

新型高强度多相冷锻钢的应用研究

C.I. Garcia, A.K. Lis, and A.J. DeArdo

(匹兹堡大学材料科学和工程系基础金属工艺研究所)

摘要: 高强度紧固件和冷锻件大都采用碳钢或低合金钢生产。通常采用这些传统钢材生产的最终产品都具有足够的机械性能如强度、韧性、耐疲劳性能等,但其制造加工成本却相当高。这其中相当大一部分费用是由所选择加工的钢材本身的性质决定的。与材质相关的附加加工工序,例如冷锻前的球化退火、以及冷锻后的调质热处理和去应力热处理,使得总加工成本变得不经济。一种理想的经济型冷锻钢必须具有以下特性:(1) 热轧线棒材应具有良好的体积变形能力;(2) 冷锻加工后应具有高的强度;(3) 最终产品应能保持良好的韧性。匹兹堡大学基础金属工艺研究所最近开发出一种具有以上理想特性的新钢种。这种牌号为 BHS-1 的新型微合金化钢具有多相微观组织,可通过线棒材的控制轧制获得。实验室试验和工业性试验表明,这种新型钢材在多种应用中具有高的强度、良好的塑性和缺口韧性、以及好的耐疲劳性能,是传统调质钢的一种经济有效的替代品。

简介

高强度冷成形零部件的加工工艺流程通常包括: 热轧线棒材→球化退火→拉拔减径→冷变形至最终产品尺寸和形状→加工硬化热处理→电镀→烘干热处理。基于以上加工工艺流程,高性能冷锻钢应具有以下特性:

- (1) 具有足够的塑性,以保证在冷成形过程中不产生裂纹,以及能完全填充模腔。
- (2) 最终成形加工后应具有足够的强度,以保证有足够的载荷承受能力和耐疲劳性能。
- (3) 最终成形加工后应具有足够的韧性,以保证在工作应力下有不可避免的或不能检测出的发纹时的抗断裂能力。

传统的高强度冷锻用钢通常是低合金钢、低碳至中碳(0.2~0.4%)钢。对于一个特定的调质处理工艺,钢的强度由 C 含量决定,淬硬截面尺寸由合金含量决定。根据需求,只有部分钢种可以被用来作高强度冷锻钢使用,如 SAE/AISI 标准系列中的: 10BXX, 13XX, 15XX, 41XX, 51XX 和 86XX, 这里 XX 代表 C 含量的质量分数。这些钢具有良好的冷锻性能和足够的强度,已经被成功应用了数十年,在这些应用中,没有可能进一步改善其性能。

传统钢种在高强度紧固件和冷锻件中的使用存在两个问题: 一是经济问题,另一个是冶金学问题。经济问题主要集中在部件预变形过程中的多道工序,在部件成形过程中的多道变形,及变形后的处理。因此,最终产品的成本包括两个方面: 材料成本和加工成本。很显然,新钢种通过减少加工工序,从而可使加工成本降低,使其具有很大的优势。

传统钢种的冶金学问题由其最终微观组织的特性引起。传统钢种的高强度通过调质处理使其产生回火马氏体微观组织得以实现。这种微观组织可使钢具有高强度的特性，但也有很多缺点，如组织的均匀性差、淬火裂纹、变形、韧性不足、电镀时吸氢导致其在静载荷条件下的延迟断裂等。这些问题导致其最终产品在评估和使用性能方面存在不稳定性。

理想的新型冷成形用钢，其强度最好不是通过碳含量来实现，而是其具有一种理想的微观组织，通过冷变形后便能达到需要的强度级别。这种理想类型微观组织的最好例子就是具有低碳铁素体、贝氏体和马氏体的多相微观组织，可通过它们及它们的相互作用来提高强度。其益处是采用了不依赖碳含量的强化机理，具体表现有：

