文章编号:1674-2974(2017)06-0001-06

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.06.001

应力比对 WC-Co 硬质合金疲劳性能的影响^{*}

陈振华^{1,2},黄瑞明¹,陈鼎^{1†},张忠健²,徐涛² (1.湖南大学材料科学与工程学院,湖南长沙,410082; 2.硬质合金国家重点实验室,湖南株洲,412000)

摘 要:采用三点弯曲疲劳法,研究了不同粘结相含量以及粘结相成分的硬质合金在两种不同应力比(R=0.1和R=0.5)加载时的疲劳行为,并结合 SEM 对疲劳机理进行了分析. 结果表明:硬质合金疲劳断裂过程同时存在脆性断裂和韧性断裂.在两种应力比疲劳加载时 都发现,增加钴含量,合金的疲劳敏感性先减小后增大,添加 Ni 和 Cr 能降低合金的疲劳敏 感性.大应力比疲劳加载时,粘结相疲劳断裂过程由脆性断裂向韧性断裂转变.增大应力比 对合金的疲劳敏感性也有影响.

关键词:硬质合金;应力比;疲劳;粘结相 中图分类号:TB302.3

文献标志码:A

Influence of Different Stress Ratios on Fatigue Behavior of WC-Co Cemented Carbides

CHEN Zhenhua^{1,2}, HUANG Ruiming¹, CHEN Ding^{1†}, ZHANG Zhongjian², XU Tao²

(1.College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;2.State Key Laboratory of Cemented Carbide, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The three-point bending fatigue behaviors of WC-Co cemented carbides with different binder phase content and composition under cyclic loading at two different stress ratios (R=0.1 and R=0.5) were investigated. The characterization of the fracture surfaces was carried out by using a scanning electron microscope (SEM), and the fatigue mechanism was also studied. The results show that the macroscopic fracture morphology exhibited brittle fracture and toughness fracture. With the increase of Co content, the fatigue sensitivity decreased firstly and then increased. Cemented carbides with complex binder phase (Co + Ni + Cr) exhibited lower fatigue sensitivity than that of pure Co cemented carbides. The fracture mechanism transformed from brittle to ductile at the stress ratio changing from 0.1 to 0.5. With the increase of the stress ratio, the fatigue sensitivity was changed.

Key words:cemented carbides; stress ratio; fatigue; binder phase

硬质合金被称为工业的牙齿,是现代工业部门 和新技术领域不可缺少的工具材料和结构材料,然 而硬质合金的断裂失效一直制约其应用发展,疲劳 是导致硬质合金断裂的主要原因^[1-3].除材料的化

* **收稿日期:**2016-02-25

基金项目:硬质合金国家重点实验室项目(201403001), the Open Foundation of State Key Laboratory of Cemented Carbide (201403001).

作者简介:陈振华(1945-),男,江苏溧阳人,湖南大学教授,博士生导师

[†]通讯联系人,E-mail:chending@hnu.edu.cn

学成分及显微结构外,材料所处的实验或服役条件,如温度、环境、频率、应力比等因素都会影响疲劳性能.针对应力比($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)对硬质合金疲劳性能的影响已有一些研究,但主要集中在裂纹扩展方面,Hirose 等^[4]研究发现随着应力比的增加,硬质合金会出现从脆性断裂向韧性断裂的转变,Co相中马氏体相变量与疲劳裂纹扩展特性密切相关. Ishihara 等^[5]在研究一种金属陶瓷应力比对疲劳裂纹的扩展速率的影响时也发现,随着应力比的增加,Paris 指数增加,当裂纹扩展速率较快时只与 K_{max} 有关;当裂纹扩展曲线却与应力比有很好的相关性,显示出金属特征.然而目前并没有发现系统的关于硬质合金在不同应力比时疲劳 S-N 曲线的研究.

对于硬质合金而言,由于其固有缺陷导致疲劳 裂纹萌生的时间占据了疲劳过程的绝大部分,因此 S-N曲线对于硬质合金的疲劳研究更加具有实际意 义^[6].本文系统地研究了不同应力比对不同粘结相 含量以及成分的硬质合金三点弯曲疲劳性能的 影响.

1 实验材料

实验材料采用株洲硬质合金集团有限公司生产的 WC-Co 系硬质合金,各组试样的成分及 WC 晶粒度如表1 所示.

