



硬质合金刀具前刀面刀屑粘焊形成及元素扩散理论模型

陈金国^{1,2}, 郑敏利¹, 李鹏飞¹, 张 为¹, 孙玉双¹

(1. 哈尔滨理工大学 国家地方联合工程重点实验室, 哈尔滨 150080;

2. 莆田学院 机电工程学院, 莆田 351100)

摘 要: 结合菲克第二定律描述了前刀面刀屑的元素浓度分布, 采用半无限长模型, 建立考虑温度影响的刀屑元素扩散方程; 通过分析切削过程中粘焊的形成过程, 利用夹紧件和焊接件在不同温度下的扩散分别近似模拟粘焊未产生和产生时在不同温度下的元素扩散情况, 探究温度和粘焊对元素扩散的影响; 同时, 结合扩散试件在不同温度下的元素浓度分布, 采用数据拟合软件进行数据处理及参数的确定。研究表明: 粘焊的产生并不影响扩散的最终浓度, 但在一定程度上影响扩散的进程; 随着温度的升高, 扩散速率及扩散距离都有相应地增大。研究结果对于从微观层面揭示原子运动规律, 进而提高刀具抗粘结破损性能具有重要意义。

关键词: 元素扩散; 硬质合金刀具; 粘焊; 扩散方程

文章编号: 1004-0609(2019)-04-0790-13

中图分类号: TG701

文献标志码: A

硬质合金刀具是由硬质碳化物粉末和质地较软的金属粉末(一般为 Co、Ni、Fe)作为原料, 经过球磨混合、成形、烧结而成的复合材料。由于其既具有超过高速钢的硬度, 又能承受较大的冲击载荷, 还能承受切削过程中的高温, 这些优异的性能使硬质合金逐渐成为应用最广泛的刀具材料^[1]。筒节是加氢反应器的关键部件, 其 2.25Cr1Mo0.25V 钢锻造毛坯的荒加工条件恶劣; 同时 2.25Cr1Mo0.25V 钢塑性高, 强度大, 切削加工时易与硬质合金发生粘焊, 属于难加工材料; 当进行荒加工时, 材料表面由于氧化皮或缺陷的存在造成部分凸起或凹坑, 刀具经过此处会受到较强的冲击载荷和热应力, 循环往复; 伴随着切削过程的进行, 元素扩散也不断发生, 改变刀具基体结构和性能^[2-4], 当粘焊层与基体结合力小于表面剪切力时, 刀具破损较严重。因此, 探究加工条件对元素扩散的影响具有重要意义。

针对异种材料元素扩散行为的理论分析、仿真和实验验证, 国内外学者已经进行了大量的研究。在切削过程中刀具与工件之间元素扩散方面: 孙凤莲等^[5]学者通过对硬质合金刀具和 M2 刀具切削 3Cr1Mo0.25V, 发现硬质合金中的 Co 粘焊相与工件中

Fe、Mo、Cr 等同族元素的亲和力很强, 温度较高时会引起刀-屑接触区的严重粘焊甚至破损; 王英姿等^[6]采用将切削后的硬质合金刀具在最大磨损处断面切割的方法, 对最大磨损处的截面进行观察和元素分析, 有助于对元素扩散磨损的分析检测; 严复钢等^[7]通过对重型切削过程中高温高压环境下的刀具扩散磨损及粘焊破损现象进行分析, 通过结合有限元仿真方法, 揭示了刀具磨损机理, 并通过理论分析, 对硬质合金刀具扩散磨损规律进行定量描述; SOKOVIĆ 等^[8]研究了涂层金属陶瓷工具/工件界面上的扩散, 发现元素扩散使工具边界组成发生变化, 增加了切削刃机械损伤的可能性; 在异种材料研究方面, 王敬^[9]通过对 Fe/Al 扩散焊接头界面微观组织和元素在界面附近的扩散行为以及元素扩散与形成界面过渡区之间关系的研究, 探讨了扩散焊界面反应层形成机理; 刘玉林等^[10]采用固态扩散方法实现高熵合金和铜的连接, 并分析扩散反应温度对界面反应行为和接头性能的影响, 结合测试分析得到 Cu 在高熵合金中的扩散系数; SUN 等^[11]研究了工艺参数在双金属热变形冶金结合过程中对元素扩散行为的不同影响, 提出了元素扩散模型来预测元素在冶金结合界面附近的集中值, 并在模型

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575146); 福建省中青年教育科研项目(JAT170506); CAD/CAM 福建省高校工程研究中心开放课题(K201709)

收稿日期: 2018-03-28; **修订日期:** 2018-11-06

通信作者: 郑敏利, 教授, 博士; 电话: 18646097088; 传真: 0451-86390512; E-mail: zhengminli163@163.com

中考虑了有效应变和有效应变速率的影响; AHMED 等^[12]基于 Boltzmann-Matano、Sauer、Freise 和 Hall 的方法对互扩散系数精度进行了比较研究; 刘超等^[13]利用腐蚀法研究了高碳铬轴承钢高温扩散前后带状组织的演化, 并结合扫描电镜分析了带状偏析下主要合金元素的分布, 通过高温扩散前和高温扩散后的 Cr 的偏析峰分布对比, 得出高温扩散可能促进元素的再分配; 张国庆等^[14]以 SiC 纤维、Ti 箔、Ti₂AlNb 箔为原料, 使用真空热压技术, 制备箔-纤维-箔叠层复合材料, 并对其组成和微观组织进行分析, 得到其界面反应产物以及界面处的连接形态; 邹军涛等^[15]对采用固液扩散连接方法制备了 ZChSnSb11-6/20 号钢双金属复合材料, 并通过仪器测试分析, 分析表明在材料结合区中 Fe 与 Sn 能形成互扩散过渡层, 界面结合强度提高; 庞秋等^[16]采用固体粉末包埋结合高温固相扩散工艺制备了新型三维网状开孔 Ni-Cr-Fe 泡沫合金, 结合仪器测试分析, 分析表明温度会使网丝 Ni-Cr-Fe 骨架中 Cr、Fe 元素浓度增加, 压缩强度提高和能量吸收性能降低; 刘舒婕等^[17]制备以 45 号钢为基体的高铝青铜等离子喷焊层, 并通过热扩散处理, 研究喷焊层与基体之间元素扩散对喷焊层组织及摩擦性能的影响; YANG 等^[18]通过粉末烧结制备复合陶瓷, 并利用 XRD 衍射峰观察两相的差异, 结果表明: 随着烧结温度的升高, 试样的晶粒尺寸和相对密度均有所增加, 且在 1500 °C 的电导率显著高于 1400~1450 °C 时, 可通过烧结过程中烧结温度对元素扩散影响解释; SILVA 等^[19]通过实验测量和扩散计算发现在热处理期间碳和其他合金元素会发生相互扩散, 扩散结果影响涂层基体和基底之间界面区域的力学性能。

关于元素扩散、界面反应对界面及材料性能的影响已有研究, 但针对切削加工过程中刀具前刀面粘焊的产生及其元素扩散的机理研究较少。因此, 本文结合切削实验分析粘焊的形成过程; 同时将夹紧件和焊接件在不同温度下保温一段时间, 近似模拟粘焊未形成和形成后的元素扩散情况, 分析粘焊及温度对元素扩散的影响; 根据菲克第二定律, 建立元素扩散模型, 并结合切削实验对模型进行验证; 希望通过对刀屑接触界面元素扩散行为的研究, 探究扩散行为的影响因素, 揭示刀具粘接破损机理, 对提高刀具寿命具有指导意义。

1 刀-屑元素扩散模型

在切削加工过程中, 硬质合金刀具前刀面刀-屑

相互接触, 接触面处的扩散属于异种金属材料间元素互扩散, 且元素浓度是随着时间变化而变化的, 因此可采用菲克第二定律定量描述扩散元素在某一状态下的浓度分布。又由于前刀面始终与新鲜的切屑接触, 其工件侧的浓度保持恒定值, 接触区域在温度和应力作用下造成工件材料在前刀面的残留, 并不断累积, 最终造成粘焊的产生, 因此选用半无限长扩散模型来描述刀屑侧的元素扩散状态, 其模型如图 1 所示。

