

文章编号: 1004 - 0609(2003) 05 - 1098 - 05

热应力作用下碳化钨基钢结硬质合金梯形裂纹的形成机理^①

尤显卿, 郑玉春, 程娟文, 任 昊
(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 在自约束型热疲劳试验机上对碳化钨含量不同的钢结硬质合金进行了热疲劳试验, 用金相显微镜和扫描电镜对热疲劳裂纹扩展行为进行了研究。结果表明: 在热应力作用下, 不仅在合金的表面, 在合金的内部都形成了“梯形”裂纹。这种形态的裂纹是由试样缺口处的热疲劳裂纹扩展而引起的, 合金中的钢基体相阻碍裂纹扩展, 而 WC 硬质相诱导裂纹扩展, 这两种因素的综合作用促使热疲劳裂纹成“梯形”扩展。分析认为: 使 WC 粒子在钢基体中均匀分布, 提高钢基体的热疲劳抗力, 从而来阻止梯形裂纹的形成, 是提高碳化钨钢结硬质合金抗热疲劳性能的有效途径。

关键词: 碳化钨; 钢结硬质合金; 热疲劳; 裂纹扩展

中图分类号: TF 125.3

文献标识码: A

钢结硬质合金是以 WC(或 TiC 等) 粒子作硬质相, 以合金钢为粘结剂, 用粉末冶金法制备的硬质工模具材料。这种材料既具有硬质合金的高硬度和高耐磨性, 又具有钢的可锻性、可机加工、可热处理等工艺性能及强韧性, 所以近 20 年来被广泛用在模具工业中^[1~4]。但是这种硬质合金主要用在冷作模具上, 而较少用在热作模具上。原因是: 热作模具服役条件十分恶劣, 在工作中由于进行频繁加热和冷却, 极易发生热疲劳, 致使热作模具失效。由于我国富产钨, 所以国内主要研制的是碳化钨基钢结硬质合金, 常用的牌号有 GJW50、GW50、TLMW50、DT、GJW35 和 GW30 等。要想使这类合金的应用范围扩大到热作模具上, 必须研究热疲劳问题, 使其具有良好的抗热疲劳性能。作者在文献[5]中讨论了碳化钨基钢结硬质合金热疲劳裂纹萌生的过程, 本文重点讨论在试样缺口应力集中处所形成的裂纹是如何扩展的。

1 实验

实验用的碳化钨钢结硬质合金选用合肥工业大学研制的 GJW50 和 GJW35, 其化学成分见表 1。由表 1 可见, 前者含 WC 较多, 钢基体为低合金结构钢 50CrMo; 后者含 WC 较少, 钢基体为热作模具钢 5CrNiMo。

实验材料在真空炉中烧结而成, 经退火处理后用火花线切割机切成形状尺寸如图 1 所示带有 V 型缺口的平板状热疲劳试样, 在这种试样上容易观察热疲劳裂纹(以下简称裂纹)在两个平面上扩展的情况。

因为钢结硬质合金都是经过淬火和回火处理后

表 1 实验材料的牌号和化学成分

Table 1 Trademarks and chemical compositions of test materials (mass fraction, %)

Trademark	Hard phase	Bonding phase					
	WC	C	Cr	Mo	Ni	Mn	Fe
GJW50	50	0.24	0.50	0.25	-	-	Bal.
GJW35	35	0.4	1.2	0.5	1.2	0.4	Bal.

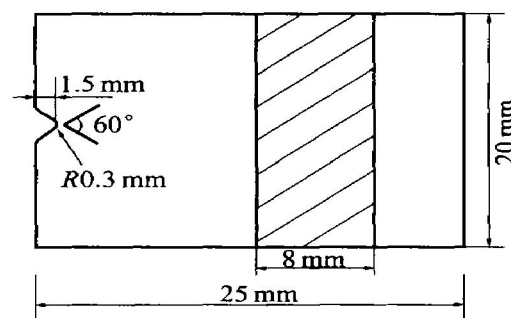


图 1 热疲劳试样示意图

Fig 1 Schematic diagram of thermal fatigue specimen

① 收稿日期: 2002 - 09 - 25; 修订日期: 2003 - 01 - 01

作者简介: 尤显卿(1949 -), 男, 副教授

通讯联系人: 尤显卿, 副教授; 电话: 0551 - 2902961, E-mail: YST25@sina.com

2 头颈总结

经最终热处理后，GJW50 合金试样的金相组织为 WC 粒子+ 回火索氏体，GJW35 合金试样的金相组织为 WC 粒子+ 回火屈氏体，其金相组织见图 2。

两种合金经过一定次数的热循环后，在热应力作用下都在试样的 V 型缺口尖端应力集中处萌生裂纹，其中一条成为最早引起试样断裂的主裂纹。其中 GJW35 合金的裂纹萌生孕育期($N_{Cycle}=12$)长于 GJW50 合金的($N_{Cycle}=6$)，裂纹的形态均呈楔形。文献[7]指出脆性材料中的裂纹尖端具有一定宽度，并非尖锐的狭缝。