表 1 试样成分与 WC 晶粒度 Tab.1 The compositions and the grain size of cemented carbides

合金编号	晶粒度/ μm	粘结相质量分数/%	硬质相质量分数/%
А	$2.0 \sim 2.5$	8(Co)	92(WC)
В	$2.0 \sim 2.5$	15(Co)	85(WC)
С	$2.0 \sim 2.5$	30(Co)	70(WC)
D	$2.0 \sim 2.5$	30(Co+Ni+Cr)	70(WC)

2 实验方法

2.1 抗弯强度试验

硬质合金的抗弯强度试验方法按照 GB/T3851 --1983 进行.

2.2 三点弯曲疲劳试验

三点弯曲疲劳试验在 Letry 微机控制电液伺服 疲劳试验机上进行,试样尺寸为 3 mm×3 mm×30 mm,跨距为 25 mm,疲劳加载方式为正弦波加载, 频率为 6 Hz.循环应力从略低于抗弯强度值开始, 逐级降低应力加载,得到四种合金的 S-N 曲线,由 于硬质合金 S-N 曲线不存在平坦区且呈线性关 系^[7-8],本文定义 1×10⁷次断裂时对应的应力为疲 劳极限,通过线性拟合后由外推法得到不同应力比 下四种合金的疲劳极限.

采用 FEI QUANTA - 200 扫描电镜对试样断 口进行观察.

3 实验结果与分析

3.1 抗弯强度结果与分析

表 2 为四种硬质合金的抗弯强度值.由表 2 可 知,当钴含量(质量分数)由 8%增加至 30%时,硬质 合金的抗弯强度先增大后减小,当钴含量(质量分 数)为 15%时抗弯强度最大达 2 849 MPa,这与硬质 合金著名的克列梅尔断裂理论^[8]中抗弯强度的最大 值在钴含量(质量分数)为 10%~20%范围内的结 论是对应的.而粘结相成分不同但钴含量(质量分 数)相同的合金,抗弯强度相差不大.

表 2 硬质合金的抗弯强度值

Tab.2 The blend strength of cemented carbides

合金牌号	A合金	B合金	C合金	D合金
抗弯强度/MPa	2 135	2 849	2 457	2 415

3.2 硬质合金不同应力比疲劳结果与分析

3.2.1 Co含量对硬质合金疲劳性能影响

在硬质合金疲劳性能的研究中,S-N曲线斜率的绝对值常用来表征疲劳敏感性,斜率的绝对值越小,疲劳敏感性也就越小,硬质合金抵抗疲劳裂纹扩展能力越强^[9-16].图1为不同应力比条件下不同 钴含量的硬质合金三点弯曲S-N曲线图.从图1可 知,A,B,C三种硬质合金都显示出明显的疲劳现 象,即随着应力增加疲劳寿命显著下降.在高应力时 疲劳寿命主要与自身的弯曲强度相关,弯曲强度越 大疲劳寿命越高.随着应力的降低,合金的疲劳寿命 呈直线下降,疲劳寿命不仅与弯曲强度有关,还与 钴含量以及应力比有关.

疲劳敏感性(S-N曲线斜率的绝对值)以及疲劳 极限如表 3 所示.由表 3 可知,当应力比 R=0.1 时, A,B,C 三种合金的疲劳敏感性分别为 191,172 以 及 240,疲劳极限分别为 805 MPa,1 244 MPa 以及 707 MPa,随着钻含量的增加硬质合金的疲劳敏感 性先减小后增大,而疲劳极限先增大后减小.这与



Sailer^[16]关于细晶硬质合金疲劳性能的研究结果相 一致.当应力比 R = 0.5 时,随着钴含量的增加,合金 的疲劳敏感性以及疲劳极限的变化规律与 R = 0.1时类似.但是当 R = 0.5 时,A,B,C 三种合金疲劳敏 感性都小于 R = 0.1 时,而高钴硬质合金的疲劳敏 感性减小幅度大于低钴合金,例如当 R = 0.5 时高 钴 C 合金的疲劳敏感性为 195,比 R = 0.1 时小 45, 而低钴 A 合金仅减小 14.

