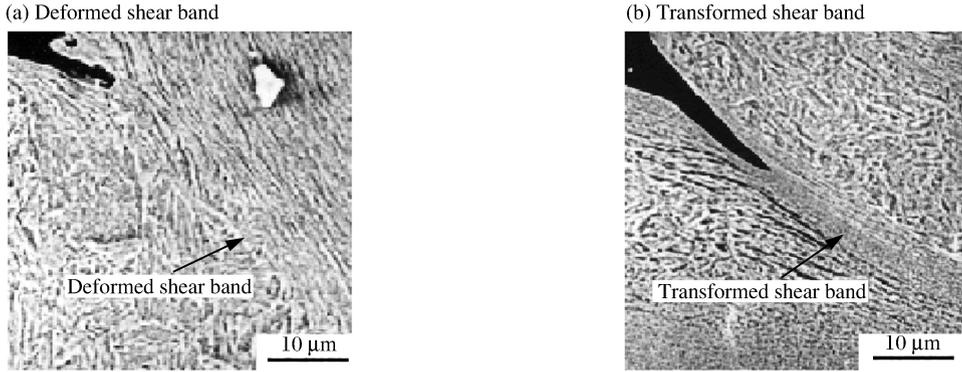


图 4 绝热剪切带的 SEM 形貌特征

Fig. 4 SEM micrographs of adiabatic shear band

3.2 绝热剪切带的显微硬度

将显微硬度测量结果制成曲线,如图 5 所示,图中横坐标 x 为测点距剪切带中心的距离。图中剪切带中心的硬度很高,已接近淬火马氏体硬度(本文中使用的材料 30CrNi₃MoV 经淬火后的硬度(HV)为 780),切削速度对剪切带硬度的影响应该与应变和应变率有关,而实验结果表明,切削速度没有影响带内硬度值,由此可以推断剪切带内可能发生了马氏体相变。绝热剪切带内的温升可用下式计算

$$\Delta T = k\gamma\tau / (\rho c) \quad (1)$$

式中: k 为塑性变形转化为热量的比例常数,称为 Taylor-Quinney 系数^[11],其值一般取 0.9; γ 为剪切带内剪切应变; τ 为平均剪切应力; ρ 为材料密度; c 为质量热容。本实验中, $\rho = 7.768 \text{ kg/m}^3$, $c = 446.7 \text{ J}/(\text{°C} \cdot \text{kg})$,当切削速度 $v =$

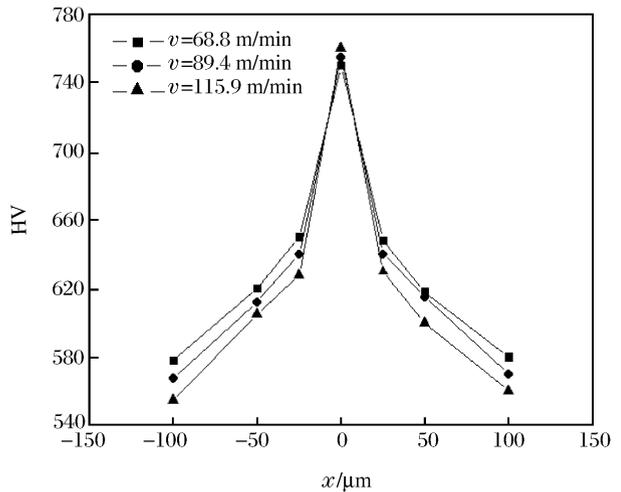


图 5 穿越绝热剪切带的硬度分布

Fig. 5 Distribution of hardness across adiabatic shear bands

298.5 m/min,测得的与切削速度方向平行的切削力分量分别为: $F_C = 210 \text{ N}$, $F_T = 230 \text{ N}$ 。经计算, $\gamma = 28$, $\tau = 68 \text{ MPa}$,应用式(1)计算得到剪切带内的温升 $\Delta T = 1200 \text{ °C}$ 。在考虑了热量散失和摩擦热对温升的影响后,剪切带内的温度已经超过材料的奥氏化温度(30CrNi₃MoV 钢的奥氏化温度是 750 °C),由此可见,绝热剪切带内的材料发生马氏体相变是可能的。所以,剪切带内的高硬度应来自于相变硬化。

