

气门热锻模具失效分析*

宁志坚¹, 邱万奇², 莫东强¹, 陈冠华¹, 毛智成¹, 周 翀¹

(1. 怀集登云汽配股份有限公司, 广东 怀集 526400; 2. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘 要:用扫描电镜和金相显微镜对发动机气门热锻模具失效的原因进行了研究. 结果表明:模具 R 根部位表面纵横交错的龟裂裂纹、裂纹交汇处表面崩落及沿表面块状崩落, 使 R 根位表面出现凹坑而失效; 龟裂裂纹的产生是由于 R 根位的热疲劳和相变疲劳的共同作用.

关键词:气门; 热锻模具; 失效

中图分类号: TG31

文献标识码: A

气门是燃油发动机的关键部件之一, 控制着燃烧室的进气和排气, 承载着较高的机械负荷和热负荷. 如果进气门的工作温度为 300~500 ℃, 则排气门的工作温度可达 600~800 ℃, 甚至更高^[1]. 因而, 通常采用高温强度较高的合金作为气门材料. 在气门模锻成形过程中, 如果热锻模具寿命较短, 会使模锻工艺中断, 废品增加, 生产效率降低, 从而导致气门的制造成本大大增加. 因此, 有必要对气门热锻模具失效的原因进行分析.

1 气门热锻模具服役工况

气门材料为 21-4N(50Cr21Mo9Ni4N). 在气门模锻成形过程中, 先电锻成蒜头形状, 再在热锻模具上锻成气门形状. 气门热锻模具的材料为模具钢 HM1(3Cr3Mo2W2V), 经 1080 ℃ 淬火和 580 ℃ 回火(2 次)处理后, 回火硬度为 HRC50-52. 其型腔工作面经氮化处理. 每锻造一支气门后, 就用含润滑剂的液体喷湿模具型腔的工作面, 这样在保证锻造模具润滑的同时, 也降低了模具型腔的表面温度. 生产中发现, 某副模具在锻造 440 支气门后, 模具 R 根部位(模具型腔圆颈处)出现较严重的拉伤, 模具失效.

2 测试方法

将失效模具用线切割剖切后, 分别取其 R 根位的表面部分和截面部分作测试样品, 其中截面样品在抛光后没有进行腐蚀, 以利于观察裂纹细节. 为防止截面样品在研磨和抛光时边缘倒角, 采用了制样夹片作保护. 用德国 LEO-1530 场发射扫描电镜对 R 根位表面形貌进行分析; 截面样品经硝酸酒精腐蚀后, 用 Leica DMIRM/DFC320 光学显微镜对 R 根位截面组织进行分析.

3 结果与讨论

3.1 检测结果

图 1 是失效模具的部分剖切图, 图中箭头所指是 R 根位置, 它是模具磨损最严重的部位.

图 2(a)是模具 R 根部位型腔工作面的 SEM 照片. 图 2(a)显示, 在 25 倍放大倍率下, 可清晰看到纵横交错的裂纹, 裂纹基本互成 90°, 与热疲劳裂纹类似^[2]; 其中周向裂纹宽度大于轴向裂纹. 在裂纹交汇处, 出现部分崩落, 有些部位崩落连片. 图 2(b)是图 2(a)B 部位的局部放大图. 从 2(b)可看出, 崩落坑较深, 沿着轴向分布. 在 R 根部位还可观察到面

收稿日期:2009-07-14

* 基金项目:广东省产学研基地项目(2007B09020027)

作者简介:宁志坚(1963-), 男, 广东怀集人, 工程师.

积较大的区域性崩落,崩落底部形貌疏松,但相对平整,没有向心部纵深扩展的迹象,如图 2(c)所示.在未崩落区域,可见沿轴向的犁沟痕迹,这是典型的磨粒磨损特征.这说明模具失效前存在比较严重的磨粒磨损^[4].

图 3(a)和 3(b)分别是 R 根部位截面上的裂纹分布和裂纹尖端扩展趋势形貌.图 3(a)显示,裂纹从表面垂直延伸至基体,裂纹密集,深浅不一,大部分裂纹长度约 0.2 mm,只有少量裂纹深入基体达 0.4 mm.图 3(b)显示部分区域裂纹扩展转向平行于模具型腔表面,垂直表面裂纹宽大,裂纹在深入基体约 0.20 mm 后,裂纹尖端变钝,并转向平行于表面发展.

