

# H68M 黄铜微区塑性变形行为研究

熊显渝

(重庆长安工业公司,重庆 401120)

**摘要:** 通过对黄铜中形变微区晶体结构缺陷的观察分析,定性比较了位错和孪晶缺陷的形态、数量和分布与外载荷类型、大小的关系。为 H68M 的冷变形行为的研究提出了一种较为实用的试验方法。该方法可为改进产品设计、消除重大质量安全事故提供实验依据和途径。

**关键词:** 晶体缺陷;位错;孪晶;滑移带;切应力;扫描电镜二次电子图像

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)09-0129-05

## A Study on Microanalysis of Plastic Deformation Behaviors of H68M Brass

XIONG Xian-yu

(Chang'an Industrial Company, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** In this paper, the relations between the dislocation and the morphology of twin defects, number and distribution with the load type, the size were qualitatively compared through the analysis of deformation micro crystal structure defects observed in brass. A practical test method to research for the cold deformation behavior of H68M brass is put forward. This experiment also provides experimental basis and the approach to eliminate the quality of major accidents, improving product design.

**Key words:** crystal defect; dislocation; twin; slip bands; shear stress; Second Electron Image of Scanning Electron Microscope

某产品在使用过程中发生了多起重大安全事故,在事故原因分析时,肉眼发现该产品上的一个 H68M 黄铜部件,在零件局部较小区域内,多次呈现出与正常变形不一致的异常塑性变形。

首先需要确认零件内部是否存在异常塑性变形的特征信息,弄清异常变形(微观)区域的位置、大小和分布等特征,才能顺藤摸瓜探索这种导致变形的驱动力源头。在此基础上才有可能找到改进产品设计的方法措施,达到最终消除安全事故隐患的目的。

本试验立足于铜锌合金形变过程中,会在规则排列的晶体结构中萌生出位错和孪晶缺陷的物理冶金理论,采用了金相显微组织观察和扫描电子显微镜二次电子图像分析相结合的试验方法,借助微区硬度测试技术,对 3 种不同的形变样品进行分析比对。

### 1 试样制备和试验方法

本试验选用的 3 个样品,分别取自不同形变类型失效产品。试样制备方法如下:采用高频电火花线切割机,先在成品尾端面变形区域的中心部位,切取宽度约为 5 mm 的纵截面样品。然后用金相样品镶嵌机将样品制成直径为 22 mm、高为 12 mm 的圆柱形试样,经粗磨、细磨、抛光等一系列工序,获得平整、无形变层的光亮表面。最后经氯化高铁、盐酸水溶液轻微浸蚀。

经浅浸蚀的金相试样在 LEICA 型光学显微镜下用明场观察,放大倍率 500 $\times$ 。在扫描电子显微镜的二次电子图像观察(放大倍率 500 $\times$ ~1000 $\times$ )时,也采用相同的试样,但需用银粉导电胶将用塑料粉镶嵌的金属试样接地,以降低吸收、透射类电子的干扰,提高图像清晰度。硬度测试在型号

为 ZWICK-3212002 的维氏硬度计, 试验力为 1.96 N。

参与 3 种模拟试验试样的受力和变形类型见表 1。

表 1 3 类变形底火的几何外形和形成条件

外端面变形类型	药室朝后冲击载荷	外加冲击载荷	变形区照片号
I 型 靠辅助点燃替代底火, 未击发, 火帽壳外底面鼓起, 形成凸台; 内底面现凹坑	有	无	1
II 型 正常底火药, 正常击发, 火帽壳外底面起凸台, 内底面现凹坑	有	无	2
III 型 无底火药, 正常击发 (即空击发), 火帽壳外底面现凹坑和内底面中部凸起, 四周凹陷	无	有	3