表 3 不同钴含量硬质合金的疲劳敏感性与疲劳极限值 Tab.3 The fatigue sensitivity and fatigue limit of cemented carbides with different Co binder content

合金 牌号	疲劳极限 /MPa <i>R</i> =0.1	疲劳敏感性 R=0.1	疲劳极限 /MPa R=0.5	疲劳敏感性 R=0.5
А	805	191	864	177
В	1 244	172	1 380	138
С	707	240	925	195

为了探讨不同应力比疲劳加载时不同钴含量 对合金疲劳性能的作用机理,本文选择不同应力比 加载时疲劳寿命相差较大的高周疲劳(N>1×10⁴) 试样进行扫描电镜分析.图 2 为不同钴含量不同应 力比疲劳加载后的高周疲劳断口 SEM 图.

图 2(a)和图 2(b)给出 R = 0.1 时,A 合金和 B 合金的高周疲劳断口 SEM 图.从图中可以看出,当 R = 0.1,Co 含量为 8%的 A 合金和钴含量为 15% 的 B 合金裂纹主要沿 WC/WC,WC/Co 界面扩展断 裂,同时夹杂着少量的穿晶解离断裂,Co 相虽然以 脆性断裂为主,但仍可发现少量小而浅的韧窝,且 B 合金韧窝数量多于 A 合金.在疲劳载荷过程中由于 亚临界裂纹在钴相中扩展导致钴相在发生塑性变 形前断裂^[9-10],因此钴相呈脆性断裂.另一方面,钴 相在疲劳裂纹尖端具有桥联增韧作用,导致合金抵 抗疲劳裂纹扩展的能力增强.与A合金相比,B合金 具有更多 Co 相产生韧性断裂,因此 B 合金的疲劳 敏感性低于 A 合金.

图 2(c)为高钴 C 合金(30% Co)在应力比 R= 0.1 时的 SEM 图.从图中可以看出,C 合金的 WC 晶 粒更为完整,Co 相附着在 WC 表面呈"台阶"形态, 这种"台阶"形貌在 A 合金和 B 合金中未观察到,在 C 合金的 SEM 图中没有发现明显的韧窝形貌.Kursawe^[17-18]研究结果表明"台阶"形貌是钴含量过高 时,在疲劳过程中钴相发生大量的 fcc-hcp 相变所 致,同时这种相变加快了亚临界裂纹的扩展,导致 Co 相发生脆性断裂,因此 C 合金断口形貌中未发现 明显的韧窝形貌.由此可知,钴含量过高,合金的疲 劳性能反而更差.

图 2(d)~(f)为三种硬质合金在 R=0.5 加载 的高周疲劳断口 SEM 图.从图中可以看出,三种合 金 WC 的断裂方式与 R = 0.1 时相似,裂纹也沿 WC/WC,WC/Co界面扩展,同时存在少量的解离 断裂以及穿晶断裂,因此在R = 0.5时,随着钴含量 的增加疲劳敏感性的变化与 R=0.1 时类似.而钴相 断裂方式与R = 0.1时差别较大,与图 2(a)和图 2 (b)相比,从图 2(d)与图 2(e)可以看到当 R = 0.5时,A 合金和 B 合金的韧窝形貌更加明显,且韧窝 的数量增多的同时韧窝的深度也加深.图 2(f)给出 了 R = 0.5 时 C 合金的 SEM 图, 与 R = 0.1 时 C 合 金的断口形貌相比,可以看到"台阶"形貌明显减 少,并出现明显的韧窝形貌.由于大应力比疲劳加载 时,疲劳加载的方式更加接近静态加载,亚临界裂 纹扩展减少,Co相更有效地起到桥联增韧的作 用[19].从扫描电镜的结果分析也发现在大应力比疲 劳加载时,Co相确实产生更多的韧性断裂,而与R =0.1 时相比高钴合金变化特征更加明显.因此大应 力比疲劳加载时硬质合金的疲劳敏感性小于小应 力比,高 Co 合金有更多的 Co 起到桥联增韧作用, 所以增大应力比时高 Co 合金疲劳敏感性减小幅度 更大.