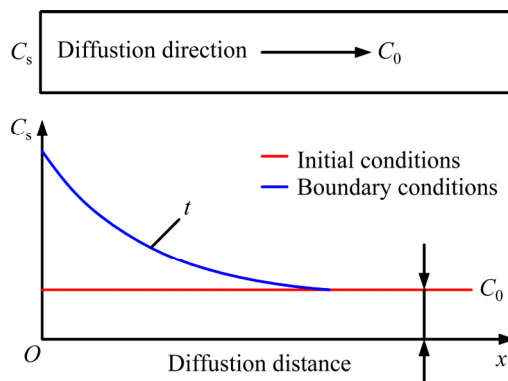


图 1 半无限长扩散模型

Fig. 1 Semi-infinite length diffusion model

切削过程是在热-力耦合作用下, 刀具与工件间亲和元素不断扩散, 前刀面的表面成分和显微组织发生变化, 最终导致刀具失效的过程。其中, 切削温度作为固体材料扩散中必不可少的一环, 直接影响扩散的进程, 为了探究温度的影响, 且接触区的扩散符合菲克第二定律, 则

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[p \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: C 为元素浓度; t 为扩散时间; D 为扩散系数; p 为温度影响指数; T 为有效温度; T_0 为有效参考温度。

令 $\lambda = x / \sqrt{t}$, 方程两边可简化为

$$\frac{dC}{d\lambda} = a \exp \left(- \frac{\lambda^2}{4D[p \ln(T/T_0)]} \right) \quad (2)$$

对两边进行积分, 再令 $\beta = \lambda / (2\sqrt{D})$ 得方程的通解为

$$C = A \int_0^\lambda \exp \left(- \frac{\lambda^2}{4D[p \ln(T/T_0)]} \right) d\lambda + B \quad (3)$$

式中: A 为相应元素的浓度变化幅度; B 为中心界面处的元素浓度。

根据结合界面处扩散元素浓度的初始条件和边界条件, 确定方程的解。

初始条件为

$$C(x=0, t=0) = C_0 \quad (4)$$

边界条件为

$$\begin{cases} C(x=0, t>0) = C_p \\ C(x=+\infty, t>0) = C_0 \end{cases} \quad (5)$$

最终得到扩散方程的最终误差函数解, 即元素扩散浓度计算公式为

$$C(x, t) = C_p - (C_p - C_0) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D[p \ln(T/T_0)]t}} \right) \quad (6)$$

式中: x 为扩散距离, μm ; C_0 为界面初始浓度, %; C_p 为工件材料扩散元素最终浓度, %; D 为扩散系数, m^2/s ; p 为温度影响指数; t 为扩散时间, s ; T 为有效温度, K ; T_0 为有效参考温度, K 。

2 刀-屑粘焊的形成

在实验室切削实验及工厂切削加工 2.25Cr1Mo0.25V 筒节材料的现场, 发现很多刀具前刀面有不同程度的粘焊, 如图 2 所示。在切削加工过程

中, 由于工件表面氧化皮或缺陷的存在造成部分凸起或凹坑, 导致刀具处于断续切削, 刀具经过此处会受到较强的冲击载荷和热应力; 2.25Cr1Mo0.25V 筒节材料具有较好的高温塑性及强度, 大的切削力使切屑底部与刀具表面紧密结合, 使两者的表面原子间的距离达到可相互吸引的程度; 高的切削温度使双方的表面原子都具有了较高的扩散能力, 可跨过界面相互扩散, 形成牢固的粘焊层, 即所谓的“粘刀”现象, 粘结的材料在切削过程中改变了原有的刀具前刀面几何形状, 使加工表面高低不平, 进而影响加工的尺寸精度^[20]。

已有的研究表明: Co 元素作为硬质合金中的粘结相能够润湿高熔点的难熔金属碳化物硬质相, 赋予刀具材料所要求的塑韧性, 但由于 Fe、Cr 和 Co 元素为同族元素, 有相同的点阵结构, 原子间亲和力强, 较易形成置换型固溶体。2.25Cr1Mo0.25V 筒节材料的切削试验结果表明, 切削过程中因大进给大切深使前刀面承受很大主切削力, 根据刀-屑最大接触面积与最小主切削力计算, 其刀-屑接触区的压强为 100 MPa, 从而保证了材料表面的紧密接触, 原子间距离达到较小级别; 高温增加了扩散能力, 使刀-屑中的元素穿过界面形成牢固结合。对合金刀具的前刀面进行面扫描分析, 得到其区域内的元素种类及含量, Fe、Cr 元素的存在进一步证明了扩散的发生, 如图 3 所示。

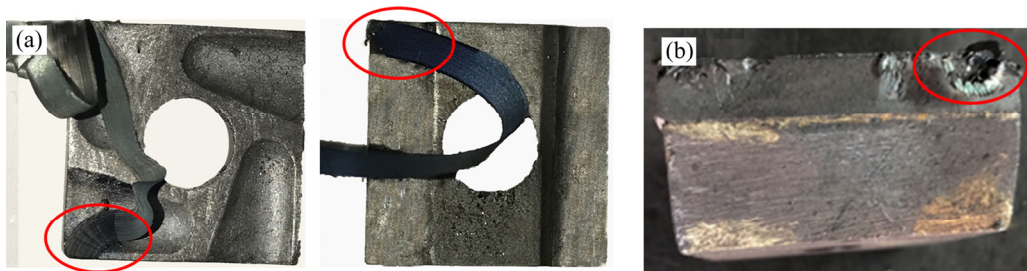


图 2 刀具前刀面的粘焊现象

Fig. 2 Bonding phenomenon of tool rake face: (a) Laboratory tools; (b) Processing site tools

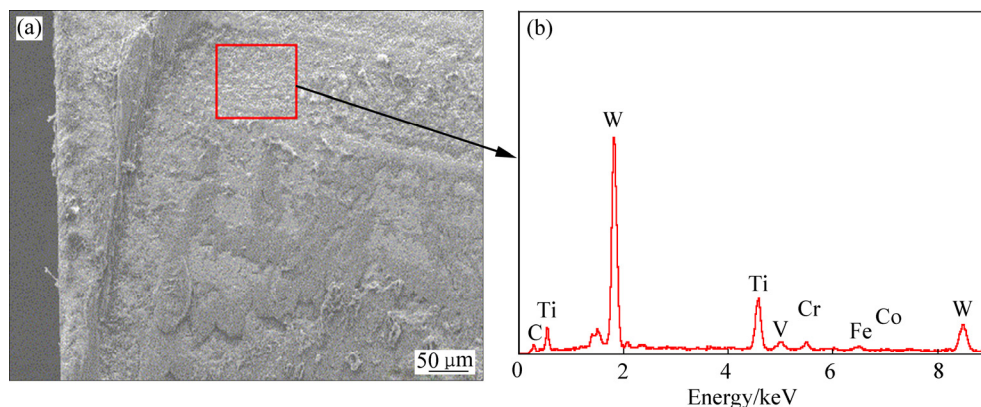


图 3 刀具前刀面面扫描分析

Fig. 3 Scanning analysis of tool rake face

采用高速摄影仪记录断续切削过程中刀屑接触情况的动态图像, 如图 4 所示。由图 4 可知, 材料在每次切出时, 前刀面大部分时间都伴随着切屑, 当下一次切入时, 受到冲击载荷的影响, 对于粘结不牢固的切屑在下次切削时很容易就会脱落, 而粘结牢固的切屑会带走部分刀具材料造成刀具前刀面的表面形貌改变, 随着切削过程的循环往复, 最终造成刀具前刀面的破损。

切削过程始终处在高温高压的环境下, 为元素的扩散提供了有利的条件, 同时结合切削塑性金属的第二变形区分析, 前刀面刀-屑粘焊由形成到最终刀具破损一般分为 4 个阶段。