## 2 3 种类型金相试样的微观变形特征

1) I 型火帽壳轴向剖面塑性变形特征见示意图 4 所示, 金相试样的变形特征见表 2 所示。

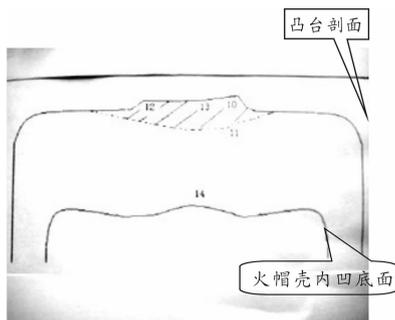


图 4 I 型火帽壳轴向剖面塑性变形示意图

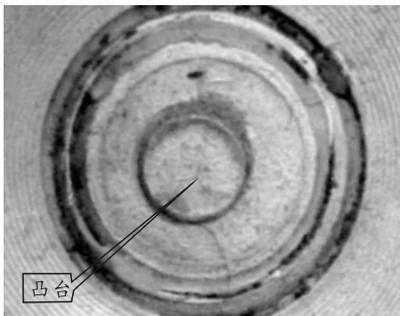


图 1 I 型火帽壳外底面变形后的形貌

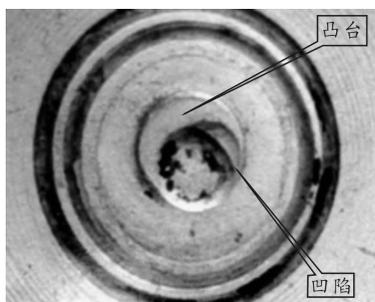


图 2 II 型火帽壳外底面变形后的形貌

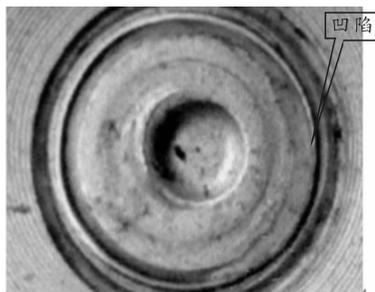


图 3 III 型火帽壳外底面变形后的形貌

表 2 I 型金相试样的变形特征

试样类型	扫描电子显微镜二次电子图像	金相显微镜
I 型	凸台左 (图 5) 右两侧的滑移带呈“八”字分布, 凸台轴心位置的上端 (图 6) 无滑移带, 有较多孪晶; 下端 (图 8) 无滑移带, 有少量孪晶。	凸台左 (图 7) 右两侧的滑移带呈“八”字分布, 轴心位置的上端无滑移带, 有较多孪晶; 下端 (图 8) 无滑移带, 一部分晶粒内有孪晶。

