

超低碳冷轧薄板单向拉伸过程变形机理

初元璋¹⁾ 黄玲²⁾ 李慧琴³⁾

1)北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083 2)重庆钢铁设计院,重庆 400013 3)包头钢铁学院,包头 014010

摘要 通过对超低碳 IF 钢冷轧薄板拉伸过程中不同变形程度的测试与扫描电镜的观察,研究了其表面形貌及组织的变化规律,探讨了超低碳钢韧性断裂中内部孔洞形成机理,并指出超低碳钢中的微孔洞不是主要由夹杂物或第二相粒子产生,而是因为位错的滑移、集聚,在原有损伤处形成。

关键词 冷轧薄板;表面形貌;组织的变化;孔洞形成机理

分类号 TG 355.11

目前宝钢生产的超低碳钢 BIF 是国产汽车用冷轧钢板中深冲级别钢的典型产品。研究这个钢种的冲压成形过程及影响冲压性能的因素十分重要。冲压成形一般含有大量的应变,其失效通常是由拉伸中的塑性失稳所致。对于失稳问题,前人已经做了很多研究工作,并取得一定成果。近一个时期人们已把注意力集中在如何理解微细观结构与宏观结构之间的关系及如何运用微细观结构对变形各种形态的响应来解释变形失稳的机理。材料的性能与其组织和结构有着密切的关系。宏观上,薄板在拉伸过程中经历着屈服、颈缩直至最后断裂的过程;微观观上,其内部组织结构也必然发生着一系列变化。本文对 BIF 钢在单向拉伸过程中的表面形貌、内部组织结构、断裂与损伤进行了分析,并对孔洞形成机理进行了初步探讨。

1 实验材料及实验方法

1.1 实验材料

实验材料选取宝钢生产的 BIF, 1.2 mm 厚, 其化学成分(质量分数/%) : C—0.03, Si—0.016, Mn—0.18, P—0.010, S—0.006 2, N—0.016, Al—0.034, Ti—0.83。

1.2 实验方法

(1) 试样制备。按 GB 228—87 制作拉伸试样。

(2) 拉伸实验。在 MTS810 材料试验机上按

GB 228—87 进行拉伸实验。当试样产生一定程度的变形时, 停机卸载, 共得到 8 种不同延伸率下的变形试样, 即: 1—0.0, 2—15.0%, 3—25.0%, 4—32.0%, 5—42.0%, 6—48.5%, 7—49.4%, 8—50.4%。

(3) 扫描电镜观察在 S-250MK3 扫描电镜上对不同程度变形后试样的表面形貌及内部组织结构进行观察。

1.2 超低碳钢单向拉伸过程中表面形貌及组织的变化

(1) 超低碳钢的拉伸曲线。BIF 的拉伸曲线与普通含碳较高钢种的拉伸曲线的明显差别主要表现在: ① 拉伸曲线在屈服之后强化速率小, 曲线平缓; ② 颈缩失稳之后, 曲线并不马上下降, 而是在经过较大一段变形之后, 材料断裂, 曲线才下降。如图 1 所示。

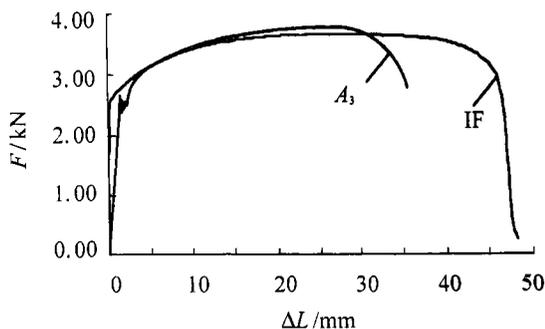


图 1 IF 钢与 A₃ 钢的拉伸曲线

IF 钢钢质纯净, 夹杂少, 因而位错运动的阻碍少。位错一经开动, 即能很顺利地进行滑移, 因此, 应力一直维持在较低的水平。

(2) 超低碳钢单向拉伸过程中表面形貌的

变化,在扫描电镜下观察到,IF钢钢板的原始表面存在较多的表面缺陷,如表面夹杂、表面裂纹、针孔等,整个表面显得疏松、粗糙。随着变形量的增大,表面的破碎状态加剧,整个表面变得起伏不平。当变形量达到15%时,表面已可见清晰的滑移带,不过这时的滑移带大多相互平行,交叉的滑移带少,同时可见钢板表面基本无起伏如图2(a)所示。当变形量达到32%时,已可见相当多的地方出现了明显的相互交叉的滑移带,滑移带的数量增加,这时材料内部位错密度大大增加,钢板表面起伏达到一定程度如图2(b)所示。以后,随变形程度的加大,表面的滑移带越来越密集,钢板表面变得起伏不平,直到最后断裂。整个变形过程中,滑移带都出现在表面缺陷较少或无表面缺陷的地方,在表面缺陷处没有发现任何滑移现象。