在热应力的不断作用下，所形成的主裂纹开始扩展。从宏观上看，在长度为 8 mm 的热疲劳区域内主裂纹是以直线形式扩展的；在光学显微镜下观察发现，各个试样的表面上都形成了明显的梯形裂纹(见图 3)，即宏观上的直线形主裂纹是由微观的梯形裂纹组成，而且这些裂纹也是以梯形的形式加宽的(见图 4)。最后，在疲劳断口上也发现梯形裂纹(见图 5)。由此可见，无论在试样表面，还是在试样内部(裂纹的长度、宽度及深度方向上)，都是以形成梯形裂纹的方式扩展的，最终引起试样断裂。

3 分析与讨论

由上述实验结果可见，WC 含量不同、钢基体

Fig. 2 Optical microstructures of specimens; (a) —Sample GJW50; (b) —Sample GJW35

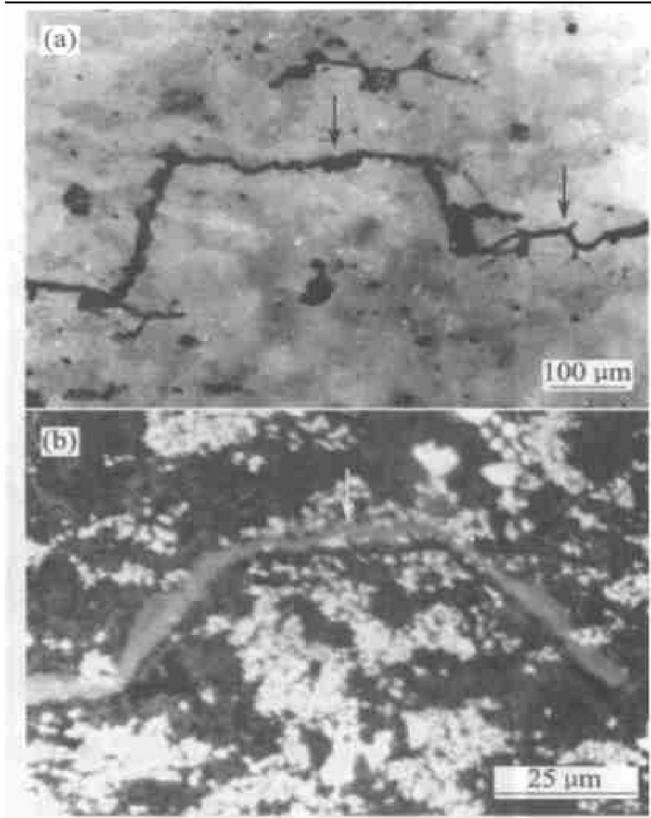


图 3 试样表面形成的梯形裂纹形貌(经 50 次热循环)
Fig. 3 Morphologies of “trapezoid crack ” formed on surface of sample($N_{Cycle}=50$)
(a) —Sample GJw50(Not corroded)
(b) —Sample GJW35(Corroded by 4% nitric acid alcohol)

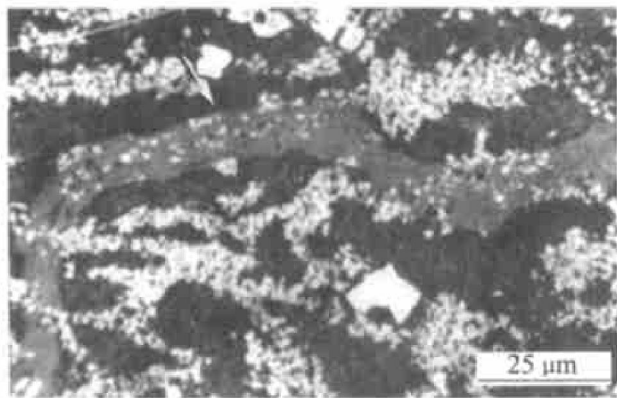


图 4 加宽的梯形裂纹

Fig. 4 Morphology of widening trapezoid crack (Sample GJW35, No. 1)