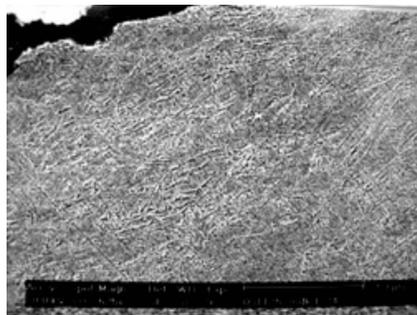


图 5 凸台左侧的滑移带呈“八”字走向



图 6 凸台右侧的滑移带呈“八”字走向

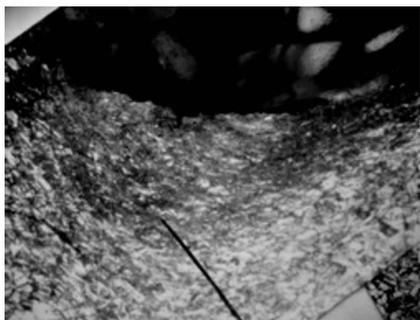


图7 凸台左侧的滑移带呈“八”字走向

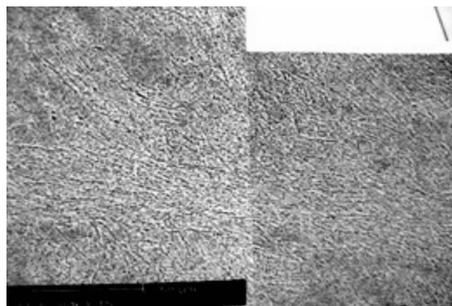


图10 凸台右侧的滑移带呈“八”字走向

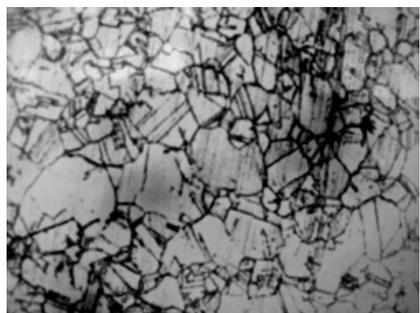


图8 轴心位置下端无滑移带,部分晶粒内有孪晶

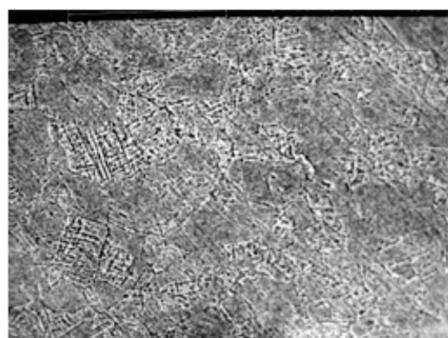


图11 凸台轴心位置上端部分晶粒内有滑移带,无孪晶

2) II型火帽壳轴向剖面塑性变形特征见示意图9所示,金相试样的变形特征见表3所示。

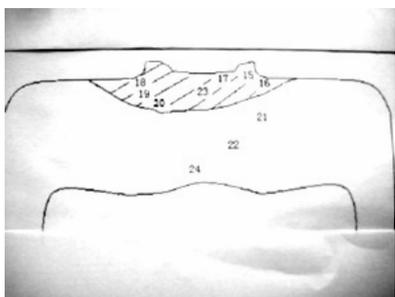


图9 II型火帽壳轴向剖面塑性变形示意图

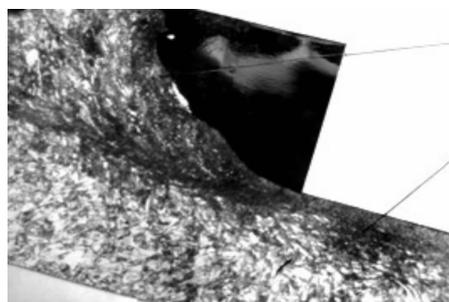


图12 凸台左侧有高密度的滑移带

金相试样的变形特征见表3所示。

表3 II型金相试样的变形特征

试样类型	扫描电子显微镜二次电子图像	金相显微镜
II型	凸台左、右(图10)两侧的滑移带呈“八”字分布,有孪晶。凸台轴心位置的上端(图11)部分晶粒内有滑移带,无孪晶;下端个别晶粒内有滑移带,有少量孪晶。	凸台左侧(图12)有高密度的滑移带;凸台右侧有一层平行表面的滑移带。随着离凸台距离增加,内层滑移带逐渐减少,表现在滑移带仅在单个晶粒内出现,孪晶增多(图13)。

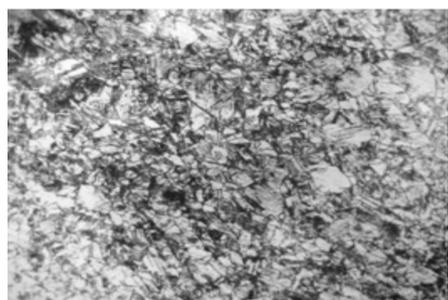


图13 火帽壳左外侧肩边缘,较大范围内覆盖滑移带

3) III型火帽壳轴向剖面塑性变形特征见示意图14所示,金相试样的变形特征见表4所示。

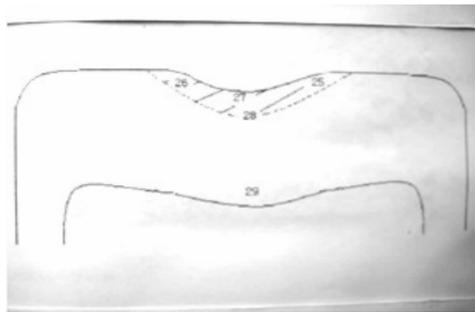


图14 III型火帽壳轴向剖面塑性变形示意图

表4 III型金相试样的变形特征

试样类型	扫描电子显微镜的二次电子图像	金相显微镜形貌
III型	凹坑中部及左右两侧表层滑移带少,不连续,呈分散分布的滑移领域(图15)。离表面约0.05 mm处开始出现孪晶(图16)。轴心中部和内底面均无滑移带,有较多分散分布的孪晶(图17)。	凹坑右边缘靠轴心侧有穿过晶粒的滑移带,但背离轴心侧滑移带长度缩短成晶粒尺度,约0.025 mm。凹坑轴心位置上部滑移带长度大于晶粒尺度,但比边缘短一些。中部的滑移带长度缩短成晶粒尺度,底部无滑移带,有较多孪晶(图18)。