表面缺陷的形式多种多样,产生的原因也各不相同。其中,裂纹和气泡是冷轧板最常见也是最有害和最难控制的2种缺陷。已有的研究成果^[1-4]大多认为,气泡中的 Al_2O_3 夹杂是引起裂纹的主要因素,其直径为4~10 μm 。据此,作者认为,在表面缺陷处没有产生任何滑移是因为:
①产生表面缺陷的夹杂是位错运动的障碍,将

阻止滑移的进行;②有的表面缺陷本身就是位错运动的障碍,如气泡、表面夹杂。

因此,钢板的表面形貌对变形有影响,表面缺陷多,将阻碍位错运动,不利于变形的继续;提高表面质量,不仅将提高钢板的各种表面性能,也将在一定程度上提高材料的冲压成形性。

关于变形过程中,表面粗糙度的增加及其对成形极限的影响,已有不少学者进行过相关的研究^[5-7],他们大都认为:变形过程中钢板的表面粗化对成形极限有不利的影响。

(3)超低碳钢单向拉伸中内部组织的变化实验中观察了IF钢在不同变形程度时的内部组织,可见到,其原始状态为大小均匀的等轴晶粒,在个别地方有尺寸较大的夹杂。变形量为15%时,与原始状态相比,晶粒有不太明显的拉长变形如图3(a)所示。当变形量达到32%时,变形已达到非常剧烈的程度,不仅晶粒被拉长,出现滑移带,而且还出现了裂纹与孔洞如图3(b)所示。以后,随着变形的进行,这种趋势进一步加强,裂纹和孔洞进一步扩大,而且在颈缩区域的孔洞数量明显多于其他区域。直到断裂前,孔洞数量达到相当多的程度。