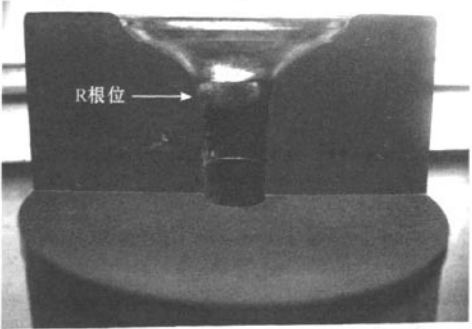


图 1 失效模具的部分刨切图
Fig. 1 The digging cut figure of failure die

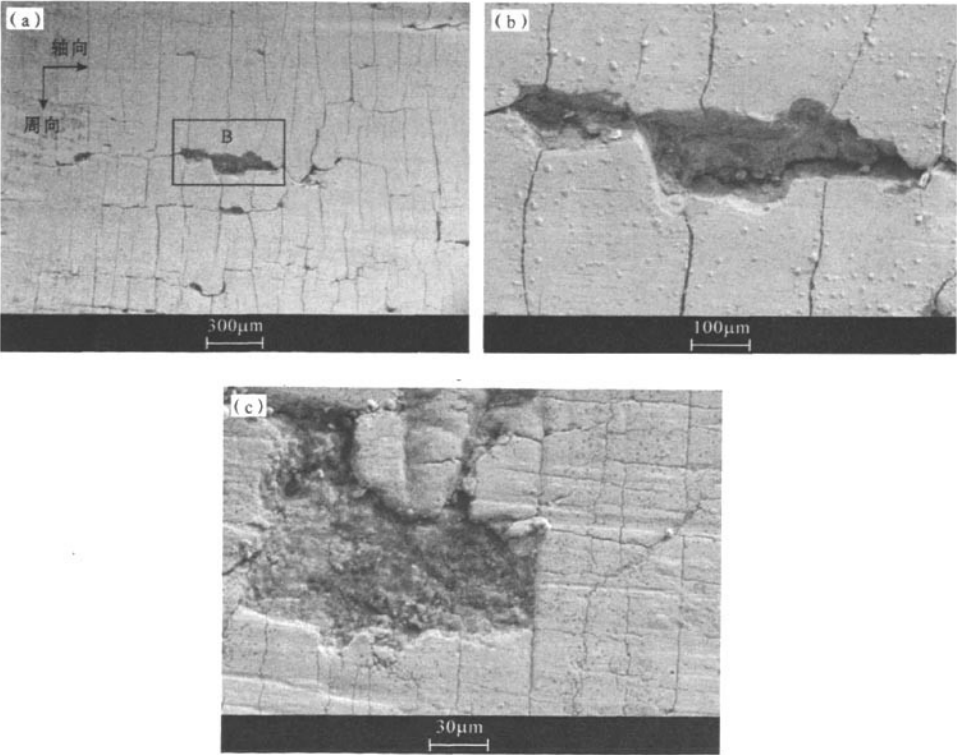


图 2 R 根位磨损的 SEM 形貌
(a)R 根部位的裂纹分布;(b)崩落区域 B 位置的放大图;(c)区域性崩落

Fig. 2 The SEM images of the worn R root
(a)the crack distributing of the die R root; (b)the enlarged SEM image of avalanched zone B; (c)the zone avalanche at the R root

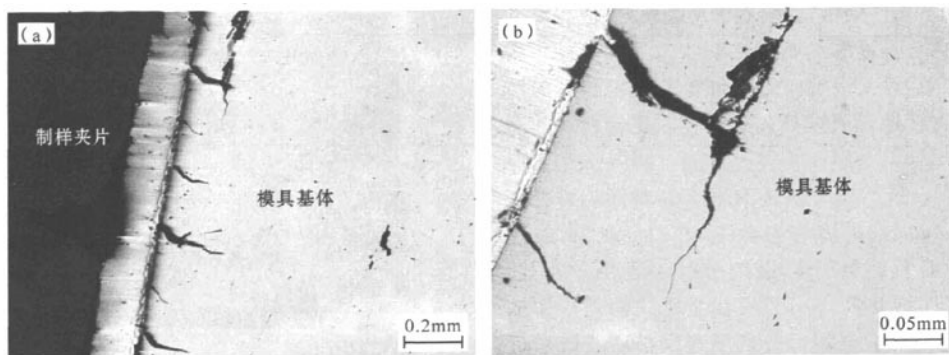


图3 R根部位的裂纹分布及裂纹尖端转向扩展

(a) R根位截面的裂纹分布; (b) R根位裂纹尖端转向

Fig. 3 The crack distributing at the R root and the crack top end turning expand

(a) the crack distributing at the R root section; (b) the crack top end turning at the R root

图4是R根部位的截面金相照片。在制样夹片和模具基体之间的黑色层是氮化层,厚度约为0.2 mm。因氮化层与裂纹均为黑色,所以在氮化层中的裂纹不明显。氮化层中与表面垂直的大部分裂纹刚刚伸出氮化层就停止。图4显示裂纹已伸出氮化层,并且有少量的宽大的裂纹已深入延伸至基体。