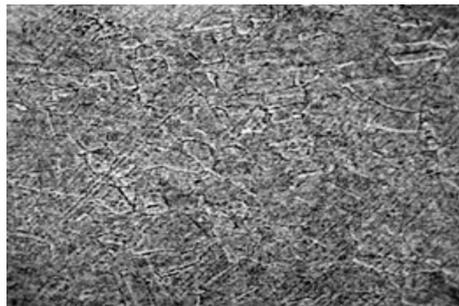


图17 凹坑中部和内底面均无滑移带,内层出现较多孪晶

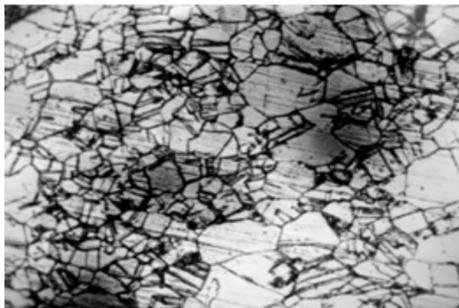


图18 底部无滑移带,有较多孪晶

4) 经不同变形的3类产品试样的硬度值(HV0.2)如表5所示。

表5 3类产品试样的硬度值

测量位置	3类经变形试样硬度值		
	I	II	III
凹或凸台轴心表面	167	167	172
凹或凸台轴心左侧边缘	187	180	178
凹或凸台轴心右侧边缘	173	170	180
凸台左侧边缘外平面	155	145	149
凸台右侧边缘外平面	144	152	145
凸台轴心厚度心部	145	145	155
轴心内表面	137	137	142



图15 凹坑右侧表层有少量不连续的滑移带

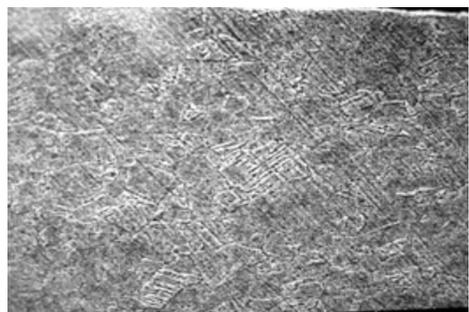


图16 凹坑轴心位置中部呈分散分布的滑移领域

### 3 试验结果的分析 and 讨论

1) H68M 黄铜是一种含32% Zn和68% Cu的Cu-Zn二元合金,由于元素Cu的晶体结构为面心立方;Zn的晶体结构为密排六方,2种组元的晶格类型不同,形成有限固溶体。Cu的原子半径(当配位数为12时)为12.8 nm、元素Zn的原子半径(当配位数为12时)为13.8 nm,这2种组元的原子半径相近,形成置换式固溶体。元素Cu是溶剂,所以H68M黄铜的晶体结构与面心立方相近<sup>[1]</sup>。

具有面心立方结构的金属在外力作用下,由于滑移系多,容易沿特定的平面发生塑形变形。当滑移面上大量的位错移出后,则在晶体表面形成一条条滑移线,使光滑表面变

得粗糙。滑移线是由一组相互平行的位错台阶痕(线)组成。高分辨率电子显微镜观察到相邻两条滑移线间距约 100 个原子间距。

试验中在显微镜和扫描电镜下看到的是由许多滑移线构成的滑移带,滑移带的走向与试样表面大致平行。单条滑移带宽度大约 1 000 个原子间距。相邻 2 条滑移带的间距约 10 000 个原子间距,相当于肉眼的分辨率 0.2 mm。试样经轻腐蚀后,观察到的滑移带比实际宽度大一点。

参与试验的 3 个试样的平均晶粒度,根据 GB/T6394—2002 第 2 级别图<sup>[2]</sup>都评为 9 级,属于细晶粒的铜合金。晶粒越细,单位体积中的晶界面积越大,在切应力作用下由于滑动在晶界受阻,有利于位错的形成,导致应力集中和基体硬化。

2) 应力类型和应力大小与晶体缺陷的关系。从外加的应力类型来说,只有剪切应力才能形成位错和孪晶缺陷。变形区内的压应力,其变形效果实质上是造成整块基体的平移,在基体内部之间并不发生相对位移,没有切应力,形成不了位错。如火帽壳内底面虽然受到超强气压瞬间压应力作用,由于没有切应力(或分量),所以底表层基体中没有位错,硬度也不会明显升高。

从应力大小考虑,只有当切向应力大于(形成位错所需的)临界分切应力时,能形成位错。当切向应力小于(形成位错所需的)临界分切应力时,虽然不能形成位错,但仍会在一些晶粒内形成孪晶。从结构上说,孪晶由 2 个镜面对称的晶面构成,通常有一个共格界面。从能量上说,形成共格界面所需要的能量仅为形成位错所需要的能量的十分之一,形成半共格界面能量也仅为形成位错所需要的能量的二分之一。

在火帽壳凸台峰顶位置,因切应力很大,全部被位错线占领,位错线茂密,基体硬度升高,但看不到孪晶;随着离凸台峰顶位置渐远,切应力逐渐减少,位错密度越来越小,直至消失。但这时的切应力大小,给孪晶的形成提供了足够的空间。