1) 月牙洼的形成。切削过程的进行破坏了硬质合金刀具表面的完整性, 使刀具表面的硬质相裸露出来, 形成众多“孤岛状”颗粒, 如图 5 所示。这些硬质相的强度、硬度和熔点很高, 切削中的温度很难使其融化, 导致刚从工件切下的切屑表面也变得粗糙, 流过前刀面时与硬质点接触。由于硬质相的硬度更高, 工

件材料更易变形, 并在切削力和切削热的作用下形成刀屑密切接触, 元素扩散继续发生。

2) 刀-屑粘焊的初步形成。随着月牙洼磨损加剧, 部分切屑残留在刀具前刀面上, 刚形成时粘结面积很小, 切屑与刀具前刀面结合力较小, 不稳定且易发生脱落; 脱落后又会有新的切屑与刀具前刀面硬质点紧密接触, 在附近形成新的粘结; 如此反复, 直至硬质相间的间隙逐渐由强度、硬度较小的工件材料填充, 出现更多的点与点的接触, 使点粘结的区域增大; 加之高温高压的环境, 促进刀屑元素扩散的进行, 从而使所形成粘接层牢固粘附在刀具前刀面上, 由此, 刀具粘焊层初步形成, 如图 6 所示。

3) 刀-屑粘焊基本形成。随着刀-屑表面微凸体的不断摩擦、咬合, 更多的切屑残留在刀具硬质相的表面, 由原来点与点之间的结合变成面与面的粘结, 加之不断进行的元素扩散行为, 在刀具前刀面的切屑粘附强度大于切屑内部的剪切屈服强度, 最终形成变质

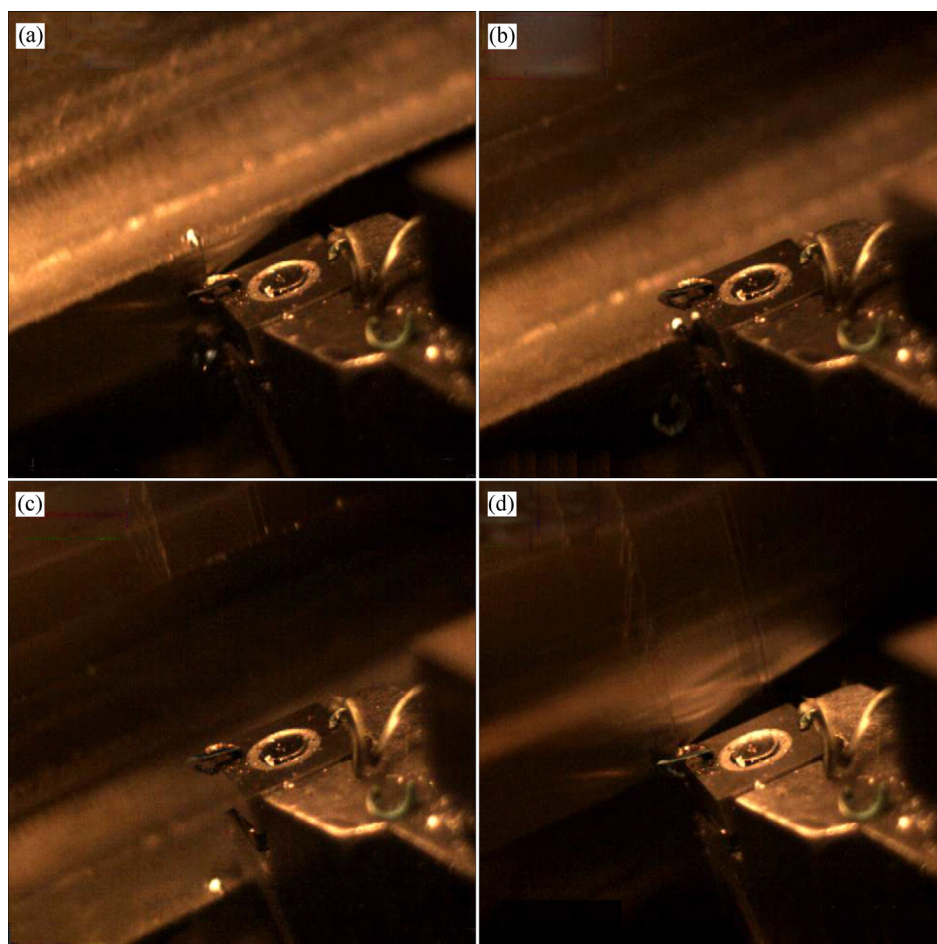


图 4 高速摄影仪记录的瞬时切削状态图像

Fig. 4 Images of instantaneous cutting state recorded by high-speed camera: (a) Before cutting into groove; (b) Just leaving tool contact surface and cutting into groove; (c) Cutting into groove; (d) Cutting out groove

粘焊层(如图 7 所示), 改变了切屑和硬质合金刀具的接触状态。

4) 前刀面破损产生。由于刀具前刀面形成的粘焊层始终受到交变热应力和机械应力的作用, 使得不断增大变厚的粘焊层与刀具基体的有效结合面积减小、

结合强度减弱, 由于粘焊层材料内部产生屈服并引起疲劳裂纹产生, 在剪应力的作用下, 裂纹沿平行表面扩展, 相互临近的裂纹连接起来, 当结合强度减小到某一程度时, 将粘焊层撕裂并被切屑带走, 造成刀具的破损, 如图 8 所示。

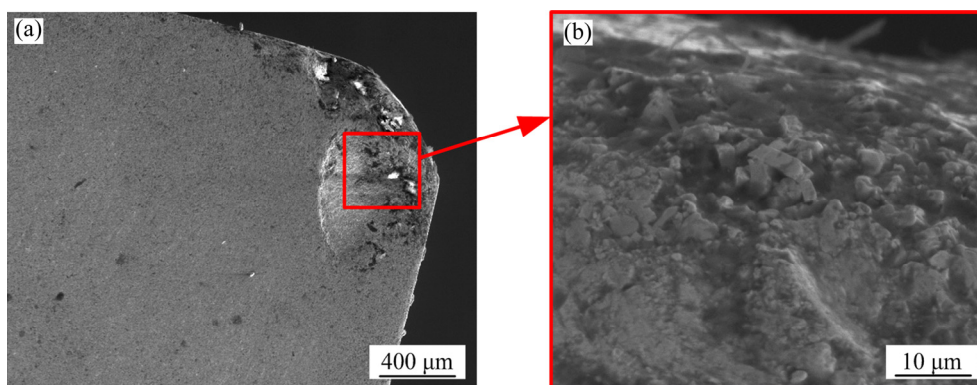


图 5 刀具前刀面磨损及表面磨损区的硬质相颗粒形貌

Fig. 5 Hard phase particles morphologies of tool rake face wear (a) and surface wear area (b)