- (1) 由于低碳钢延性好，所以不需要球化退火，热轧态线材可直接使用。
- (2) 由于低碳钢具有高的冷变形能力，故有减少变形工序的可能性。
- (3) 可在部件需要高强度的部位获得高强度，而其它部位仍保持较软的状态。因此，模具磨损和机加工性可得到进一步改善。
- (4) 由于通过冷变形加工硬化便可使产品达到理想的强度，所以不需要成形后的热处理工序。
- (5) 热轧态线材性能的均匀性、良好的模具润滑、合理的变形区域几何形状等的结合（这些在工业实践中都是可实现的），将使成品具有均一的性能。

(6) 由于多相微观组织对氢致裂纹不敏感，所以，镀后成品对延迟断裂性也不敏感。

本文介绍了一种由匹兹堡大学材料科学和工程系基础金属工艺研究所最近开发的具有多相微观组织的微合金钢，以及它的机械性能，最近进行的大批量成功的冷成形试验。

新型多相微合金化钢的物理冶金

这种钢称作 BHS-1，实际上它是 Mn-Mo-Nb 合金钢系列中的一种，碳含量为 0.1%。其详细的物理冶金性能的介绍见^[1, 2]，本文将对其作简单介绍。这种新型钢的合金成分基于一种控制过程而设计，包括热轧、以及随后的连续冷却。在这种情况下，在控制热处理过程中，溶于奥氏体的 Nb 从奥氏体中析出，从而改变了奥氏体状态；同时，在冷却过程中，溶解在奥氏体中的 Nb，结合 Mn 和 Mo 的作用，共同控制相变特性。

这种钢的线棒材可通过常规热轧工艺生产，也可通过控制轧制工艺生产^[3, 4]。这里，常规轧制工艺指终轧温度较高（通常超过 1800°F）的轧制工艺，控制轧制工艺指轧制过程伴随间歇冷却从而使终轧温度较低（通常低于 1550°F）的轧制工艺。采用常规热轧工艺生产的线棒材一般用于热锻加工的坯料，采用控制轧制工艺生产的线棒材一般用于温锻和冷锻加工用坯料。

由于这种钢采用了连续冷却工艺，其热轧态的性质主要决定于它的微观组织，包括相组成和微区组份，以及它们的数量、尺寸、分布，而微观组织，反过来，决定于其化学成份

（淬透性）、轧制过程（奥氏体状态）和冷却速率。采用控轧和空冷工艺生产的 BHS-1 钢，其微观组织包括铁素体、上贝氏体和下贝氏体^[1, 2]。本文介绍了在大量的试验室试验和大生产冷锻处理试验过程中，用控制轧制 BHS-1 钢制造的各种紧固件和冷锻件产品的性能评估情况。

BHS-1 钢冷成形特性

通过控轧获得良好的奥氏体状态，从而使热轧态的线棒材具有良好的韧性，而良好的韧性又可避免冷成形过程中裂纹的产生，同时可提高最终成品在使用过程中的抗裂纹敏感性（特别在一些安全性非常重要的部位）。控轧态 BHS-1 钢的机械性能见表 1，同时也列出了其不同冷拔压缩率后的性能。例如，冷拔压缩率为 10% 时，其屈服强度提高了 80%，但其塑性和韧性却降低很少。从表 1 可见，多相组织的钢具有高的加工硬化率。这一效果在汽车板领域已经有了很长时间的认知，如双相钢因具有高的加工硬化率，通常通过拉伸颈缩变形来提高成品部件的强度和耐断裂性^[5~7]。表 1 的数据表明，通过控轧工艺生产的 BHS-1 钢是一种很好的适合冷变形加工的材料，冷变形加工前不需要球化退火。表 1 也表明，经控轧工艺生产的 BHS-1 钢通过冷变形能达到 SAE8 级和 8.2 级螺栓（屈服强度 $\geq 130\text{KSI}$ ，抗拉强度 $\geq 150\text{KSI}$ ）的要求。