3) 试验发现位错线和孪晶在样品中的形成和分布,与晶体在空间中所处的位向有关。即使在同一个微观领域内,并不是所有晶粒都会形成滑移线,而只有那些平行于表面的走向上切应力最大,所以试验中观察到的长、厚且密滑移带总是出现在切应变最大的表层,特别是在火帽壳凸台的峰顶位置。孪晶出现在切应变较小的区域,无切应变的区域既无位错又无孪晶,而在切应变较大区域,便是位错和孪晶的共生区。

目前铜中孪晶对硬度等力学性能的影响已有报道<sup>[3]</sup>,特别是当孪晶片层厚度减小到纳米级尺度对材料强韧性的影响更受到广泛关注<sup>[4]</sup>。位错和孪晶缺陷均能不同程度地升高基体硬度,硬度分布与位错和孪晶的比例有关,位错所占的比例越大的区域,硬度升得越高,如本试验的 3 种试样上,由于两种晶体缺陷的配比不同,同一个样品中硬度可相差 36~50 HV。

4) 从晶体结构上说,位错形成是一种大量原子集团以

原子间距整数倍的距离集体迁移的行为;所以微观存在的位错线能够聚合成宏观可见的位错带,属于线缺陷。孪晶形成是部分原子围绕共格界面集体转动,虽然单个原子移动的距离只有一个原子间距的几分之一,但众多原子累积起来的切变位移,仍可以达到原子间距的许多倍,从而使这种缺陷达到宏观尺度,属于面缺陷。

从能量上说,位错和孪晶均存在于晶体结构畸变区,该处原子排列具有不同程度的紊乱现象,与无晶体缺陷处的基体相比,具有较高的位能。这些区域更易受到浸蚀剂的腐蚀,所以经轻腐蚀的金相试样面上,不但缺陷部位颜色较深,而且在缺陷部位产生微观凹陷。前者给光学显微镜观察带来衬度,后者造成的高度差,恰恰是扫描电镜中二次电子图像清晰成像所必须的<sup>[5]</sup>。

5) 试验样品剪切应力的来源。试验样品取自三种不同变形的火帽壳,在火帽壳与一个称为三爪火台的零件过盈配合,两者之间有一个恒定的间隙,若点燃底火,则产生瞬间冲向壳底面的气压力,这种压力对整个底面接近于平均分布,表层基体几乎没有相对位移,不发生切变,没有切应力,所以 3 个样品在这个部位并未显示出位错和孪晶。

火帽壳外侧底面与内底面不同:外底面承受一个高硬度零件的快速撞击,形成一个小凹坑(也可理解为外底面上凹坑的产生必然存在一个冲击载荷)。在弧形凹陷面上各个不同部位,则受到大小和方向不同的瞬间冲击力;凹面边缘即凸台位置,以切应力为主,位错密度最高;而凹面底部相当于轴心部位,以压应力为主,两者之间有一些切应力,所以该处也会出现一些位错滑移线。

6) 本研究的试验结果对本次安全事故原因分析至关重要,作为实际应用往往是对实验结果逆向思维,即将观察到的火帽壳纵向剖面上的位错、孪晶缺陷的多寡、分布状况及其变化规律,反推基体金属中形变部位曾经遭受过的外载荷大小、方向和分布等重要信息。基于本次实验结果,曾经众说纷纭的“火帽壳有没有承受过应力?”等等疑点,就会迎刃而解了。这也是本次试验方法的设计思路。

采用本文介绍的试验方法,可以实实在在地观察到基体中易被人忽视的滑移线和孪晶。值得欣慰的是,扫描电子显微镜和光学显微镜虽然成像原理不同,但是最终获得的试验结果几乎完全吻合。这表明零件变形区内的晶体缺陷确实存在,观察到的图像具有可信性。

## 4 结论

1) 具有面心立方的 H68M 黄铜样品,晶体结构中的位错滑移线和孪晶缺陷的数量、分布和类型与所承受的剪切应力大小、方向有密切的关系。所以可根据试验获得的晶体缺陷的数量、分布和类型,推算外载荷的有关信息。本实验在方法上具有某些独创性。本文试验研究了一种将光学金相、电子金相和硬度测试相结合的综合实验方法,该方法立足于较成熟的晶体位错理论,对深入研究 H68M 黄铜的冷变形微观行为,提供了一种较为实用可靠的方法。(下转第 148 页)