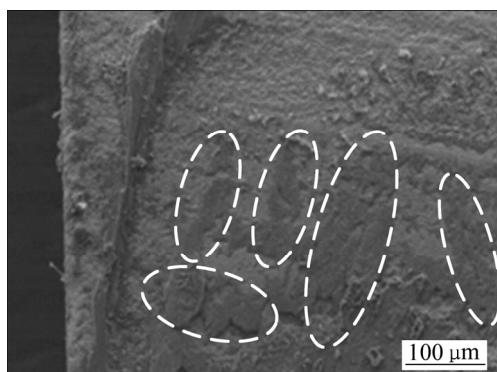


图 6 刀-屑粘焊的初步形成

Fig. 6 Initial formation of tool-chip bonding

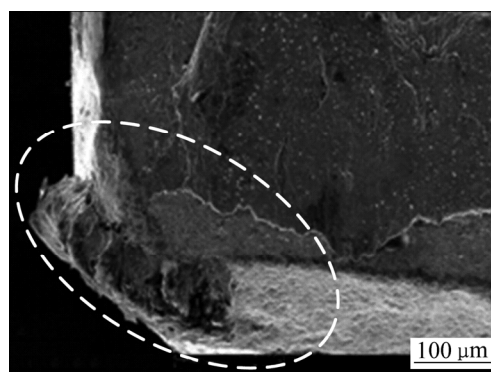


图 7 刀-屑粘焊的基本形成

Fig. 7 Basic formation of tool-chip bonding

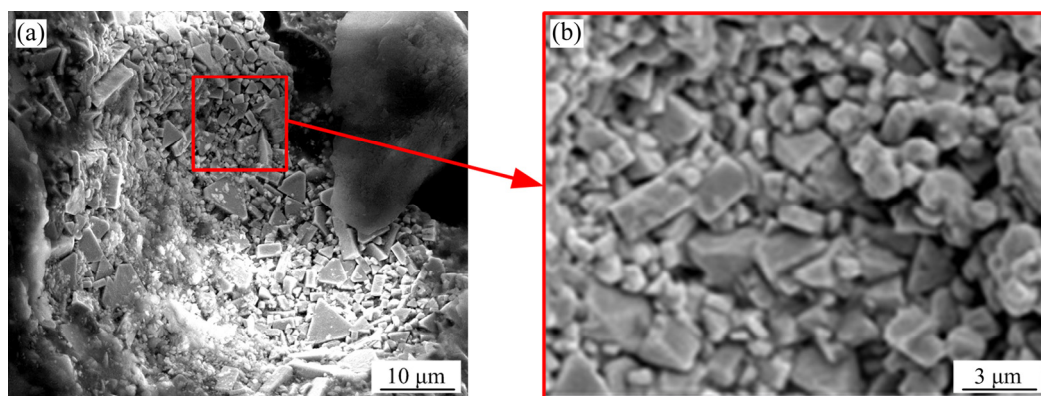


图 8 刀具前刀面破损及破损区的硬质相颗粒形貌

Fig. 8 Hard phase particles morphologies of tool rake surface damage (a) and damaged area (b)

3 扩散实验

元素扩散始终伴随着整个切削过程,“外来”元素的流入及刀具基体中元素的流失改变了刀具基体的成分和微观结构,进而影响刀具的性能;而温度作为最重要的切削条件之一,不仅影响切屑的颜色,还会影响元素的互扩散进程。为了更好的探究有无粘焊以及温度对元素扩散的影响,用 YT15 硬质合金刀具材料与 2.25Cr1Mo0.25V 筒节材料组成扩散偶,进行扩散实验探究其影响规律。

3.1 扩散偶的结构选择

综合以上刀-屑粘焊的形成可知,摩擦焊的过程与粘焊形成类似,一般经历 3 个阶段:第一阶段主要是摩擦过程,通过接触件之间的相互摩擦排除工件表面的油污、氧化物等,使纯净的金属表面暴露出来,由初期个别凸点之间的摩擦,逐渐扩大至面的摩擦;第二阶段是在反复摩擦的过程中造成接触面温度的升高,变形抗力下降,在静压力和交变剪应力的共同作用下,焊件表面塑性流动,促使纯金属表面的原子接近到原子能发生引力作用的范围内,出现原子扩散及相互结合,或出现再结晶现象;第三阶段是随着摩擦过程的进行,接触面积越来越大,焊接区内形成塑性流动层,并出现焊件间的机械咬合:前期的咬合点较少,咬合面积小,容易被破坏,后期的咬合点和面积不断增加,当大于剪切力时形成牢固接头。在静压力、温度和接触面摩擦力的作用下,粘结的面积由小到大,并伴随着元素的转移,最终形成稳定粘结或者牢固接头的过程。因此,采用机械夹紧和焊接结构两种试件进行实验验证,模拟切削过程中未产生粘焊和产生粘焊现象,探究粘焊对元素扩散的影响。

3.2 实验方案

机械夹紧试件的制备: 将筒节材料 2.25Cr1Mo0.25V 加工成尺寸为 16 mm×16 mm×5 mm 的正方体试样,在正方体试样的中心加工直径 6 mm 中心孔,用螺栓将正方体试样与 YT15 硬质合金试样固定在一起,通过扭矩扳手施加扭矩使其紧密接触。焊接试件的制备:先采用上述方法将 2.25Cr1Mo0.25V 材料与 YT15 硬质合金制备成夹紧件,然后采用压力焊方式将筒节材料与刀具材料焊接在一起,形成牢固的结合,如图 9 所示。在制备机械夹紧试件和焊接试件之前,要对工件和刀片的接触表

面的油污和氧化物去除,并进行研磨抛光,其接触表面粗糙度达到 0.05,以保证工件和刀片紧密接触。

扩散实验在真空炉(如图 10 所示)中进行,分别在 600、800 和 1000 °C 保温 60 min。用机械夹紧试件近似模拟切削过程中未产生粘焊时不同温度的元素扩散状况;用焊接试件近似模拟切削过程中产生粘焊时不同温度的元素扩散状况。

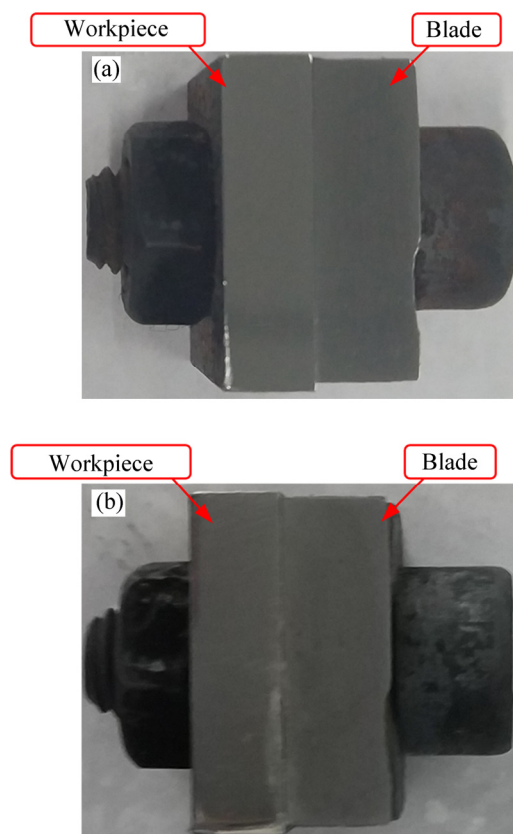


图 9 扩散偶的外观形貌

Fig. 9 Appearances of diffusion couple: (a) Clamped specimen; (b) Welded specimen

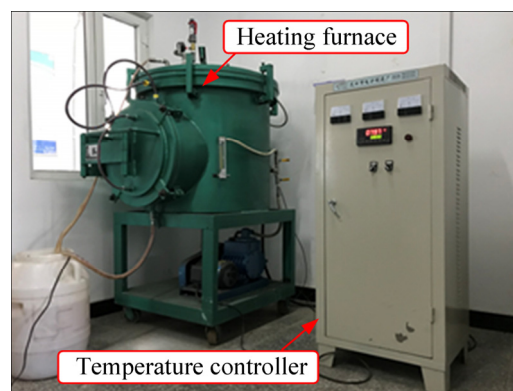


图 10 真空保温炉照片

Fig. 10 Photo of vacuum holding furnace

对扩散处理后的机械夹紧试件进行抛光和腐蚀处理,清除表面氧化膜并保证平面的光滑,处理后使用酒精清洗,得到洁净的样件。使用扫描电镜沿剖面进行观测,并进行能谱分析,得到接触区元素浓度分布的线扫描图谱,如图11所示。