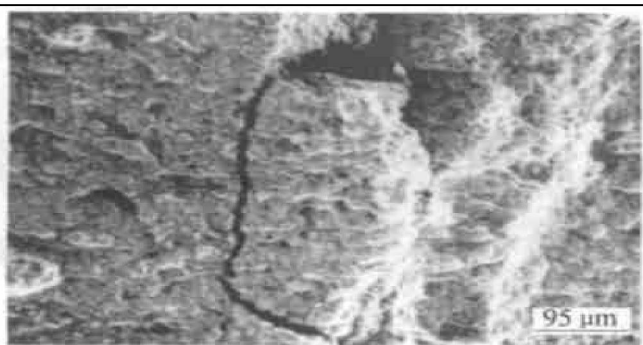


图 5 疲劳断口上的梯形裂纹(经 500 次热循环)

Fig. 5 Morphology of trapezoid crack on thermal fatigue fracture surface ($N_{\text{Cycle}} = 500$, sample GJW50)

相成分与性质也不同的两种试样呈现出完全相同的热疲劳裂纹扩展特征——以形成梯形裂纹的方式扩展,这显然与碳化钨钢结硬质合金的结构密切相关。

3.1 合金的结构特征

理想化的碳化钨钢结硬质合金显微结构应该是颗粒均匀细小的硬质相粒子均匀弥散地分布在粘结相钢基体中,起到颗粒增强作用,但实际烧结后所获得的合金并非如此。在液相烧结过程中,硬质相与钢基体相要发生不同程度的相互溶解和析出过程^[8],使合金基体的化学成分发生变化,从而导致组织发生变化。硬质相粒子往往聚集成一团,颗粒大小也不十分均匀。大颗粒(白色)硬质相含 W 较少,为 $(\text{FeW})_6\text{C}$,小颗粒(灰色)含 W 较多,为 WC 相。文献[9]指出,原始的碳化钨要转变为两种碳化物相:贫铁的 M_6C 型碳化物和富铁的 MC 型碳化物,两者相比前者的热力学稳定性较好。文献[10]指出,合金中存在两种形态的 WC 相:接近“球化”

和“未球化的”。未球化的往往是大颗粒的碳化物,呈三角状或多边形。另外,在烧结及随后的热处理冷却过程中,从基体中析出的二次碳化物还会把硬质相连接起来,出现所谓的“碳化物桥接”现象。

经退火处理后的合金组织的一个显著特点是“白色区”与“暗区”相间分布,“白区”为大块硬质相的集中分布区,“暗区”则是大量细小碳化物群集区^[11]。经淬火后,由于细小碳化物溶解,明暗区不太分明。在回火过程中,随着温度的提高,主要是合金中钢基体的转变,而硬质相碳化物变化不大,合金具有较高的回火稳定性。

3.2 梯形裂纹形成过程

3.2.1 裂纹优先在硬质相区内扩展

合金中的两大相中,WC 是硬脆相,钢基体相是软相,经淬火和回火处理后基体表现出较高的强韧性。而且,数量众多、大小不同的硬质相对于钢基体内塑性变形产生的约束及区域性封锁效应使金属的滑移带的扩展受阻,难以形成明显的塑性变形,因此显示出比合金钢优越得多的抗回火性能。

合金中的硬质相是随着它们在合金中体积分数的增加而愈容易集聚,形成不同形态的群集区。在热循环过程初期,靠近试样缺口处的大尺寸的硬质相粒子会发生“自裂”。而当 WC 碎裂时,钢基体相无热疲劳裂纹出现。WC 粒子以自身的碎裂承担了因温度下降产生的热应力,而使基体免于破坏^[12]。在小尺寸 WC 粒子的群集区内,WC 粒子之间的薄层钢基体粘结相在相同的热应力作用下会优先开裂;另外,在合金中会出现由小尺寸 WC 粒子成列分布的所谓 WC 粒子链,每个 WC 粒子相当于一个“孔洞”,在热应力的作用下,这些孔洞很快连通成一裂纹。

通过上述分析可见,在试样缺口处所形成的裂纹在热应力的连续作用下,面对硬质相区与钢基体相区,会优先选择在硬质相区中扩展。因为这样它可以找到节省能量的扩展路径:“自裂”的 WC 粒子→WC 粒子之间的界面,即所谓的沿晶扩展→WC 粒子链,如图 6(1→2)所示。