Fig.2 The SEM of cemented carbides with different binder phase content ($N \approx 1 \times 10^5 \sim 3 \times 10^5$ cycles)

3.2.2 不同粘结剂对硬质合金疲劳性能影响 图 3 为不同粘结相成分的硬质合金 S-N 疲劳

曲线.疲劳敏感性以及疲劳极限如表 4 所示.



different binder composition

经观察发现,在低周疲劳时粘结相的成分对合 金的疲劳性能影响较小.而在高周疲劳时,当最大应 力相同时 D 合金的疲劳寿命明显高于 C 合金,虽然 两种合金的抗弯强度值相近(见表 1),但是 D 合金 的疲劳极限值却更大.从表 4 可知,在两种应力比疲 劳加载时,添加了 Ni 和 Cr 的 D 合金的疲劳敏感性 都低于纯钴 C 合金.Kammermeier^[20]等人的研究 也发现将 Ni 添加到 CoFe 硬质合金中可以提高合 金的疲劳性能.当R = 0.1时,D 合金的疲劳敏感性 为 201,比 C 合金(240)小 39,D 合金的疲劳极限比 C 合金的疲劳极限高 130 MPa.当R = 0.5时 D 合金 的疲劳敏感性为 168,比 C 合金(195)小 27,D 合金 的疲劳极限仅比 C 合金的疲劳极限高 74 MPa,这 表明在 R = 0.5时添加 Ni 和 Cr 对疲劳性能影响 较小.

表 4 不同粘结相硬质合金的疲劳敏感性与疲劳极限值

 Tab.4
 The fatigue sensitivity and fatigue limit of cemented carbides with different binder composition

合金 牌号	疲劳极限 /MPa R=0.1	疲劳敏感性 R=0.1	疲劳极限 /MPa R=0.5	疲劳敏感性 R=0.5
С	707	240	925	195
D	837	201	1 009	168

图 4 为 D 合金的 EDS 能谱分析.从图 4 的 EDS 结果可以看到,Cr 和 Ni 是以固溶的形式存在于 Co 中.已有研究表明,循环载荷会加剧 Co 相的马氏体 相变,往粘结相中加入 Ni 能有效减少这种相变^[21]. 图 5(a)为 R = 0.1 时 D 合金的高周疲劳 SEM,与 R=0.1 时 C 合金的断口形貌相比(见图 2(c)),可以 发现 Co 相"台阶"断裂形貌比图 2(c)少,这进一步 说明用部分的 Ni 和 Cr 代替 Co,确实可以抑制 Co 相 fcc-hcp 相转变,从而提高合金的疲劳性能,减少 材料的疲劳敏感性.当 R = 0.5 时,D 合金的断口形 貌(图 5(b))与 C 合金(图 2(f))差异性不大,都可以 看到明显的韧窝,这是由于在大应力比加载时 Co 相更容易发生韧性断裂^[19],fcc-hcp 相变较少,因此 添加 Ni 和 Cr 对硬质合金疲劳性能影响不大.



图 4 D 合金的扫描能谱图 Fig.4 SEM micrograph of grade D and results from EDS





4 结 论

1) 钴相具有桥联增韧的作用,能增强硬质合金 抵抗裂纹扩展的能力. 而疲劳载荷时亚临界裂纹在 钴相中扩展导致钴相发生脆性断裂,减小了合金抵 抗裂纹扩展的能力.

2)在两种不同应力比载荷时都发现,随着钴含量的增加,合金的疲劳敏感性先增大后减小,用少量的 Ni 和 Cr 代替 Co 能减少马氏体相变,降低合金的疲劳敏感性.

3)大应力比疲劳载荷时硬质合金粘结相呈现

出更多的韧性断裂特征,增大应力比,硬质合金疲 劳敏感性降低,高钴合金疲劳敏感性减小程度大于 低钴合金;含部分Ni和Cr的合金,在小应力比加载 时疲劳敏感性低于纯Co合金,而大应力比加载时 疲劳敏感性差异不大.

参考文献

- [1] 陈振华,姜勇,陈鼎,等.硬质合金的疲劳与断裂[J].中国有色 金属学报,2011,21(10):2394-2399.
 CHEN Zhenhua,JIANG Yong,CHEN Ding ,et al.Fatigue and fracture of cemented carbides[J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2011,21(10):2394-2401.(In Chinese)
- [2] ABDEL-AAL H A, NOUARI M, MANSORI M E. The effect

of thermal property degradation on wear of WC-CO inserts in dry cutting [J].Wear,2008,265 (11):1670-1679.