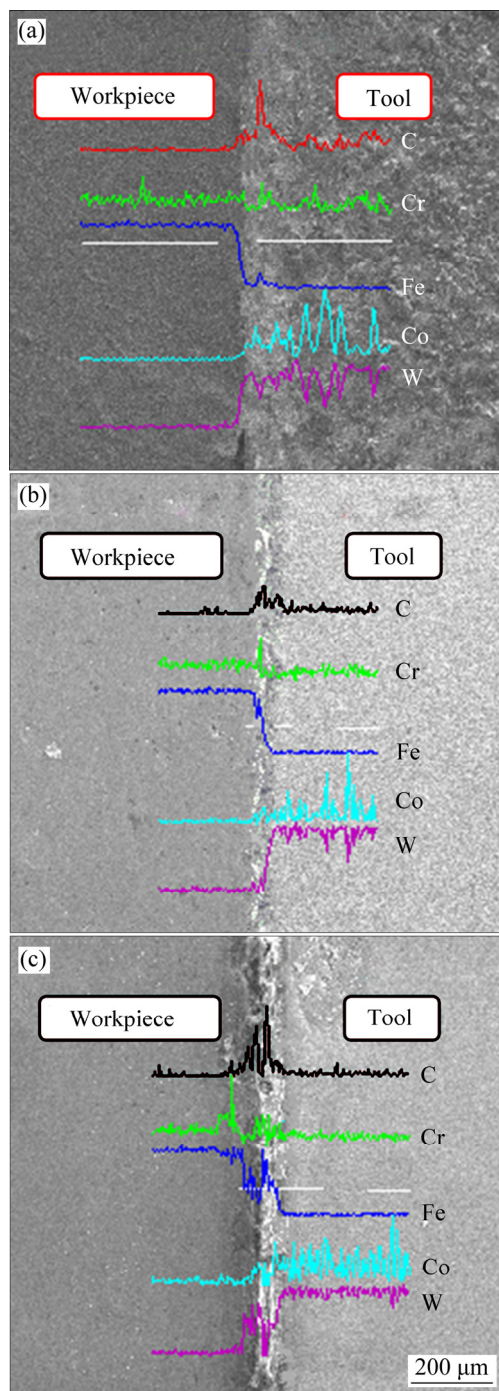


图11 不同温度扩散处理后机械夹紧试件界面的元素浓度分布线扫描谱

Fig. 11 Line scanning maps of element concentration distribution at mechanical clamping specimens interfaces after diffusion treatment at different temperatures: (a) 600 °C; (b) 800 °C; (c) 1000 °C

对扩散处理后的焊接件做同样的表面处理,得到洁净的样件。然后使用能谱分析仪进行剖面浓度扫描,如图12所示。

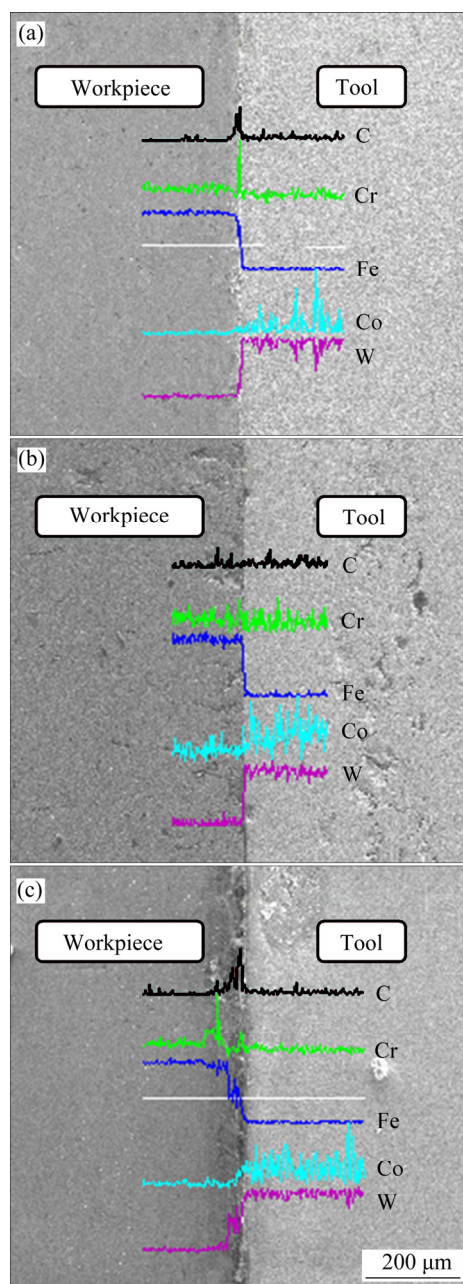


图12 不同温度扩散处理后焊接试件界面的元素浓度分布线扫描谱

Fig. 12 Line scanning maps of element concentration distribution at welded specimens interface after diffusion treatment at different temperatures: (a) 600 °C; (b) 800 °C; (c) 1000 °C

4 结果分析及模型验证

4.1 扩散实验结果分析

根据前人工作可知,在切削加工过程中,工件材

料或刀具材料只会与空气中的氧和氮产生对应的氧化物和氮化物, 其界面接触位置不会产生其它界面化合物^[21-22]。而本文中扩散偶实验是在真空炉中进行, 工件材料和刀具材料界面接触位置同样不会产生其它界面化合物, 由于 Fe 和 W 分别为工件材料和刀具中含量最多的元素, 其扩散行为相对于低含量元素更为明显; 同时 Co 作为硬质合金粘接相, 一方面润湿硬质相, 另一方面提高合金的塑韧性, 直接影响硬质合金的性能, 因而选择 Fe、W、Co 3 种元素作为主元素来描述扩散区的浓度变化。

从图 11 中分别提取 Fe、W、Co 3 种元素不同温度下硬质合金刀具侧的扩散浓度值, 绘制出元素浓度的变化曲线, 如图 13 所示。

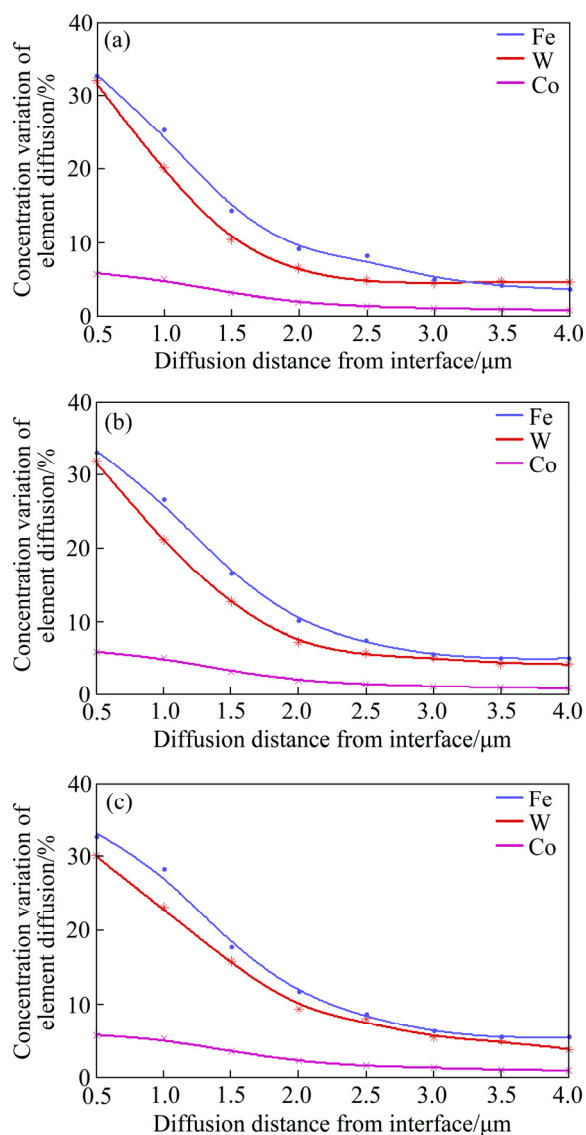


图 13 机械夹紧试件在不同温度下的 Fe、W、Co 元素浓度变化曲线

Fig. 13 Concentration variation curves of Fe, W and Co elements for mechanical clamping specimens at different temperatures: (a) 600 °C; (b) 800 °C; (c) 1000 °C

由图 13 可知: 未发生粘焊时, 在不同的温度下, 不同元素的扩散距离不同; 对于同种元素来说, 温度升高, 其扩散速率相应增加, 且温度对于 W 的影响随着温度的升高更加显著, 略大于对 Fe 和 Co 的影响; 对于不同元素来说, 相同温度下的扩散距离也不尽相同, 但都在 3~5 μm 之内; 当远离扩散界面时, 其浓度最终趋于一致。