一种被认为适合冷变形加工的材料，它一定能够满足在冷变形加工过程中不产生裂纹。虽然拉力试验的塑性指标经常被用来评价一种给定材料冷加工变形能力，但更有效的试验是带凸缘试样的墩粗试验^[8]。在这个试验中，材料被压缩一直到其凸缘部分表面出现破坏为止。测量和记录下其出现破坏时的应力，用该应力来比较材料的冷变形加工能力。表 2 列出了现常用的两种球化退火工艺处理的冷锻钢和控轧态的 BHS-1 钢的破坏应力。表 2 中的数据表明，这三种钢在实际应用中都具有良好的冷变形能力。因此，应用 BHS-1 钢能省去冷变形加工前的球化退火工艺。

表1 控轧态BHS-1钢（Φ19mm线材）机械性能及冷变形后机械性能

Condition	YS(MPa)	UTS(MPa)	RA(%)	CVN(Joules)	
				RT	-50℃
AC	462	751	65	152	112
AC+5%Red	772	854	62	148	145
AC+10%Red	834	882	58	112	63
AC+15%Red	882	944	56	93	41
AC+20%Red	971	1013	53	84	

表2 1021钢和BHS-1钢冷墩性能比较

STEEL-CONDITION	HOOP STRAIN(KN)
1021 SA(GOOD)	0.330~0.480
1021 SA(POOR)	0.234~0.280
BHS-1 CCR	0.380

最终成品的性能

使用效果的好坏主要由成品部件使用性能决定。传统上，通常通过对整个部件进行调质硬化处理来获得高强度。例如屈服强度必须 $\geq 130\text{KSI}$ 的 SAE8 级螺栓就是通过调质处理来实现。表 3 列出 4140 和 5140 两种钢的性质，它们通过调质处理来制作 8 级螺栓。控轧态的 BHS-1 钢拉拔 18%后的性能也列在其中。从中可见，三种钢的屈服强度、抗拉强度和断面收缩率几乎相同时，冷拔后的 BHS-1 钢具有更好的韧性。因此，应用 BHS-1 可省去最后的热处理工序。

最后，表 3 还列出了 BHS-1 钢经过从控轧最后一个道次出来后立即淬火（即直接淬火）的性能指标。从中可见，其性能指标与冷变形加工后经过再加热和淬火处理的调质钢部件相当，说明其高的强度、良好的塑韧性与很有吸引力。表 3 的数据表明，BHS-1 钢通过冷变形加工不仅能很容易能达到 8 级螺栓的强度要求，而且具有高的韧性。

表3 不同的冷锻钢制作的8级螺栓（YS $\geq 896\text{MPa}$ ）的最终性能

Condition	YS(MPa)	UTS(MPa)	RA(%)	CVN@RT(Joules)
4140 QT	930	967	62.3	26
5140 QT	906	1011	57.1	16
BHS-1(CCR)	462	751	65.0	152
BHS-1(CCR+18%CD)	916	958	53.4	87
BHS-1(CCR+DQ)	965	1157	63.0	81

生产实践

控轧态 BHS-1 钢的冷锻加工应用已进行了几次大批量试制试验。其制作的部件主要包括轮轴、转向中心连杆、拉杆头、5 级和 8 级螺栓、转向臂等。在所有的这些应用中，对最终的成品部件最主要的性能要求就是高强度、好的耐疲劳性和高的韧性。这些试验的结果都很成功。有 3 个 BHS-1 钢代替调质钢的例子，可详细说明使用 BHS-1 钢可省去球化退火工艺和硬化调质热处理工艺。第一个例子是用控轧态 BHS-1 钢和用于制作 5 级螺栓的 10B21 钢进行比较，结果见表 4。表 4 列出了两种钢制作的螺栓杆部性能的比较。从表 4 可以看出 2 个有趣的结果。首先，BHS-1 可以很容易地达到 5 级螺栓强度性能要求；其次，10B21 钢在制作螺栓和热处理的工艺过程中，其强度变化很大，不能让人接受。钢材产品小的性能波动一直期望和努力方向，调质钢的性能波动不太令人满意。而 BHS-1 钢的性能波动小。另外，BHS-1 控轧钢在成形过程中头部成形性能好，杆部件不采用球化退火和调质处理就能达到高强度。