3.3 白层的 X 射线衍射分析

在锯齿形切屑的第一变形区发现绝热剪切带的同时,在切屑底边的第二变形区位置发现了与绝热剪切带相连接的白层,如图 6 所示。A. E. Bayoumi 等^[12]认为这种白层是另一种形式的绝热剪切带,是第一变形区内发现的白色转变带的分支。但二者的形成机理是有区别的。白层在承受局部化变形的同时也经历了与刀具表面的剧烈摩擦,因此白层内材料温度可能更高,发生相变的可能性更大。对未切削原始试样和切屑底边进行 X 射线对比分析,结果见图 7,图中纵坐标为强度。未切削试样仅含有体心立

方的 α 相和少量碳化物,而切屑白层的 X 射线衍射图谱中出现了面心立方的 γ 相,这说明由于切削过程中产生的高温使 α 相转变成 γ 相,然后以非扩散形式转变为马氏体,白层内的温度至少超过 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

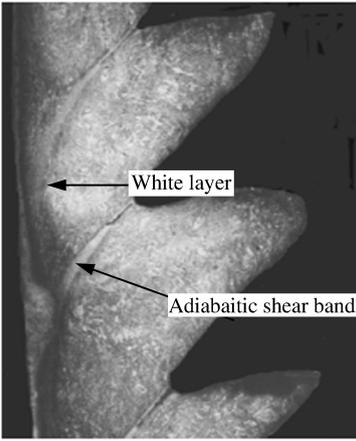


图 6 锯齿形切屑内的白层和绝热剪切带
Fig. 6 White layer and adiabatic shear band in the serrated chips

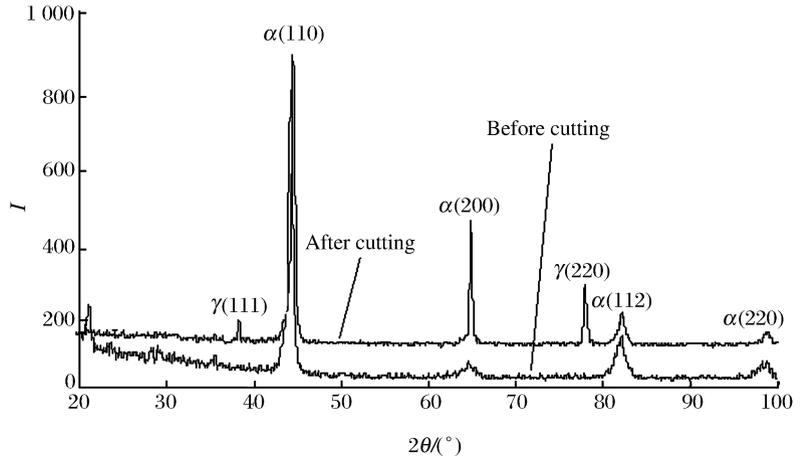


图 7 白层和未切削试样的 X 射线衍射对比分析

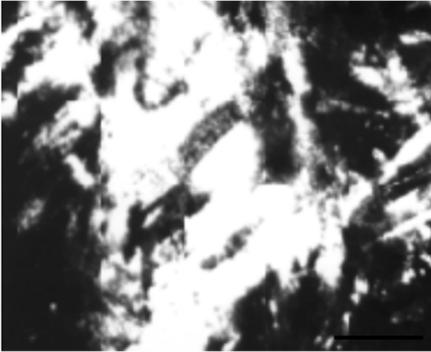
Fig. 7 X-Ray diffraction peaks of the white layer

in the serrated chip in comparison with that uncut of sample

3.4 绝热剪切带的微细结构

为了能够更深入地了解绝热剪切带的微观本质及形成机理,使用 TEM 对形变带和转变带的微细结构进行了观察,结果如图 8、图 9 所示。

(a) Deformed tempered martensite (BF)