同样, 对分别在 600 °C、800 °C 和 1000 °C 保温 60 min 的焊接试件进行表面处理, 从图 11 能谱图中提取刀具侧的扩散浓度值, 绘制出其浓度变化曲线, 如图 14 所示。

由图 14 可知, 当粘焊形成时, 对于同种元素来说, 随着温度的增加, 扩散速率和扩散距离相应增加; 对

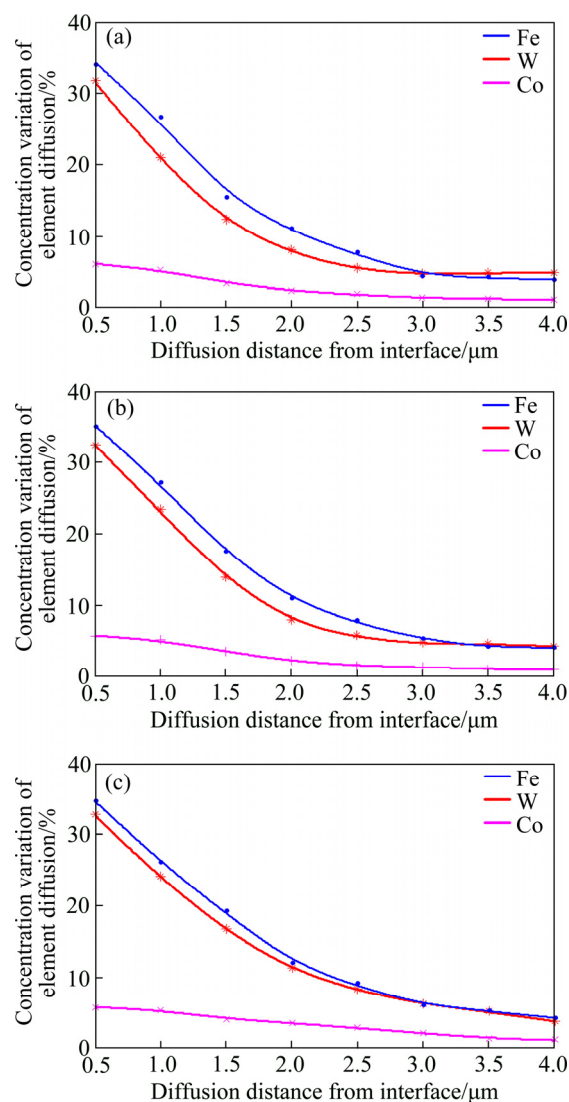


图 14 焊接件在不同温度下元素浓度变化曲线

Fig. 14 Element concentration variation curves of welded parts at different temperatures: (a) 600 °C; (b) 800 °C; (c) 1000 °C

于不同元素来说，相同温度和保温时间下的扩散距离不尽相同，但都在远离结合界面 3~5 μm 处元素浓度趋于一致。随着温度的升高，过渡区域的孔隙关闭和动态再结晶的速率增大，元素的扩散速率增加，当保温时间一定时，元素的扩散距离略有增加。扩散作为金属内部质点运动的基本方式，受周围原子的作用，原子的跃迁需要克服一定的势垒，常温常压下很难进行；温度的升高不仅提供了原子跃迁所需的能量，同时加速周围原子的热运动，部分原子由于振动而离开原来位置而留下空位，更易于原子的扩散，造成“外来”元素不断增多，且 W 和 Co 元素的流失加剧。同时，随着切削过程的进行，刀屑不断的在前刀面粘结、挤走、再粘结，循环往复，造成部分破碎的硬质相随切屑被带走，进而造成元素的“非正常”流失，改变刀具前刀面扩散层的微观结构，进而影响刀具切削性能。

对比图 13 和 14 可知，在相同的温度下，有无粘焊对同种元素有一定的影响，对不同的元素的影响是不同的。焊接试件中 Fe、Co 元素的扩散浓度及速率略高于夹紧试件中同种元素的扩散，并都在远离界面处趋于一致，说明粘焊对 Fe 的扩散浓度及速率在距离界面几微米处有轻微的影响，但并不影响其扩散的最终浓度。同样，焊接试件中 W 元素的扩散高于夹紧试件中 W 元素的浓度，同样不影响其最终浓度，但在 1000 ℃ 时对 W 的影响更为明显，说明粘焊的形成在一定程度上促进 W 的扩散。

4.2 模型的验证

1) 模型参数确定

以刀屑接触界面作为边界，使用半无限长扩散模型得到刀具侧的元素浓度分布方程可以简化为以下形式：

$$C = A \operatorname{erf}(Kx) + B \tag{7}$$

式中：C 为某元素浓度；A 和 B 为拟合系数；且

$$K = \frac{1}{2\sqrt{D[p \ln(T/T_0)]t}}$$

分别对 1000 ℃ 下 Fe、W、Co 3 种元素在刀具侧的元素浓度变化分布进行线性拟合，如图 15 显示了 3 组拟合曲线。

方程中参数值在表 1 中列出。

2) 模型的验证

实际切削过程中由于氧化皮、砂眼、凹陷等的存在，切削时基本处于断续切削的状态，切削用量大，切削过程并不稳定，其振动较大，所受冲击载荷较大，

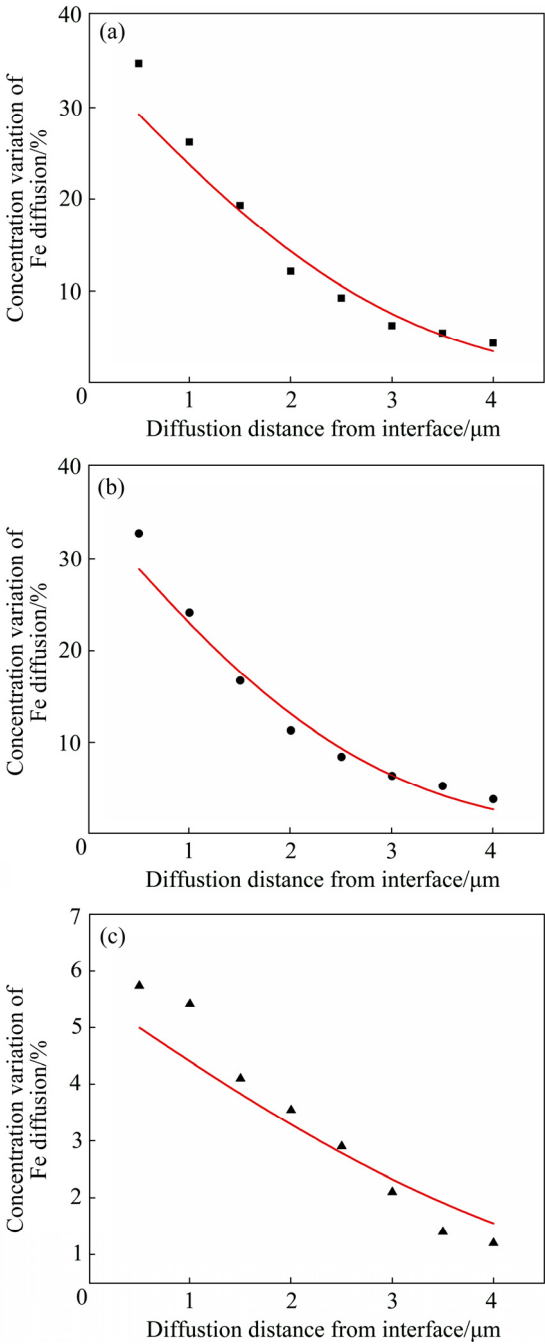


图 15 Fe、W、Co 元素变化浓度拟合曲线
Fig. 15 Concentration variation fitting curves of elements Fe (a), W (b) and Co (c)

表 1 扩散方程中未知参数

Table 1 Unknown parameter of diffusion equation		
Element	<i>p</i>	<i>D</i> /(m ² ·s ⁻¹)
Fe	0.185	3.8×10 ⁻¹³
W	0.147	5.51×10 ⁻¹³
Co	0.428	4.39×10 ⁻¹³