第二个例子涉及到 8 级螺栓的制造加工。在这个例子中，传统的钢 1335，变形后要调质处理。表 5 列出了这两种钢制造的螺栓杆部性能对比。很显然，这两种钢制造的螺栓性能非常相近。但是，必须记住，用控轧态 BHS-1 制造螺栓时未进行热处理。而且，用 BHS-1

钢制造的螺栓均通过了 10 级楔形试验。另外，随后的试验还表明，用 BHS-1 钢制造的螺栓在静载荷下，没有出现由于在最后电镀工艺中吸氢而引起的延迟断裂现象，用 1335 钢制造的螺栓就不可避免地存在这一问题。

第三个例子涉及到转向臂的制造加工。通常，这些转向臂一般采用 1038 调质钢来制作加工，1038 调质钢在冷锻前必须球化退火，锻造后必须调质处理。从转向臂的杆部取标准截面尺寸的试样对其进行了性能检验。用 1038 调质钢和 BHS-1 控轧态钢制作的转向臂的性能见表 6 和表 7。表 6 比较了它们的强度、塑性和韧性，表 7 比较了它们制造的转向臂的疲劳寿命。从表 6 可见，用 BHS-1 钢制造的转向臂的强度比 1038 调质钢的高 40%，韧性也略好于后者。疲劳寿命的差别与强度差别水平类似（见表 7）。疲劳寿命用给定批次的转向臂失效时的平均循环次数来表示，或用期望失效循环次数（给定了失效的概率及置信区间）来表示（9）。BHS-1 钢制造的转向臂的平均寿命是 1038 调质钢的 2 倍，期望寿命是 1038 调质钢的 3 倍。

表 7 也列出了转向臂不产生表面裂纹的塑性弯曲性能，包括其平均寿命和期望寿命。从中可见，BHS-1 钢平均永久弯曲次数比 1038 调质钢高 262，期望值比 1038 调质钢高 33%。很显然，从表 6 和表 7 的数据可见，用 BHS-1 钢制造的转向臂在各个方面都要优于用 1038 调质钢制造的。并且，由于省去了几道传统加工工序，用 BHS-1 钢制造转向臂的加工成本也有了较大的降低。

表 4 5 级安全螺栓性能

STEEL	YS(MPa)	UTS(MPa)	RA(%)
GRADE 5	634	827	35
10B21 QT	661	1130	61
BHS-1	785	1089	59

表5 8级螺栓性能

STEEL	YS(MPa)	UTS(MPa)	RA(%)	CVN@RT(Joules)
Grade 8	8%	1033	35	---
1335 QT	999	1144	64	47
BHS-1	965	1157	67	58

注：（1）所有的BHS-1钢螺栓都通过了10级楔形试验；

（2）BHS-1钢螺栓具有高的抗氢致裂纹性能。

表6 转向臂机械性能

SAMPLE	YS(MPa)	UTS(MPa)	RA(%)	CVN@RT(Joules)
1038 QT	88	102	59	65
BHS-1	120	150	43	71

表7 疲劳寿命比较

Fatigue Cycle-to-Failure DATA (疲劳失效数据)			
Steel	Average Kilocycles-to Failure (平均失效循环次数)	Standard Deviation (标准偏差)	Expected Life Kilocycles (期望失效循环次数)
BHS	261.85	46.94	169.57
BC1038	134.79	36.54	62.96