- [3] 陈振华,史媛媛,姜勇.冷却介质对 YG8 硬质合金热疲劳性能的影响[J].湖南大学学报:自然科学版,2011,38(3):60-64.
 CHEN Zhenhua,SHI Yuanyuan,JIANG Yong.Effect of different quenching agent on the thermal fatigue crack propagation behavior of WC-8Co cemented carbide[J].Journal of Hunan University:Natural Sciences,2011,38(3):60-64.(In Chinese)
- [4] HIROSE Y, BOO M, MATSUOKA H, et al. Influence of stress ratio and WC grain size on fatigue crack growth characteristics of WC-Co cemented carbides[J].Journal of Society of Materials Science in Japan, 1997, 46(12):1402-1409.
- [5] ISHIHARA S,GOSHIMA T,YOSHIMOTO Y, et al. The influence of the stress ratio on fatigue crack growth in a cermet
 [J].Journal of Materials Science,2000,35(22):5661-5665.
- [6] FERREIRA J A M, AMARAL M P A, ANTUNESF V, et al. A study on the mechanical behavior of WC/Co hard metals[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(1):1-8.
- [7] BROOKES K. World dictionary and handbook of hard metals and hard materials [M]. 5th ed. London; International Carbide Data, 1982.
- [8] M.Γ.洛沙克.硬质合金的强度和寿命[M].黄鹤翥译.北京:冶金 工业出版社,1990.

Лошак М Г. The strength and life of cemented carbides [M]. HUANG Hezhu translation. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.(In Chinese)

- [9] SCHLEINKOFER U, SOCKEL H G, SCHLUND P, et al. Behavior of hard metals and cermets under cyclic mechanical loads[J].Materials Science and Engineering A, 1995, 194(1):1 -8.
- [10] SCHLEINKOFER U, SOCKEL H G, GÖRTING K, et al. Fatigue of hard metals and cermets new results and a better understanding[J].International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 1997, 15(1/3):103-112.
- [11] SCHLEINKOFER U, SOCKEL H G, GÖRTING K, et al. Fatigue of hard metals and cermets[J].Materials Science and En-

gineering A,1996,209(1/2):313-317.

- [12] SERGEJEV F, KLAASEN H, KÜBARSEPP J, et al. Fatigue mechanics of carbide composites [J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2011, 40(1/2):140-163.
- [13] KÜBARSEPP J.KLAASEN H.SERGEJEV F.Performance of cemented carbides in cyclic loading wear conditions [J]. Materials Science Forum.2007.534/536:1221-1224.
- [14] KLAASEN H, KÜBARSEPP J, SERGEJEV F. Strength and failure of TiC based cermets[J].Powder Metallurgy, 2009, 52 (2):111-115.
- [15] KLAASEN H,KÜBARSEPP J,PREIS I.Wear behavior,durability,and cyclic strength of TiC base cermets[J].Materials Science and Technology,2004,20(8):1006-1010.
- [16] SAILER T. HERR M. SOCKEL H G. et al. Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained hard metals[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2001,19(4/6):553-559.
- [17] KURSAWE S, POTT P, SOCKEL H G, et al. On the influence of binder content and binder composition on the mechanical properties of hardmetals[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2001, 19 (4/6): 335 -340.
- [18] ERLING G, KURSAWE S, LUYCKX S, et al. Stable and unstable fracture surface features in WC-Co[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19(5):437-438.
- [19] LANES L, TORRES Y, ANGLADA M. On the fatigue crack growth behavior of WC-Co cemented carbides:kinetics description, microstructural effects and fatigue sensitivity [J]. Acta Materialia,2002,50(9):2381-2393.
- [20] KAMMERMEIER D, GÖRTING K, HEINRICH W, et al. Trends in the development and application of metal carbides, new products, new markets, powder metallurgy[J]. Hagener Symposium: Science and Practice, 2000,16:113-136(In Germen)
- [21] VASEL C H, KRAWITZ A D, DRAKE E F, et al. Binder deformation in WC-(Co, Ni) cemented carbide composite [J]. Metallurgical Transactions A, 1985, 16(2): 2309-2317.