因此为了更切合实际工况, 在工件表面开一通槽, 当刀具经过通槽切入, 所受冲击较大, 较易导致刀具破损; 当刀具切出时, 切屑容易残留在刀具表面, 形成粘焊。

为了验证模型的正确性, 实验室采用牌号为 YT15 的硬质合金刀具进行切削筒节材料 2.25Cr1Mo0.25V 的切削实验。图 16 所示为车削筒节材料搭建的切削试验平台。车削工艺参数如转速为 110r/min; 切削深度 $a_p=2$ mm; 进给量 $f=0.2$ mm/r; 切削时间 $t=60$ min。

为了便于对其进行测量分析, 首先从粘结位置处沿横向进行线切割, 得到的试样, 并用砂纸和抛光机进行打磨, 消除端面“毛刺”, 保证其端面的平整; 将打磨的样件放入腐蚀液(氢氧化钠和铁氰化钾按照 1:5 的比例放入烧杯, 并加入无水乙醇)中 1~3 min, 除

去表面的氧化物和杂质等, 并用酒精容易进行清洗, 得到洁净的试件, 便于进行测量; 对得到干净表面的试样进行电镜扫描和能谱分析, 得到表面的微观形貌和元素浓度分布, 如图 17 所示。

从图 17 中提取 Fe、W、Co 3 种元素的浓度, 并绘制其元素浓度变化曲线, 并用方程得出其理论浓度变化曲线, 其趋势基本吻合, 如图 18 所示。

由图 18 可知, 理论值和实验测量值在一定区域内很好的吻合, 其中有些区域浓度会高于或低于理论浓度值, 但其浓度误差基本控制在 30% 以内, 误差可能是由于以下几个方面引起的: 试件处理过程不够完善, 可能造成工件表面氧化皮未完全脱落, 致密的氧化膜以及材料本身存在的砂眼等缺陷可能影响扩散的进行; 在进行元素浓度测量时, 仪器本身误差造成一定的偏差。

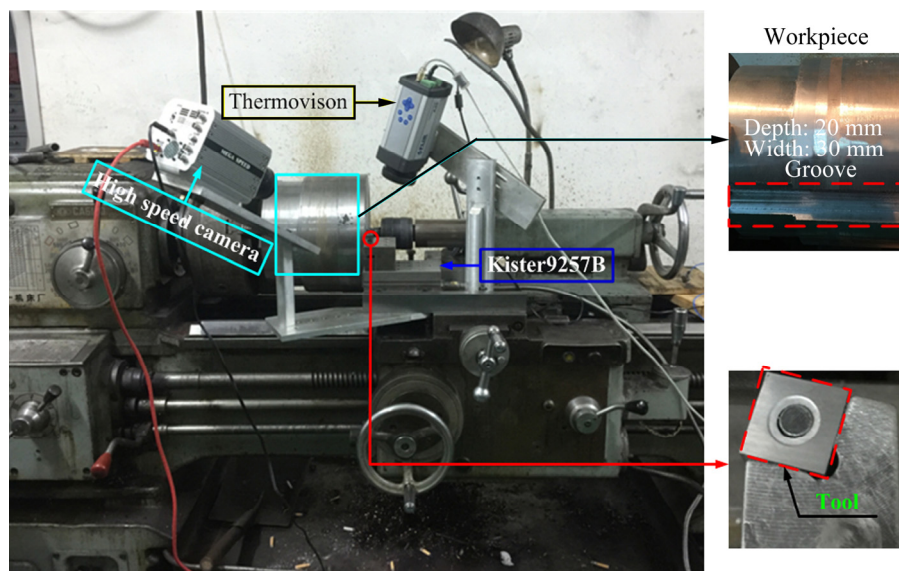


图 16 切削 2.25Cr1Mo0.25V 材料测试系统

Fig. 16 Testing system of cutting 2.25Cr1Mo0.25V

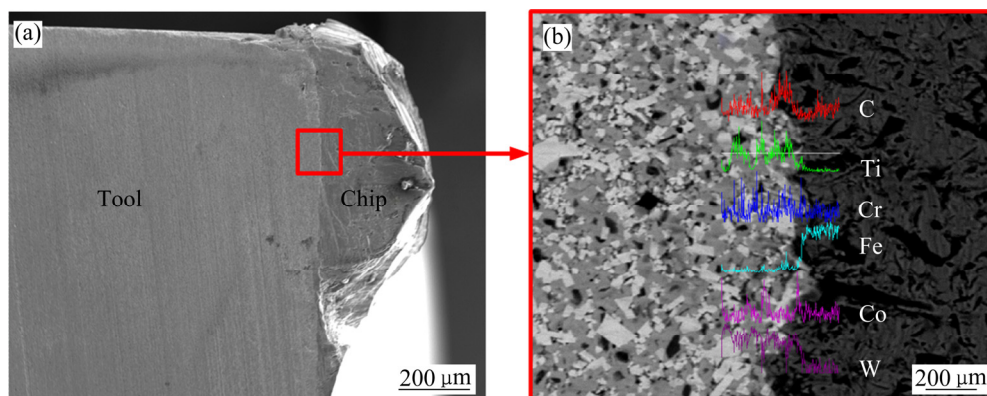


图 17 粘焊试验的表面形貌及能谱扫描

Fig. 17 Surface topography (a) and energy scanning spectrum (b) of specimens with bonding

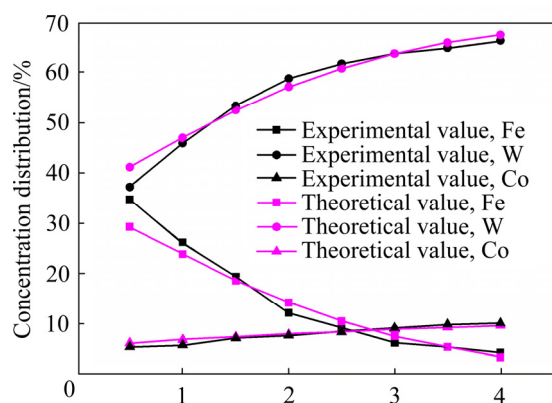


图 18 Fe、W、Co 元素浓度理论和实验分布

Fig. 18 Theoretical and experimental concentration distributions of Fe, W and Co

5 结论

1) 真空条件下, 使用夹紧件和焊接件在不同温度下保温一定时间可近似模拟粘焊未形成及形成后, 不同温度下硬质合金切削刀具和切屑中元素的互扩散过程; 结合接触第二变形区的金属挤压摩擦变形分析, 分析了切削过程中粘焊的形成。

2) 结合菲克第二定律, 选用半无限长扩散模型来描述刀具侧的元素扩散状态, 建立了考虑温度影响的刀-屑扩散理论方程; 通过扫描电镜能谱分析测定切削试验中刀具产生粘焊区的元素浓度分布并绘制主元素的界面浓度变化曲线, 验证了理论模型的正确性。

3) 通过分析不同温度下的扩散浓度分布可知: 对于同种元素来说, 随着温度的升高, 扩散速率和扩散距离相应增加; 通过对比夹紧件和焊接件在相同温度的浓度分布可知: 粘焊的形成不影响最终的浓度, 但会一定程度促进扩散进程。

REFERENCES

- [1] 李 力, 栾道成, 胡 涛, 张崇才. 硬质合金刀具新技术研究进展[J]. 中国钨业, 2010, 25(1): 45-49.
LI Li, LUAN Dao-cheng, HU Tao, ZHANG Cong-cai. On the new technologies on cemented carbide tool[J]. China Tungsten Industry, 2010, 25(1): 45-49.
- [2] 朱立荣, 赵声志, 张 颢, 邓红艳. 微量铁对 YG8 硬质合金硬度、磁性能及孔隙度的影响[J]. 硬质合金, 2013, 30(1): 41-45.
ZHU Li-rong, ZHAO Sheng-zhi, ZHANG Hao, DENG

Hong-yan. Effect of small amount of Fe on properties of WC-Co cemented carbide[J]. Cemented Carbide, 2013, 30(1): 41-45.