3.2.2 裂纹遇“钢池”受阻转向

由于合金中硬质相粒子呈聚集分布状态,造成许多硬质相粒子尺寸和大小不一的钢基体相区,即所谓的“钢池”。扩展中的裂纹遇到“钢池”后会受阻而暂时中止在界面处。原因是钢基体相具有较高的屈服强度,可以减小每次循环的塑性应变幅,而较好的塑性又使楔形裂纹尖端局部产生热应力松弛,

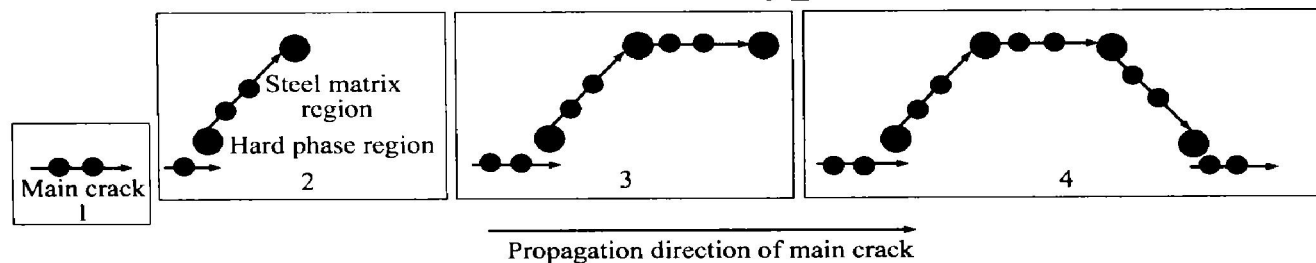


图 6 梯形裂纹形成过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of trapezoid crack forming process

所以裂纹要想穿越“钢池”必须积蓄更大的能量, 尤其遇到像 CJW35 合金中那种热作模具钢基体就更困难, 受阻裂纹将转向寻找易扩展的路径。

3.2.3 硬质相区诱导裂纹扩展

当向前扩展受阻后的裂纹上方(或下方)存在硬质相粒子聚集区时, 它会诱导裂纹向硬质相区扩展。由于裂纹的扩展方向始终受循环方向的制约, 当转向后的裂纹扩展一定的距离后, 又回到原来的方向上来, 而拐点正是这个诱导它的硬质相区。回到循环方向上来的裂纹仍然是选择硬质相作其扩展路径, 经过一段距离后, 裂纹又受阻, 位于裂纹下方(或上方)的硬质相区诱导它拐弯向其扩展, 使得裂纹回到原来的扩展路径上来, 结果形成梯形裂纹, 如图 6(3→4)所示。

当在钢基体相前沿受阻的裂纹上方(或下方)存在“自裂”的大颗粒 WC 时, 它们对裂纹的诱导性加大, 使受阻的裂纹能穿越它们之间的钢基体来完成上述的梯形裂纹形成过程。

4 结语

在热应力作用下, 碳化钨钢结硬质合金中所形成的热疲劳裂纹是以形成梯形裂纹的形式扩展的。这种扩展形式与这类合金的组织特征及合金中硬质相与钢基体相的性质有关。合金中硬质相粒子不均匀的群集分布及大颗粒的硬质相的“自裂”是裂纹扩展的主要途径。抗热疲劳性能较强的钢基体相阻碍裂纹的扩展, 而硬质相诱导裂纹扩展, 结果使裂纹在热循环方向上形成梯形裂纹。减小 WC 粒子粒度, 使其均匀弥散地分布在钢基体中, 进一步提高钢基体的热疲劳抗力, 阻止梯形裂纹的形成, 是提高这类合金抗热疲劳性能的重要途径。

REFERENCES

[1] 株洲硬质合金厂. 钢结硬质合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.

Zhuzhou Cemented Carbide Factory. Steel-Bonded Carbides [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982.

[2] 张春友, 熊惟皓. 钢结硬质合金在模具工业中的应用[J]. 机械工程材料, 1988, 22(6): 39-42.

ZHANG Chun-you, XIONG Wei-hao. Application of steel bonded carbides in die industry [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1998, 22(6): 39-42.

[3] 李沐山. 国外钢结硬质合金最新进展[J]. 国外金属材料, 1992(5): 23-27.