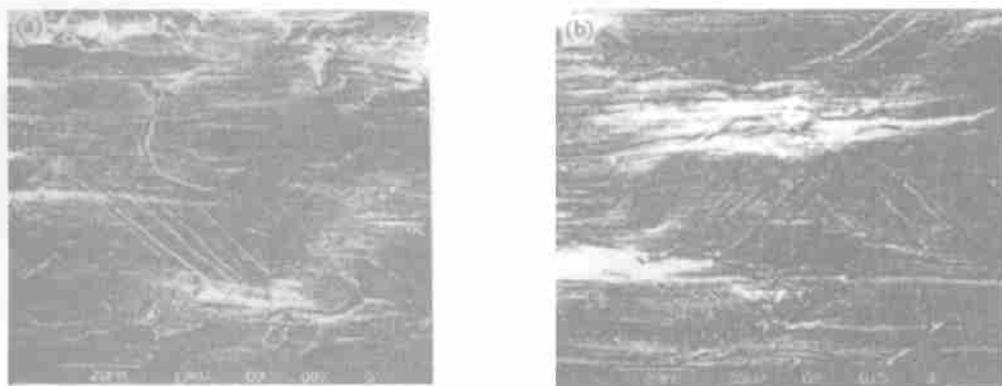


图2 IF钢变形15.0%(a)和变形32.0%(b)时的表面形貌SEM照片

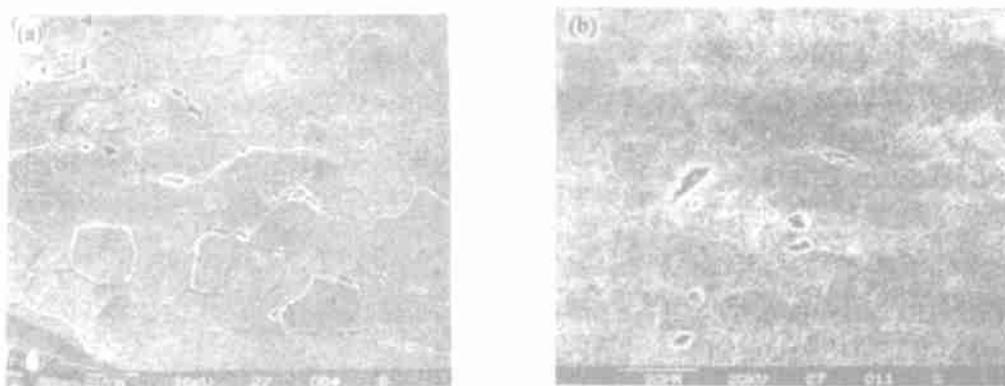


图3 IF钢变形15.0%(a)和变形32.0%(b)时的内部组织SEM照片

2 超低碳钢韧性断裂中内部孔洞形成机理分析

2.1 断口分析

IF钢的断裂属典型的韧性断裂,断口韧窝呈抛物线状(图4),这是由于受切应力作用的缘故,而且大小不均匀。韧窝断口的形成,大多都经过这样几个步骤,即范性形变、形成空洞、空洞扩展、空洞凝聚贯通而成裂纹、裂纹扩展而导致断裂。金属断口理论认为,材料内部的微孔是逐渐形成的,可以认为,这些韧窝的大小不一,正是由于微孔形成的时间不同,并逐步长大所致。

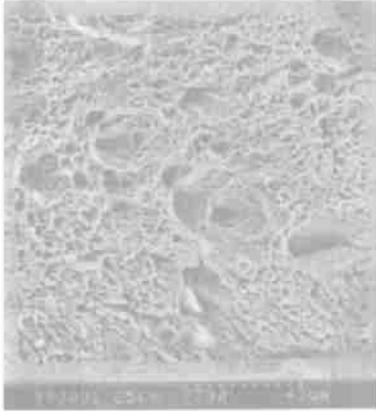


图4 IF钢断口SEM照片

2.2 超低碳钢内部孔洞形成机理分析

前人的研究认为,孔洞大多起源于夹杂物或第二相粒子。塑性变形过程中,夹杂物或第二相粒子成为位错运动的障碍;位错在它们之前大量塞积,产生高的应力集中;应力集中达到一定程度,金属与这些粒子的界面产生分离,或者一些硬脆性粒子本身脆性断裂而形成了微细裂缝;裂缝端部又引起了应力集中,因为基体本身的塑性变形能力较好,必然在裂缝尖端的应力集中处形成一个集中的剪切变形区,局部大量的剪切变形就使得孔洞(裂缝)长大,当孔洞扩展到一定程度后,相邻孔洞之间的金属犹如宏观试样产生颈缩时的情况一样,将会引起应力集中,而加速形变,直到细缩至一线而被撕断,便形成一个刀刃状的韧窝边缘,如此连续不断,就形成了韧窝断口。由于韧窝大多起源于夹杂物或第二相质点,所以在断口上这些质点大多分布在韧窝的底部。在扫描电镜下观察IF钢的断口,在大部分韧窝底部未发现夹杂物或第二相质点,这说明IF钢中的孔洞不是主要由夹杂物或第二相粒子处形成,而是另有成因。

为探讨IF钢中孔洞形成的主要原因,有必要先弄清楚IF钢中夹杂物及第2相粒子的分布情况。IF钢由于经过铁水预处理和RH真空脱气,钢质纯净,钢中的夹杂物已很少。一般认为,IF钢中的第2相粒子(TiC, TiN, NbC, AlN等)在退火前已完全析出,故其都呈粗大且稀疏分布。文献[8]对BIF钢在退火过程中2相粒子的演变进行了研究,给出了Ti-IF钢中存在的4种常见粒子TiN, TiS, $Ti_4(CS)_2$, TiC的基本形貌和尺寸范围,经罩式退火,粒子的尺寸范围见表3。

表3 罩式退火后Ti-IF钢中常见第2相粒子尺寸 μm

TiN	TiS	$Ti_4(CS)_2$	TiC
180~1400	40~500	80~600	10~30

因此,对于本实验中所用Ti-IF钢中第2相粒子的分布可描述为:在铁素体基体上稀疏分布着一些粗大的TiN, TiS, $Ti_4(CS)_2$ 第2相粒子,另外还弥散分布着一些细小的TiC粒子。

Break在70年代提出了夹杂物在塑性断裂中所起作用的物理模型,并提出了冲压过程中钢板内的孔洞形成物理模型。他们认为,在单向拉伸状态下孔洞的成因有3种:

(1)金属中最先出现的是简单滑移,滑移面的间距为 $1\mu m$ 左右,这种滑移使那些粗大的夹杂物质点成为位错运动的障碍,质点前塞积了大量的位错,当应力足够大时,位错挤入质点和基体金属的交界面形成孔隙,产生孔洞,而尺寸远远小于滑移面间距,并位于二滑移面之间的质点对位错没有塞积作用;

(2)随变形量增加,位错密度增加,金属发生交滑移,交滑移和高的位错密度使微小的质点也处在障碍位错运动的位置,因而在这些质点处也形成孔洞;