- [3] 刘 珂, 胡丽娟, 冯炫凯, 张巧凤, 高超, 董海英, 梁婉怡, 谢耀平. Fe-1.24%Cu-0.62%Ni 合金拉伸性能的分子动力学模拟[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(10): 150-158.
LIU Ke, HU Li-juan, FENG Xuan-kai, ZHANG Qiao-feng, GAO Chao, DONG Hai-ying, LIANG Wan-yi, XIE Yao-ping. Molecular dynamics simulation of tensile properties of Fe-1.24%Cu-0.62%Ni alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(10): 150-158.
- [4] 王银涛. 高速断续切削刀具疲劳失效实验与仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 11-26.
WANG Yin-tao. Experimental and simulation investigation on fatigue of high speed intermittent cutting tools[D]. Jinan: Shandong University, 2016: 11-26.
- [5] 敖晓春. 难加工材料 3Cr-1Mo-1/4V 钢的切削及刀具破损机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005: 20-23.
AO Xiao-chun. Study on the cutting and disrepair mechanism of the difficult-to-machine material 3Cr-1Mo-1/4V steel[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2005: 20-23.
- [6] 王英姿, 陶文宏, 杨中喜, 李友生. 高速切削刀具的扩散磨损检测研究[J]. 制造技术与机床, 2009, 31(1): 116-118.
WANG Ying-zi, TAO Wen-hong, YANG Zhong-xi, LI You-sheng. Diffusion wear detection of cutting tool in high speed machining[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009, 31(1): 116-118.
- [7] 严复钢, 李艳国, 刘 利, 程耀楠, 吕亚飞. 重型切削过程中硬质合金刀具扩散磨损行为研究[J]. 工具技术, 2016, 50(3): 11-15.
YAN Fu-gang, LI Yan-guo, LIU Li, CHENG Yao-nan, LÜ Ya-fei. Research on diffusion wear behavior of carbide tool in heavy cutting process[J]. Tool Engineering, 2016, 50(3): 11-15.
- [8] SOKOVIĆ M, KOSEC L, DOBRZANĀSKI L A. Diffusion across PVD coated cermet tool/workpiece interface[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, s157/158(1): 427-433.
- [9] 王 敬. Fe/Al 异种金属扩散界面形成机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012: 13-52.
WANG Jing. The formation mechanism research of Fe/Al dissimilar materials bonding interface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012: 13-52.
- [10] 刘玉林, 罗永春, 赵 丹, 张国庆, 康 龙. 高熵合金

- (CoCrFeMnNi)/铜真空扩散连接的界面行为及接头性能研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 84–91.
- LIU Yu-lin, LUO Yong-chun, ZHAO Dan, ZHANG Guo-qing, KANG Long. Interfacial behavior and joint performance of high-entropy alloy CoCrFeMnNi and pure Cu joints obtained by vacuum diffusion welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 84–91.
- [11] SUN C Y, LI L, FU M W, ZHOU Q J. Element diffusion model of bimetallic hot deformation in metallurgical bonding process[J]. Materials & Design, 2016, 94(3): 433–443.
- [12] AHMED T, BELOVA I V, MURCH G E. Finite difference solution of the diffusion equation and calculation of the inter-diffusion coefficient using the Sauer-Freise and Hall methods in binary systems[J]. Procedia Engineering, 2015, 105(247): 570–575.
- [13] 刘超, 陈继林, 张鹏程, 王伟. 高温扩散对 GCr15 钢带状组织及合金元素分布的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(10): 223–226.
- LIU Chao, CHEN Ji-lin, ZHANG Peng-cheng, WANG Wei. Effect of high-temperature diffusion on zonal structure and alloying element distribution of GCr15 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(10): 223–226.
- [14] 张国庆, 原梅妮, 李殊霞, 侯红亮, 曲海涛, 赵冰. SiC 纤维增强 Ti/Ti₂AlNb 叠层复合材料制备及界面行为研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(10): 1093–1098.
- ZHANG Guo-qing, YUAN Mei-ni, LI Shu-xia, HOU Hong-liang, QU Hai-tao, ZHAO Bing. Fabrication and interface reaction of SiC fiber reinforced Ti/Ti₂AlNb[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(10): 1093–1098.
- [15] 邹军涛, 赵艳, 王婵, 杨晓红, 梁淑华. ZChSnSb11-6/20 号钢双金属复合材料的扩散连接[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1451–1458.
- ZOU Jun-tao, ZHAO Yan, WANG Chan, YANG Xiao-hong, LIANG Shu-hua. Diffusion bonding of ZChSnSb11-6/20 steel bimetal composite material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1451–1458.
- [16] 庞秋, 胡志力, 孙东立. 开孔 Ni-Cr-Fe 泡沫合金制备及高温力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1609–1622.
- PANG Qiu, HU Zhi-li, SUN Dong-li. Preparation and high temperature mechanical properties of open-cell Ni-Cr-Fe alloy foams[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(8): 1609–1622.
- [17] 刘舒婕, 李文生, 杨效田, 何玲, 王大锋, 何艳艳. 热扩散对高铝青铜等离子喷焊层组织及摩擦性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1487–1497.
- LIU Shu-jie, LI Wen-sheng, YANG Xiao-tian, HE Ling, WANG Da-feng, HE Yan-yan. Effect of thermal diffusion on microstructure and wear behaviors of plasma spray welded high Al bronze coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1487–1497.
- [18] YANG Q Q, MENG B, LIN Z L, ZHU X K, YANG F, WU S. Effect of sintering temperature on the elemental diffusion and electrical conductivity of SrTiO₃/YSZ composite ceramic[J]. Ionics, 2017, 23(4): 967–975.
- [19] SILVA P A, WEBER S, INDEN G, PYZALLA A R. Influence of hard particle addition and chemical interdiffusion on the properties of hot extruded tool steel compounds[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 516(1): 193–200.
- [20] 程耀楠, 刘献礼, 李振加, 刘利, 王海婷. 极端重载切削条件下的刀-屑粘结失效[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 169–176.
- CHENG Yao-nan, LIU Xian-li, LI Zhen-jia, LIU Li, WANG Hai-ting. Adhering failure of the tool-chip in the process of extremely heavy cutting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 169–176.
- [21] DENG J X, LI Y S, SONG W L. Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools[J]. Wear, 2008, 265(11): 1776–1783.
- [22] YI H F, ZHAO P H, JIE Q L, ZHI X Y. Material response at tool-chip interface and its effects on tool wear in turning Inconel 718[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2014, 29(11/12): 1446–1452.

Formation of sticking-welding on rake face of carbide tool and its theoretical model of element diffusion

CHEN Jin-guo^{1,2}, ZHENG Min-li¹, LI Peng-fei¹, ZHANG Wei¹, SUN Yu-shuang¹

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Putian University, Putian 351100, China)

Abstract: Based on the Fick's second law, the elements concentration distribution of the rake face was described and the semi-infinite length model was used to establish the diffusion equation of the rake face considering the influence of temperature. By analyzing the formation of the sticking-welding during the cutting process, the welded and clamping parts at different temperatures were used to approximately simulate the elements diffusion at different temperatures with or without sticking-welding, so the effects of temperature and sticking-welding on the elements diffusion can be explored. At the same time, combined with elements concentration distribution of the diffusion specimens at different temperatures, data processing and parameter determination were carried out by using data fitting software. The results show that sticking-welding does not affect the final diffusion concentration, but it affects the diffusion process to a certain extent, and with the increase of temperature, the diffusion rate and diffusion distance increase correspondingly, the results are significance for revealing the law of atom movement at microscopic level and improving the anti-adhesion and anti-fracture performance of carbide tool.

Key words: elements diffusion; carbide tool; sticking-welding; diffusion equation

Foundation item: Project(51575146) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(JAT170506) supported by the Education of Research for Young and Middle-aged Teachers of Fujian Province, China; Project(K201709) supported by CAD/CAM Open Issues of Fujian University Engineering Research Center, China.

Received date: 2018-03-28; **Accepted date:** 2018-11-06

Corresponding author: ZHENG Min-li; Tel: +86-18646097088; E-mail: zhengminli163@163.com

(编辑 李艳红)