LI Mu-shan. Recent developments in steel bonded hard metals abroad [J]. Metal Material Abroad, 1992(5): 23-27.

[4] 李良福. 钢结硬质合金在工业中的应用[J]. 硬质合金, 2000, 17(2): 120-124.

LI Liang-fu. Application of steel bonded carbide in industry [J]. Cemented Carbide, 1987, 17(2): 120-124.

[5] 尤显卿, 郑玉春, 程娟文. 碳化钨钢结硬质合金热疲劳裂纹形成机理研究[J]. 矿冶工程, 2002, 22(2): 93-95.

YOU Xian-qing, ZHENG Yu-Chun, CHENG Juan-wen. The forming mechanism of thermal fatigue crack of steel bonded carbide [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(2): 93-95.

[6] 尤显卿, 游兴河. 简易式钢结硬质合金热疲劳试验装置[J]. 硬质合金, 1995, 12(1): 61-63.

YOU Xian-qing, YOU Xing-he. Simple thermal fatigue testing apparatus of steel bonded carbide [J]. Cemented Carbide, 1995, 12(1): 61-63.

[7] 李志成, 刘路, 吴昕, 等. 脆性材料中的微裂纹尖端结构与断裂[J]. 金属学报, 2001, 37(5): 503-506.

LI Zhi-cheng, LIU Lu, WU Xin, et al. Structure at microcrack-tip and fracture in entire brittle solid [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(5): 503-506.

[8] 杨瑞成, 王军民, 王夏兵, 等. 颗粒复合材料中硬质相(WC)与钢基体的交互作用及其影响[J]. 金属热处理, 1998(12): 7-9.

YANG Rui-cheng, WANG Jun-min, WANG Xia-bing, et al. Interactions between hard phase (WC) and steel matrix

- and its effects in particle reinforced composite [J]. *Heat Treatment of Metals*, 1998(12): 7-9.
- [9] 游兴河. WC 系钢结硬质合金热处理过程中硬质相的行为[J]. *粉末冶金技术*, 1984, 2(2): 1-7.
YOU Xing-he. Hard phase behavior of WC steel bonded carbide in the process of heat treatment [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1984, 2(2): 1-7.
- [10] 万振海, 谭 宁, 于克强, 等. DT 碳化钨钢结硬质合金显微结构的研究[J]. *粉末冶金技术*, 1986, 4(3): 140-146.
WAN Zhen-hai, TAN Ning, YU Ke-qiang, et al. An investigation of microstructure of DT type steel bonded tungsten carbide [J]. *Powder Metallurgy Technology*, 1986, 4(3): 140-146.
- [11] 杨瑞成, 师瑞霞, 王 晖, 等. WC/ 钢基复合材料奥氏体化后的硬化效应及微观机理[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(2): 41-44.
YANG Rui-cheng, SHI Rui-xia, WANG Hui, et al. Hardening effects and micromechanisms of WC/steel matrix composites after austenization [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(2): 41-44.
- [12] 王 溪, 胡汉起, 史京明, 等. WC_p/Fe-Ni 钢基复合材料的抗热疲劳特性[J]. *钢铁研究学报*, 1998, 10(5): 44-48.
WANG Xi, HU Han-qi, SHI Jing-ming, et al. Behavior of thermal fatigue resistance of WC_p/Fe-Ni steel matrix composites [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1998, 10(5): 44-48.

Formation mechanism of trapezoid crack in WC steel bonded carbide under action of thermal stress

YOU Xian-qing, ZHENG Yu-chun, CHEN Juan-wen, REN Hao

(Institute of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Thermal fatigue test of two kinds of WC steel bonded carbides with different WC contents was examined on self-strained thermal fatigue testing machines, and thermal fatigue crack propagation process was investigated by optical microscopy and SEM. The results show that a kind of trapezoid crack forms not only on the surface but also in the alloy, and the forming process of this kind of crack is the propagation process of the thermal fatigue crack that forms at the sample notch. Steel matrix prevents the crack from propagating, and WC hard phase induces the crack to propagate. The comprehensive effects of these two factors make thermal fatigue crack form trapezoid crack shape. It is pointed out by analyzing that making WC particles distribute uniformly in the steel matrix and increasing thermal fatigue resistance of the matrix to prevent trapezoid crack from forming are effective methods to increase the thermal fatigue resistance of WC steel bonded carbides.

Key words WC(tungsten carbide); steel bonded carbide; thermal fatigue; crack propagation

(编辑 杨 兵)