(3)由于交滑移使位错在某些滑移面上合并消失,形成大的缺陷,这些缺陷集聚连片也能形成微孔,使金属内部的微孔数量大大增加。第一种类型的孔洞在拉伸变形早期已出现,随拉伸过程的进行,逐渐长大,就得到了断口上那些尺寸较大的韧窝,而第2和第3种类型的孔洞在拉伸后期才出现,因此长大不充分,在断口上的韧窝就较小。

作者认为,对于普通碳钢,甚至低碳钢,这些孔洞的成因都是成立的,即孔洞主要由夹杂物、第2相粒子导致,但对于超低碳钢,由于其中夹杂物和第2相粒子极少,孔洞的产生将主

要不是由夹杂物和第2相粒子引起,而由第3种成因导致的微孔洞将占绝大多数。

工程中实际使用的材料,在原始状态就已存在着许多损伤和缺陷,如空位、位错、各种界面、超显微空洞等。在单向拉伸中,其中的超显微空洞将由于位错在空洞前的聚集而长大,在拉伸后期,在位错集聚的高密度区也会由于位错的集聚而形成微孔核心。这些成因的孔洞在拉伸后期才能产生,因此断口上的切窝很细小。在拉伸初期,超低碳钢中的一些较粗大的夹杂物、第2相粒子仍然将引起孔洞产生,那些细小的第2相粒子在拉伸后期也会导致孔洞产生,但这已不是主要原因。当这些各种成因的孔洞的数量和体积达到一临界值,宏观上就表现为失稳,继续变形孔洞结合起来成为裂纹。

这样就解释超低碳IF钢的拉伸曲线在分散性失稳后仍能有较大一段的伸长变形的现象。IF钢中的微孔洞大多在拉伸后期失稳前产生,体积较小,因此在失稳后势必经过一个较长过程的变形,才能使相邻孔洞间的材料产生类似宏观试样中的颈缩,孔洞才能连接,进而发生断裂。

3 结论

(1) 钢板表面缺陷将阻碍位错的运动,提高

表面质量,将有利于冲压成形性的提高;

(2) 单向拉伸中,IF钢内部组织将发生一系列的变化,断裂前,材料中分布着大量的裂缝和孔洞;

(3) 与低碳钢比较,超低碳IF钢中的微孔洞不是主要由夹杂物或第2相粒子产生,而是因为位错的滑移、集聚而在原有损伤处形成。

参考文献

- 1 Maehara Y, Yasumoto K. Surface Cracking Mechanism of Continuously Cast Low Carbon Low Alloy Steel Slabs. *Materials Science and Technology*, 1990, 6(9): 793
- 2 井上健, 安中弘行, 松本泽. 极低炭素钢人工欠陥サンプルの熱延テスト. *CAMP-ISIJ*, 1993, 6: 1167
- 3 安中弘行, 山中量一, 井上健. 极低炭素鋼の表層部にはつ生するき泡および介在物欠陥. *鉄と鋼*, 1995, 18(5): 17
- 4 山中量一, 井上健, 安中弘行. 非金属介在物による鋼板表面欠陥のはつ生機構. *CAMP-ISIJ*, 1993, 6: 1170
- 5 山口克彦ほか. 薄板の破断時のひずみ測定. *塑性と加工*, 1980, 21(231): 315.
- 6 陈光南, 沈还, 胡世光. 冷轧钢板的表面形貌及评价方法. *钢铁研究*, 1989(2): 83
- 7 石京. IF钢罩式退火工艺优化及再结晶组织研究: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 1998
- 8 黄玲. 国产轿车用钢板冲压级别评定和性能的研究: [硕士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 1999

Deformation Mechanism in Simple Tension of Cold-Rolled Extra-Low-Carbon Light Gauge Sheet

Chu Yuanzhang¹⁾ Huang Ling²⁾ Li Huiqing³⁾

1) Material Science and Engineering School, UST, Beijing, Beijing 100083 China 2) Chongqing Iron & Steel Design Institute, Chongqing, 400013 China 3) Baotou University of Iron and Steel Technology, Baotou Tou 014010, China

ABSTRACT By testing the cold-rolled extra-low-carbon light gauge sheet samples under different deformation stages and observing them by SEM, their surface pattern and the rules of the transmutation of microstructure has been researched, and the mechanism of the formation of interior holes in gliding fracture was discussed. The result pointed out that it is dislocations' slipping and gathering in original impaired locations but not inclusion and second-phase particles that is mainly responsible for formation of micro-holes in extra-low-carbon steel.

KEY WORDS tension test, surface pattern; transmutation of microstructure; mechanism of the formation of interior holes