(b) The diffraction pattern

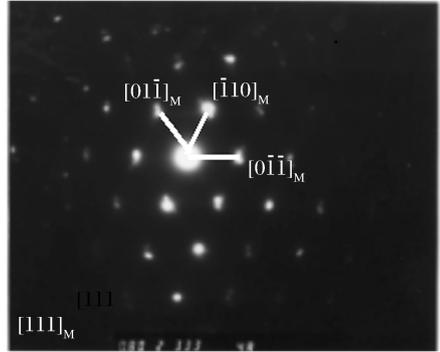
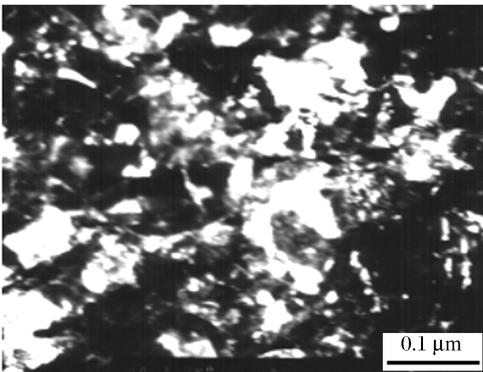


图 8 形变带的 TEM 形貌 ($v=177.3\text{ m/min}$)

Fig. 8 TEM micrographs of deformed band

(a) Equiaxed grains in the center of the shear band (BF)



(b) The diffraction pattern

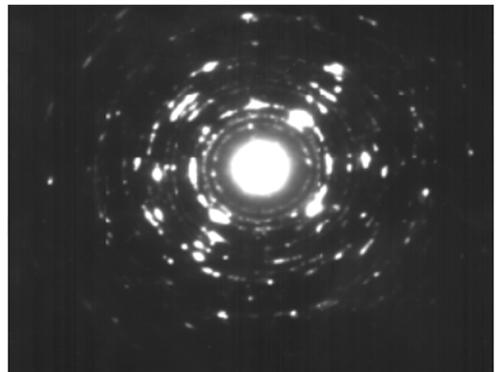


图 9 白色转变带的 TEM 形貌 ($v=298.5\text{ m/min}$)

Fig. 9 TEM micrographs of white shear band

图 8(a)为形变带中心的微细组织,板条组织发生了碎化,板条内及板条间存在高密度的位错。图 8(b)的衍射花样为规则的马氏体衍射点阵。图 9(a)为转变带中心区的等轴晶组织的明场相,等轴晶组织平均晶粒尺寸约为 50~100 nm,与有关文献^[5-10]观察到的动态再结晶组织非常相似。图 9(b)为转变带中心的选区衍射,衍射图案接近于多晶衍射环,带中心组织发生了严重细化。TEM 的观察结果表明,转变带内发生了马氏体相变和动态再结晶。而形变带只是一种经历了大塑性变形的回火马氏体组织。

4 结 论

(1) 高速切削 30CrNi₃MoV 高强度合金钢形成的锯齿形切屑第一和第二变形区内形成了绝热剪切带和白层。绝热剪切带分成两类即在较低切削速度下形成的形变带和高速下形成的转变带。

(2) 转变带内的硬度高于形变带和切屑基体,并达到了淬火马氏体硬度。对剪切带内温升的计算表明,转变带的硬度来自于相硬化。

(3) 白层的 X 射线衍射分析结果表明,白层内发生了非扩散性的马氏体相变。

(4) TEM 观察发现,形变带内为经历了大塑性变形的回火马氏体组织。转变带是由尺寸为 50~100 nm 的等轴晶组成,转变带中心区在形成过程中发生了动态再结晶。

参考文献:

- [1] Rogers H C. Material behaviour under high stress and ultra-high-loading rates[C]// Mescall J, Weiss V. 29th Sagamore Army Materials Research Conf. New York: Plenum Press, 1983:101-108.
- [2] Wittman C L, Meyers M A, Pak H R. The effect of high-strain, high-strain rate behavior of copper[J]. Metallurgical Transactions: A, 1990,21:707-712.
- [3] Wang L L, Lu W X, Hu S S, et al. Study on the initiation and development of adiabatic shear bands for a titanium alloy under high strain rates[C]// Kawata K, Shioiri J. Macro- and Micro-Mechanics of High Velocity Deformation and Fracture. IUTAM Symposium of MMMHVDF, August 12-15, 1985, Tokyo, Japan. Berlin: Springer-Verlag, 1987:359-406.
- [4] 董瀚,李桂芬. 高强度钢中绝热剪切带的组织和硬度[J]. 金属学报,1996,31(6):599-604.
DONG Han, LI Gui-fen. Microstructure and hardness of adiabatic shear bands in high strength steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996,31(6):599-604.
- [5] Cho K M, Lee S, Nutt S R. Adiabatic shear band formation during dynamic torsional deformation of an HY-100 steel[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993,41(3):923-932.
- [6] Meyers M A, Xu Y B, Xue Q. Microstructural evolution in adiabatic shear localization in stainless steel[J]. Acta Materials, 2003,51:1307-1325.
- [7] Xu Y B, Zhong W L, Chen Y J. Shear localization and recrystallization in dynamic deformation of 8090 Al-Li alloy [J]. Materials Science & Engineering: A, 2001,299:287-295.
- [8] Li Q, Xu Y B, Lai Z H. Dynamic recrystallization induced by plastic deformation at high strain rate in a Monel alloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2000,276:250-256.
- [9] 刘瑞堂,喻杰奎,姜凤春. 高应变率下 907A 钢绝热剪切带的微结构[J]. 机械工程材料,2002,26(8):17-20.
LIU Rui-tang, YU Jie-kui, JIANG Feng-chun. Microstructure of adiabatic shear bands in high-strain-rate deformed steel 907A[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2002,26(8):17-20.
- [10] Bai Y L. Adiabatic shear banding[J]. Res Mechanica, 1990,31:133-203.
- [11] Marc A Meyers. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994:23-35.
- [12] Bayoumi A E, Xie J Q. Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti-6wt. %Al-4wt. %V alloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 1995,190:173-180.

Study on microscopic characteristics of adiabatic shear bands in the serrated chips formed during high speed machining

DUAN Chun-zheng, WANG Min-jie, LI Guo-he, CAI Yu-jun
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology
of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Adiabatic shear bands and white layers in primary and secondary deformation zones within the serrated chips formed during high speed cutting of 30CrNi₃MoV steel were investigated by optical microscope, microhardness tester, XRD, SEM and TEM. Results show that two types of adiabatic shear bands, i. e. deformed shear bands and transformed shear bands, were formed during lower and higher cutting speed respectively. The microhardness in the transformed shear bands is higher than that in deformed bands and matrix of chips. XRD investigation shows that martensitic phase transformation takes place in the white layers. TEM observation reveals the equiaxed grains with diameter of 50~100 nm in center of transformed shear bands, this means that dynamic recrystallization occur during formation of shear bands.

Key words: solid mechanics; adiabatic shear band; microscopic analysis; high speed machining; serrated chip

* Corresponding author: DUAN Chun-zheng
E-mail address: dbf71@163.com
Telephone: 86-411-83015033

第十届全国岩石动力学学术会议通知

中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于2007年8月在葫芦岛召开“第十届全国岩石动力学学术会议暨岩石动力学专委会成立二十周年庆祝大会”,欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿与参加会议。

会议主题: 岩石动力学在国民经济建设中的地位与作用

会议专题: (1) 岩石动力学学科发展与回顾;(2) 岩石动态力学性质与本构关系;(3) 岩石和岩体中应力波的传播与衰减规律;(4) 岩石动态断裂机理与数值模拟;(5) 岩石动力学与防护工程;(6) 岩石洞、基、坡动态稳定性分析;(7) 岩石锚杆、锚索、土钉抗动载效应;(8) 岩石爆破与控爆技术;(9) 岩爆与冲击地压机理研究;(10) 岩石动力参数的测试新技术与新方法;(11) 桩基动测技术及其应用;(12) 其他与岩石动力学相关的研究。

论文经评审合格将刊登在《岩石力学与工程学报》2007年增刊上(EI、CPCD收录)。

按惯例,本次学术会议仍评选优秀论文。

论文格式: 见《岩石力学与工程学报》征稿启示

征稿截止日期: 2007年4月15日

联系方式: 430071 武昌小洪山中科院武汉岩土力学所 黄理兴

E-mail: lxhuang@whrsm.ac.cn