Permanent Flex DATA (永久弯曲数据)			
Steel	Average Permanent Flex (平均永久弯曲寿命)	Standard Deviation (标准偏差)	Expected Life Permanent Flex (期望永久弯曲寿命)
BHS	0.309	0.0149	0.280
BC1038	0.245	0.0174	0.211

结论

通过采用控轧空冷态的新型微合金化多相钢 BHS-1 制作高强度冷锻产品的应用试验实践，得出如下结论：

(1) 采用控轧工艺生产的 BHS-1 钢的冷成形性能至少和经过球化退火的传统钢相当。这就意味着完全可用 BHS-1 钢来生产紧固件等冷成形产品。采用 BHS-1 钢可省去成形前的球化退火工艺。

(2) 多相钢的高的加工硬化速率使其可以通过自身的成形工艺（拉拔、镦粗、镦头、挤压、压印）来强化 BHS-1 钢，使其达到所需的强度级别。所以，使用 BHS-1 钢可省去变形加工后的硬化调质热处理工艺。

(3) 用控轧态 BHS-1 钢已成功制作出了 SAE 5 级和 8 级强度级别的螺栓。这些螺栓的韧性远远好于采用传统调质钢制作的螺栓的韧性。

(4) BHS-1 钢高的冷变形性能使其在制作高强度紧固件的过程中，可以减少冷加工步骤。

(5) BHS-1 钢在冷变形状态下具有的多相微观组织，使其对在用调质钢制作的电镀产品中经常出现的氢脆（在用调质钢制作的电镀产品中经常出现）具有一定的抵抗能力。

(6) 用 BHS-1 钢制作的转向臂在强度、韧性和耐疲劳性等方面均优于用 1038 调质钢生产的。

(7) BHS-1 所具有的高强度、高的冷变形能力、高韧性可使工程师精简部件尺寸，获得优异的效益。

致谢

作者和匹兹堡大学材料科学和工程系基础金属工艺研究所感谢为本研究提供资金支持

的单位和部门：Bethlehem Steel 线棒部、NPC 公司、Ben Franklin Partnership 的 Western Pennsylvania Advanced Technology Center。作者感谢 Bethlehem Steel 钢厂提供的技术帮助。

参考文献

1. C. I. Garcia, E. J. Palmiere and A.J. DeArdo, "An Alternative Approach to the Alloy Design and Thermomechanical Processing of Low-Carbon Microalloyed Bar Products", 29th Mechanical Working and Steel Processing Proceedings, Iron and Steel Society of AIME, Warrendale, PA, 1987, p. 79.
2. C. I. Garcia, E. J. Palmiere and A.J. DeArdo, "Optimizing Strength and Toughness in Low-Carbon Microalloyed Bar Steels", 8th Process Technology Conference Proceedings, Vol. 8, Iron and Steel Society of AIME, Warrendale, PA, 1988, p. 59.
3. G. R. Speich, L. J. Cuddy, C. R. Gordon and A. J. DeArdo, "Formation of Ferrite from Controlled-Rolled Austenite", Proceedings of Phase Transformations in Ferrous Alloys, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, 1984, p. 341.
4. A. J. DeArdo, "Accelerated Cooling: A Physical Metallurgy Perspective", Can. Met. Q., 1988, Vol. 27, p. 141.
5. T. Matsuoka and K. Yamamori, Metall. Trans., 1975, Vol. 6A, p. 1613.
6. M. S. Rashid, "GM 980X-A Unique High Strength Sheet Steel with Superior Formability", SAE Paper No. 760206, Feb. 1976.
7. R. G. Davies, Metall. Trans., 1978, Vol. 9A, p. 41.
8. P. W. Lee and H. A. Kuhn, "Cold Upset Testing", Workability Testing Techniques, ASM, Metals Park, Ohio, 1984, p. 37.
9. ASTM-STP 91, 1963, p. 67.

(马钢技术中心 汪开忠 译 蒲玉梅 校)