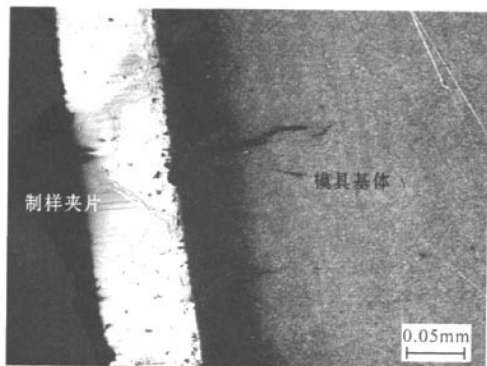


图4 R根位氮化层与裂纹分布的金相图

Fig. 4 Metallography picture of nitriding deepness and the crack distributing at the R root

3.2 分析讨论

检测结果表明,热锻模具失效的原因是模具R根部位表面纵横交错的裂纹、裂纹交汇处表面崩落及沿表面块状崩落,使模具R根部位表面出现凹坑而失效。

从模具的受力情况看,R根位的型腔表面受到

轴向的摩擦力和径向的挤压力。径向挤压力是压应力,模具承受压应力的强度比承受拉应力的强度高得多,并且能通过模具套来分散压应力。较大的压应力会使平行于轴向的摩擦力增大,摩擦力在模具表面最大,并且是拉应力。每锻造一个气门,就形成一次机械应力疲劳。

从模具的受热情况看,21-4N材料电锻成蒜头的终锻温度为950℃,在后序的热锻中模具R根部位受到强烈的挤压变形,气门材料与模具型腔壁产生剧烈摩擦,模具内型腔表面瞬时温度可达950℃以上。但因每一气门终锻时间很短,在不到0.5 s内完成,因而扩散至模具的热量并不多。根据不平衡热传导模型计算,由模具表面垂直向内部的温度呈指数下降。以模具表面温度为1000℃计算,在距表面10 μm时温度降至510℃,距表面20 μm时只有310℃^[4]。生产中发现模具的整体温度并不高,因每锻造一支气门后,型腔工作面不仅会在空气中迅速冷却,而且机械手会喷洒含润滑剂的溶液使之冷却,这样模具的表面温度迅速降低,形成剧烈的冷热疲劳。另外,模具型腔工作面经过氮化处理,当表面氮化层温度超过Fe-N共析温度592℃时,表面氮化层开始转变成含氮奥氏体,在随后的冷却中又迅速转变成含氮马氏体。这种马氏体-奥氏体转变是一级相变,体积会发生变化,从而引起表层巨大的内应力。每锻造一支气门模具就经历一次疲劳循环,其表面很容易形成龟裂裂纹。

模具型腔工作面形成龟裂裂纹后,在轴向摩擦力的作用下,形成应力集中,将型腔内工作面沿轴向

撕裂.因而,R根部位周向裂纹比轴向裂纹宽.模具表面出现裂纹后,型腔工作面与热锻气门材料间的摩擦力进一步增加,撕裂倾向加剧.裂纹向内部扩展,当裂纹长度超出氮化层时,因模具基体材料的韧性比氮化层好,裂纹扩展受到制约.在各种应力的综合作用下,裂纹转向沿氮化层与基体分界面扩展,扩展到一定程度时,形成图2所示的崩落,从而导致模具失效.

另外,模具加工时R根部位的刀痕,会增大模具表面与气门的摩擦力,并形成应力集中,促使裂纹扩展,降低模具寿命.

4 结 论

热锻模具失效的原因是R根部位表面纵横交错的龟裂裂纹、裂纹交汇处崩落及表面块状崩落.龟

裂裂纹源于R根位的热疲劳和相变疲劳的共同作用;锻造摩擦力使龟裂裂纹扩展,穿过氮化层至基体时遇阻,转向氮化层/基体界面扩展,最后形成氮化层崩落.模具型腔工作面的加工刀痕增大了模具表面与气门的摩擦力,并形成应力集中,促使裂纹扩展,降低模具寿命.

参考文献:

- [1] 韩明臣,朱昱. TiAl合金汽车气门[J]. 汽车工艺与材料, 1994, 4: 21-23, 32.
- [2] 蔡美良,丁惠麟,孟沪龙. 新编工模具钢金相热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1998:289-293.
- [3] 程培源. 模具寿命与材料[M]. 北京:机械工业出版社, 2002:70-77.
- [4] 屠传经,沈璐婵,吴字静. 热传导[M]. 北京:高等教育出版社,1992:100-112.

The invalidation analysis of the valve hot forging die

NING Zhi-jian¹, QIU Wan-qi², MO Dong-qiang¹, CHEN Guan-hua¹, MAO Zhi-cheng¹, ZHOU Chong¹

(1. Huaiji Dengyun Auto-parts Co. Ltd., Huaiji 526400, China;

2. School of Material Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The invalidation of valve hot forging die was analyzed by scanning electronic microcopy (SEM) and optical microcopy. The results indicated that the vertical and horizontal cracks on the surface of the R cone spread and joined together, leading to cracks avalanching and the pits occurring at the cracks cross, which caused the invalidation of R cone. The vertical and horizontal cracks were produced due to the thermal fatigue and phase transition effects.

Key words: vavle; hot forging die; invalidation